

Estrés hídrico en *Pinus engelmannii* Carr., producido en vivero

J. A. Prieto Ruiz*¹, E. H. Cornejo Oviedo², P. A. Domínguez Calleros³, J. de J. Návar Chaidez³, J. G. Marmolejo Moncivais³ y J. Jiménez Pérez³

¹ Campo Experimental Valle del Guadiana. INIFAP-Durango. Programa Doctoral. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Ctra. Durango-El Mezquital, km 4,5. Durango (Dgo.), México

² Departamento Forestal. UAAAN. CP: 25315 Buenavista, Saltillo (Coahuila). México

³ Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Ctra. Nal., km 145. CP: 67700 Linares (Nuevo León), México

Resumen

Se evaluó el efecto del estrés hídrico en el potencial hídrico y en el crecimiento de plantas de *Pinus engelmannii* Carr. de cinco meses de edad, sometidas a dos tratamientos de riego (con y sin estrés hídrico). El experimento comprendió del 21 de septiembre al 27 de octubre de 2003, tiempo en el que se aplicaron tres ciclos de estrés hídrico. Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,01$) en el potencial hídrico a partir del tercer día después del riego. Las plantas sometidas a estrés hídrico alcanzaron valores de $-1,96$ a $-2,29$ MPa al final de cada ciclo de estrés hídrico, mientras que los del tratamiento sin estrés variaron entre $-0,13$ y $-0,20$ MPa. La respuesta morfológica de las plantas mostró dos vertientes bien definidas; en el tratamiento sin restricción de humedad las tasas de crecimiento fueron mayores en altura (20,7%), diámetro del cuello (69,4%) y producción total de fitomasa (144,1%); mientras que en la condición de estrés los incrementos fueron menores en altura (1,3%), diámetro del cuello (9,8%) y fitomasa total (73,1%). Se concluye que las plantas fueron sensibles a los niveles de estrés hídrico evaluados, lo que permitiría su manejo para favorecer su preacondicionamiento.

Palabras clave: déficit de humedad, calidad de planta, crecimiento, fase de preacondicionamiento.

Abstract

Water stress in *Pinus engelmannii* Carr., under nursery conditions

The effect of water stress was evaluated in relation to the water potential and growth of five-month old seedlings of *Pinus engelmannii* Carr. The essay was conducted from September 21st to October 27th, 2003; in this period of time three water stress cycles were completed. Significant differences between water supply treatments were found ($p < 0.01$) in regard to the seedlings water potential after the third day of watering. The seedlings under water stress reached final water potentials from $-1,96$ to $-2,29$ MPa, while the seedlings without water stress showed values between -0.13 and -0.20 MPa. The morphological response of the seedlings presented two well-defined trends. First, the seedlings irrigated without humidity restriction showed larger growth rates in height (20.7%), collar diameter (69.4%) and total phytomass production (144.1%). On the other hand, the seedlings under water stress showed smaller increments in height (1.3%), collar diameter (9.8%) and total phytomass (73.1%). It is concluded that the seedlings were sensible to the evaluated levels of water stress, therefore allowing management to promote their hardening.

Key words: humidity deficit, seedlings quality, growth, preconditioning phase.

Introducción

El riego es una de las prácticas culturales más importantes en la producción de planta, ya que ayuda a mantener un adecuado nivel del agua para que el crecimiento ocurra sin restricciones (Johnson, 1986; Landis *et al.*, 1989; Lopushinsky, 1990), al influir en la

mayoría de los procesos fisiológicos, tales como la fotosíntesis, la respiración, la síntesis de compuestos químicos, la división y elongación celular, el transporte de elementos esenciales y la termorregulación foliar de las plantas, procesos que dependiendo del nivel de estrés hídrico alcanzado, pueden afectar el rendimiento de las plantas (CEFORA, 1994; Rojas, 2003). La cantidad y periodicidad de agua que debe aplicarse a las plantas es variable y depende de diversos factores, entre lo que destacan la edad, la épo-

* Autor para la correspondencia: jprietoviv@yahoo.com

Recibido: 25-03-04; Aceptado: 06-07-04.

ca del año y las condiciones ambientales del sitio de producción (Starkey, 2002).

