

COLEGIO DE POSTGRADUADOS



INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

MORFOLOGÍA Y CRECIMIENTO DE *Pinus patula*
SCHIEDE EX SCHLTDL. *et* CHAM. PRODUCIDO
EN ENVASES QUE PROPICIAN LA PODA
RADICAL

MANUEL AGUILERA RODRÍGUEZ

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

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019



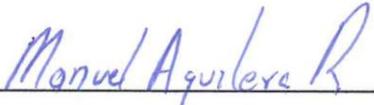
COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe, “**MANUEL AGUILERA RODRÍGUEZ**”, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor “**Dr. ARNULFO ALDRETE**”, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis “**MORFOLOGÍA Y CRECIMIENTO DE Pinus patula SCHIEDE EX SCHLTDL. et CHAM. PRODUCIDO EN ENVASES QUE PROPICIAN LA PODA RADICAL**”, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Texcoco, Estado de México a 15 de octubre de 2019



Manuel Aguilera Rodríguez



Vo. Bo. del Dr. Arnulfo Aldrete

La presente tesis titulada: “**Morfología y crecimiento de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. producido en envases que propician la poda radical**”, realizada por **Manuel Aguilera Rodríguez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



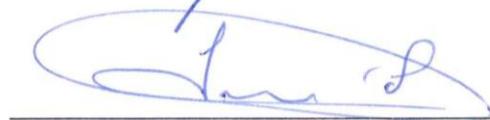
Dr. Arnulfo Aldrete

ASESOR



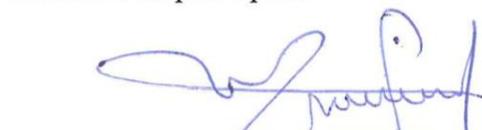
Dr. J. Jesús Vargas Hernández

ASESOR



Dr. Javier López Upton

ASESOR



Dr. Miguel Ángel López López

ASESOR



Dr. Víctor Manuel Ordaz Chaparro

Montecillo, Texcoco, Estado de México, octubre de 2019

MORFOLOGÍA Y CRECIMIENTO DE *Pinus patula* SCHIEDE EX SCHLTDL. *et*
CHAM. PRODUCIDO EN ENVASES QUE PROPICIAN LA PODA RADICAL

Manuel Aguilera Rodríguez, D.C.
Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

La impregnación de las cavidades con sales de cobre y el uso de cavidades con aberturas en sus paredes, propician la poda química o aérea de las raíces laterales de las plantas y reducen su crecimiento envolvente. El objetivo del presente estudio fue evaluar el crecimiento de *Pinus patula* en vivero y en campo, después de ser producido en dos tipos de charolas de plástico y una de poliestireno con cavidades de 170 cc impregnadas con hidróxido de cobre; de manera complementaria se incluyó una charola de plástico con diseño para poda radical aérea. Durante 2016 y 2018 se establecieron dos experimentos de producción de planta, uno de crecimiento potencial de raíz y uno de plantación. En los dos ensayos de producción, la planta sin poda desarrolló tallas y pesos secos superiores que los de la planta con poda, al igual que la planta producida en charolas de poliestireno con respecto a la planta producida en charolas de plástico. En el primero y segundo ensayo la planta con poda radical química desarrolló en promedio menos raíces laterales envolventes que la planta sin poda (0.06 vs. 3.29 y 0.30 vs. 3.53) y en la prueba de crecimiento potencial de raíz desarrolló mayores tasas relativas de crecimiento en biomasa radical con crecimientos totales 0.37 vs. 0.29 g g⁻¹ mes⁻¹ y con crecimientos horizontales 0.28 vs. 0.15 g g⁻¹ mes⁻¹. Después de 16 meses en campo, la planta con poda química fue superior a la planta sin poda en altura (98.5 vs. 91.0 cm), diámetro del tallo (16.4 vs. 15.6 mm), supervivencia (91.0 vs. 80.1 %) y tasa relativa de crecimiento en diámetro (1.05 vs. 0.99 mm mm⁻¹ año⁻¹) y altura (1.12 vs. 1.01 cm cm⁻¹ año⁻¹). En el segundo experimento de producción, la planta con poda química acumuló N, P, K y Cu en el follaje dentro de los valores recomendados para la especie, pero en la raíz acumuló diez veces más Cu que la planta sin poda (190.2 vs. 19.8 mg kg⁻¹), sin signos de toxicidad. La planta con poda radical aérea desarrolló en campo tallas y tasas de crecimiento relativo similares a la planta producida en las mismas charolas con y sin poda química, a pesar de que al inicio de la plantación presentaba tallas inferiores.

Palabras clave: Deformación radical en vivero; planta objetivo; poda de raíces laterales.

MORPHOLOGY AND GROWTH OF *Pinus patula* SCHIEDE EX SCHLTDL. *et*
CHAM. PRODUCED IN CONTAINERS THAT PROMOTE ROOT PRUNING

Manuel Aguilera Rodríguez, D.C.
Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

Impregnation of cavities with copper (Cu) salts and use of cavities with wall openings promote chemical or aerial pruning of lateral roots in seedlings and prevent their enveloping growth.. The objective of this study was to evaluate the growth of *Pinus patula* seedlings in nursery and field, after being produced in two types of plastic trays and one of polystyrene with 170 cc cavities, impregnated with Cu hydroxide; a plastic tray designed for radical aerial pruning was also included in the trial. During 2016 and 2018 two seedling production trials were established, one for evaluating root growth potential and one for seedling performance after field planting. In the two seedling production trials, the seedlings without root-pruning developed sizes and dry weights higher than those of root-pruned, similarly to the polystyrene-tray seedlings when compared with the plastic-tray seedlings. In the first and second trials the seedlings with root chemical pruning developed fewer enveloping lateral roots than the seedlings without pruning (0.06 vs. 3.29 y 0.30 vs. 3.53), and in the test of root growth potential they developed higher relative growth rate in total (0.37 vs. 0.29 g g⁻¹ month⁻¹) and horizontal-growth root biomass (0.28 vs. 0.15 g g⁻¹ month⁻¹). After 16 months in the field, chemically pruned seedlings were superior than not pruned seedlings in: height (98.5 vs. 91.0 cm), stem diameter (16.4 vs. 15.6 mm), survival (91.0 vs. 80.1 %), and in annual relative growth rate in diameter (1.05 vs. 0.99 mm mm⁻¹ year⁻¹) and height (1.12 vs. 1.01 cm cm⁻¹ year⁻¹). In the second production trial, seedlings produced with chemical pruning accumulated N, P, K and Cu in the foliage within the recommended values for the species, but in the root, they accumulated ten times more Cu than seedlings without chemical pruning (190.2 vs. 19.8 mg kg⁻¹), with no signs of toxicity. Seedlings with aerial root pruning developed in the field, sizes and relative growth rates similar to those of seedlings produced in the same trays with or without chemical pruning, even though at the time of field planting they exhibited lower sizes.

Keywords: Pruning of lateral roots; root deformation in nursery; target seedling.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento durante mi programa de estudios doctorales.

Al Colegio de Postgraduados (CP) por mi formación doctoral.

A los doctores Arnulfo Aldrete, Miguel Ángel López López, Javier López Upton, Víctor Manuel Ordaz Chaparro y J. Jesús Vargas Hernández, por haber fungido como miembros de mi Consejo Particular y principalmente por brindarme su amistad.

A mi esposa querida y a mis hijos por su apoyo para concluir esta etapa académica tan trascendente.

A las autoridades y ejidatarios de los Ejidos Pueblo Nuevo y Llano Grande, del municipio de Chignahuapan, Puebla, por las facilidades brindadas para la realización de los experimentos de producción de planta y plantación.

A todos los integrantes de la Familia Vargas Hernández, titulares del vivero forestal GUMAIR, en Acaxochitlán, Hidalgo, por el apoyo y facilidades brindadas para realizar ensayos de producción de planta que sirvieron de base para estructurar y ejecutar el presente proyecto de investigación.

A los doctores David Cibrián Tovar y Silvia Edith García Díaz, por su apoyo en la solución de problemas sanitarios que se presentaron durante la ejecución de los trabajos de producción de planta y plantación; de igual manera, por su amistad.

A los trabajadores del vivero del Postgrado en Ciencias Forestales, por su apoyo brindado para producir y evaluar la planta utilizada en el presente estudio.

A las trabajadoras administrativas del Postgrado en Ciencias Forestales, por su ayuda otorgado en los trámites administrativos durante mi estancia en la institución.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
AGRADECIMIENTOS	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE CUADROS	xi
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
LITERATURA CITADA	4
CAPÍTULO I. MORFOLOGÍA Y CRECIMIENTO POTENCIAL DE RAÍZ DE <i>Pinus patula</i> SCHIEDE EX SCHLTDL. <i>et</i> CHAM. PRODUCIDO EN CHAROLAS CON PODA DE RAÍCES LATERALES	7
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
MATERIALES Y MÉTODOS	10
Localización del estudio	10
Establecimiento del ensayo	11
Diseño experimental	13
Variables evaluadas	14
Características morfológicas de las plantas	14
Crecimiento potencial de raíz (CPR)	14
Análisis estadístico	16
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
Crecimiento de las plantas	16
Crecimiento de raíces en las prueba de CPR	20
CONCLUSIONES	24
LITERATURA CITADA	25
CAPÍTULO II. LA PODA RADICAL DE <i>Pinus patula</i> SCHIEDE EX SCHLTDL. <i>et</i> CHAM. EN VIVERO AFECTA SU CRECIMIENTO EN CAMPO	30

RESUMEN	30
ABSTRACT.....	31
INTRODUCCIÓN	32
MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
Área de estudio.....	33
Insumos utilizados.....	35
Establecimiento del ensayo	36
Mantenimiento del ensayo	37
Variables evaluadas.....	37
Análisis estadístico.....	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
Efecto en el crecimiento de las plantas	39
Efecto del tipo de poda (química vs. aérea)	41
Efecto en la supervivencia de la planta	44
CONCLUSIONES	45
LITERATURA CITADA	46
CAPÍTULO III. CRECIMIENTO, NUTRICIÓN Y ACUMULACION DE COBRE EN	
PLANTAS DE <i>Pinus patula</i> SCHIEDE EX SCHLTDL. <i>et</i> CHAM. CON PODA	
RADICAL QUÍMICA.....	
RESUMEN	50
ABSTRACT.....	51
MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
Localización del estudio.....	54
Establecimiento del ensayo	54
Variables evaluadas.....	56
Crecimiento e índices de calidad	56
Concentración de N, P, K, Cu	56
Lixiviados de Cu.....	57
Diseño experimental y análisis estadístico	57
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
Crecimiento de las plantas	57

Acumulación de N, P y K	61
Acumulación de Cu.....	63
Contenido de Cu en lixiviados	64
CONCLUSIONES	66
LITERATURA CITADA	66
CONCLUSIONES GENERALES	71

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1.1. Planta de *Pinus patula* sin poda radical y con poda radical química y aérea..... 15
- Figura 1.2. Instalación de la prueba de crecimiento potencial de raíz de *Pinus patula* 15
- Figura 1.3. Emisión de raíces laterales a los 45 días de prueba de crecimiento potencial de raíz en plantas de *Pinus patula* producido con y sin poda radical. 22

CAPÍTULO II

- Figura 2.1. Instalación y evaluación del experimento de plantación de *Pinus patula* en el ejido Llano Grande, Chignahuapan, Puebla. 38
- Figura 2.2. Variación bimestral de la supervivencia de *Pinus patula* durante 16 meses en campo. 44

CAPÍTULO III

- Figura 3.1. Planta de *Pinus patula* de siete meses de edad, producida con poda (a) y sin poda (b) química de raíz..... 59
- Figura 3.2. Efecto del tipo de envase (a) y de la poda química (b) en la acumulación de Cu en los componentes estructurales de la planta..... 64

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO I

Cuadro 1.1. Temperatura media mensual (°C) registrada en diferentes puntos durante el período de producción de planta.	13
Cuadro 1.2. Comparación de medias y niveles de significancia para las variables morfológicas de planta de <i>Pinus patula</i> producida en tres charolas con poda radical química.	17
Cuadro 1.3. Comparación de medias para los factores y variables morfológicas de la planta de <i>Pinus patula</i> producida en charolas de tubetes, con poda radical química y aérea.	18
Cuadro 1.4. Valores promedio al inicio y final de la prueba de crecimiento potencial de raíz (CPR) de plantas de <i>Pinus patula</i> producidas en tres tipos de charola, con poda radical química.	21
Cuadro 1.5. Valores promedio al final de la prueba de crecimiento potencial de raíz (CPR) de <i>Pinus patula</i> producido en tubetes con poda radical química y aérea.	22

CAPÍTULO II

Cuadro 2.1. Características físicas y de fertilidad del suelo del área forestal donde se ubican los bloques de plantación de <i>Pinus patula</i>	34
Cuadro 2.2. Arreglo de la plantación de <i>Pinus patula</i> por tratamiento y bloque.	37
Cuadro 2.3. Valores de significancia (P) para el crecimiento en altura y diámetro y la supervivencia de plantas de <i>Pinus patula</i> producido en tres tipos de contenedor con poda radical química 16 meses después de la plantación.	39
Cuadro 2.4. Valores promedio por tipo de contenedor y poda radical para el crecimiento en altura, diámetro y supervivencia de plantas de <i>Pinus patula</i> producido en tres tipos de contenedor con poda radical química después de 16 meses de plantación.	40
Cuadro 2.5. Valores promedio por tipo de poda radical para el crecimiento en altura, diámetro y supervivencia de plantas de <i>Pinus patula</i> producida en tubetes sin poda, con poda radical química y poda radical aérea, después de 16 meses de plantación.	42

CAPÍTULO III

Cuadro 3.1. Características de tres charolas utilizados para producir planta de <i>Pinus patula</i>	54
Cuadro 3.2. Valores medios y de significancia de las variables evaluadas en <i>Pinus patula</i> a los siete meses de edad, en respuesta al tipo de contenedor y poda radical.....	58
Cuadro 3.3. Valores medios y significancia de la concentración de nutrientes en plantas de <i>Pinus patula</i> de siete meses de edad en respuesta al tipo de contenedor y poda radical.	62
Cuadro 3.4. Contenido de Cu (mg L^{-1}) en lixiviados recolectados mensualmente durante el ciclo de producción de <i>Pinus patula</i> en tres tipos de charola con y sin recubrimiento de Cu.	65

INTRODUCCIÓN GENERAL

La planta producida en los sistemas “tradicional” de bolsas de polietileno y de “contenedores” o charolas plásticas puede desarrollar sistemas radicales deformes, debido a que sus raíces laterales crecen hacia abajo o en forma envolvente en la periferia del cepellón, cuando éstas chocan con las paredes de las cavidades. Este crecimiento es contrario al crecimiento natural de las raíces laterales en sentido horizontal (South *et al.*, 2001; Aldrete *et al.*, 2005; Sung y Dumroese, 2013; Landis *et al.*, 2014). Este fenómeno se agudiza en la medida en que se reduce la capacidad volumétrica de las cavidades o se incrementa el tiempo de permanencia de la planta en el vivero (Chapman y Colombo, 2006; Mathers *et al.*, 2007; Sung *et al.*, 2009). Autores de varios países, donde se utilizan estos sistemas de producción, coinciden en señalar que las plantas con raíces deformes presentan dificultad para arraigarse en el sitio de plantación, mayor crecimiento radical vertical que horizontal, baja resistencia a los vientos, estrangulamiento del cuello del tallo, y mayor susceptibilidad a patógenos y fenómenos naturales extremos (South *et al.*, 2001; Mattsson, 2005; Cortina *et al.*, 2006; Nilsson *et al.*, 2010; Landis *et al.*, 2014).

Para prevenir esta deformación radical, a nivel internacional se utilizan dos técnicas de poda de las raíces laterales (RL): a) poda radical química (PRQ), utilizada a partir de la década de 1960 (Dickson *et al.*, 1960), la cual consiste en impregnar con sales de Cu las paredes interiores de las cavidades (Landis *et al.*, 1990, Landis *et al.*, 2014); y b) poda radical aérea (PRA), innovada durante la década de 1990, mediante el uso de charolas de plástico y tubetes con aberturas en las paredes de sus cavidades, o cavidades de pared permeable y biodegradable (Landis, 2005; Mattsson, 2005; Nilsson *et al.*, 2010; Zhigunov *et al.*, 2011, Landis *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2016).

En nuestro país la producción masiva de planta en charolas inició en 1993, con la introducción del sistema de producción de planta en “contenedores”. En ese año se utilizaron charolas Copperblock[®], importadas de Canadá (Burney *et al.*, 2015). En la misma década, varias empresas nacionales iniciaron la producción de charolas de poliestireno y de plástico, lo cual contribuyó al cambio de sistema de producción “tradicional” al sistema de producción en “contenedores”. En 2016, del total de planta producida para restauración de áreas

forestales perturbadas, a cargo de la Comisión Nacional Forestal, 93 % se produjo en contenedores (CONAFOR, 2017).

Para mejorar la calidad de la planta e incrementar su supervivencia en campo, la CONAFOR elaboró una norma mexicana para la certificación de los viveros forestales (SE, 2016). En este ordenamiento de carácter voluntario se incluyen las características de diseño para cuatro tipos de contenedores: charola de plástico, charola de poliestireno, rejillas con tubetes de plástico y rejillas de plástico con cavidades de material biodegradable; en todos los casos, las cavidades de producción deben tener una altura mínima de 10 cm y capacidad volumétrica mínima de 160 cc. Para propiciar la poda radical de la planta se exige impregnar con sales de cobre las cavidades de las charolas de poliestireno y que las de material biodegradable sean de malla permeable; para las charolas de plástico se señala que sus cavidades pueden o no contener canales de aireación en sus paredes. No se exige impregnar con sales de cobre las cavidades en las charolas de plástico.

A la fecha, en varios viveros se utiliza con buenos resultados una solución propuesta por Aldana y Aguilera (2003), elaborada con 10 L de agua, 4 L de sellador acrílico y 1 kg de hidróxido de cobre comercial en polvo con una concentración 77 % de hidróxido. Las charolas de plástico no se impregnan en ningún vivero debido a que aún no existe interés en las instancias gubernamentales que contratan la producción de planta, o de los dueños de los predios para utilizar planta con poda de raíces laterales. Contrario a lo que sucede en nuestros viveros, en otros países las charolas de plástico se impregnan con soluciones de cobre de manera normal (Escobar, 2012); estas soluciones se caracterizan por contener más de 75 % de sellador acrílico, para mantener el recubrimiento debidamente adherido al plástico durante uno o más ciclos de producción (Pardos *et al.*, 2001; Tsakalimi y Ganatsas, 2006).

En México, los trabajos de investigación encaminados a mostrar las bondades de la poda de raíces laterales en especies forestales nativas son incipientes; hay escasos estudios con poda química (Barajas *et al.*, 2004; Aldrete *et al.*, 2005) y con poda aérea de estas raíces (Sánchez *et al.*, 2016; Sánchez *et al.*, 2017; Castro *et al.*, 2018). Además, no se han realizado estudios de campo para evaluar las bondades de la planta producida con poda de raíces laterales en vivero.

En este contexto se planteó la necesidad de evaluar el comportamiento de *Pinus patula* en vivero y en campo, al ser producido en tres tipos de contenedor con cavidades de 170 cc (charola de plástico de 54 cavidades P-54, charola de poliestireno de 77 cavidades PS-77 y charola de rejilla con 42 tubetes de plástico intercambiables T-42), con tratamiento para propiciar la poda química de raíces laterales. Adicionalmente se incluyó un cuarto tipo de charola con aberturas en las paredes de las cavidades (Ta-42), para propiciar la poda aérea y compararla con la poda química. Se eligió esta especie de pino por ser de rápido crecimiento y porque existen predios forestales con manejo silvícola donde predomina esta especie y donde se aplican métodos silvícolas de “árboles padre” y “corta total” con plantación, con condiciones propicias para probar la eficiencia de la planta en campo. Adicionalmente, esta especie es de las especies del género *Pinus* más utilizadas en plantaciones comerciales maderables en nuestro país y en otros países de Sudamérica y de África.

El presente proyecto de investigación incluyó tres ensayos o experimentos:

1. Crecimiento potencial de raíz. En este ensayo el objetivo fue comprobar que la planta producida con poda de raíz, en forma química o aérea, tiene la misma capacidad de desarrollar libremente sus raíces laterales que la planta sin poda, al establecerse en recipientes de mayor capacidad que los utilizados para su producción.
2. Crecimiento en campo. Parte de la planta producida se estableció en campo y se evaluó durante 16 meses, con el propósito de comprobar si la planta con poda de raíz presentaba mayores crecimientos e índices de supervivencia que la planta producida sin poda.
3. Acumulación de N, P, K y Cu por efecto de la poda radical química. Este ensayo se estableció con el propósito de evaluar el efecto del Cu en la nutrición de las plantas, así como la pérdida de este elemento en lixiviados durante el periodo de producción, por tipo de charola.

La hipótesis planteada fue que la planta producida con poda radical química desarrolla un mínimo de raíces laterales envolventes, de tal manera que al trasplantarse en envases de mayor capacidad, o al establecerse en campo presenta mayor crecimiento radical, mayor incremento en diámetro y altura que la planta sin poda, y sin problemas de toxicidad por el uso del cobre. Adicionalmente, que la planta producida con poda radical aérea presenta un comportamiento similar a la planta producida con poda radical química.

LITERATURA CITADA

- Aldana B., R. y M. Aguilera R. 2003. Procedimientos y Cálculos Básicos Útiles en la Operación de Viveros que Producen en Contenedor. Documento Técnico. Programa Nacional de Reforestación. CONAFOR. Guadalajara, Jalisco, México. 41 p.
- Aldrete A., J. Mexal G. y J. López U. 2005. Variación entre procedencias y respuesta a la poda química en plántulas de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 39: 563-574.
- Barajas R., J. E., A. Aldrete, J. J. Vargas H. y J. López U. 2004. La poda química en vivero incrementa la densidad de raíces en árboles jóvenes de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 38: 545-553.
- Burney, O., A. Aldrete, R. Alvarez R., J. A. Prieto R., J. R. Sánchez V. and J. G. Mexal. 2015. México- addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry* 113: 1-10.
- Castro G., S. L., A. Aldrete, J. López U. y V. M. Ordaz C. 2018. Efecto del envase, sustrato y fertilización en el crecimiento de *Pinus greggii* var. *australis* en vivero. *Agrociencia* 52: 115-127.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2017. Objetivo Específico 1 del Monitoreo y Evaluación Complementaria de los Apoyos de Reforestación y Suelos 2016. Documento Técnico. Guadalajara, Jalisco, México. pp: 178-187.
- Cortina, J., R. M. Navarro y A. del Campo. 2006. Evaluación del éxito de la reintroducción de especies leñosas en ambientes mediterráneos. *In*: J. Cortina J., J. L. Peñuelas, J. Puértolas; R. Savé y A. Vilagrosa. *Calidad de Planta Forestal para la Restauración en Ambientes Mediterráneos*. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España. pp: 11-29.
- Dickson, A., A. L. Leaf and J. F. Hosner. 1960. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *Forestry Chronicle* 36(1): 10-13.
- Dumroese, R. K. and T. D. Landis. 2015. Growing container seedlings: three considerations. *Tree Planters' Notes*. USDA, Forest Service. Washington, DC. pp: 58-62.

- Landis, T. D., R. W. Tinus, S. E. Mc Donald and J. P. Barnett. 1990. Containers and growing media. The Container Tree Nursery Manual. Vol. 2. Agricultural Handbook 674. USDA, Forest Service. Washington, DC. 88 p.
- Landis, T. D. 2005. Sidelist or airlist containers. Summer Forest Nursery Notes. USDA, Forest Service. Washington, DC. pp: 17-19.
- Landis, T. D., T. Luna and R. K. Dumroese. 2014. Containers. *In*: K. M. Wilkinson, T. D. Landis, D. L. Haase, B. F. Daley and R. K. Dumroese. Tropical Nursery Manual. Agriculture Handbook 732. USDA, Forest Service. Washington, DC. pp: 123-139.
- Mathers, H. M., S. B. Low, C. Scagel, D. K. Struve and L. T. Case. 2007. Abiotic factors influencing root growth of woody nursery plants in containers. *HortTechnology* 17(2): 151-162.
- Mattsson, A. 2005. Regeneration practices in Scandinavia: State-of-the-art and new trend. *In*: The Thin Green Line: A Symposium on the State-of-the-Art in Reforestation. Ontario Forest Research Institute, Ontario Ministry of Natural Resources. ON, Canada. pp: 25-30.
- Nilsson, U., J. Luoranen, T. Kolström, G. Örlander and P. Puttonen. 2010. Reforestation with planting in northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25(4): 283-294.
- Pardos, M., J. A. Pardos y G. Montero. 2001. Growth responses of chemically root-pruned cork oak seedlings in the nursery. *Journal of Environmental Horticulture* 19(2): 69–72.
- Sánchez A., H., A. Aldrete, J. J. Vargas H. y V. M. Ordaz C. 2016. Influencia del tipo y color de charola en el desarrollo de plantas de pino en vivero. *Agrociencia* 50: 481-492.
- Sánchez V., O., V. M. Cetina A., M. A. López L. y L. I. Trejo T. 2017. Efecto del sistema de producción de *Pinus greggii* Engelm. var. *australis* en vivero sobre su desarrollo morfofisiológico en campo. *Agroproductividad* 10(8): 59–64.

- SE (Secretaría de Economía). 2016. Norma Mexicana NMX-AA-170-SCFI-2016. Certificación de la operación de viveros forestales. Diario Oficial de la Federación. 17 de febrero de 2016. México, D.F. pp: 17-28.
- South, D. B., J. Shelton and S. A. Enebak. 2001. Geotropic lateral roots of container-grown longleaf pine seedlings. *Native Plants Journal* 2(2): 126-130.
- Sung, S., S., J. D. Hayhood, S. J. Zaronch and M. S. S. Sword. 2009. Long-term container effects on root system architecture of longleaf pine. *In: Proc. of the 2009 Society of American Foresters Convention*. Society of American Foresters, Bethesda, MD. 9 p.
- Sung, S. S. and K. R. Dumroese. 2013. Root system architecture: the invisible trait in: container longleaf pine seedlings. *USDA Forest Service Proceedings*. RMRS-P-69. pp: 26-31.
- Tsakalidimi, N. M. and P. P. Ganatsas. 2006. Effect of chemical root pruning on stem growth, root morphology and field performance of the mediterranean pine *Pinus halepensis* Mill. *Scientia Horticulturae* 109: 183–189.
- Zhigunov, A., B. Mochalov, A. Sokolov, T. Saksa, J. Sved, J. Nerg and R. Rikala. 2011. *Fundamentals of container tree seedling production*. St. Petersburg Forestry Research Institute, St. Petersburg. 28 p.

**CAPÍTULO I. MORFOLOGÍA Y CRECIMIENTO POTENCIAL DE RAÍZ DE
Pinus patula SCHIEDE EX SCHLTDL. et CHAM. PRODUCIDO EN CHAROLAS
CON PODA DE RAÍCES LATERALES**

Manuel Aguilera Rodríguez, MC.

Colegio de Postgraduados, 2019.

RESUMEN

La planta producida en charolas con poda de raíces laterales desarrolla una arquitectura radical con pocas deformaciones. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la morfología y el crecimiento potencial de raíz de *Pinus patula* producido en dos tipos de charolas de plástico y una de poliestireno con cavidades de 170 cc, ambas con tratamiento para propiciar la poda química de los ápices de las raíces laterales. Se impregnó la mitad de las charolas con una solución con 7 % de hidróxido de cobre. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial 3×2 (tres tipos de charola y dos condiciones de poda), con cuatro repeticiones por tratamiento. Se incluyó un tratamiento adicional de charola con diseño para propiciar la poda aérea de raíces laterales, para comparar ambos tipos de poda radical. A los nueve meses, la planta sin poda desarrolló mayor talla y peso seco ($p \leq 0.05$) que la planta con poda; en cambio, las plantas con poda radical química y aérea desarrollaron menos raíces laterales envolventes ($p \leq 0.05$) que las plantas sin poda (0.06 vs. 3.29; 0.40 vs. 3.5). La prueba de crecimiento potencial de raíz se realizó en macetas de 10 L durante seis semanas; las plantas con poda radical química y aérea presentaron una tasa relativa de crecimiento de raíces horizontales de 0.29 y 0.20 $\text{g g}^{-1} \text{mes}^{-1}$ y totales de 0.37 y 0.30 $\text{g g}^{-1} \text{mes}^{-1}$ superiores ($p \leq 0.05$) a las plantas sin poda (0.12 y 0.25 $\text{g g}^{-1} \text{mes}^{-1}$). La planta producida en charolas de poliestireno desarrolló mayor talla, con tasa relativa de crecimiento más alta, que la planta producida en las dos charolas de plástico.

Palabras clave: Arquitectura radical, calidad de planta, prevención de malformación radical.

**MORPHOLOGY AND ROOT GROWTH POTENTIAL OF *Pinus patula* SCHIEDE
EX SCHLTDL. et CHAM. PRODUCED IN CONTAINERS WITH LATERAL
ROOT PRUNING**

Manuel Aguilera Rodríguez, MC.

Colegio de Postgraduados, 2019.

ABSTRACT

Seedlings produced in trays with lateral root pruning develop a root architecture with few deformations. The objective of this work was to evaluate the morphology and root growth potential of *Pinus patula* seedlings produced in two plastic trays and one polystyrene tray with cavities 170 cc in volume, both treated to promote the chemical pruning of lateral roots. Half of the trays were impregnated with a 7 % Cu-hydroxide solution. A complete randomized experimental design was used with a 3 × 2 factorial arrangement (three types of trays and two root pruning conditions), with four replications per treatment. An additional tray designed to promote air root pruning was included in the trial, to compare both types of root pruning. After nine months, non-pruned seedlings were greater in size and dry weight ($p \leq 0.05$) than the root-pruned seedlings; in contrast, root-pruned seedlings (either chemical or air pruned) developed fewer enveloping lateral roots ($p \leq 0.05$) than non-pruned seedlings (0.06 vs. 3.29; 0.40 vs. 3.5). The root growth potential test was performed in 10 L pots for six weeks; chemical and air root-pruned seedlings had a higher ($p \leq 0.05$) relative growth rate for both horizontal- (0.29 and 0.20 g g⁻¹ month⁻¹) and total-roots (0.37 and 0.30 g g⁻¹ month⁻¹) than non-pruned seedlings (0.12 and 0.25 g g⁻¹ month⁻¹). Seedlings produced in polystyrene trays developed larger size, with higher relative growth rate, than seedlings produced in the two plastic trays.

Keywords: Plant quality, prevention of radical malformation, radical architecture.

INTRODUCCIÓN

De manera natural, las especies forestales desarrollan una raíz principal (RP) con geotropismo positivo, a partir de ésta se desarrollan múltiples raíces laterales de primer orden (RL₁) en todas sus caras, de las que a su vez se desarrollan otras raíces laterales de menor orden (RL₂, RL₃, etc.), todas con crecimiento horizontal dentro de los primeros 40 cm del suelo.

Al producir planta en charolas (contenedores) o en bolsas de polietileno, se corre el riesgo de que las RL se deformen y crezcan hacia abajo al hacer contacto con las paredes de las cavidades (South *et al.*, 2001; Aldrete *et al.*, 2005; Sung y Dumroese, 2013; Landis *et al.*, 2014). Cuando se utilizan charolas con cavidades de volumen reducido o si la planta permanece en éstas más tiempo del necesario, algunas RL pueden presentar crecimientos envolventes y ascendentes en la periferia del cepellón (Chapman y Colombo, 2006; Mathers *et al.*, 2007; Sung *et al.*, 2009).

En algunos países donde se ha reforestado con planta producida sin poda radical, se ha observado que la raíz conserva el patrón de crecimiento envolvente y emite pocas raíces laterales en la capa fértil del suelo. Esta deformación radical ocasiona afectaciones a las plantaciones, tales como: baja supervivencia, crecimiento lento, doblamiento de los árboles por fenómenos naturales y mayor susceptibilidad a daños por patógenos, en comparación con la planta de regeneración natural o de la planta producida con poda radical en vivero (South *et al.*, 2001; Mattsson, 2005; Cortina *et al.*, 2006; Nilsson *et al.*, 2010; Landis *et al.*, 2014).

Para prevenir la deformación radical se utilizan dos técnicas de poda los ápices de las RL: a) poda radical química (PRQ), la cual consiste en impregnar con sales de Cu las paredes interiores de las cavidades, y b) poda radical aérea (PRA), mediante el uso de charolas con cavidades de plástico con aberturas en sus paredes o cavidades de pared permeable y biodegradable (Landis, 2005; Mattsson, 2005; Nilsson *et al.*, 2010; Zhigunov *et al.*, 2011).

Aunque existe el consenso de que la planta con poda de RL es más eficiente en campo que la planta sin poda (Landis *et al.*, 2014; Sung y Haywood, 2016), a la fecha sólo la planta que se produce en charolas de poliestireno presenta este tipo de poda (Secretaría de

Economía, 2016). Por otra parte, los estudios de campo con especies nativas en este tema, son incipientes, quizá porque demandan periodos de observación de varios años. Una alternativa de corto plazo para estimar el comportamiento en campo de la raíz de la planta con poda radical, es la prueba de crecimiento potencial de raíz (CPR). Esta prueba consiste en colocar una muestra aleatoria de 25 a 50 plantas por tratamiento, en macetas, melgas o estructuras de crecimiento hidropónico por 3 a 4 semanas, para evaluar la capacidad de emisión de raíces y sus características como longitud, volumen, peso seco, arquitectura, posición y orientación, entre otras (Landis *et al.*, 2010).

El presente estudio se realizó con el propósito de evaluar el efecto de la poda radical en el CPR de *Pinus patula*, por ser a una de las especies forestales más utilizadas en plantaciones de restauración (CONAFOR, 2017). Se eligieron dos tipos de charolas de plástico y una de poliestireno de mayor uso en los viveros forestales, las cuales se impregnaron con una solución de hidróxido de Cu para propiciar la PRQ. Adicionalmente, se incluyó una charola con diseño para propiciar la PRA, con el objeto de comparar ambos tipos poda radical.

La hipótesis fue que la planta producida con poda radical desarrolla un mínimo de raíces laterales envolventes, de tal manera que al trasplantarse en envases de mayor capacidad, emite mayor biomasa radial en sentido horizontal y total que la planta sin poda radical.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

La planta se produjo en el vivero del ejido Pueblo Nuevo, en Chignahuapan, Pue., localizado en las coordenadas 19° 57' 34.59" LN, 98° 06' 23.03 LO, a una altitud de 2,600 m. El clima de la zona es C (w₁) (w), templado subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004), con precipitación y temperatura medias anuales de 750 mm y 12.7 °C, (CONAGUA, 2018). El vivero cuenta con mesas metálicas porta charolas de 70 cm de alto, estructuras metálicas de protección de 3 m de alto, con malla sombra al 50 % de color negro, y sistema de riego fijo por micro aspersión.

Establecimiento del ensayo

Las charolas incluidas contienen cavidades de forma cilíndrica de 170 cc, con las siguientes dimensiones: a) PS-77, charola de poliestireno expandido de $35.0 \times 60.0 \times 15.2$ cm con 77 cavidades y una densidad de 366 cavidades por m^2 ; cada cavidad mide 4.3 y 15.2 cm de diámetro superior y longitud, respectivamente (Aislantes y Empaques, S.A. de C.V, Guadalajara, Jal.); b) P-54, charola de plástico de $30.8 \times 50.0 \times 13.8.2$ cm, con 54 cavidades y una densidad de 348 cavidades por m^2 ; cada cavidad mide 4.8 cm de diámetro superior y 13.8 cm de longitud; c) T-42, rejilla de plástico con cuatro soportes verticales (“patas”) de $37.3 \times 37.5 \times 23.4$ cm, con 42 cavidades de plástico intercambiables (tubetes) y una densidad de 298 cavidades por m^2 ; los tubetes tienen un diámetro superior de 4.8 cm y una longitud de 13.8 cm (Innovaciones Industriales y Forestales, S.A. de C.V. Azcapotzalco, Estado de México). También se incluyeron charolas Ta-42, con diseño y dimensiones iguales al T-42; en estas charolas, cada tubete contiene tres filas de aberturas circundantes de 3 mm de ancho, distribuidas de manera equidistante a lo largo del tubete, para propiciar la poda natural de las RL al hacer contacto con el aire.

En las charolas P-54, PS-77 y T-42 se aplicaron los tratamientos sin y con recubrimiento de Cu, con una solución de 7.0 % de hidróxido de cobre comercial, con el procedimiento siguiente: a) en un recipiente de plástico con 100 mL de agua caliente (80 °C) se disolvieron 90 g de hidróxido de cobre comercial en polvo, con una concentración de 77 % de $Cu(OH)_2$ (Hidromet[®]); b) una vez disuelto el hidróxido, se adicionó 1 L de sellador vinil-acrílico 5 x 1 (Comex[®]) y se homogenizaron los ingredientes; c) ya preparada la solución se impregnaron las cavidades de las charolas con brochas de una pulgada de ancho. Esta concentración de hidróxido de cobre se ha reportado como adecuada para propiciar la PRQ en especies del género *Pinus* producidas en charolas de plástico y de poliestireno (Aldrete *et al.*, 2005; Aguilera *et al.*, 2016b). Los tratamientos 1, 2 y 3 se asignaron a las charolas P-54, PS-77 y T-42 sin recubrimiento de Cu y los tratamientos 4, 5 y 6 a las mismas charolas con recubrimiento. El tratamiento adicional (T₇) correspondió al contenedor Ta-42 con diseño para PRA.

Una vez aplicado el tratamiento de hidróxido de cobre, las charolas se llenaron con el mismo sustrato que se maneja en el vivero, compuesto por aserrín de *Pinus patula* sin

compostar, perlita, vermiculita y turba de musgo (*peat moss*) en proporción 60:20:10:10. Al sustrato se agregaron 8.0 g L⁻¹ de fertilizante de liberación controlada (FLC) Osmocote® Plus, fórmula 15-9-12 + micro elementos, de 8-9 meses de liberación, y 1.0 g L⁻¹ de fertilizante de liberación lenta Micromax® (Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn, 6.00, 3.00, 12.00, 0.10, 1.00, 17.00, 2.50, 0.05, 1.00 %). Estos insumos también se utilizan en otros viveros del centro del país para producir planta de especies forestales en charolas de plástico y poliestireno (Hernández *et al.*, 2014; Aguilera *et al.*, 2016b).

Las características físicas y químicas del sustrato se determinaron en el laboratorio del vivero del ejido Pueblo Nuevo, con los siguientes resultados: porosidad total (80 %), porosidad de aireación (33 %) y porosidad de retención de humedad (45 %); pH 5.1; CE 0.1 dS m⁻¹, los cuales se ubican dentro de los rangos recomendados para producir planta de coníferas en charolas (Prieto *et al.*, 2012).

La siembra se realizó en la primera semana del mes de octubre de 2016. Se utilizó semilla de *Pinus patula* recolectada en el ejido Llano Grande, ubicado en el municipio de Chignahuapan, Pue. Las semillas se remojaron en agua potable durante 24 h con cambio de agua cada 6 h, y posteriormente se desinfectaron con una solución con 10 % de agua oxigenada comercial durante 30 min. Antes de sembrar, las semillas se impregnaron con 1.0 g kg⁻¹ de biofungicida Bactiva^{MR}. En cada cavidad se sembraron dos semillas. Desde la siembra y hasta el mes de mayo de 2017, el área de producción estuvo protegida con malla sombra a 50% de color negro, y a partir de junio a la intemperie.

Durante la etapa de vivero se registró la temperatura del sitio donde se colocaron las charolas y del sustrato en cada tipo de charola. La temperatura del sitio se midió cada hora con un equipo de la marca HOBO® U12-012. La temperatura del sustrato se tomó con termómetro digital de aguja de aluminio de 15 cm de largo de la marca HANA® HI 145, de lunes a viernes y tres veces al día (07:00, 14:00 y 18:00 h), en una cavidad elegida en forma aleatoria de cada tipo de charola utilizada; la medición se realizó. La temperatura media mensual del sitio de producción y del sustrato por tipo de charola se obtuvo con base en el promedio de las temperaturas registradas diariamente (Cuadro 1).

Cuadro 1.1. Temperatura media mensual (°C) registrada en diferentes puntos durante el período de producción de planta.

Mes	Zona geográfica †	Sitio de producción	Temperatura del sustrato			
			P-54	PS-77	T-42	Ta-42
Octubre	12.1	13.2	9.9	11.7	9.7	9.1
Noviembre	11.1	12.0	9.0	11.7	8.4	7.8
Diciembre	10.7	11.9	9.6	11.6	9.4	8.9
Enero	9.9	10.7	9.1	11.3	8.4	7.7
Febrero	10.8	12.3	10.1	12.1	10.1	9.2
Marzo	12.7	13.4	10.9	13.3	11.6	10.8
Abril	14.6	15.3	13.2	15.7	13.6	12.7
Mayo	15.4	16.6	14.7	16.7	14.6	13.4
Junio	15.0	16.1	14.3	15.5	13.9	13.2
Julio	13.7	15.8	13.9	15.5	14.2	13.6
Promedio	12.6	13.73	11.5	13.5	11.4	10.6

† Valores medios de la estación climatológica Chignahuapan 00021140 (CONAGUA, 2018).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de siete tratamientos con ocho repeticiones en un arreglo completamente al azar. La unidad experimental estuvo constituida por una charola de producción de planta. Si se excluye el tratamiento de PRA de los siete tratamientos incluidos en el ensayo, los seis tratamientos restantes se integran en un diseño factorial 3 x 2, en donde el factor 1 es el tipo de charola, con tres niveles (P-54, PS-77 y T-42) y el segundo factor es el nivel de PRQ, con dos niveles (sin poda y con poda). Esto permite analizar por separado el efecto del tipo de charola y de la PRQ, con respecto al efecto de la PRA.