El preacondicionamiento contribuye a mejorar la calidad de las plantas, previo a su establecimiento en campo, y consiste en modificar las prácticas de cultivo en vivero, tales como: disminuir la cantidad de agua suministrada, reducir las dosis de nitrógeno y aumentar las de potasio, así como eliminar el sombreado y el efecto de invernadero. En ese sentido, en la fase de preacondicionamiento la función del agua en las plantas cambia, ya que aparte de servir para que realicen su metabolismo, al disminuir su aporte se induce estrés hídrico para reducir el crecimiento en altura, promover la aparición de la yema apical e iniciar mecanismos de resistencia a temperaturas bajas extremas (Joly, 1985; Timmer y Armstrong, 1989; Landis *et al.*, 1992), lo que a su vez contribuye a incrementar la resistencia a déficits iniciales de humedad en el sitio de plantación (Peñuelas y Ocaña, 1996; Toral, 1997). Para provocar déficit hídrico se deja de regar durante períodos cortos de tiempo, hasta que las plantas comienzan a manifestar marchitez o alcanzan un estrés hídrico determinado (Landis *et al.*, 1989). Obviamente que el tiempo de restricción de humedad depende de las condiciones ambientales del sitio de producción, el tipo de sustrato y envase utilizado, así como la especie y sus características morfológicas.

El estrés hídrico, como práctica de manejo en vivero, ha sido poco estudiado en México; entre los casos más recientes destacan los trabajos de Cetina (1997), Cetina *et al.* (2001) y Cetina *et al.* (2002) en *Pinus greggii* Engelm.; Cornejo y Emmingham, (2003) en *Pinus durangensis* Mart, *Pinus arizonica* Engelm. y *Pinus engelmannii* Carr.; y Martínez *et al.*, (2002) en *Pinus leiophylla* Schiede *et* Cham., quienes destacan la importancia que tiene el estrés hídrico en el metabolismo de las plantas. Sin embargo, para entender la respuesta de las plantas a las diferentes condiciones de producción en vivero y a las diversas características ecológicas de los sitios de plantación, es necesario profundizar sobre tópicos de esta naturaleza (Cornejo, 1999; Shibu *et al.*, 2003), de manera que contribuyan a mejorar las tasas de supervivencia y crecimiento, principalmente en sitios con escasez de humedad (Forest Service British Columbia, 1999).

Los objetivos del experimento tuvieron la finalidad de evaluar en vivero, durante la etapa de preacondicionamiento, el efecto del estrés hídrico en *Pinus engelmannii* Carr., de cinco meses de edad, para: a) determinar los patrones de cambio del potencial hídrico

en plantas con y sin estrés hídrico y, b) cuantificar su influencia en el crecimiento en altura, incremento en diámetro del cuello y producción de fitomasa.

Se seleccionó a *Pinus engelmannii* Carr. debido a su amplia distribución y abundancia en los bosques de clima templado de la Sierra Madre Occidental, al habitar a una altitud de 1.600 a 2.500 m y 23° 15' a 32° 00' N y 103° 30' a 111° 10' W (Eguiluz, 1977; García y González, 1998). Además, la madera es bastante utilizada con fines comerciales y es de las especies más requeridas en los programas de reforestación, que en México realiza el Programa Nacional de Reforestación (PRONARE), coordinado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

Materiales y Métodos

Localización y características del área de estudio

El experimento se realizó en el Campo Experimental Valle del Guadiana, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en Durango, Dgo., México, a una altitud de 1.830 m y a 24° 01' N y 104° 44' W. La planta se produjo en un invernadero cubierto con plástico de polietileno, protegido contra rayos ultravioleta y malla de sombreado del 35%. La temperatura y la humedad relativa se registraron diariamente a diferentes horas; además se cuantificaron los valores extremos cada día (Tabla 1).

Condiciones de producción y siembra

La planta se produjo en charolas de poliestireno de 77 cavidades, caracterizadas por tener 170 cm³ de volumen por cavidad. El sustrato consistió en una mezcla compuesta por turba al 55%, vermiculita al 24% y agrolita al 21%. La semilla utilizada fue recolectada en Noviembre de 2002, de rodales naturales localizados en el Ejido San Isidro, Durango, Dgo., México, a una altitud de 2.483 m y a 23° 40' 23" N y 105° 02' 14" W. La siembra se realizó el 31 de Marzo de 2003, después de que la semilla se remojó en agua durante 24 horas y se desinfectó 10 minutos en una solución compuesta por nueve partes de agua y una parte de cloro comercial al 6%. Para evitar daños por damping off la semilla fue impregnada con el fungicida Promyl®.