Variables evaluadas

Características morfológicas de las plantas

A los nueve meses de edad se realizó la evaluación de la planta. De cada tratamiento se eligieron en forma aleatoria cuatro charolas (repeticiones) y se extrajeron, en forma sistemática, 15 plantas de la parte central de cada charola, para un total de 60 plantas por tratamiento. Los cepellones de las plantas se lavaron con agua potable para remover el sustrato y dejar libres las raíces. A cada planta se le midió la altura de la parte aérea (A), el diámetro del cuello del tallo (D) y el número de raíces laterales envolventes (RLE) con diámetro ≥ 1 mm y longitud mayor a la longitud del cepellón. Las plantas evaluadas se seccionaron a la altura del cuello del tallo y ambas secciones se colocaron por separado en bolsas de papel y se secaron en horno eléctrico durante 72 h a 70 °C. Después de este periodo se registró el peso seco de la raíz (PSR) y de la parte aérea (PSA) y se calcularon los siguientes índices: relación parte aérea/raíz (PSA/PSR); índice de robustez IR (A/D) e índice de calidad de Dickson ICD = [PST / (IR + PSA/PSR)].

Crecimiento potencial de raíz (CPR)

Esta prueba fisiológica se realizó en un invernadero del vivero del Postgrado en Ciencias Forestales, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, de la cuarta semana de julio a la tercera de septiembre de 2017 durante 45 días. El vivero se ubica a 19° 29' N, 98° 54' O, a una altitud de 2,240 m, con clima de la zona tipo C (Wo) (w) b (1) g', templado subhúmedo con lluvias en verano, precipitación y temperatura media anual de 750 mm y 15.5 °C (García, 2004).

De las cuatro charolas restantes de cada tratamiento se seleccionaron 10 plantas con características homogéneas en diámetro y altura, para un total de 40 plantas por tratamiento. Para el crecimiento de la planta se utilizaron macetas de plástico de 10 L con diámetro inferior, diámetro superior y altura de 20, 30 y 27 cm, respectivamente. Las macetas se llenaron con sustrato y fertilizante similar a los utilizados para producir la planta en vivero. En cada maceta se plantaron cuatro plantas distribuidas en forma equidistante, a las cuales se les midió el diámetro y altura inicial (D₀, A₀). Las macetas se rotularon y se acomodaron en

el piso de la parte central del invernadero en un diseño completamente al azar (Figuras 1 y 2).



Figura 1.1. Planta de *Pinus patula* sin poda radical y con poda radical química y aérea



Figura 1.2. Instalación de la prueba de crecimiento potencial de raíz de *Pinus patula*

Durante el periodo de la prueba se aplicó la misma cantidad de agua a todas las macetas. A los 45 días de la prueba, se extrajo la planta de cada maceta y se lavó su sistema radical procurando que los cepellones no perdieran la forma que presentaban al inicio de la prueba, con el propósito de diferenciar las raíces nuevas emitidas durante la prueba. A cada planta se le midió su diámetro y altura final (D_1 , A_1), y se seccionaron por separado las raíces con crecimiento horizontal (R_h) emitidas a partir de la periferia del cepellón y las raíces con crecimiento vertical (R_v), emitidas a partir de la base del cepellón. Los tallos, cepellones (C_p), las R_h y R_v de cada planta se colocaron por separado en bolsas de papel y se secaron en horno eléctrico a 70 °C, durante 72 h. Al término de este periodo se registró el peso seco de cada componente de las muestras.

Para cada tratamiento se calculó la tasa relativa de crecimiento mensual (TRC_m) en diámetro, altura, y en peso seco de R_h , R_v y raíces totales emitidas (R_t), con la fórmula $TRC_m = [(\ln Y_2 - \ln Y_1) / (T_2 - T_1)]$, donde: Y_1 = valor de la variable al inicio de la prueba Y_2 = Valor de la variable al final de la prueba; T_1 = edad de la planta al inicio de la prueba (9 meses); T_2 = edad de la planta al final de la prueba (10.5 meses). Para las variables R_h , R_v y R_t se consideró como valor inicial el peso seco del cepellón (PSCp) y como valor final el mismo peso (PSCp) más el peso de R_h , R_v y R_t , respectivamente. Esto es, para calcular el logaritmo de las variables R_h , R_v y R_t se consideró que no hubo cambios en PSCp durante el desarrollo de la prueba.

Análisis estadístico

El análisis de varianza se realizó con el software estadístico SAS[®] versión 9.0 (SAS, 2002), con el cual se calcularon los niveles de significancia, los promedios de las variables morfológicas y sus índices relativos, y la tasa de crecimiento relativo de los componentes de la planta al final de la prueba de crecimiento potencial de la raíz. En los casos donde se encontraron efectos significativos de alguno de los factores en estudio, se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$). Para analizar el efecto del tratamiento de PRA en el comportamiento de la planta producida, con respecto a la planta sin y con PRQ, se realizó un análisis de varianza por separado, incluyendo sólo los tratamientos T_3 (Charola T-42 sin poda), T_6 (Charola T-42 con recubrimiento de Cu) y T_7 (Charola Ta-42).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento de las plantas

El tipo de contenedor afectó de manera significativa las variables D, A, PSA, PSR e ICD. La planta producida en charolas de poliestireno desarrolló tallas y pesos secos (aéreo y radical) superiores a las plantas producidas en las charolas de plástico aunque en los índices de calidad (PSA/PSR, IE, ICD, RLE) no hubo diferencias significativas (Cuadro 2). La poda de RL tuvo efecto significativo en todas las variables evaluadas, excepto en el índice de robustez (IR). La planta con poda de RL desarrolló tallas, pesos secos, ICD y RLE con

valores promedio menores a la planta sin poda, con una mayor relación PSA/PSR; como se esperaba, la planta con poda desarrolló un menor número de RLE (Cuadro 2). Respecto a la interacción charola × poda radical, no hubo efecto significativo en ninguna de las variables; es decir que el efecto de la cubierta de Cu tuvo un efecto similar en los tres tipos de charola utilizados.

Cuadro 1.2. Comparación de medias y niveles de significancia para las variables morfológicas de planta de *Pinus patula* producida en tres charolas con poda radical química.

FV [†]	D (mm)	A (cm)	PSA (g)	PSR (g)	PSA / PSR	IE	ICD	RLE
a) <u>Tipo de charola</u>								
P-54	3.82 b [‡]	20.28 b	2.09 b	1.04 b	2.03 a	5.30 a	0.43 b	1.59 a
PS-77	4.24 a	23.58 a	2.49 a	1.17 a	2.17 a	5.59 a	0.47 a	1.64 a
T-42	3.91 b	21.00 b	2.20 b	1.09 ab	2.05 a	5.38 a	0.44 ab	1.79 a
<i>P</i>	<0.003	<0.001	<0.001	<0.008	<0.181	<0.275	<0.012	<0.391
b) <u>Poda radical:</u>								
Sin P	4.08 a	22.48 a	2.35 a	1.24 a	1.90 b	5.52 a	0.48 a	3.29 a
Con P	3.89 b	20.76 b	2.17 b	0.96 b	2.26 a	5.33 a	0.41 b	0.06 b
<i>P</i>	<0.049	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.208	<0.001	<0.001
VR	≥ 4.0	15 - 30			1.5 - 2.5	≥7.5	≥ 4	0.0

[†]FV: factor de variación; D: diámetro del tallo; A: altura de la parte aérea; PSA: peso seco aéreo; PSR: peso seco radical; IE: índice de esbeltez; ICD: índice de calidad de Dickson, RLE: raíces laterales envolventes; P-54: charolas de plástico con 54 cavidades; PS-77: charola de poliestireno con 77 cavidades; T-42: rejilla con 42 tubetes de plástico; Sin P: sin poda; Con P: con poda; VR: valores recomendados (Prieto *et al.*, 2011).

[‡]Letras diferentes en una columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Al comparar la planta del tratamiento adicional, en charolas Ta-42 con diseño para poda radical aérea, con sus dos similares T-42 (sin y con recubrimiento de Cu para poda radical química), se presentaron diferencias significativas en los valores promedio de las variables evaluadas por efecto del tipo de poda radical. La planta sin poda desarrolló variables morfológicas e índices de calidad cualitativamente superiores a las plantas con poda, con

excepción del índice RLE. La planta con PRQ fue superior a la planta con PRA tallas, pesos secos e ICD. El conjunto de plantas con poda radical (química y aérea) desarrollaron un mejor IE y un mínimo de RLE, comparación con las plantas sin poda (Cuadro 3).

Cuadro 1.3. Comparación de medias para los factores y variables morfológicas de la planta de *Pinus patula* producida en charolas de tubetes, con poda radical química y aérea.

FV [†]	D (mm)	A (cm)	PSA (g)	PSR (g)	PSA / PSR	IR	ICD	RLE
SP	3.96 a [‡]	21.7 a	2.30 a	1.23 a	1.88 b	5.49 a	0.48 a	3.50 a
PRQ	3.86 a	20.3 b	2.10 a	0.95 b	2.22 a	5.27 b	0.41 b	0.09 b
PARA	3.68 b	18.8 c	1.77 b	0.83 c	2.15 a	5.11 b	0.36 c	0.40 b
<i>P</i>	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	<0.014	<0.001	<0.001	<0.001
VR	≥ 4.0	15 - 30			1.5 - 2.5	≥7.5	≥ 4	0.0

[†]FV: fuente de variación, D: diámetro del tallo; A: altura de la parte aérea; PSA: peso seco aéreo; PSR: peso seco radical; IR: índice de robustez; ICD: índice de calidad de Dickson, RLE: raíces laterales envolventes; SP: sin poda; PRQ: poda radical química; PRA: poda radical aérea; VR: valores recomendados (Prieto *et al.*, 2011).

[‡]Letras diferentes en una columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

La poda radical química y aérea afectó el crecimiento de la raíz de las plantas y por consecuencia el crecimiento aéreo de las mismas. Al respecto, South *et al.* (2016) señalan que en algunos viveros del sureste de los Estados Unidos, donde se utilizan charolas impregnadas con soluciones de Cu, el periodo de producción puede ser hasta 20 % más largo al de los viveros donde no se aplica este tratamiento, para asegurar que las plantas desarrollen suficientes raíces con cepellones firmes y prevenir daños o pérdidas de planta durante su extracción de las charolas y embalaje.

Respecto a la arquitectura radical, las plantas con poda radical química y aérea desarrollaron raíces conformadas por con un eje central, con múltiples raíces laterales cortas en todas sus caras. En cambio, las plantas sin poda desarrollaron un eje central con raíces laterales envolventes en torno al cepellón. En varios estudios de producción de planta de coníferas en charolas, con tratamiento o diseño para propiciar la poda radical, se señala que

la planta con poda desarrolla raíces fibrosas con pocas deformaciones y para las plantas sin poda se mencionan raíces en forma de “jaula de pájaro” o con crecimiento envolvente en torno del cepellón (South *et al.*, 2001; Aldrete *et al.*, 2005; Chapman y Colombo, 2006; Sung y Dumroese, 2013; Sánchez *et al.*, 2016; Castro *et al.*, 2018).

En relación con el efecto de las charolas, la planta producida en charolas de poliestireno (PS-77) presentó los valores más altos, seguida por las obtenidas en las charolas de plástico con cavidades fusionadas (T-42), con cavidades intercambiables (P-54) y con cavidades intercambiables y aberturas en las paredes (Ta-42). Este patrón de crecimiento, al parecer, estuvo influenciado por la temperatura del sustrato en cada tipo de charola y la facilidad de circulación del aire frío, durante el período de producción (Cuadro 1), misma que puede ser relacionada con la capacidad térmica de la materia prima de las charolas. Landis *et al.* (2014) señalan que en algunos viveros forestales de Estados Unidos y Canadá, ubicados en zonas con climas extremos, predomina el uso de charolas de poliestireno porque mantienen la temperatura del sustrato más estable, con respecto a las charolas de plástico.

Por otra parte, las bajas temperaturas afectaron la intensidad de liberación de los nutrientes del fertilizante utilizado, ya que en su ficha técnica se establece que el tiempo de liberación de 8 a 9 meses es a temperatura constante del sustrato a 21 °C, y que puede incrementarse o reducirse un mes, si la temperatura es de 15 o 25 °C, respectivamente. Durante la producción de la planta la temperatura media del sustrato fue menor a 13.6 °C en los tres tipos de charolas (Cuadro 1). Es decir, se puede suponer que los nutrientes contenidos en el fertilizante no se liberaron en su totalidad. Además, algunos autores coinciden en señalar que en los fertilizantes de liberación controlada una parte de los nutrientes permanece al interior de las esferas al final del periodo de liberación, debido al aumento del potencial osmótico al interior de las esferas (Jacobs, 2005; Haase *et al.*, 2007; Landis y Dumroese, 2009).

En un estudio realizado por Aguilera *et al.* (2016a) en un vivero ubicado en el estado de Hidalgo con temperatura media de la zona de 15.1 °C, se produjo *Pinus montezumae* Lamb. en charolas de poliestireno con cavidades de 160 cc, en dos sustratos (aserrín de pino y turba de musgo) combinados con 8 g L⁻¹ de tres marcas comerciales de fertilizantes de liberación controlada. A los 9.5 meses, cuando se evaluó la planta, se encontró en las esferas de Osmocote® 13, 38 y 33 % del contenido nominal de N, P y K. Este resultado permite suponer

que si las plantas de *Pinus patula* del presente estudio se hubiesen evaluado a los 10 meses o que si se hubiesen producido en condiciones más cálidas, las plantas habrían desarrollado tallas e índices de calidad mayores.

En el tratamiento alterno con charolas Ta-42, se obtuvo la planta con los valores más bajos de talla, peso seco e índice de calidad de Dickson, como consecuencia de que en éstas se observó una mayor pérdida de agua durante el ciclo de producción y por consecuencia, del fertilizante adicionado inicialmente al sustrato, con respecto a las charolas con cavidades sin aberturas. Este patrón de comportamiento se reporta en dos estudios de producción de pinos en charolas con cavidades intercambiables de 220 cc y diseño para propiciar la PRA: en el primero, Sánchez *et al.* (2016) produjeron *Pinus oaxacana* Mirov. y *Pinus greggii* var. *australis* Donahue & López, y reporta valores promedio para tallas y pesos secos significativamente superiores en las charolas sin aberturas, respecto a la planta producida en las mismas chaolas sin aberturas; en el segundo estudio, Castro *et al.* (2018) produjeron *Pinus greggii* var *australis* la cual desarrolló valores promedio para D, A, PSA y PSR de 25, 17, 28 38 % superiores a la planta producida en las mismas charolas sin aberturas en sus cavidades.

Para reducir la pérdida de agua y de fertilizante que se registra en los charolas con diseño para PRA, Landis (2005) recomienda varias técnicas utilizadas en viveros de Canadá y Estados Unidos, que incluyen el manejo por separado de charolas sin aberturas; uso de charolas de color blanco en zonas con temperaturas altas o en los extremos de las mesas porta charolas; incremento en la frecuencia de riegos y de la dosis de fertilización, y uso de fertilizantes de liberación controlada para reducir pérdidas por lixiviación.

Crecimiento de raíces en las prueba de CPR

Al final de la prueba de CPR, los valores promedio de la TRC_m mostraron diferencias significativas por efecto del tipo de contenedor, excepto en la TRC_m de la altura. Esto indica que la planta producida en charolas de poliestireno (PS-77) que inició con mayores tallas de diámetro y altura, también desarrolló las mayores TRC_m , respecto a las plantas producidas en las charolas de plástico (P-54 y T-42). La poda radical generó un efecto significativo en la TRC_m de las raíces emitidas; las plantas con poda emitieron mayor cantidad de raíces totales (R_t) y con crecimiento horizontal (R_h), pero menor crecimiento de raíces con

crecimiento vertical (R_v), a pesar de que al inicio de la prueba el diámetro inicial (D_0) era menor que el de las plantas sin poda (Cuadro 4 y Figura 3). En la interacción charola \times poda radical no hubo efecto significativo para ninguna de las variables evaluadas.

Cuadro 1.4. Valores promedio al inicio y final de la prueba de crecimiento potencial de raíz (CPR) de plantas de *Pinus patula* producidas en tres tipos de charola, con poda radical química.

FV	$\dagger D_0$ (mm)	D_1 (mm)	A_0 (cm)	A_1 (cm)	TRC _m (mm mm ⁻¹ mes ⁻¹)	TRC _m (cm cm ⁻¹ mes ⁻¹)	TRC _m (g g ⁻¹ mes ⁻¹)		
					D	A	R _h	R _v	R _t
a) Tipo de charola									
P-54	4.1 a [‡]	5.5 c	22.7c	30.3 c	0.19 c	0.19 a	0.19 b	0.14 b	0.30 b
PS-77	4.2 a	6.2 a	26.4a	35.8 a	0.26 a	0.20 a	0.24 a	0.19 a	0.38 a
T-42	4.1 a	5.8 b	25.3 b	33.8 b	0.22 b	0.19 a	0.21 ab	0.14 b	0.31 b
<i>p</i>	<0.185	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.198	<0.005	<0.001	<0.001
b) Poda radical									
SP	4.2 a	5.9 a	25.0 a	34.7 a	0.23 a	0.22 a	0.15 b	0.18 a	0.29 b
CP	4.1 b	5.7 b	24.6 a	31.9 b	0.22 a	0.17 b	0.28 a	0.13 b	0.37 a
<i>p</i>	<0.008	<0.052	<0.0276	<0.001	<0.314	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

[†] D_0 y D_1 : diámetro inicial y final; A_0 y A_1 : altura inicial y final; TRC_m: tasa relativa de crecimiento mensual; R_h, R_v y R_t: raíces con crecimiento horizontal, con crecimiento vertical y raíces totales; P-54: charola de plástico con 54 cavidades; PS-77: charola de poliestireno con 77 cavidades; T-42: rejilla con 42 tubetes de plástico; SP: sin poda; CP: con poda.

[‡]Letras diferentes en una columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).



Figura 1.3. Emisión de raíces laterales a los 45 días de prueba de crecimiento potencial de raíz en plantas de *Pinus patula* producido con y sin poda radical.

Al comparar la planta del tratamiento adicional, con poda radical aérea, con sus dos similares T-42 (sin y con recubrimiento de Cu), se presentaron diferencias significativas en los valores promedio de las variables evaluadas excepto en la TRC_m del diámetro. La planta con poda radical aérea desarrolló TRC_m similares a las plantas con poda radical química, excepto en R_h donde fue menor, pero superior a la de la planta producida sin poda radical (Cuadro 5).

Cuadro 1.5. Valores promedio al final de la prueba de crecimiento potencial de raíz (CPR) de *Pinus patula* producido en tubetes con poda radical química y aérea.

FV	†D ₀ (mm)	D ₁ (mm)	A ₀ (cm)	A ₁ (cm)	TRC _m (mm mm ⁻¹ mes ⁻¹)	TRC _m (cm cm ⁻¹ mes ⁻¹)	TRC _m (g g ⁻¹ mes ⁻¹)		
					D	A	R _h	R _v	R _t
Sin P	4.1 a [‡]	5.7 a	25.3 a	34.5 a	0.22 a	0.21 a	0.12 c	0.16 a	0.25 b
PQ	4.1 a	5.8 a	25.2 a	33.0 a	0.23 a	0.18 ab	0.29 a	0.11 b	0.37 a
PA	3.9 b	5.2 b	20.7 b	26.1 b	0.19 a	0.15 b	0.20 b	0.13 ab	0.30 ab
<i>p</i>	<0.001	<0.002	<0.001	<0.001	<0.087	<0.001	<0.001	<0.010	<0.001

†D₀ y D₁: diámetro inicial y final; A₀ y A₁: altura inicial y final; TRC_m: tasa relativa de crecimiento mensual; R_h, R_v y R_t: raíces con crecimiento horizontal, con crecimiento vertical y raíces totales; Sin P: sin poda, PQ: poda química, PA: poda aérea.

[‡]Letras diferentes en una columna indican diferencias significativas (Tukey, p≤0.05)

Se han encontrado resultados similares a los obtenidos en la presente prueba en otras especies forestales de alta producción en contenedores. Por ejemplo, South *et al.* (2005) evaluaron en condiciones hidropónicas el CPR de plantas de *Pinus palustris* Mill. producidas en charolas de poliestireno sin y con recubrimiento de Cu y en charolas de plástico sin y con aberturas para propiciar la poda radical aérea; a las cuatro semanas, en las plantas sin poda 64 % de las raíces emitidas crecieron en forma vertical (a partir de la base del cepellón) y sólo el 36 % crecieron de manera horizontal (a partir de la periferia del cepellón), mientras que en las plantas con PRQ los valores fueron 33 y 67 %, respectivamente, y en las plantas con PRA 22 y 78 %.

Chapman y Colombo (2006) evaluaron en macetas de plástico el CPR de planta de *P. banksiana* Lamb. producida en tres tipos de charola con cavidades de 46 a 60 cc (charolas de plástico con y sin aberturas, charolas de poliestireno con y sin recubrimiento de Cu y charolas con cavidades de paredes biodegradables); a los siete meses de prueba, las plantas con PRQ emitieron mayor cantidad y biomasa radical con crecimiento horizontal y con distribución más homogénea en todas las caras de la raíz principal, en comparación con las plantas sin poda que desarrollaron mayor cantidad de raíces hacia abajo y con una distribución irregular, en torno a la raíz principal.