Tabla 1. Temperatura y humedad relativa prevalcientes durante el ensayo (21 de septiembre a 27 de octubre de 2003)

Tiempo (horas)	Temperatura		Humedad relativa	
	Promedio (°C)	Error estándar	Promedio (°C)	Error estándar
8:00	13,73	0,55	97,68	0,23
12:00	29,18	0,77	36,95	3,31
16:00	30,09	0,71	33,18	2,29
Máxima (diaria)	34,41	0,47	97,18	0,56
Mínima (diaria)	12,28	0,61	26,68	1,53

Aplicación de fertilizantes y fungicidas

Durante la preparación del sustrato se añadieron 5 kg m⁻³ del fertilizante granulado Multicote®, el cual tarda en liberarse de nueve a once meses, cuya formulación N-P-K (porcentaje de nitrógeno-porcentaje de P₂O₅-porcentaje de K₂O) fue de 15-07-15. Aparte de la fertilización inicial en el sustrato, dos veces por semana se añadió el fertilizante soluble Peters profesional®, caracterizado por tener diferentes proporciones de N-P-K en cada fase de crecimiento de las plantas. Durante la fase de establecimiento se aplicaron 100:250:202 ppm de N-P-K. En la fase de crecimiento rápido se añadieron 200:30:158 ppm de N-P-K, y en la fase de precondicionamiento se adicionaron 70:191:508 ppm de N-P-K. Para prevenir daños por damping off, durante los primeros dos meses de crecimiento semanalmente se aplicaron en forma rotativa los fungicidas Captán®, Promyl® y Tecto®, en dosis de 2.5, 1.5 y 1.0 g L⁻¹ de agua, respectivamente.

Tratamientos utilizados y diseño experimental

Se evaluaron dos tratamientos: a) planta sin estrés, la cual fue regada diariamente; en esta condición el contenido gravimétrico del agua en el sustrato se mantuvo entre 322 y 369%, y b) planta sometida a estrés hídrico, donde el sustrato se regó solamente al finalizar cada ciclo de estrés hídrico, cuando las yemas apicales de las plantas presentaron síntomas iniciales de marchitamiento, lo cual sucedió cada 10 días. El contenido gravimétrico de humedad en el sustrato varió desde el 323% en condición de saturación, hasta cerca del 40% al final cada ciclo de estrés hídrico. Se consideró como ciclo de estrés hídrico el tiempo que duró la planta sin regar, desde que estaban saturadas de humedad hasta que mostraron indicios de marchitamiento del

brote terminal. Para tener representatividad de la información obtenida y determinar posible variación en el déficit hídrico, los ciclos se repitieron tres veces; ciclo uno: 21 de septiembre al 01 de octubre de 2003; ciclo dos: 04 al 14 de octubre de 2003 y ciclo tres: 17 al 27 de octubre de 2003. Durante cada ciclo se realizaron cinco evaluaciones del potencial hídrico.

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar, con tres repeticiones por tratamiento. En cada evaluación fueron seleccionadas en forma aleatoria cuatro plantas por repetición, esto hizo que se utilizaran 12 plantas por tratamiento y evaluación, y que durante los tres ciclos se hayan evaluado 180 plantas por tratamiento y 360 en total.

Evaluación

El ensayo fue evaluado desde dos enfoques; por un lado, se consideró la variación del potencial hídrico de las plantas en función de los tratamientos aplicados (con y sin estrés hídrico) y en la otra fase se determinó el efecto del potencial hídrico en su crecimiento morfológico. Cada ciclo se inició a partir de una condición de saturación de humedad del sustrato de ambos tratamientos. Posteriormente, las plantas sometidas a estrés hídrico dejaron de regarse hasta que mostraron indicios de marchitamiento, manifestado en el decaimiento del brote terminal, a los 10 días. Una vez terminado cada ciclo, todo el lote experimental fue regado en forma abundante hasta saturación durante dos días y medio, tiempo durante el cual las plantas volvieron a recuperar su nivel de humedad normal. Las evaluaciones se hicieron a las 5:00 a.m., momento durante el cual el potencial hídrico de las plantas está en equilibrio con el del sustrato y provee bases estables para realizar comparaciones entre diferentes días (Lan-dis *et al.*, 1989; Lopushinsky, 1990).