Sword *et al.* (2011) también evaluaron en macetas de plástico el CPR de plantas de *Pinus palustris* Mill. las cuales fueron producidas en charolas de poliestireno de 60, 105 y 170 cc, sin y con recubrimiento de Cu; a las cuatro semanas de prueba, las plantas con PRQ emitieron en promedio, 33 raíces mayores de 1 mm de diámetro en los dos tercios superiores del cepellón y 15 raíces en el tercio inferior del cepellón mientras que en las plantas sin poda, el número de raíces fue de 19 y 35, respectivamente.

En México las pruebas de CPR con especies forestales son incipientes; a la fecha sólo se han publicado los resultados de un estudio de este tipo, realizada por Sánchez *et al.* (2016) con planta *Pinus greggii* var *australis* y de *Pinus oacaxana* Mirov. producida en charolas de plástico con tubetes de 210 cc sin y con aberturas laterales (RT-25 y RTa-25); a los 6 y 8 meses de edad, las plantas fueron evaluadas en su CPR durante cuatro semanas en macetas de plástico de 10 L en sustrato de corteza de pino y perlita (70, 30 %), y al final de la prueba

el número de raíces vivas mayores a un centímetro de longitud fue mayor en las plantas con PRA, con 220 vs. 167 raíces en *P. greggii* y 373 vs. 264 raíces en *P. oaxacana*.

El crecimiento radical observado en la planta de *Pinus patula* en la prueba de CPR, puede también compararse con los hallazgos encontrados por autores (South *et al.*, 2001; Sung y Dumroese, 2013; Sung y Haywood, 2016) que han estudiado durante varios años el crecimiento en campo de *Pinus palustris* Mill., quienes coinciden en señalar que las RL de las plantas con poda radical no tienen barreras que les impidan crecer libremente en campo; en cambio, en las plantas sin poda las RL forman una malla en torno al cepellón que bloquea su crecimiento en sentido horizontal. También han observado que en las plantas sin poda se forman callos o protuberancias en los ápices de la raíz principal y de las RL, cuando alcanzan el orificio de drenaje de las cavidades y hacen contacto con el aire; en campo, de estos callos, se generan raíces con geotropismo positivo, lo cual ocasiona que la planta desarrolle mayor número y biomasa radical en sentido vertical que horizontal. Este comportamiento radical en *Pinus palustris*, coincide con el observado en el presente estudio, como se ilustra en las Figura 1.

CONCLUSIONES

La impregnación de cavidades de las charolas de poliestireno y de plástico con la solución vinil-acrílica de hidróxido de Cu comercial genera planta con poda eficiente de raíces laterales y con un mínimo de raíces laterales envolventes en torno al cepellón, en ambos tipos de charolas. La planta obtenida en las charolas de poliestireno presenta mayor talla, peso seco e índice de calidad de Dickson con respecto a la producida en las charolas de plástico.

En la prueba de crecimiento potencial de raíz, la planta con poda radical química desarrolla mayor tasa relativa de crecimiento de raíces totales y con crecimiento horizontal, en comparación con la planta sin poda radical, misma que presenta mayor tasa relativa de crecimiento de raíces con crecimiento vertical.

El tratamiento alternativo de poda aérea produce planta con menores tallas y pesos secos que la planta producida con y sin poda radical química; sin embargo, genera menos raíces

laterales envolventes y mayor tasa relativa de crecimiento de raíces con sentido horizontal que las plantas producidas en el mismo tipo de charola sin aberturas laterales.

El uso de charolas con diseño para poda radical aérea presenta la ventaja de no contaminar el ambiente o afectar la salud de los trabajadores por el uso intensivo del Cu; por otra parte, la calidad de la planta puede mejorarse o igualarse a la planta con poda radical química, mediante el incremento de la dosis de fertilizante y de las láminas de riego como ya se realiza en otros países forestales.

LITERATURA CITADA

- Aguilera R., M., A. Aldrete, T. Martínez T. y V. M. Ordaz C. V. M. 2016a. Producción de *Pinus montezumae* Lamb. con diferentes sustratos y fertilizantes de liberación controlada. *Agrociencia* 50: 107–118.
- Aguilera R., M., A. Aldrete, T. Martínez T. y V. M. Ordaz C. 2016b. Producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(34): 7-19.
- Aldrete, A., J. Mexal G. y J. López Upton. 2005. Variación entre procedencias y respuesta a la poda química en plántulas de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 39: 563-574.
- Castro G., S. L., A. Aldrete, J. López U. y V. M. Ordaz C. 2018. Efecto del charola, sustrato y fertilización en el crecimiento de *Pinus greggii* var. *australis* en vivero. *Agrociencia* 52: 115-127.
- Chapman, K. A. and S. J. Colombo. 2006. Early root morphology of jack pine seedlings grown in different types of container. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21: 372-379.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2017. Objetivo Específico 1 del Monitoreo y Evaluación Complementaria de los Apoyos de Reforestación y Suelos 2016. Documento técnico. Guadalajara, Jalisco, México. pp: 178-187.

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. Información Climatológica por estado. <http://smn.cna.gob.mx/es/información-climatológica-ver-stado?estado=pue> (Marzo 2019).
- Cortina, J., R. M. Navarro y A. del Campo. 2006. Evaluación del éxito de la reintroducción de especies leñosas en ambientes mediterráneos. *In: J. Cortina J., J. L. Peñuelas, J. Puértolas; R. Savé y A. Vilagrosa. Calidad de Planta Forestal para la Restauración en Ambientes Mediterráneos. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España. pp: 11-29.*
- Escobar R., R. 2012. Fase de cultivo: Endurecimiento. *In: Buamscha M., G., L. T. Contardi, R. Dumroese K., J. A. Enricci, R. Escobar R., H. E. Gonda, D. Jakobs F., T. Landis D., T. Luna., J. Mexal G. y K. Wilkinson M. Producción de Planta en Viveros Forestales. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires, Argentina. pp: 145-162.*
- García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köeppen. Serie Libros N° 6, 5a Edición corregida y aumentada. Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F. pp: 50-52.
- Jacobs, D. F. 2005. Variation in nutrient release of polymer-coated fertilizers. *In: R.K. Dumroese, L. E. Riley y T. D. Landis, technical coordinators. National proceedings, forest and conservation nursery associations–2004. Fort Collins (CO): USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Proceedings RMRS-P-35. pp: 113- 118.*
- Haase, D. L., P. Alzugaray, R. Rose y D. F. Jacobs. 2007. Nutrient-release rates of controlled-release fertilizers in forest soil. *Soil Science and Plant Analysis* 38: 739-750.
- Haase, D. L. 2011. Seedling root targets. *In: L. E. Riley, D. L. Haase, J. R. Pinto, Technical Coordinators. National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2010. Proc. RMRS-P-65. Fort Collins, CO. Rocky Mountain Research Station. USDA, Forest Service, pp: 80-82.*

- Hernández Z., L., A. Aldrete, V. M. Ordaz C., J. López U. y M. A. López L. 2014. Crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb. en vivero influenciado por diferentes mezclas de sustratos. *Agrociencia* 48: 627-637.
- Landis, T. D. 2005. Sidelist or airlist containers. *Summer Forest Nursery Notes*. USDA, Forest Service. Washington, DC. USA. pp: 17-19.
- Landis, T. D. and R. K. Dumroese. 2009. Using polymer-coated controlled release fertilizers in the nursery and after outplanting. *USDA, Forest Service. Winter Forest Nursery Notes*. Washington, DC. pp: 5-12.
- Landis, T. D., R. K. Dumroese and D. L. Haase. 2010. *The Container Tree Nursery Manual Vol 7: Seedling Processing, Storage, and Outplanting*. *Agric. Handbook 674*. USDA, Forest Service, Washington, DC. pp: 3–15.
- Landis, T. D., T. Luna and R. K. Dumroese. 2014. Containers. In: K. M. Wilkinson, T. D. Landis, D. L. Haase, B. F. Daley and R. K. Dumroese. *Tropical Nursery Manual*. *Agriculture Handbook 732*. USDA, Forest Service. Washington, DC. pp: 123-139.
- Mathers, H. M., S. B. Low., C. Scagel, D. K. Struve and L. T. Case 2007. Abiotic factors influencing root growth of woody nursery plants in containers. *HortTechnology* 17(2): 151-162.
- Mattsson, A. 2005. Regeneration practices in Scandinavia: State-of-the-art and new trend. *In: The Thin Green Line: A Symposium on the State-of-the-Art in Reforestation*. Ontario Forest Research Institute, Ontario Ministry of Natural Resources. ON, Canada. pp: 25-30.
- Nilsson, U., J. Luoranen, T. Kolström, G. Örlander and P. Puttonen. 2010. Reforestation with planting in northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25(4): 283-294.
- Prieto R., J. A. y J. T. Sáenz R. 2011. *Indicadores de Calidad de Planta en Viveros Forestales de la Sierra Madre Occidental*. Libro Técnico Núm. 3. Campo Experimental Valle del Gadiana. Centro de Investigación Regional Norte Centro. INIFAP. Durango, Durango, México. 210 p.

- Prieto R., J. A., J. L. García R., J. C. Monárrez G. y R. E. Madrid A. 2012. Producción de Planta del Género Pinus. Folleto Técnico Núm. 50. Centro de Investigación Regional Norte Centro. INIFAP. Durango, Durango, México. 52 p.
- SAS Institute (Statistical Analysis System). 2002. The SAS system for Windows. Release versión 9.0. Cary, NC, USA: Author.
- Sánchez A., H., A. Aldrete, J. J. Vargas H. y V. M. Ordaz C. 2016. Influencia del tipo y color de charola en el desarrollo de plantas de pino en vivero. *Agrociencia* 50: 481-492.
- Secretaría de Economía. 2016. Norma Mexicana NMX-AA-170-SCFI-2016. Certificación de la operación de viveros forestales. Diario Oficial de la Federación. 17 de febrero de 2016. México, D.F. pp: 17-28.
- South, D. B., J. Shelton and S. A. Enebak. 2001. Geotropic lateral roots of container-grown longleaf pine seedlings. *Native Plants Journal* 2(2): 126-130.
- South, D. B., S. W. Harris, J. P. Barnett, M. J. Hains and D. H. Gjerstad. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, USA. *Forest Ecology and Management* 204: 385-394.
- South, D. B., T. E. Starkey and S.A. Enebak. 2016. Forestry nursery practice in Southern United States. *Foresta* 1: 106-146.
- Sung, S., S., J. D. Haywood, S. J. Zaronch and M. S. S. Sword. 2009. Long-term container effects on root system architecture of longleaf pine. *In: Proc. of the 2009 Society of American Foresters Convention*. Society of American Foresters, Bethesda, MD. 9 p.
- Sung, S. S. and K. R. Dumroese. 2013. Root system architecture: the invisible trait in: container longleaf pine seedlings. *Proceedings. RMRS-P-69 USDA Forest Service*. pp: 26-31.
- Sung, S. S. and J. D. Haywood. 2016. Air lateral root pruning affects longleaf pine seedling root system morphology. *In: C. J. Schweitzer, W. K. Clatterbuck and C. M. Oswalt (eds.)*. 2016. *Proceedings of the 18th biennial southern silvicultural research conference*. E-Gen. Tech. Rep. SRS-212. , Southern Research Station. Asheville, NC. USDA, Forest Service. pp: 317-322.

Sword Sayer, M. A., S. S. Sung and J. D. Haywood. 2011. Longleaf pine root system development and seedling quality in response to copper root pruning and cavity size. *Southern Journal of Applied Forestry* 35(1): 5-11.

Zhigunov, A., B. Mochalov, A. Sokolov, T. Saksa, J. Sved, J. Nerg and R. Rikala. 2011. *Fundamentals of container tree seedling production*. St. Petersburg Forestry Research Institute, St. Petersburg. 28 p.

CAPÍTULO II. LA PODA RADICAL DE *Pinus patula* SCHIEDE EX SCHLTDL. et CHAM. EN VIVERO AFECTA SU CRECIMIENTO EN CAMPO

Manuel Aguilera Rodríguez, MC.

Colegio de Postgraduados, 2019.

RESUMEN

Generalmente la reforestación se realiza sin considerar la arquitectura de la raíz de la planta utilizada. El objetivo del presente estudio fue el de evaluar el crecimiento en campo de planta de *Pinus patula* producida en contenedores con poda de los ápices de las raíces laterales. Planta de nueve meses de edad se produjo en tres tipos de contenedores de 170 cc: a) charola de plástico de 54 cavidades, b) charola de poliestireno de 77 cavidades y c) rejilla con 42 tubetes de plástico. La mitad de éstos se impregnó con una solución de 7 % de hidróxido de cobre para propiciar la poda química de raíces laterales. Se incluyó un tratamiento de poda aérea de raíces laterales que consistió en tubetes de plástico con aberturas circundantes en sus paredes. La prueba de campo se realizó con 72 plantas de cada tratamiento repartidas en 6 bloques, con espaciamiento de 2.5 × 2.5 m. Dieciséis meses después de establecida la plantación se registraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre las plantas con poda y sin poda de raíces laterales, para las variables altura (98.5 vs. 91.0 cm), diámetro del tallo (16.4 vs. 15.6 mm), supervivencia (91 vs. 80 %) y tasa relativa de crecimiento en diámetro (1.05 vs. 0.99 mm mm⁻¹ año⁻¹) y altura (1.12 vs. 1.01 cm cm⁻¹ año⁻¹). Las plantas producidas en charolas de poliestireno desarrollaron las mayores tallas en vivero y en campo. La planta con poda radical química y aérea presentó crecimiento y supervivencia en campo superior a la planta sin poda.

Palabras clave: Desarrollo en campo, poda radical química y aérea, supervivencia.

THE ROOT PRUNING OF *Pinus patula* SCHIEDE EX SCHLTDL. *et* CHAM. IN NURSERY AFFECTS ITS GROWTH IN THE FIELD

Manuel Aguilera Rodríguez, MC.

Colegio de Postgraduados, 2019.

ABSTRACT

Reforestation is commonly performed without considering the root architecture of seedlings used. The objective of this study was to evaluate the growth in the field of *Pinus patula* seedlings produced in containers with pruning of lateral roots. Nine-months-old seedlings were produced in three types of 170 cc containers: a) 54-cavities plastic tray (P-54), b) 77-cavities polystyrene tray (PS-77) and c) grille with 42 plastic containers (T-42). Half of these were impregnated with a 7% copper hydroxide solution to promote chemical root pruning. An air root pruning treatment consisting of plastic containers with horizontal wall-openings was included. A field test with 72-seedlings from each treatment, spread over 6 blocks, with a 2.5 x 2.5 m spacing, was established. Sixteen months after planting, significant differences ($p \leq 0.05$) were recorded between plants with and without lateral root pruning, for seedling height (98.5 vs. 91.0 cm), stem diameter (16.4 vs. 15.6 mm), survival (91 vs. 80 %) and relative growth rate in diameter (1.05 vs. 0.99 mm mm⁻¹ año⁻¹) and height (1.12 vs. 1.01 cm cm⁻¹ año⁻¹). Seedlings produced in polystyrene trays developed the largest sizes in the nursery and in the field. Seedlings with chemical and air root pruning showed superior growth and survival in field than non-pruned seedlings.

Keywords: Development in the field, radical chemical and aerial pruning, survival.

INTRODUCCIÓN

La producción de planta forestal en contenedores (charolas) tiene el riesgo de la alteración del crecimiento normal de la raíz, durante la etapa de vivero. Las raíces laterales (RL) que emergen de la raíz principal, crecen hacia abajo al chocar con las paredes de las cavidades, contrario a su desarrollo horizontal natural (South *et al.*, 2001; Escobar, 2012). Cuando se utilizan cavidades pequeñas o las plantas permanecen en las charolas por largo tiempo, la deformación se acentúa y se generan RL con crecimiento no sólo hacia abajo, sino también en sentido envolvente y ascendente, formando en algunos casos una madeja de raíces (Landis, 2010; Ritchie *et al.*, 2010; Sung and Dumroese, 2013). La deformación radical generada en vivero persiste y se incrementa en campo, ocasionando reducción en el crecimiento de la planta y susceptibilidad a patógenos y fenómenos naturales extremos (South *et al.*, 2001; Mattsson, 2005; Cortina *et al.*, 2006; Sung and Dumroese, 2013)

Para prevenir la deformación de la raíz se han innovado varias tecnologías que propician la poda de los ápices de las RL; de estas tecnologías predominan la impregnación de charolas con sales de Cu para propiciar la poda radical química (PRQ) y el uso de contenedores con aberturas horizontales en las paredes laterales para propiciar la poda radical aérea -PRA (Landis *et al.*, 1990; Mattsson, 2005; Landis, 2005; Landis *et al.*, 2014). A nivel general se ha señalado que la planta producida con poda radical desarrolla en campo una raíz con crecimiento similar al de las plantas de regeneración natural. Adicionalmente, algunos autores indican que presenta crecimiento, supervivencia y resistencia a patógenos superiores a la planta sin poda (Cortina *et al.*, 2006; Escobar, 2012; Sung and Haywood, 2016; Regan *et al.*, 2015).

Actualmente en los viveros forestales de México sólo las charolas de poliestireno se impregnan con sales de Cu. Esta impregnación se realiza principalmente con el propósito de prevenir que las raíces se incrusten en las paredes de las cavidades, más que por el interés de los productores de producir planta con poda radical.

A la fecha, las plantaciones en zonas de restauración y en las áreas forestales bajo manejo silvícola se realizan con planta disponible en los viveros locales o de otras entidades, sin importar la calidad de la raíz de las plantas. Los costos y la ausencia de plantaciones

demostrativas donde se evidencien las bondades de la planta con poda radical y las desventajas de la planta sin poda podrían explicar la falta de interés por implementar esta práctica en todos los viveros. De hecho, los trabajos experimentales sobre poda radical en vivero con especies nativas son incipientes (Aldrete *et al.*, 2002; Sánchez *et al.*, 2016; Castro *et al.*, 2018) y los estudios de campo aún más escasos (Barajas *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, 2017), por lo cual es imprescindible incrementar estos ensayos.

En este contexto, en este trabajo se evalúa el efecto de la poda de raíz en vivero sobre la supervivencia y el desarrollo en campo de plantas de *Pinus patula* producidas en tres de los tipos de contenedores más utilizados en los viveros forestales de México. La hipótesis planteada fue que las plantas producidas con poda radical tienen mejor desempeño en campo, en términos de supervivencia y crecimiento, que las plantas sin poda, independientemente del tipo de poda y del contenedor utilizado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el Ejido Llano Grande, municipio de Chignahuapan, Puebla, localizado entre las coordenadas 19° 44' 06.4" y 19° 40' 25.3" LN, 98° 06' 54.3" y 98° 11' 26.4" LO, a una altitud promedio de 2,800 m, topografía ondulada y accidentada, con pendientes de 5 a 60 % y suelos profundos del tipo andosol húmico. El clima de la zona es C(w₁)(w) templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura y precipitación media anual de 14.8° C y 1,000 mm; el período de lluvias es de junio a octubre y los vientos predominantes son de noreste a suroeste. La vegetación arbórea está constituida por masas puras de *Pinus patula* y *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. y asociaciones de *Pinus-Abies* y *Pinus-Quercus*; de las especies del género *Pinus* predomina la especie *patula*, seguido de las especies *montezumae*, *rudiz*, *ayacahuite*, *pseudostrobus*, y *teocote* (Cruz, 2013).

El experimento de plantación se estableció en las dos áreas de corta total aprovechadas en 2017, correspondientes a la cuarta anualidad del programa de manejo forestal vigente del Ejido (Cruz, 2013). Los puntos centrales de estas dos áreas se localizan en las coordenadas siguientes:

área A), 19° 41' 59.83" LN y 98° 09' 26.87" LO y área B), 19° 41' 58.31" LN y 98° 10' 42.33" LO. Después de extraer los productos forestales se delimitaron dos bloques (I y II) de 17.5 × 35.5 m en el área de corta A, y cuatro bloques (III, IV, V y VI) en el área B, ambos representativos de las condiciones topográficas y edáficas de ambas áreas de corta.

Para determinar las características del suelo, previo a la plantación, se tomaron tres muestras de suelo a una profundidad de 25 cm a lo largo de cada bloque, con las que se integró una mezcla compuesta por bloque. Las muestras analizaron en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados. De los resultados obtenidos se observa que los bloques con menor pendiente, localizados en el área de corta A, los contenidos de MO, N y K resultaron más altos y con pH más ácido, que los bloques con mayor pendiente, localizados en el área de corta B, conforme al Cuadro 1.

Cuadro 2.1. Características físicas y de fertilidad del suelo del área forestal donde se ubican los bloques de plantación de *Pinus patula*.

Bq	Alt	Exp	Pen	Densidad (Mg m ⁻³)		M.O (%)	pH (1:2)	C.E (dSm ⁻¹)	Contenido de nutrientes (mg kg ⁻¹)		
				DA	DR				N	P	K
I	2,828	NO	10	0.8	2.0	5	5.6	0.11	0.35	0.02	1.47
II	2,814	NO	5	0.8	2.1	6	5.7	0.13	0.36	0.02	1.56
III	2,730	SO	20	0.8	1.7	5	5.3	0.16	0.37	0.02	1.59
IV	2,738	NE	40	0.8	2.2	3	6.0	0.11	0.25	0.03	1.32
V	2,761	SO	40	0.8	2.2	3	6.0	0.10	0.26	0.02	1.42
VI	2,766	NO	30	0.8	2.0	5	5.8	0.11	0.34	0.03	1.45

Bq: bloque, Alt: altitud en m, Exp: exposición, P: pendiente, DA: densidad aparente, DR: densidad real. Todos con textura migajón-limoso.

Insumos utilizados

La planta de *Pinus patula* var. *patula* utilizada en la plantación se obtuvo de un experimento de producción desarrollado, para este propósito, en el vivero del ejido Pueblo Nuevo, Chignahuapan, Pue., durante nueve meses, de octubre de 2016 a julio de 2017. Se incluyeron cuatro tipos de contenedor con cavidades de forma cilíndrica con las dimensiones siguientes: a) PS-77, charola de poliestireno expandido de $35 \times 60 \times 15.2$ cm, con 77 cavidades de 170 cc y densidad de 366 cavidades por m^2 , las cavidades presentan un diámetro superior y longitud de 4.3 y 15.2 cm (Aislantes y Empaques, S.A. de C.V., Guadalajara, Jal.); b) P-54, charola de plástico de color negro de $30.8 \times 50.0 \times 13.8$ cm, con 54 cavidades de 170 cc y densidad de 348 cavidades por m^2 , las cavidades presentan un diámetro superior y longitud de 4.8 y 13.8 cm; c) T-42, rejilla de plástico con cuatro soportes verticales de $37.3 \times 37.5 \times 23.4$ cm, con 42 tubetes individuales de plástico de color negro de 170 cc y densidad de 298 cavidades por m^2 , los tubetes tienen un diámetro superior y longitud de 4.8 y 13.8 cm; d) Ta-42, contenedor con diseño y dimensiones iguales al contenedor T-42, con tres aberturas circundantes de 0.5 cm de ancho distribuidas en la pared de cada tubete, para propiciar la poda aérea de las RL. Los últimos tres contenedores son fabricados por Innovaciones Industriales y Forestales, S.A. de C.V. Azcapotzalco, Edo. de México.

Para propiciar la PRQ de las plantas, la mitad de los contenedores P-54, PS-77 y T-42 se impregnaron con una solución plástica que contenía 7.0 % de hidróxido de Cu ($Cu(OH)_2$), compuesta por 1 kg de sellador vinil-acrílico 5 x 1 (Comex[®]), 0.2 kg de agua potable y 0.09 kg de hidróxido de Cu comercial (Hidromet[®]). Esta concentración de hidróxido de Cu comercial se utiliza en varios viveros que producen especies forestales en charolas de poliestireno (Aldana & Aguilera, 2003), la cual se reporta como apropiada para propiciar la PRQ en la producción de planta de *Pinus montezumae* Lamb. (Aguilera *et al.*, 2016a) y *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Aguilera *et al.*, 2016b).

Los tratamientos de producción de planta estuvieron definidos por el tipo de contenedor y el tipo de poda radical: los tratamientos 1, 2 y 3 correspondieron a los contenedores (P-54, PS-77 y T-42) sin impregnar con Cu y los tratamientos 4, 5 y 6 a los mismos contenedores impregnados con Cu. El tratamiento alterno (T7) estuvo definido por el contenedor Ta-42 con aberturas en las paredes de las cavidades para propiciar la poda aérea de las RL.

Para cada tratamiento se utilizaron cuatro charolas, las cuales se llenaron con sustrato compuesto por aserrín fresco de pino (sin compostar), perlita, vermiculita y turba de musgo (peat-moss) en proporciones 60, 20, 10 y 10 % en volumen, combinado con 8 g L⁻¹ de fertilizante de liberación controlada Osmocote® Plus 8-9M (15-9-12 + ME), más 1 g L⁻¹ de fertilizante con micronutrientes (Micromax®). Las charolas se sembraron con semilla procedente del ejido Llano Grande. Desde la siembra y hasta el mes de mayo de 2017 las plantas crecieron protegidas con malla sombra (50%) de color negro y a partir de junio crecieron a la intemperie.

Durante la primera semana del mes de julio de 2017, a los nueve meses de edad de la planta, se extrajeron en forma aleatoria 72 plantas de cada conjunto de contenedores por tratamiento, las cuales fueron ordenadas en paquetes de 12 plantas cada uno, para su traslado a las áreas de plantación en el ejido Llano Grande.

Establecimiento del ensayo

La plantación se realizó en la primera semana del mes de julio de 2017, con un diseño experimental de bloques completos al azar, con seis repeticiones; el factor de bloqueo estuvo determinado por la exposición y pendiente del terreno. Los tratamientos se distribuyeron en forma aleatoria en cada bloque y se plantaron mediante el sistema de “cepa común” en dos hileras continuas de seis plantas cada una, con un espaciamiento de 2.5 m entre plantas e hileras, conforme al Cuadro 2.

Cuadro 2.2. Arreglo de la plantación de *Pinus patula* por tratamiento y bloque.

Bloque	Tratamientos						
I	6	2	3	5	4	7	1
II	4	6	7	1	2	5	3
II	6	3	1	5	7	4	2
IV	7	1	3	4	2	6	5
V	6	2	3	5	4	7	1
VI	4	6	7	1	2	5	3
	Parte baja del terreno				Parte alta del terreno		

Mantenimiento del ensayo

Durante los meses de septiembre de 2017, abril y septiembre de 2018 se removieron las malezas para permitir que las plantas establecidas crecieran libremente. Las áreas de corta donde se establecieron los bloques cuentan con brechas corta-fuego y vigilancia permanente para prevenir incendios y pastoreo. Cada dos meses se evaluó la supervivencia de la planta desde el momento de plantación. A partir de la primera evaluación, en septiembre de 2017, se detectó afectación de la raíz de las plantas por larvas de escarabajos del género *Phyllofaga* (gallina ciega), principalmente en los bloques del área de corta B, ubicada junto a parcelas agrícolas. A pesar de que esta plaga causó daños a algunas plantas, se tomó la decisión de no aplicar insecticidas para valorar, si las plantas con poda radical ofrecían diferente nivel de resistencia a este patógeno, que las plantas sin poda.

Variables evaluadas

Al momento de realizar la plantación se midió el diámetro en la base del tallo y la altura de las plantas (D0, A0) de cada tratamiento por bloque. En la primera semana de noviembre

de 2018, a los 16 meses de edad de la planta (1.33 años) se midió el diámetro del tallo con vernier digital a 3 cm arriba del suelo (D1) y la altura de las plantas con regla graduada de 2 m. Durante la medición se cuantificó la planta muerta por tratamiento y bloque, para calcular la supervivencia, Figura 1.



Figura 2.1. Instalación y evaluación del experimento de plantación de *Pinus patula* en el ejido Llano Grande, Chignahuapan, Puebla.

Para cada planta y para el conjunto de plantas por tratamiento se calcularon las tasas de crecimiento relativo anual (Tcra) para el diámetro y la altura, con la fórmula: $Tcra = [(\ln Y_2 - \ln Y_1) / (T_2 - T_1)]$, donde: $Y_1 = D_0, A_0$; $Y_2 = D_1, A_1$; $T_1 =$ edad de la planta al inicio de la prueba (9 meses = 0.75 años); $T_2 =$ edad de la planta al final de la prueba (25 meses = 2.08 años).

Análisis estadístico

Para los tratamientos T1 a T6, el arreglo experimental fue factorial 3×2 (tres tipos de contenedor y dos condiciones de poda radical química [con y sin]). El análisis de varianza se realizó con el software estadístico SAS[®] versión 9.0 (SAS, 2002). Para la evaluación del tratamiento alternativo con poda radical aérea (TA), el análisis de varianza se realizó comparando este tratamiento con los tratamientos T3 y T6 (T-42 sin poda y T-42 con cavidades impregnadas con Cu. En el análisis estadístico de la supervivencia, el análisis de varianza se

realizó con los valores originales y con la transformación raíz cuadrada de los valores originales de supervivencia por bloque. Sin embargo, los resultados fueron idénticos con ambos procedimientos por lo que sólo se presentan los resultados con la variable original.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto en el crecimiento de las plantas

En el análisis de varianza los valores de significancia de las tallas finales, tasa de crecimiento relativo y supervivencia fueron influenciados ($p < 0.05$) por el factor bloque, debido a que éstos fueron ubicados en condiciones edáficas y ambientales contrastantes y representativas de las áreas de plantación. La influencia del factor poda radical fue más significativa que el factor contenedor. La interacción contenedor \times poda radical no mostró significancia ($p < 0.05$) para ninguna de las variables medidas al final de la prueba (Cuadro 3).

Cuadro 2.3. Valores de significancia (P) para el crecimiento en altura y diámetro y la supervivencia de plantas de *Pinus patula* producido en tres tipos de contenedor con poda radical química 16 meses después de la plantación.

FV	GL	D0	A0	D1	A1	TcraD	TcraA	Sv (%)
Bq	5	0.058	0.051	0.001	0.005	0.001	0.019	0.019
Ct	2	0.001	0.001	0.044	0.145	0.058	0.001	0.264
PR	1	0.001	0.001	0.085	0.021	0.002	0.001	0.009
Ct*PR	2	0.056	0.103	0.606	0.347	0.340	0.262	0.593

FV: Fuente de variación, GL: grados de libertad, D0 y D1: diámetro inicial y después de 16 meses en campo, A0 y A1: altura inicial y después de 16 meses en campo, TcraD y TcraA: tasa de crecimiento relativo anual en diámetro y altura, Sv: supervivencia, Bq: bloque, Ct: contenedor, PR: poda radical.

Los valores promedio de las variables morfológicas presentaron diferencias significativas por efecto del factor contenedor y poda radical. La planta producida en contenedores PS-77

desarrolló diámetro y altura significativamente superiores a la planta producida en los contenedores P-54 y T-42. Conforme a la hipótesis planteada, el conjunto de plantas de los tratamientos con poda radical (T2, T4 y T6) presentaron altura final, tasas relativas de crecimiento y supervivencia en campo, significativamente superiores al conjunto de plantas de los tratamientos sin poda (T1, T3, y T5), a pesar de que las plantas de estos últimos presentaban tallas significativamente superiores al momento de la plantación (Cuadro 4).

Cuadro 2.4. Valores promedio por tipo de contenedor y poda radical para el crecimiento en altura, diámetro y supervivencia de plantas de *Pinus patula* producido en tres tipos de contenedor con poda radical química después de 16 meses de plantación.

FV	D0 (mm)	A0 (cm)	D1 (mm)	A1 (cm)	TcraD (mm mm ⁻¹ año ⁻¹)	TcraA (cm cm ⁻¹ año ⁻¹)	Sv %
a) Tipo de contenedor							
P-54	3.9 b	22.1 b	15.2 b	90.4 a	0.99 a	1.04 b	81.4 a
PS-77	4.1 a	23.9 a	16.6 a	96.3 a	1.02 a	1.02 b	87.2 a
T-42	3.9 b	21.4 b	16.3 ab	97.5 a	1.05 a	1.13 a	88.9 a
b) Poda radical							
Sin	4.1 a	23.2 a	15.6 b	91.0 b	0.99 b	1.01 b	80.1 b
Con	3.9 b	21.7 b	16.4 a	98.5 a	1.05 a	1.12 a	91.0 a

FV: factor de variación, D0 y D1: diámetro inicial y después de 16 meses en campo, A0 y A1: altura inicial y después de 16 meses en campo, TcraD y TcraA: tasa de crecimiento relativo anual en diámetro y altura, P-54: charola de plástico de 54 cavidades, PS-77: charola de poliestireno de 77 cavidades, T-42: rejilla con 42 tubetes de plástico, Sv: supervivencia.

En diversos estudios de campo realizados con otras especies de coníferas se reportan supervivencias y crecimientos superiores en las plantas con poda radical, respecto a las plantas sin poda; aunque también se reportan sin diferencias significativas durante los primeros años de vida, principalmente cuando la planta se produjo en cavidades menores a 110 cc, cuando la plantación se realiza en sitios muy fríos o con suelo pobre y cuando se utilizan especies cespitosas (Grossnickle, 2005).

En un experimento de plantación con *Pinus palustris* Mill. (especie cespitosa del sur de los Estados Unidos), se utilizó entre otras, planta producida en charolas de poliestireno (Supperblock®) con cavidades impregnadas con una solución de Cu denominada comercialmente como Spin Out® y charolas de plástico (Hiko V-93), ambas con cavidades de 93 cc. Las plantas se establecieron en cuatro sitios diferentes y dos años después, los árboles con poda radical y sin poda no presentaron diferencias significativas en supervivencia (78 y 75 %), diámetro del cuello (3.7 y 3.7 cm) y altura (23 y 21 cm), tampoco en la ruptura del estado cespitoso 63 y 60 %, respectivamente (South *et al.*, 2005). En cambio, con la misma especie producida en charolas de poliestireno impregnadas con Cu con cavidades de 60, 108 y 164 cc, a los cinco años de plantación, las plantas con poda y sin poda no presentaron diferencias significativas en supervivencia (94 y 91 %), pero sí en diámetro del cuello del tallo (7.0 y 6.5 cm) y altura (200 y 170 cm, respectivamente (Haywood *et al.*, 2012).

En otro experimento realizado por Regan *et al.* (2015) con *Pinus monticola* Douglas ex D. Don (especie subalpina de lento crecimiento), la planta se produjo en charolas de poliestireno con cavidades de 80 y 130 cc, con y sin cavidades impregnadas con Cu. Después de 5.5 años de crecimiento en un sitio sin deficiencia de humedad, las plantas con poda radical y sin poda no presentaron diferencias significativas en supervivencia (59 y 52 %), pero sí en diámetro (3.5 y 3.2 cm) y altura (134 y 121 cm), respectivamente.

Cuando la plantación se realiza en sitios con clima seco, las diferencias pueden ser menos evidentes, como es el caso de *Pinus halepensis* Mill. cultivado en charolas de plástico con cavidades de 650 cc impregnadas manualmente con una solución plástica de 3.3 % de carbonato de Cu básico ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_3$) y establecido en un sitio con clima mediterráneo y precipitación media anual de 581 mL. Dos años después de la plantación, los árboles con poda radical y sin poda no presentaron diferencias significativas en supervivencia ni en el crecimiento en diámetro y altura (Tsakaldimi y Ganatsas, 2006).

Efecto del tipo de poda (química vs. aérea)

Al comparar la planta producida en tubetes con aberturas (Ta-42) con sus dos similares T-42 (sin y con cavidades impregnadas con Cu), las variables D0 y A0 fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$) por efecto del tipo de contenedor y de poda radical a los nueve meses

en vivero (al inicio de la plantación), mas no por efecto del bloque. A los 16 meses de establecida la planta en campo, los crecimientos en diámetro (D1), altura (A1), las tasas de crecimiento relativo anual en diámetro y altura (TcraD, TcraA) y la supervivencia no presentaron diferencias significativas por efecto del tipo de contenedor, a pesar de que las plantas producidas con poda radical aérea y química iniciaron el periodo de plantación con tallas significativamente menores (Cuadro 5).

Cuadro 2.5. Valores promedio por tipo de poda radical para el crecimiento en altura, diámetro y supervivencia de plantas de *Pinus patula* producida en tubetes sin poda, con poda radical química y poda radical aérea, después de 16 meses de plantación.

Tipo de poda	D0	A0	D1	A1	TcraD (mm mm ⁻¹ año ⁻¹)	TcraA (cm cm ⁻¹ año ⁻¹)	Sv (%)
Sin poda	4.0 a	22.3 a	16.2 a	96.6 a	1.0 a	1.1 a	84.7 a
Química	3.8 b	20.5 b	16.4 a	98.5 a	1.1 a	1.2 a	90.3 a
Aérea	3.8 b	17.5 c	15.5 a	92.9 a	1.1 a	1.2 a	87.5 a

D0 y D1: diámetro inicial y después de 16 meses en campo, A0 y A1: altura inicial y después de 16 meses en campo, TcraD y TcraA: tasa de crecimiento relativo anual en diámetro y altura, Sv: supervivencia.

Las plantas producidas en contenedores Ta-42 con poda radical aérea desarrollaron en campo tasas de crecimiento relativo anual para diámetro y altura iguales a las generadas en contenedores T-42 con poda radical química, a pesar de haber iniciado con tallas más pequeñas (Cuadros 4 y 5). Estudios de campo con planta originada con poda radical aérea comprueban que este tipo de plantas pueden llegar a ser tan eficientes como aquellas producidas con poda radical química. Cambell *et al.*, 2006) produjeron *Pinus contorta* Dougl. var. *latifolia* Engelm. en tres tipos de charolas con cavidades de 80 cc, con tratamiento y diseño para poda radical química y aérea, y sin poda radical (Copperblock[®], Airblock[®] y Superblock[®]). La planta se estableció en un sitio subalpino con precipitación y temperatura media diaria de 780 mm y -0.3 °C y después de dos estaciones de crecimiento (1.5 años), las plantas con poda radical química y aérea presentaron tallas similares en D (4.8, 4.7 mm) y A (22.4, 22.3 cm) y en conjunto fueron significativamente superiores a las plantas sin poda radical, con diámetro de 4.6 mm y altura de 20.3 cm.

En el caso de pinos con crecimiento cespitoso, Sung and Haywood, 2016 produjeron *Pinus palustris* Mill. en charolas de plástico (Rigi-pots®) con cavidades de 110 cc, con y sin aberturas laterales para propiciar la poda radical aérea. La planta fue establecida en un sitio de distribución natural de la especie, y 14 meses después de la plantación no se registraron diferencias significativas entre los árboles con poda radical y sin poda en diámetro (1.6 y 1.6 cm) y altura (6.0 y, 6.1 cm); en cambio en la evaluación de raíces emitidas se presentaron diferencias significativas en el número de raíces gruesas (≥ 0.9 mm) con crecimiento envolvente (2.1 y 4.5 raíces gruesas), lo cual hace suponer que en los próximos años las plantas con poda radical aérea presentarán crecimientos superiores a las plantas sin poda.

Respecto a especies mexicanas producidas con poda radical aérea, sólo se tiene el antecedente de un trabajo de campo realizado por Sánchez *et al.* (2017), quienes produjeron planta de *Pinus greggii* Engelm. var. *australis* en contenedores de rejilla y tubetes de plástico de color blanco y negro, de 245 cc con aberturas laterales circundantes (RTa-25) y sin éstas (RT-25), con tres tipos de sustrato y dos niveles de fertilización. Los árboles se establecieron en un sitio con precipitación y temperatura media de 1,215 mm y 15 °C. Un año después, el conjunto de plantas con poda radical aérea y sin poda no presentaron diferencias significativas en diámetro (5.2 y 5.3 mm), altura (45.1 y 45.3 cm) y supervivencia (90 y 89 %), a pesar de que el diámetro inicial de las plantas sin poda fue significativamente superiores a las plantas con poda radical aérea (3.1 y 2.9 mm).

La producción de planta en contenedores con diseño para poda radical aérea presenta la ventaja de que no contamina el suelo o el ambiente con lixiviados de Cu, como sucede en la poda radical química, aunque si demanda mayor cantidad de láminas de riego y fertilizantes durante la etapa de vivero. Para reducir la pérdida de agua y fertilizantes, Landis (2005) recomienda varias prácticas de manejo, incluyendo el acomodo de los contenedores separado de otros contenedores sin aberturas; uso de contenedores de color blanco en zonas con temperaturas altas o en los extremos de las mesas porta-charolas; programa específico de riego y uso de fertilizantes de liberación controlada para reducir pérdidas por lixiviación.

Efecto en la supervivencia de la planta

La supervivencia de la planta sólo fue afectada por los factores bloque y poda radical química ($p < 0.05$), y sin efecto por el factor contenedor y por la interacción contenedor por poda radical. Los valores de supervivencia promedio por tipo de contenedor fueron de 81.6, 86.1 y 88.5 % para P-54, PS-77 y 87.5 %, respectivamente; para el conjunto de plantas con poda radical y sin poda, la supervivencia fue de 90 y 80 %. Al comparar la supervivencia de la planta producida con poda radical aérea en contenedores Ta-42, con sus similares T-42 sin poda y con poda radical química no se registraron diferencias significativas; los valores promedio para estos contenedores fue de 88, 85 y 90 % respectivamente. En la Figura 1 se ilustra la variación de la supervivencia para el conjunto de plantas con PRQ, PRA y sin poda, a lo largo del período de plantación; en los tres casos se observa la estabilización de la supervivencia al final del período, una vez que las plantas desarrollaron tallas aéreas mayores de 1.5 m capaces de soportar las condiciones climáticas extremas de la zona.