Las evaluaciones del potencial hídrico se hicieron en una cámara de presión Modelo 600 (PMS Instruments Co., Corvallis, OR) y la metodología desarrollada consideró las propuestas de Day y Walsh (1980) y Cleary *et al.* (2003). Los potenciales hídricos se obtuvieron del tallo a la altura del diámetro del cuello, punto donde se cortó con navaja y a partir de ahí se quitó la corteza de los primeros 4 cm para obtener una adecuada medición; además, en los siguientes 3 cm se eliminó el follaje para facilitar la inserción del tallo en la cámara de presión. Para conocer el efecto del estrés hídrico en el crecimiento de las plantas se realizaron evaluaciones morfológicas antes de iniciar los tratamientos de estrés hídrico y al final del experimento. En la evaluación inicial se extrajeron en forma aleatoria 30 plantas; mientras que en la evaluación final se extrajeron 15 plantas por tratamiento.

VARIABLES EVALUADAS

a) Potencial hídrico. Se registró en el xilema de las plantas en MegaPascales (MPa), b) Altura de la parte aérea. Se midió desde la base del cuello hasta la yema apical, c) Diámetro del cuello. Se registró en la unión del tallo y raíz, d) Peso seco de la parte aérea y del sistema radical. Se cuantificó después de secar las muestras durante 72 horas en una estufa a 72 °C, e) Relación peso seco de la parte aérea-peso seco del sistema radical. Se obtuvo de dividir el peso seco de la parte aérea entre el peso seco de la raíz, f) Índice de lignificación. Consistió en determinar el porcentaje de peso seco, con relación al contenido de agua en las plantas, lo cual se obtuvo de dividir el peso seco entre el peso fresco, multiplicado por cien, y g) Contenido gravimétrico del agua en el sustrato. Se estimó a través del método propuesto por McDonald (1984) y Landis *et al.* (1989):

$$W (\%) = \frac{\text{Peso fresco del sustrato} - \text{peso anhidro del sustrato}}{\text{Peso anhidro del sustrato}} \times 100$$

donde: W (%) = contenido gravimétrico del agua en el sustrato.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO E INTERPRETACIÓN

Las variables estudiadas fueron analizadas a través del paquete estadístico Statistical Analysis System

(SAS). El potencial hídrico se analizó a través del procedimiento PROC MIXED, el cual separa los efectos en fijos y aleatorios, teniéndose como efectos fijos a los tratamientos y a las fechas de evaluación, así como a la interacción de ambos; como efectos aleatorios se tuvo a las repeticiones de cada tratamiento. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \alpha_j + \tau\alpha_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

donde: Y_{ij} = variable respuesta; μ = media general del experimento; τ_i = efecto del i -ésimo tratamiento; α_j = efecto de la j -ésima fecha de evaluación; $\tau\alpha_{ij}$ = interacción de tratamientos con fechas de evaluación ij ; ε_{ij} = error aleatorio ij .

A las variables morfológicas se les realizaron análisis de varianza a través del procedimiento PROC ANOVA. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

donde: Y_{ij} = variable respuesta; μ = media general del experimento; τ_i = efecto del i -ésimo tratamiento; ε_{ij} = error aleatorio ij .

Cuando se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos ($p < 0,01$), se realizaron pruebas de contrastes ortogonales al potencial hídrico de las plantas por fecha de evaluación y a las variables morfológicas al final de la evaluación.

RESULTADOS

POTENCIAL HÍDRICO DE LAS PLANTAS

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,01$) para la interacción tratamiento \times fecha en los tres ciclos de estrés hídrico. Los resultados entre tratamientos (con y sin estrés hídrico) por fecha de evaluación y por ciclo mostraron diferencias significativas ($p < 0,01$) a partir del tercer día (segunda evaluación) de cada ciclo. Conforme las plantas duraron más tiempo sin regar, las diferencias en el potencial hídrico se incrementaron paulatinamente y se acentuaron en la parte final de los tres ciclos, a los 10 días, cuando las plantas estuvieron sometidas a altos niveles de estrés hídrico (Figura 1).