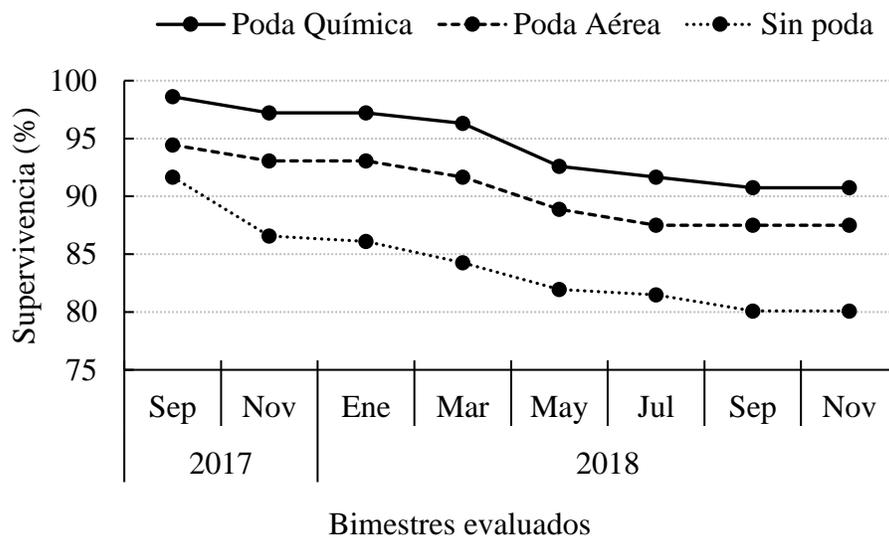


Figura 2.2. Variación bimestral de la supervivencia de *Pinus patula* durante 16 meses en campo.

Respecto a las causas de muerte de las plantas, en el área de corta A la afectación fue por heladas presentadas durante los meses de diciembre de 2017 y enero de 2018, con supervivencias de 86 y 100 % para los bloques I y II; del total de planta muerta, 50 % fue de planta sin poda, 25 % en planta con PRQ y 25 % en planta con PRA. En el área de corta B la

afectación fue por larvas de escarabajos del género *Phyllofaga* (“gallina ciega”), con supervivencias 79, 78, 74 y 81 % para los bloques III, IV, V y VI, respectivamente; de la planta muerta, 47 % fue de planta sin poda, 23 % en planta con PRQ y 30 % en planta con PRA. Cabe hacer notar que el área de corta B colinda con parcelas agrícolas, donde la presencia de este tipo de insectos es muy común; a este respecto, Cibrián (2016) señala que el género *Phyllofaga* predomina en los climas templados y es una de las principales plagas de las plantaciones forestales recién establecidas, sobre todo en aquellas ubicadas en áreas de uso agropecuario.

La mayor afectación en plantas sin poda radical puede atribuirse al hecho de que este tipo de plantas desarrollan raíces con crecimientos envolventes en vivero, mismos que persisten en campo durante los primeros años (South *et al.*, 2001; Sung and Dumroese, 2013), en cambio las plantas con poda radical emiten raíces laterales en sentido horizontal más rápido que las plantas sin poda, lo cual les confiere mayor resistencia a patógenos y a fenómenos naturales extremos (Landis *et al.*, 2014).

CONCLUSIONES

La planta con poda radical química presentó, a 16 meses de edad en campo, una supervivencia y crecimiento relativo en diámetro y altura superiores a los desarrollados por la planta producida en los mismos contenedores sin poda radical.

La planta producida en contenedores de cavidades intercambiables con poda radical aérea, desarrolló en campo tasas de supervivencia y de crecimiento relativo en diámetro y altura iguales a las plantas producidas en los mismos contenedores con poda radical química y sin ésta, a pesar de haber iniciado con tallas más bajas.

LITERATURA CITADA

- Aguilera R., M., A. Aldrete, T. Martínez T. y V. M. Ordaz C. 2016a. Producción de *Pinus montezumae* Lamb. con diferentes sustratos y fertilizantes de liberación controlada. *Agrociencia* 50: 107–118.
- Aguilera R., M., A. Aldrete, T. Martínez T. y V. M. Ordaz C. 2016b. Producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(34): 7–19.
- Aldana B., R. y M. Aguilera R. 2003. Procedimientos y Cálculos Básicos Útiles en la Operación de Viveros que Producen en Contenedor. Documento Técnico. Programa Nacional de Reforestación. CONAFOR. Guadalajara, Jalisco, México. 41 p.
- Aldrete A., J. G. Mexal, R. Phillips and A. D. Vallotton. 2002. Copper coated polybags improve seedlings morphology for two nursery-grown Mexican pine species. *Forest Ecology and Management* 163: 197–204.
- Barajas R., J. E., A. Aldrete, J. J. Vargas H. y J. López U. 2004. La poda química en vivero incrementa la densidad de raíces en árboles jóvenes de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 38: 545–553.
- Cambell B., D. S. Kiiskila, L. J. Philip, J. J. Zwiazek and M. D. Jones. 2006. Effects of forest floor planting and stock type on growth and root emergence of *Pinus contorta* seedlings in a cold northern cutblock. *New Forests* 32: 145–162.
- Castro G., S. L., A. Aldrete, J. López U. y V. M. Ordaz C. 2018. Efecto del envase, sustrato y fertilización en el crecimiento de *Pinus greggii* var. *australis* en vivero. *Agrociencia* 52: 115-127.
- Cibrián T., D. 2016. Manual para la Identificación y Manejo de Plagas en Plantaciones Forestales Comerciales (1ª Reimpresión). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 230 p.
- Cortina, J., R. M. Navarro y A. del Campo. 2006. Evaluación del éxito de la reintroducción de especies leñosas en ambientes mediterráneos. *In: J. Cortina J., J. L. Peñuelas, J.*

- Puértolas; R. Savé y A. Vilagrosa. Calidad de Planta Forestal para la Restauración en Ambientes Mediterráneos. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España. pp: 11-29.
- Cruz M., L. 2013. Programa de manejo forestal persistente nivel avanzado para el aprovechamiento de recursos forestales maderables 2014-2023, del Ejido Llano Grande, Chignahuapan, Puebla, México. 337 p.
- Escobar R., R. 2012. Fase de cultivo: endurecimiento. *In*: Buamscha M., G., L. T. Contardi, R. Dumroese K., J. A. Enricci, R. Escobar R., H. E. Gonda, D. Jakobs F., T. Landis D., T. Luna., J. Mexal G. y K. Wilkinson M. Producción de Planta en Viveros Forestales. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires, Argentina. pp: 151-152.
- Grossnickle, S. C. 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests* 30: 273–294.
- Haywood, D. J., S. S. Sung and S. M. A. Sword. 2012. Copper root pruning and container cavity size Influence longleaf pine growth through five growing seasons. *Southern Journal of Applied Forestry* 36(3): 146–151.
- Landis, T. D., R. W. Tinus, S. E. Mc Donald and J. P. Barnett. 1990. Containers and Growing Media, Vol. 2. The Container Tree Nursery Manual. Agricultural Handbook 674. USDA, Forest Service. Washington, DC. 88 p.
- Landis, T. D. 2005. Sidelist or airtlist containers. Summer Forest Nursery Notes. USDA, Forest Service. Washington, DC. USA. pp: 17-19.
- Landis, T. D. 2010. Managing surplus or holdover nursery stock. *Forest Nursery Notes* 30: 10–12.
- Landis, T. D., T. Luna and R. K. Dumroese. 2014. Containers. *In*: K. M. Wilkinson, T. D. Landis, D. L. Haase, B. F. Daley and R. K. Dumroese. Tropical Nursery Manual. Agriculture Handbook 732. USDA, Forest Service. Washington, DC. pp: 123-139.

- Mattsson, A. 2005. Regeneration practices in Scandinavia: State-of-the-art and new trend. *In: The Thin Green Line: A Symposium on the State-of-the-Art in Reforestation*. Ontario Forest Research Institute, Ontario Ministry of Natural Resources. ON, Canada. pp: 25-30.
- Regan J., D., K. G. Apóstol and A. S. Davis. 2015. Stocktype influences western white pine seedling size 6 years after outplanting. *Tree Planters' Notes* 58(1): 37-41.
- Ritchie G. A., T. D. Landis, R. K. Dumroese and D. L. Haase. 2010. Evaluation the quality plant. *In: T. D. Landis, R. K. Dumroese and D. L. Haase. Container Tree Nursery Manual Vol 7. Seedling Processing, Storage, and Outplanting*. Agricultural Handbook 674. USDA, Forest Service, Washington, D.C. pp. 3–15.
- Sánchez A., H., A. Aldrete, J. J. Vargas H. y V. M. Ordaz C. 2016. Influencia del tipo y color de charola en el desarrollo de plantas de pino en vivero. *Agrociencia* 50: 481-492.
- Sánchez V., O., V. M. Cetina A., M. A. López L. y L. I. Trejo T. 2017. Efecto del sistema de producción de *Pinus greggii* Engelm. var. *australis* en vivero sobre su desarrollo morfofisiológico en campo. *Agroproductividad* 10(8): 59–64.
- South, D. B., J. Shelton and S. A. Enebak. 2001. Geotropic lateral roots of container-grown longleaf pine seedlings. *Native Plants Journal* 2(2): 126-130.
- South, D. B., S. W. Harris, J. P. Barnett, M. J. Hains and D. H. Gjerstad. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, USA. *Forest Ecology and Management* 204: 385-394.
- SAS Institute (Statistical Analysis System). 2002. The SAS system for Windows. Release versión 9.0. Cary, NC, USA.
- Sung, S. S. and K. R. Dumroese. 2013. Root system architecture: the invisible trait in: container longleaf pine seedlings. *Proceedings. RMRS-P-69* USDA, Forest Service. pp: 26-31.
- Sung, S. S. and J. D. Haywood. 2016. Air lateral root pruning affects longleaf pine seedling root system morphology. *In: C. J. Schweitzer, W. K. Clatterbuck and C. M. Oswalt,*

eds. 2016. Proceedings of the 18th biennial southern silvicultural research conference. E-Gen. Tech. Rep. SRS–212. USDA, Forest Service. Asheville, NC. pp: 317-322.

Tsakalimi, N. M. and P. P. Ganatsas. 2006. Effect of chemical root pruning on stem growth, root morphology and field performance of the mediterranean pine *Pinus halepensis* Mill. *Scientia Horticulturae* 109: 183–189.

CAPÍTULO III. CRECIMIENTO, NUTRICIÓN Y ACUMULACION DE COBRE EN PLANTAS DE *Pinus patula* SCHIEDE EX SCHLTDL. et CHAM. CON PODA RADICAL QUÍMICA

Manuel Aguilera Rodríguez, MC.

Colegio de Postgraduados, 2019.

RESUMEN

El cobre (Cu) adherido a las paredes de las cavidades de las charolas poda los ápices de las raíces laterales de las plantas e impide su crecimiento envolvente o al interior de las paredes de las cavidades. El objetivo del presente estudio fue evaluar el crecimiento de *Pinus patula* y la acumulación de N, P, K y Cu al utilizar diferentes tipos de charola con recubrimiento de Cu. Se probaron dos tipos de charolas de plástico (P-54 y T-42) y una de poliestireno (PS-77), todas con cavidades de 170 cc; la mitad de éstas se impregnó con una solución plástica con 7 % de $\text{Cu}(\text{OH})_2$, para propiciar la poda radical. Se utilizó un sustrato de aserrín de pino, perlita, vermiculita y turba (60, 20, 10 y 10 % en volumen), con 8.0 g L^{-1} de Osmocote® Plus 15-9-12 + ME (8-9M), más 1.0 g L^{-1} de Micromax®. A los siete meses, la planta producida en charolas PS-77 presentó valores morfológicos mayores que los de la producida en charolas P-54 y T-42. La planta sin poda desarrolló valores significativamente mayores en diámetro (4.17 vs. 4.02 mm), altura (27.89 vs. 25.99 cm), peso seco de raíz (1.28 vs. 0.98 g), índice de robustez (6.74 vs. 6.53 cm mm^{-1}), índice de calidad de Dickson (0.48 vs. 0.41) y raíces laterales envolventes mayores (3.53 vs. 0.30) que la planta con poda. En ambos tratamientos la planta acumuló en el follaje contenidos de N, P, K y Cu dentro de los valores recomendados para la especie; sin embargo, en raíz la planta con poda acumuló diez veces más Cu que la planta sin poda (190.2 vs. 19.8 mg kg^{-1}).

Palabras clave: Acumulación de Cu; arquitectura radical, Hidróxido de cobre, vivero.

**GROWTH, NUTRITION AND COPPER ACUMULATION IN *Pinus patula*
SCHIEDE EX SCHLTDL. et CHAM SEEDLINGS WITH CHEMICAL ROOT
PRUNING**

ABSTRACT

Copper (Cu) attached to the cavity walls of the tray prunes the apexes of the lateral roots of seedlings and prevents their enveloping or inside-the-cavity-walls growth. The objective of this study was to evaluate the growth of *Pinus patula* seedlings and the accumulation of N, P, K and Cu when using different types of Cu-coated trays. Two types of plastic trays (P-54 and T-42) and one polystyrene (PS-77) type were tested, all with 170 cc cavities; half of these were impregnated with a plastic 7 % Cu(OH)₂ solution, to promote lateral root pruning. A substrate of pine sawdust, perlite, vermiculite and peat (60, 20, 10 and 10 % by volume) was used, with 8.0 g L⁻¹ of Osmocote® Plus 15-9-12 + ME (8-9M), plus 1.0 g L⁻¹ of Micromax®. After seven months, seedlings produced in PS-77 trays had morphological values higher than those produced in P-54 and T-42 trays. The non-pruned seedlings showed significantly higher values in diameter (4.17 vs. 4.02 mm), height (27.89 vs. 25.99 cm), root dry weight (1.28 vs. 0.98 g), robustness index (6.74 vs. 6.53 cm mm⁻¹), Dickson quality index (0.48 vs. 0.41), and enveloping lateral roots (3.53 vs. 0.30) than root-pruned seedlings. In both treatments seedlings accumulated N, P, K and Cu in the foliage within the range of values recommended for the species; however, in the root, chemically pruned seedlings accumulated Cu ten times as much as the non-pruned seedlings (190.2 vs. 19.8 mg kg⁻¹).

Keywords: Copper accumulation, copper hydroxide, radical architecture.

INTRODUCCIÓN

El cobre (Cu) es un elemento esencial para las plantas; es constituyente y activador de enzimas, participa en la fotosíntesis, la conversión de fotosintatos a macromoléculas y en el proceso de fijación de N por microorganismos simbiotes (De Almeida *et al.*, 2007; Broadley *et al.*, 2012). El contenido normal de Cu en el follaje de las plantas de coníferas producidas en contenedores (charolas), puede variar de 4 a 20 mg kg⁻¹ (Landis, 1985). Niveles inferiores pueden inducir deficiencias de N y Fe, reducir la biomasa total y la producción de polen, frutos y semillas; niveles superiores inhiben el crecimiento de los ápices de las raíces, generan crecimientos retorcidos de acículas, yemas y tallos, e incluso la muerte de los ápices de las hojas o de las plántulas (Landis y Steenis, 2000; Crawford, 2003; De Almeida *et al.*, 2007).

Desde la década de 1960, a nivel internacional, en los viveros forestales se utiliza la técnica de impregnar las cavidades de producción de las charolas (contenedores) con soluciones plásticas de Cu, para inhibir o podar químicamente el crecimiento de los ápices de las raíces laterales (RL), al hacer contacto con las paredes de las cavidades. La planta con este tipo de poda desarrolla una arquitectura conformada por un eje central (raíz principal), con múltiples raíces laterales cortas en todas sus caras, con una longitud igual o menor a la mitad del diámetro de la cavidad, similar a un escobillón; ya en campo, estas raíces laterales reinician su crecimiento normal en sentido horizontal, confiriendo a la planta mayor supervivencia y desarrollo que las plantas producidas en charolas sin recubrimiento de Cu, en las cuales las raíces laterales crecen hacia abajo y hacia los lados, envolviendo al cepellón (Landis *et al.*, 1990; Escobar, 2012; Landis *et al.*, 2014b).

En México la producción masiva de planta en charolas se inició en 1993, con charolas Copperblock[®] importadas de Canadá (Burney *et al.*, 2015). En la misma década, varias empresas nacionales iniciaron la producción de charolas de poliestireno y de plástico, lo cual contribuyó al cambio de sistema tradicional de producción en bolsas de polietileno a charolas. En 2016, 93 % de la planta para restauración de áreas forestales perturbadas, a cargo de la Comisión Nacional Forestal, se produjo en charolas de esos materiales (CONAFOR, 2017).

A la fecha, en los viveros forestales de México sólo las charolas de poliestireno se impregnan con soluciones de cobre, principalmente para prevenir que las raíces se incrusten

en las paredes de las cavidades. En algunos viveros se utiliza, con buenos resultados, una solución propuesta por Aldana y Aguilera (2003), elaborada con 10 L de agua, 4 L de sellador acrílico y 1 kg de hidróxido de cobre comercial en polvo con una concentración 77 % de hidróxido. Las charolas de plástico no se impregnan en ningún vivero debido a que aún no existe interés en las instancias gubernamentales que contratan producción de planta, o de los dueños de los predios para utilizar planta con poda radical. Por otra parte, los trabajos de investigación encaminados a mostrar las bondades de la poda radical son incipientes, sólo se registran dos estudios con *Pinus greggii* Engelm. producido en bolsas y en charolas de plástico impregnadas con un producto comercial que contiene 7 % de hidróxido de cobre (*Spin out*[®]); en ambos casos se reporta la obtención de planta de calidad, con sistemas radicales fibrosos y sin deformaciones (Barajas *et al.*, 2004; Aldrete *et al.*, 2005).

Contrario a lo que sucede en los viveros de México, en otros países las charolas de plástico se impregnan con soluciones de cobre de manera normal, ya sean comerciales o caseras (Escobar, 2012); estas soluciones se caracterizan por contener más de 75 % de sellador acrílico, para mantener el recubrimiento debidamente adherido al plástico durante uno o más ciclos de producción (Pardos *et al.*, 2001; Tsakalimi y Ganatsas 2006).

En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la poda radical química en el crecimiento y en la acumulación de N, P, K y Cu por parte de *Pinus patula*, al ser producido en tres tipos de charola con cavidades de 170 cc (charola de plástico de 54 cavidades P-54, charola de poliestireno de 77 cavidades PS-77 y charola de rejilla con 42 tubetes de plástico intercambiables T-42). De manera complementaria, mensualmente se midió el contenido de cobre en lixiviados por tipo de charola, para estimar las posibles pérdidas de este elemento.

La hipótesis planteada fue que la planta producida en charolas de poliestireno y de plástico con tratamiento para propiciar la poda radical química de las raíces laterales, desarrolla características morfológicas y acumulación de N, P, K inferiores a la planta sin poda, aunque sin raíces laterales envolventes y sin problemas de toxicidad por la acumulación de Cu.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

La planta se produjo durante los meses de marzo a octubre de 2018 en el vivero del Postgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, ubicado a 19° 28' 26" LN, 98° 53' 24" LO, a una altitud de 2,240 m. El clima de la zona es tipo C (Wo) (w) b (1) g', templado subhúmedo con lluvias en verano, con precipitación promedio anual de 750 mm y temperatura media anual de 15.5 °C (García, 2004). La planta se produjo en un invernadero con estructuras de protección de 5 m de alto, con cubierta plástica cenital y malla plástica lateral, mesas porta-charolas metálicas de 1.1 m de alto y 1.50 m de ancho y con riego manual.

Establecimiento del ensayo

Se probaron tres tipos de charolas: a) charola de plástico de color negro con 54 cavidades fusionadas (P-54); b) charola de poliestireno expandido de color blanco con 77 cavidades fusionadas (PS-77); y c) rejilla con patas con 42 tubetes de plástico intercambiables de color negro (T-42). Las características de estas charolas y las dimensiones de sus cavidades se describen en el Cuadro 1.

Cuadro 3.1. Características de tres charolas utilizados para producir planta de *Pinus patula*.

Tipo	Dimensiones (cm)			Plantas por m ²	Cavidades			Fabricante
	Ancho	Largo	Alto		DS (mm)	Altura (cm)	Volumen (cc)	
P-54	30.8	50	13.8	348	4.8	13.8	170	A
PS-77	35	60	15.2	366	4.3	15.2	170	B
T-42	37.3	37.5	23.4	298	4.8	13.8	170	A

DS: diámetro superior, A: Innovaciones Industriales y Forestales, S.A. de C.V. Azcapotzalco, Edo. De México, B: Aislantes y Empaques, S.A. de C.V., Guadalajara, Jal.

La mitad de cada tipo de charola se impregnó manualmente con una solución plástica con 7.0 % de hidróxido de cobre comercial, aplicada al interior de sus cavidades mediante el procedimiento siguiente: a) en un recipiente de plástico se vertieron 200 mL de agua caliente a 80 °C (15.5 %) y 90 g de hidróxido de cobre comercial en polvo con una concentración de 77 % de hidróxido, de la marca Hidromet® (7.0 %); b) una vez disuelto el hidróxido, se adicionó 1 L de sellador vinil-acrílico 5 x 1 de la marca Comex® (77.5 %); c) después de combinar los ingredientes, se impregnaron las cavidades de las charolas con brochas de 1 cm de ancho. Concentraciones de hidróxido de cobre similares se reportan como apropiadas para propiciar una adecuada poda radical en especies del género *Pinus* producidas en charolas de plástico y de poliestireno (Aldrete *et al.*, 2005; Aguilera *et al.*, 2016b).

El sustrato utilizado se preparó con aserrín de *Pinus patula* sin compostar, perlita, vermiculita y turba de musgo en proporción 60, 20, 10 y 10 %, en volumen, respectivamente. Las características físico-químicas de la mezcla se determinaron en el laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, con los siguientes valores: porosidad de aireación 33 %; pH = 4.8 y CE = 0.1 dS m⁻¹. Estos valores se reportan como apropiados para producir planta de especies forestales en charolas (Prieto *et al.*, 2012; Landis *et al.*, 2014a).

Durante la preparación del sustrato se agregaron 8.0 g L⁻¹ de fertilizante de liberación controlada Osmocote® Plus 15-9-12 + ME (microelementos) de 8-9 meses de liberación (a 21 °C, según etiqueta del envase), más 1.0 g L⁻¹ de fertilizante de liberación lenta Micromax®, con el siguiente contenido: Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn, 6.00, 3.00, 12.00, 0.10, 1.00, 17.00, 2.50, 0.05, 1.00 %. Ambos fertilizantes son fabricados por la empresa Everris ILC Fertilizer Company, USA.

La siembra se realizó en la primera semana de marzo de 2018, con semilla recolectada en el ejido Llano Grande, Chignahuapan, Pue. Previo a la siembra, la semilla se remojó en agua durante 24 h, con cambio de agua cada 6 h, se desinfectó durante 30 min en solución con 10 % de agua oxigenada comercial y se impregnó con 1.0 g kg⁻¹ de Bactiva® (microorganismos benéficos). La siembra se hizo en forma manual colocando dos semillas por cavidad. Una semana después de la germinación se removieron las plántulas excedentes y se conservó la más vigorosa en cada cavidad. De marzo a mayo las plantas permanecieron al interior del invernadero y de junio a octubre a la intemperie. La temperatura media mensual para el

período marzo-junio, al interior del vivero, fue de 22.1, 26.2, 27.5 y 25.5 °C, y para el período julio-octubre, a la intemperie, fue de 17.6, 16.2, 16.6 y 16.1 °C, respectivamente.

Variables evaluadas

Crecimiento e índices de calidad

La planta se evaluó siete meses después de la siembra, durante la primera semana de octubre de 2018. De la parte central de cada charola se extrajeron 15 plantas en forma aleatoria, para un total de 60 plantas por tratamiento. Las raíces se lavaron con agua hasta remover todo el sustrato adherido a ellas. A cada planta se le midió la altura del tallo (A), el diámetro del cuello (D) y el número de raíces laterales gruesas envolventes (RLE), con diámetro ≥ 1 mm de grosor y con longitud mayor a 15 cm (la longitud del envase). La raíz y el tallo de cada planta se colocaron por separado en bolsas de papel de estraza y se secaron en horno eléctrico a 70 °C, durante 72 h. Posteriormente se registró el peso seco de la raíz (PSR) y de la parte aérea (PSA) con una báscula digital, con precisión de 0.01 g; con ambos pesos se calculó el peso seco total (PST). Con estos datos se calcularon los siguientes parámetros de calidad para cada planta: índice de robustez IR (A/D); relación PSA/PSR e índice de calidad de Dickson ICD = $[PST / (IR + PSA/PSR)]$.

Concentración de N, P, K, Cu

Para determinar la concentración de nutrientes acumulados en las plantas, el total de raíces, tallos y hojas secas de las 60 plantas muestreadas en cada tipo de contenedor, con y sin recubrimiento de Cu, se trituraron y se pulverizaron en un molino de martillos con criba de 1.0 mm de diámetro. A partir de estas muestras se determinó la concentración de nutrientes en cuatro repeticiones por sección de la planta, en el laboratorio de nutrición vegetal Salvador Alcalde Blanco del Colegio de Postgraduados. El N se determinó por el método semi-micro-Kjeldahl (Bremner, 1965), con ácido sulfúrico-salicílico para la digestión. La concentración de P, K y Cu se determinó en el extracto resultante de la digestión húmeda de material vegetal seco con ácido sulfúrico, ácido perclórico y peróxido de hidrógeno (1.3:0.7:1, en volumen), de acuerdo con Alcántar y Sandoval (1999). Los extractos fueron leídos en un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma (Marca Agilent 725 Series ICP-OES).

Lixiviados de Cu

A partir de la siembra, durante la primera semana de cada mes se recolectó agua drenada de las charolas, para determinar su contenido de Cu en el lixiviado, producto de la disolución del recubrimiento y de los fertilizantes aplicados. Para obtener estos extractos, primero se regaron las charolas hasta saturar el sustrato y después se aplicó 30 mL de agua a cada cavidad; treinta minutos después se mezcló el lixiviado de las cuatro charolas de cada tipo de contenedor. De cada lixiviado se colocó una muestra de 100 mL en frascos de vidrio de color oscuro. Para mantener estables las muestras de lixiviados, se acidificaron con ácido nítrico hasta alcanzar un valor de pH de 2 (NMX-AA-051-SCFI-2001); posteriormente se filtraron y se determinó la concentración de Cu, empleando un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma (Marca Agilent 725 Series ICP-OES).

Diseño experimental y análisis estadístico

El ensayo se estableció con un arreglo factorial 3 x 2 en un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones. El factor 1 estuvo constituido por el tipo de charola con tres niveles (P-54, PS-77 y T-42) y el factor 2 por el tratamiento de poda química, con dos niveles (sin y con poda). La unidad experimental fue una charola con sus respectivas cavidades. Para identificar las diferencias estadísticas entre tratamientos, se realizó un análisis de varianza para cada variable de respuesta con el procedimiento GLM; para aquellas variables en las que se obtuvieron diferencias, se hizo una prueba de comparación múltiple de Tukey con una probabilidad de 0.05, ambos análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS versión 9.0 (SAS, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento de las plantas

La poda radical indujo que las plantas presentaran diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en todas las variables evaluadas, excepto en el peso seco aéreo. El tipo de contenedor solo tuvo efecto significativo ($p \leq 0.05$) en diámetro, altura, peso seco aéreo, relación parte aérea/raíz e

índice de robustez (Cuadro 2). La interacción contenedor × poda radical, sólo tuvo efecto significativo (<0.024) en el número de raíces laterales envolventes. Los valores medios de las características evaluadas fueron de mayor a menor, para los charolas PS-77, P-54 y T-42, respectivamente: Sin embargo, las plantas de los charolas T-42 presentaron valores cualitativos en el índice de robustez y relación parte aérea/raíz superiores a los de las charolas PS-77 y P-54. Las plantas producidas con poda radical presentaron valores promedio de diámetro, altura, peso seco radical, relación parte aérea/raíz e índice de calidad de Dickson inferiores a las plantas sin poda; en cambio, desarrollaron un mejor índice de robustez y sólo 0.3 raíces laterales envolventes por planta, comparado con la planta sin poda radical, la cual desarrolló en promedio 3.5 raíces de este tipo (Cuadro 2 y Figura 1).

Cuadro 3.2. Valores medios y de significancia de las variables evaluadas en *Pinus patula* a los siete meses de edad, en respuesta al tipo de contenedor y poda radical.

Fuente de variación	D (mm)	A (cm)	PSA (g)	PSR (g)	IR	PSA /PSR	ICD	RLE
a) Tipo de contenedor								
P-54	4.08 b	27.26 b	2.79 b	1.13 a	6.74 b	2.60 a	0.43 a	1.86 a
PS-77	4.19 a	28.58 a	2.99 a	1.13 a	6.93 a	2.71 a	0.45 a	1.95 a
T-42	4.01 b	24.99 c	2.56 c	1.14 a	6.25 c	2.33 b	0.45 a	1.93 a
<i>p</i>	<0.015	<0.001	<0.002	<0.943	<0.009	<0.001	<0.324	<0.707
b) Poda radical								
Sin Poda	4.17 A	27.89 A	2.85 A	1.28 A	6.74 A	2.27 B	0.48 A	3.53 A
Con Poda	4.02 B	25.99 B	2.71 A	0.98 B	6.53 B	2.83 A	0.41 B	0.30 B
<i>p</i>	<0.003	<0.001	<0.107	<0.001	<0.001	<0.046	<0.001	<0.001
VR	≥ 4.0	15-30			≤ 7.5	1.5-2.5	≥ 4	0.0

Letras diferentes en una columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

D: diámetro del tallo; A: altura del tallo; PSR: peso seco radical; PSA: peso seco aéreo; IE: índice de robustez; ICD: índice de calidad de Dickson; RLE: raíces laterales gruesas envolventes. P-54: charolas de plástico con 54 cavidades, PS-77: charola de poliestireno con 77 cavidades, T-42: rejilla con 42 tubetes de plástico, *P* = probabilidad, VR: valores recomendados (Prieto y Sáenz 2011; SE, 2016).

De conformidad con la norma mexicana para la certificación de viveros (SE, 2016a) y a la metodología para calificar la calidad de planta de especies nativas del género *Pinus* producida en contenedor, propuesta por Prieto y Sáenz (2011), todas las plantas producidas desarrollaron D, A, IE e ICD con calidad apropiada para plantación. La relación PSA/PSR resultó ligeramente arriba del intervalo recomendado en las plantas producidas en las charolas P-54 y PS-77, así como en el conjunto de plantas con poda radical química.

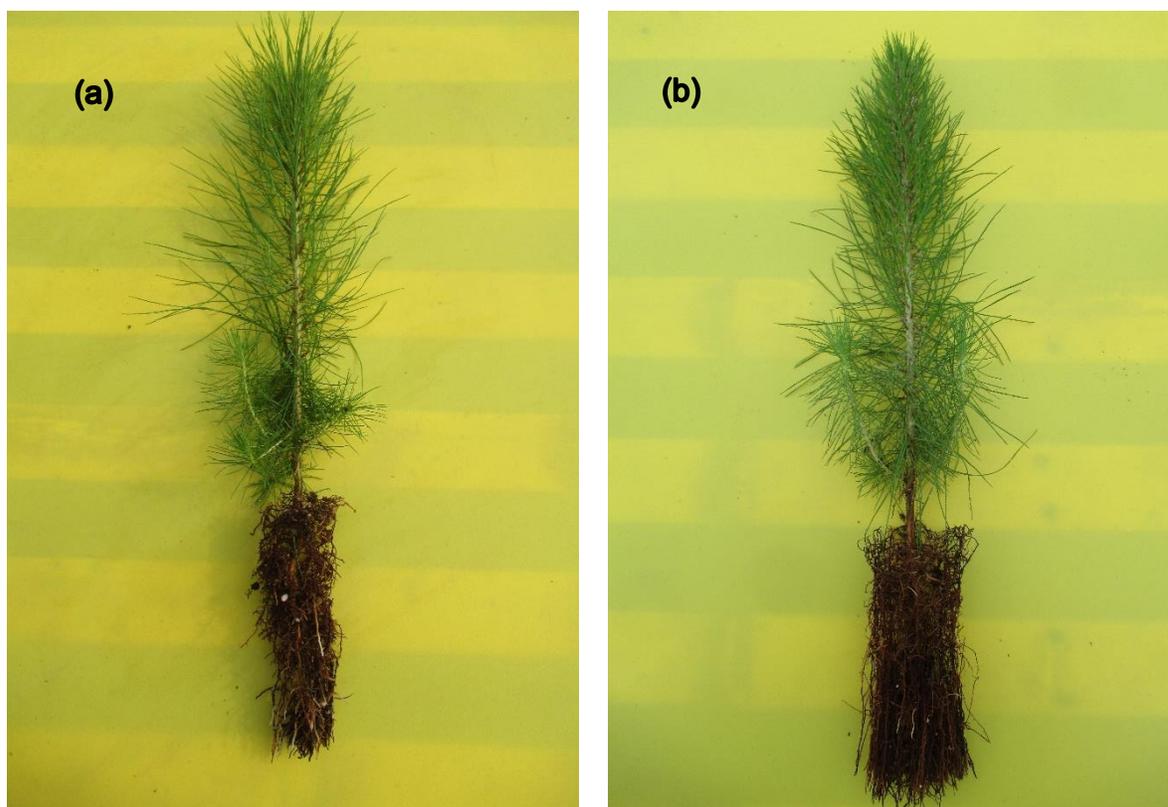


Figura 3.1. Planta de *Pinus patula* de siete meses de edad, producida con poda (a) y sin poda (b) química de raíz.

En las charolas de poliestireno, el grosor de la pared y el color blanco, permiten mantener la temperatura del sustrato más estable que en las charolas de plástico en viveros con temperaturas extremas (Landis *et al.*, 2014b), y por consecuencia, las plantas presentan un mejor desarrollo tanto radical como aéreo. En algunos viveros donde se utilizan charolas de plástico de color negro, la temperatura del sustrato puede alcanzar niveles letales para la raíz de las plantas, sobre todo las cavidades ubicadas en la periferia de las mesas o secciones de producción (Luna *et al.*, 2009; Markham *et al.*, 2011).

Sánchez *et al.* (2016) determinaron que el ICD de plantas de *Pinus greggii* y *Pinus oaxacana* Mirov. en charolas de rejilla con 25 tubetes de plástico de 220 cc (RT-25) resultó superior en las charolas de color blanco que en las negras. El efecto del color puede ser más notorio en cavidades o macetas de mayor tamaño; Markham *et al.* (2011) produjeron plantas de *Acer rubrum* L. en macetas de plástico de color negro y blanco brillante de 8.7 L; las plantas producidas en las macetas blancas desarrollaron diámetro, altura y densidad radical (mg cm^{-3}) 67, 79 y 149 % superiores a las plantas producidas en las macetas negras. Estos resultados se atribuyen a que durante el periodo de producción la temperatura del sustrato en las macetas blancas fue 3.8 °C menor que en las de color negro.

En estudios donde se comparan charolas con y sin recubrimiento de cobre se ha encontrado que la planta con poda radical puede presentar mayor o menor crecimiento que las plantas sin poda; esas diferencias pueden ser atribuidas a varios factores como el crecimiento natural de la especie, el diseño y la capacidad volumétrica de las cavidades de producción, la solución de Cu utilizada, la técnica de impregnación, las condiciones ambientales del vivero, el tipo de sustrato y fertilizantes utilizados, así como la edad de la planta al momento de la evaluación (Aldrete *et al.*, 2005; South *et al.*, 2016).

En charolas con cavidades de baja capacidad volumétrica, las diferencias pueden ser poco notorias. Por ejemplo, en un estudio realizado por Regan *et al.* (2015) con *Pinus monticola* Douglas ex D. Don. en charolas de poliestireno de 80 y 130 cc, con y sin recubrimiento de Cu (Copperblok[®] y Superblock[®]), se encontró que a los 8 meses de edad, la planta de ambas charolas no presentó diferencias significativas en diámetro y en altura; la diferencia se observó cinco años después de la plantación donde la planta con poda fue superior a la planta sin poda en altura y diámetro (133.5 vs 120.5 cm y 35.2 vs 32.5 mm). En cambio, en dos estudios realizados en *Pinus palustris* Mill. (especie con crecimiento cespitoso), con charolas Copperblock[®] y Styroblock[®], con cavidades de 60, 93, y 170 cc (Sung *et al.*, 2010) y 60, 108 y 170 cc (Sword *et al.*, 2011) no se encontraron diferencias significativas en el diámetro a los 5.5 meses de edad entre las plantas con y sin poda radical. De la misma manera, Fernández *et al.* (2007) no encontraron efectos significativos de la poda química en A, PSR y PSA de plantas de siete meses de edad de *Eucalyptus globulus* Labill. producidas en tubetes de plástico de 125 cc impregnados con una solución plástica de 2.5 % de $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$; sólo

el diámetro fue mayor en las plantas con poda. Aldrete *et al.* (2005) encontraron que las plantas de *Pinus greggii* var. *australis* Donahue & López producidas en charolas de plástico con cavidades de 120 cc con poda radical (recubrimiento de cobre Spin Out[®], 7.1 % de hidróxido de Cu) presentaron, a los seis meses de edad, mayor A, D y PSA que las plantas sin poda, pero no hubo diferencias significativas en PSR.

En contraste, cuando la producción se realiza en recipientes de mayor capacidad volumétrica, las plantas con poda radical pueden desarrollar tallas y pesos secos notoriamente superiores, ya que al desarrollar sistemas radicales más fibrosos, logran una mayor absorción del agua y nutrientes aplicados, en comparación con las plantas sin poda radical. Tsakaldimi y Ganatsas (2006) muestran que las plantas de *Pinus halepensis* Mill. producidas en charolas de plástico con cavidades de 650 cc impregnadas con una solución plástica de 3.3 % de $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, presentan, a los ocho meses después de la siembra, valores de A, D, PSR e ICD que son 40 %, 37 %, 42 % y 74 % mayores que en las plantas sin poda química; además, las plantas con poda emitieron 22 % más raíces laterales con diámetro igual o mayor a 0.2 mm. Por su parte, Aldrete *et al.* (2002) mencionan que la planta de *Pinus pseudostrobus* Lind. y *Pinus montezumae* Lamb. producida en bolsas de polietileno de 1.5 L con recubrimiento de cobre comercial (Spin Out[®]) presentó a los siete y ocho meses de edad, respectivamente, valores en diámetro del tallo y peso seco radical mayores en 29 y 43 % (*P. pseudostrobus*) y 14 y 10 % (*P. montezumae*) a los de la planta sin poda química.

Acumulación de N, P y K

El tipo de contenedor tuvo efecto significativo ($p \leq 0.05$) en la acumulación de nutrientes, excepto en la acumulación de K en la raíz. La capacidad térmica de las charolas influyó en la acumulación de nutrientes, ya que las plantas producidas en las charolas PS-77 asimilaron mayor cantidad de N, P, K ($p \leq 0.05$) que en las producidas en las charolas P-54 y T-42, excepto K en las hojas (Cuadro 3). La planta con poda radical acumuló mayor cantidad de P y K en tallo y raíz que la planta sin poda, pero no hubo diferencias significativas en la acumulación de N ni en la acumulación de P y K en el follaje (Cuadro 3). Todas las plantas producidas presentaron concentraciones de N, P, K en el follaje dentro de los intervalos recomendados por Prieto y Sáenz. (2011) y Landis (1985) para especies nativas del género *Pinus* y coníferas de Norteamérica, producidas en charolas.

Cuadro 3.3. Valores medios y significancia de la concentración de nutrientes en plantas de *Pinus patula* de siete meses de edad en respuesta al tipo de contenedor y poda radical.

Fuente de Variación	N (%)			P (%)			K (%)		
	Acícula	Tallo	Raíz	Acícula	Tallo	Raíz	Acícula	Tallo	Raíz
a) Tipo de contenedor									
P-54	1.31 b	1.01 b	0.89 b	0.24 b	0.21 b	0.25 c	0.79 a	0.73 b	0.67 a
PS-77	1.45 a	1.13 a	0.97 a	0.26 a	0.24 a	0.30 a	0.74 b	0.77 a	0.67 a
T-42	1.36 b	1.12 a	0.97 a	0.23 b	0.24 a	0.28 b	0.79 a	0.77 a	0.69 a
<i>P</i>	<0.001	<0.010	<0.024	<0.005	<0.001	<0.001	<0.038	<0.014	<0.593
b) Poda radical									
Sin Poda	1.36 A	1.11 A	0.92 A	0.24 A	0.22 B	0.26 B	0.77 A	0.73 B	0.64 B
Con Poda	1.38 A	1.07 A	0.96 A	0.25 A	0.24 A	0.29 A	0.78 A	0.78 A	0.72 A
<i>P</i>	0.253	0.297	0.079	0.394	0.001	0.001	0.532	0.001	0.001
Valor R	1.3-3.5			0.2-0.6			0.7-2.5		

Letras diferentes en una columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). P-54: charolas de plástico con 54 cavidades, PS-77: charola de poliestireno con 77 cavidades, T-42: rejilla con 42 tubetes de plástico, *P* = probabilidades límites en ANOVA, Valor R: valores recomendados en acículas (Landis, 1985; Prieto y Sáenz, 2011).

En tres estudios equiparables al presente, donde también se utilizó sustrato con aserrín nuevo de pino como insumo predominante, combinado con 8 g L⁻¹ de Osmocote® Plus 15-9-12 + ME de 8 a 9 meses de liberación, se reportan concentraciones de N, P, K en acículas ligeramente más bajas que los encontrados aquí. Aguilera *et al.* (2016a) reportan valores de 1.19, 0.15 y 0.30 % de N, P y K a los once meses de edad en plantas de *Pinus montezumae* producidas en charolas S-77 con recubrimiento de cobre. Castro *et al.* (2018) encontraron niveles de 1.10, 0.19 y 0.34 % de N, P y K a los siete meses de edad en plantas de *Pinus greggii* var. *australis* producidas en tubetes de plástico de 230 cc González *et al.* (2018) reportan valores de 1.0, 0.2 y 1.0 % de N, P y K en plantas de *Pinus cooperi* C. E. Blanco de nueve meses de edad, producidas en charolas PS-77 con recubrimiento de Cu. Sin embargo,

en los estudios anteriores la determinación de estos nutrientes se hizo en muestras de cinco fascículos tomados de la parte media de los tallos de las plantas y el análisis de laboratorio se hizo con sólo una repetición en los dos primeros casos y con tres en el último, lo cual pudo haber influido en los valores reportados.

Acumulación de Cu

El tipo de contenedor tuvo efecto significativo ($p \leq 0.05$) en la acumulación de Cu en la raíz; la planta producida en charolas de plástico P-54 y T-42 acumuló mayor cantidad que la producida en charola de poliestireno PS-77 (107.7, 107.5 vs. 99.8 mg kg⁻¹); en cambio, en las acículas y en los tallos las diferencias no tuvieron un patrón definido (Figura 2a). El tratamiento de poda química también tuvo un efecto significativo ($p \leq 0.05$) en la acumulación de Cu; la concentración de este elemento en acículas, tallo y raíz, fue mayor en las charolas con recubrimiento (Figura 2b). La planta con y sin poda radical presentó una concentración de Cu en follaje y tallo dentro del intervalo recomendado por Landis (1985) para especies de coníferas (4 a 24 mg kg⁻¹); sin embargo, la concentración de Cu (190.2 mg kg⁻¹) en la raíz de las plantas con poda química fue casi ocho veces mayor al valor máximo recomendado (Figura 2b).

A pesar de la excesiva acumulación de Cu en la raíz, las plantas no mostraron signos visibles de daños por toxicidad, con excepción de un menor crecimiento. Tsakaldimi y Ganatsas (2006) encontraron resultados similares en plantas de *Pinus halepensis* Mill. producidas en charolas de plástico impregnadas con una solución de Cu CO₃.Cu(OH)₂. En las plantas con poda se registró una concentración de Cu de 12 y 168 mg kg⁻¹ en la parte aérea y en la raíz, en comparación con 10 y 25 mg kg⁻¹, respectivamente, en las plantas sin poda. En ese estudio tampoco se reportan síntomas de toxicidad por la alta acumulación de Cu en la raíz.

Landis y Steenis (2000) y Crawford (2003) señalan que las coníferas de Norte América producidas en contenedor pueden acumular en la raíz cantidades de Cu varias veces superior a la acumulada en las acículas, sin mostrar signos de toxicidad. Estos valores pueden explicarse por el hecho de que las plantas en su proceso evolutivo han desarrollado diversos mecanismos de tolerancia a los elementos metálicos, como la acumulación de metales en la

raíz para evitar su translocación a la parte aérea, la excreción de compuestos quelatantes para reducir la disponibilidad del metal en el suelo o en el agua, y la absorción selectiva de elementos metálicos (De Almedia *et al.*, 2007, Wan *et al.*, 2019).

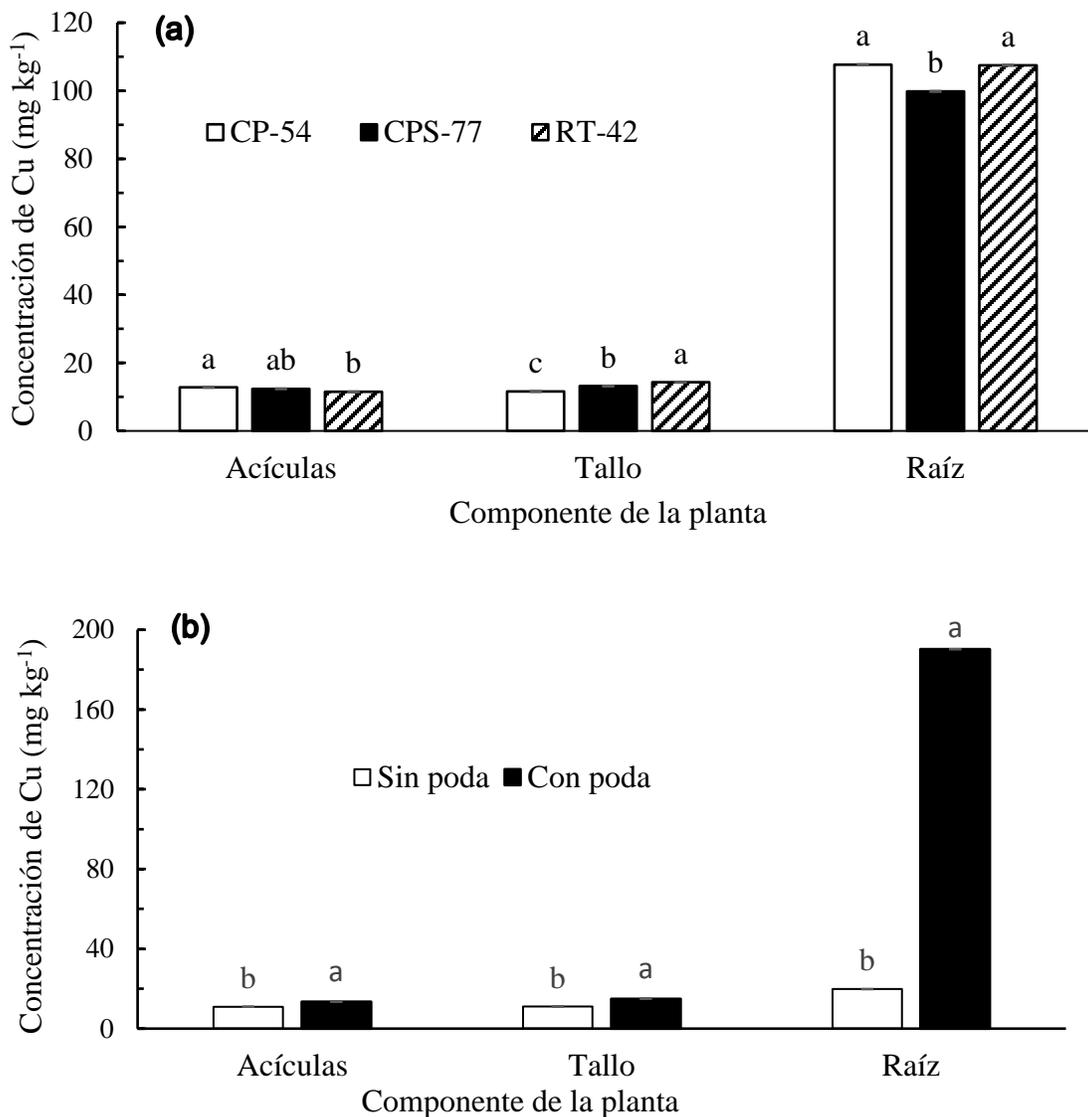


Figura 3.2. Efecto del tipo de envase (a) y de la poda química (b) en la acumulación de Cu en los componentes estructurales de la planta.

Contenido de Cu en lixiviados

El contenido de Cu en los lixiviados recolectados fue notoriamente superior en las charolas con recubrimiento de Cu, respecto de los lixiviados recolectados en las mismas

charolas sin recubrimiento. Por tipo de charola, el contenido de Cu en lixiviados fue de mayor a menor, en las charolas T-42, P-54 y PS-77, lo cual es atribuido a la capacidad térmica de cada tipo de charola. El incremento y descenso de la concentración de Cu en los lixiviados de cada mes fue afectado por la temperatura que se presentó al interior del invernadero durante los meses de marzo a junio y al colocar las charolas a la intemperie, durante julio a octubre, como se describe en el Cuadro 4.

Cuadro 3.4. Contenido de Cu (mg L^{-1}) en lixiviados recolectados mensualmente durante el ciclo de producción de *Pinus patula* en tres tipos de charola con y sin recubrimiento de Cu.

FV	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.
Sin cubierta de Cu								
P-54	0.064	0.423	0.835	1.035	0.487	0.158	0.135	0.113
PS-77	0.069	0.325	0.720	0.984	0.210	0.098	0.092	0.088
T-42	0.075	0.489	0.844	1.052	0.530	0.161	0.141	0.123
Promedio	0.069	0.412	0.800	1.024	0.409	0.139	0.123	0.108
Desviación estándar	± 0.006	± 0.083	± 0.069	± 0.035	± 0.174	± 0.036	± 0.027	± 0.018
Con cubierta de Cu								
P-54-Cu	0.069	1.132	2.462	3.253	1.854	1.326	1.094	0.941
PS-77-Cu	0.071	1.083	1.971	2.89	1.632	1.093	0.831	0.723
T-42-Cu	0.073	1.354	2.744	3.391	1.991	1.227	1.156	1.034
	0.213	3.569	7.177	9.534	5.477	3.646	3.081	2.698
Promedio	0.071	1.190	2.392	3.178	1.826	1.215	1.027	0.899
Desviación estándar	± 0.002	± 0.144	± 0.391	± 0.259	± 0.181	± 0.117	± 0.173	± 0.160
Agua de Riego	0.043	0.041	0.040	0.042	0.050	0.046	0.040	0.038
Temp MI ($^{\circ}\text{C}$)	21.0	24.0	26.0	28.0				
Temp ME ($^{\circ}\text{C}$)	17.0	17.8	18.2	17.7	17.6	16.2	16.6	16.1

P-54: charolas de plástico con 54 cavidades, PS-77: charola de poliestireno con 77 cavidades, T-42: rejilla con 42 tubetes de plástico, Temp MI: temperatura media al interior del invernadero, Temp ME: temperatura media al exterior (estación meteorológica del Colegio de Postgraduados).

CONCLUSIONES

La solución plástica con siete por ciento de hidróxido de cobre con una pureza de 77 % y con 77.5 % de sellador vinil acrílico, resulta adecuada para propiciar la poda de los ápices de las raíces laterales de las plantas, con un mínimo de raíces envolventes y sin problemas aparentes de toxicidad; tanto en charolas de poliestireno como de plástico.

El recubrimiento de cobre en las paredes de las cavidades de las charolas reduce el crecimiento radical y aéreo de las plantas, sin impedir que la planta desarrolle variables morfológicas, índices de calidad y acumulación de N, P, K y Cu en la parte aérea con valores dentro de los intervalos recomendados para planta de especies de rápido crecimiento del género *Pinus* producidas en charolas.

La planta producida en charolas con Cu acumuló en su raíz este elemento, ocho veces el contenido que acumuló la planta producida sin poda radical, lo cual podría influir en su crecimiento en campo durante los primeros meses posteriores a la plantación. Además, se detectó la presencia de Cu en los lixiviados del agua de riego, lo que podría ocasionar efectos ambientales adversos al suelo, aún no evaluados.

LITERATURA CITADA

- Aguilera R., M., A. Aldrete, T. Martínez T. y V. M. Ordaz C. 2016a. Producción de *Pinus montezumae* Lamb. con diferentes sustratos y fertilizantes de liberación controlada. *Agrociencia* 50: 107-118.
- Aguilera R., M., A. Aldrete, T. Martínez T. y V. M. Ordaz C. 2016b. Producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(34): 7-19.
- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México. 150 p.
- Aldana B., R. y M. Aguilera R. 2003. Procedimientos y Cálculos Básicos Útiles en la Operación de Viveros que Producen en Contenedor. Documento Técnico. Programa Nacional de Reforestación. CONAFOR. Guadalajara, Jalisco, México. 41 p.

- Aldrete, A., J. G. Mexal, R. Phillips, and A. D. Vallotton. 2002. Copper coated polybags improve seedlings morphology for two nursery-grown Mexican pine species. *Forest Ecology and Management* 163: 197-204.
- Aldrete A., J. Mexal G. y J. López U. 2005. Variación entre procedencias y respuesta a la poda química en plántulas de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 39: 563-574.
- Barajas R., J. E., A. Aldrete, J. J. Vargas H. y J. López U. 2004. La poda química en vivero incrementa la densidad de raíces en árboles jóvenes de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 38: 545-553.
- Bremner, J. M. 1965. Total Nitrogen. *In*: C. A Black (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbial Properties. Number 9 in series Agronomy.* American Society of Agronomy, Inc. Publisher, Madison, USA. pp: 1049-1178.
- Broadley, M., P. Brown, I. Cakmak, Z. Rengel and F. Zhao. 2012. Function of Nutrients: Micronutrients. *In*: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd Ed. School of Agriculture, Food and Wine. The University of Adelaide, Australia. pp: 206-212.
- Burney, O., A. Aldrete, R. Alvarez R., J. A. Prieto R., J. R. Sánchez V. and J. G. Mexal. 2015. México- addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry* 113: 1-10.
- Castro G., S. L., A. Aldrete, J. López U. y V. M. Ordaz C. 2018. Efecto del envase, sustrato y fertilización en el crecimiento de *Pinus greggii* var. *australis* en vivero. *Agrociencia* 52: 115-127.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2017. Objetivo Específico 1 del Monitoreo y Evaluación Complementaria de los Apoyos de Reforestación y Suelos 2016. Documento Técnico. Guadalajara, Jalisco, México. pp: 178-187.
- Crawford, M. A. 2003. Copper-coated containers and their impact on the environment. *In*: L. E., Riley, R. K. Dumroese and T. D. Landis. *Tech. Coord. National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2002.* Proceedings RMRS-P-28. Ogden, UT: USDA Forest Service. pp: 76-78.

- De Almeida F., A. A., R. R. Valle, M. S. Mielke y F. P. Gomes. 2007. Tolerance and prospection of phytoremediator woody species of Cd, Pb, Cu and Cr. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19(2):83-98.
- Escobar R., R. 2012. Fase de cultivo: endurecimiento. *In:* Buamscha M., G., L. T. Contardi, R. Dumroese K., J. A. Enricci, R. Escobar R., H. E. Gonda, D. Jakobs F., T. Landis D., T. Luna., J. Mexal G. y K. Wilkinson M. Producción de Planta en Viveros Forestales. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires, Argentina. pp: 151-152.
- Fernández M., J. R. Trejo., I. Pérez., F. Soria., F. Ruíz y G. López. 2007. Effect of copper coating nursery containers on plant growth and root morphology of *Eucalyptus globulus* Labill. cuttings and seedlings. *Silva Lusitana* 15(2): 215 – 227.
- García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köeppen. Serie Libros N° 6. 5a Edición corregida y aumentada. Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F. pp: 50-52.
- González O., M. M., J. A. Prieto R., A. Aldrete., J. C. Hernández D., J. A. Chávez L. y R. Rodríguez L. 2018. Sustratos a base de aserrín crudo con fertilización y la calidad de planta de *Pinus cooperi* C. E. Blanco en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(48): 203-225.
- Landis, T. D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling. *In:* Duryea, M. L. (ed.). 1985. *Proceedings: Evaluating Seedling Quality: Principles, Procedures, and Predictive Abilities of Major Tests.* Oregon State University, Corvallis. Or. USDA, Forest Service. USA. Pp: 29-48.
- Landis, T. D., R. W. Tinus, S. E. Mc Donald and J. P. Barnett. 1990. Containers and Growing Media, Vol. 2. *The Container Tree Nursery Manual.* Agricultural Handbook 674. USDA, Forest Service. Washington, DC. 88 p.
- Landis, T. D., and E. V. Steenis. 2000. Micronutrients: Copper. *Tree Planters' Notes.* 49(3): 44-48.

- Landis, T. D., D. F. Jacobs, K. M. Wilkinson and T. Luna. 2014a. Growing media. *In*: K. M. Wilkinson, T. D. Landis, D. L. Haase, B. F. Daley and R. K. Dumroese (eds.). Tropical Nursery Manual. Agriculture Handbook 732. USDA, Forest Service. Washington, DC. pp: 101-121.
- Landis, T. D., T. Luna, and K. R. Dumroese. 2014b. Containers. *In*: K. M. Wilkinson, T. D. Landis, D. L. Haase, B. F. Daley and R. K. Dumroese (eds.). Tropical Nursery Manual. Agriculture Handbook 732. USDA, Forest Service. Washington, DC. pp: 123-139.
- Luna, T., T. D. Landis and R. K. Dumroese. Containers. *In*: R. K. Dumroese, T. Luna and T. D. Landis. Nursery Manual for Native Plants: A Guide for Tribal Nurseries. Volume 1: Nursery Management. Agriculture Handbook 730. USDA, Forest Service. Washington, D. C. pp: 94-111.
- Markham W., J., D. J. Bremer, C. R. Boyer and K. R. Schroeder. 2011. Effect of container color on substrate temperatures and growth of red maple and redbud. *Hortscience* 46(5): 721-726.
- Pardos, M., J. A. Pardos y G. Montero. 2001. Growth responses of chemically root-pruned cork oak seedlings in the nursery. *Journal of Environmental Horticulture* 19(2): 69–72.
- Prieto R., J. A. y J. T. Sáenz R. 2011. Indicadores de Calidad de Planta en Viveros Forestales de la Sierra Madre Occidental. Libro Técnico Núm. 3. Campo Experimental Valle del Guadiana. Centro de Investigación Regional Norte Centro. INIFAP. Durango, Durango, México. 210 p.
- Prieto R., J. A., J. L. García R., J. C. Monarrez G. y R. E. Madrid A. 2012. Producción de Planta del Género *Pinus*. Folleto Técnico Núm. 50. Centro de Investigación Regional Norte Centro. INIFAP. Durango, Durango, México. 52 p.
- Regan, D. J., K. G. Apostol and A. S. Davis. 2015. Stocktype influences western white pine seedling size 6 years after outplanting. *Tree Planters' Notes* 58(1): 37-41.
- Sánchez A., H., A. Aldrete, J. J. Vargas H. y V. M. Ordaz C. 2016. Influencia del tipo y color de envase en el desarrollo de plantas de pino en vivero. *Agrociencia* 50: 481-492.

- SE (Secretaría de Economía). 2016a. Norma Mexicana NMX-AA-170-SCFI-2016. Certificación de la operación de viveros forestales. Diario Oficial de la Federación. 17 de febrero de 2016. México, D.F. pp: 17-28.
- SE (Secretaría de Economía). 2016b. Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016. Análisis de agua.-medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- método de prueba. Diario Oficial de la Federación. 17 de febrero de 2016. México, D.F. pp: 29-36.
- SAS Institute (Statistical Analysis System). 2002. The SAS system for Windows. Release versión 9.0. Cary, NC, USA.
- South, D. B., T. E. Starkey and S.A. Enebak. 2016. Forestry nursery practice in Southern United States. *Foresta* 1: 106-146.
- Sung, S. S., J. D. Haywood, M. A. S. Sword, K. F. Connor and D. A. Scott. 2010. Effects of container cavity size and copper coating on field performance of container-grown longleaf pine seedlings. *In*: Stanturf, (ed.). 2010. Proc. of the 14th biennial Southern Silvicultural Research Conference. Gen. Tech. Rep. SRS-121. USDA, Forest Service. Asheville, NC. pp: 241-245.
- Sword-Sayer, M. A., S. J. S. Sung and J. D. Haywood. 2011. Longleaf pine root system development and seedling quality in response to copper root pruning and cavity size. *Southern Journal of Applied Forestry* 35(1): 5-11.
- Tsakalimi, M. N. and P. P. Ganatsas. 2006. Effect of chemical root pruning on stem growth, root morphology and field performance of the mediterranean pine *Pinus halepensis* Mill. *Scientia Horticulturae* 109: 183-189.
- Wan, H., J. Du, J. He, D. Lyu and H. Li. 2019. Copper accumulation, subcellular partitioning and physiological and molecular responses in relation to different copper tolerance in apple rootstocks. *Tree Physiology* 39: 1215–1234. doi:10.1093/treephys/tpz042.

CONCLUSIONES GENERALES

La impregnación de cavidades de las charolas de poliestireno y de plástico con la solución vinil-acrítica con 7% de hidróxido de Cu permite producir planta con poda de raíces laterales eficiente y con un mínimo de raíces laterales envolventes. La planta obtenida en las charolas de poliestireno presenta tallas y pesos secos mayores a la producida en las charola de plástico.

La planta con poda radical química desarrolla mayor tasa relativa de crecimiento de raíces totales y con crecimiento horizontal, en comparación con la planta sin poda radical, misma que presenta mayor tasa relativa de crecimiento de raíces con crecimiento vertical.

La planta con poda radical química presentó, a los 16 meses de establecida en campo, una mayor supervivencia y tasa relativa de crecimiento en diámetro y altura que la planta producida en los mismos contenedores sin poda radical.

El recubrimiento de cobre en las paredes de las cavidades de las charolas reduce el crecimiento radical y aéreo de las plantas, sin impedir que la planta desarrolle variables morfológicas, índices de calidad y acumulación de N, P, K y Cu en la parte aérea con valores dentro de los intervalos recomendados para esta especie.

La planta producida con poda química de raíz acumuló en la raíz diez veces la cantidad de Cu acumulado por la planta producida sin poda radical química, lo cual podría influir en su crecimiento en campo durante los primeros meses posteriores a la plantación. Además, se detectó la presencia de Cu en los lixiviados del agua de riego, lo que podría ocasionar efectos ambientales desfavorables al suelo, aún no evaluados.

El tratamiento alternativo de poda radical aérea produce planta con tallas y pesos secos menores que la planta producida con y sin poda radical química; sin embargo, genera menos raíces laterales envolventes y mayor tasa relativa de crecimiento de raíces horizontales, diámetro y altura en campo, en comparación con la planta producida en el mismo tipo de charola sin poda de raíz. Adicionalmente, este tipo de charola presenta la ventaja de no contaminar el ambiente o afectar la salud de los trabajadores por el uso intensivo del Cu.