El potencial hídrico tuvo una tendencia similar en los tres ciclos. En la planta regada continuamente sin ser sometida a estrés hídrico, los valores medios se mantuvieron estables, con ligeras variaciones entre -0,13 y -0,20 MPa (Figura 1); en tanto que el contenido de hu-

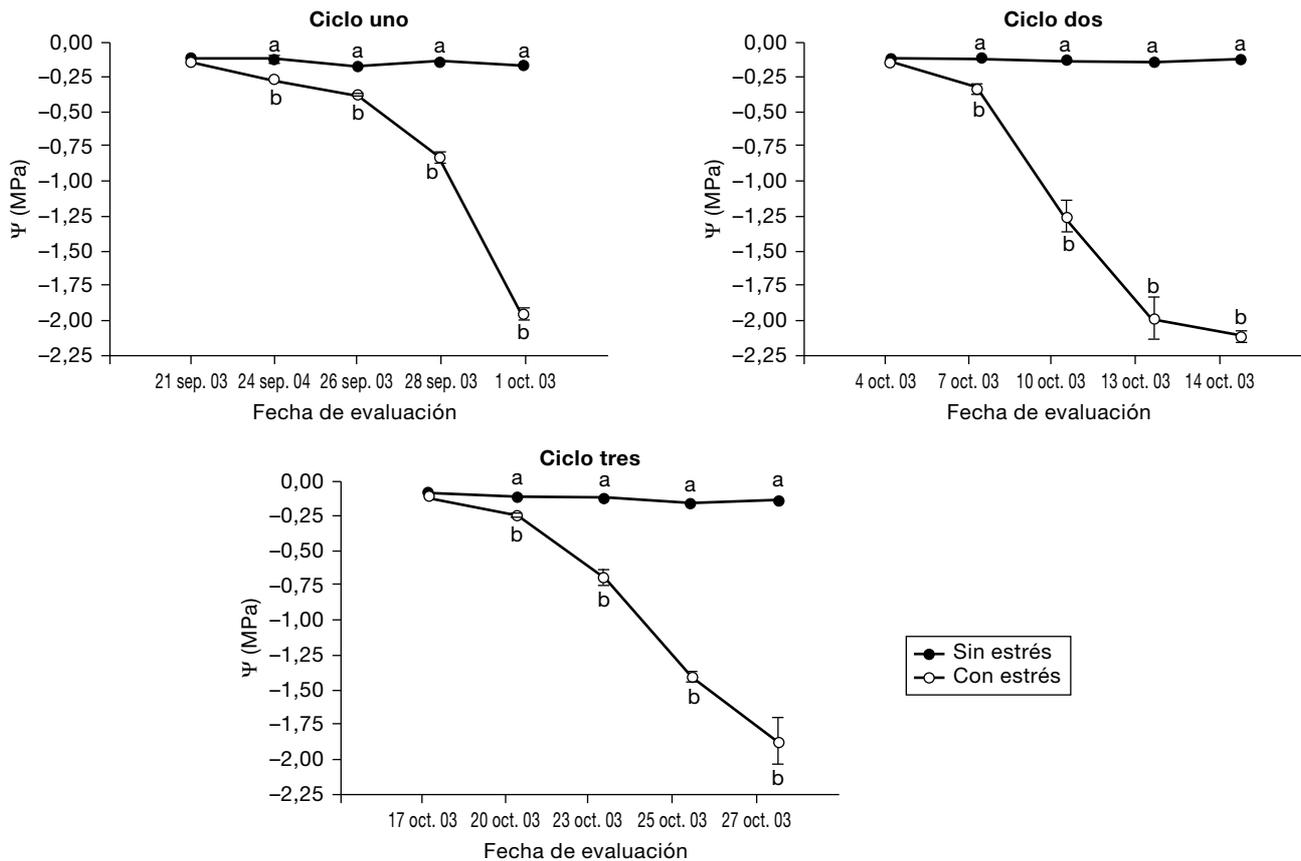


Figura 1. Potencial hídrico (Ψ) en las plantas por tratamiento durante los tres ciclos de estrés hídrico evaluados. Letras diferentes para la misma fecha de evaluación indican diferencias significativas ($p < 0,01$).

medad promedio del sustrato fluctuó entre 322,7 y 368,5% (Figura 2). Cuando dejó de regarse durante tres días (segunda evaluación) el estrés hídrico en las plantas fue ligero al tener entre $-0,27$ y $-0,34$ MPa, mientras que el contenido gravimétrico de humedad del sustrato disminuyó drásticamente a menos de la mitad (132,8%). Cuando el sustrato tenía entre 5 y 6 días sin regar (tercera evaluación) el potencial hídrico alcanzó valores entre $-0,37$ y $-1,24$ MPa y el contenido de humedad decreció, en promedio, a un 65,02%. En cambio, cuando no se regó entre 7 y 9 días (cuarta evaluación) el potencial hídrico fluctuó entre $-0,81$ y $-1,96$ MPa, mientras que el contenido de humedad se redujo a un 52,2%. Finalmente, cuando el sustrato dejó de regarse durante 10 días (última evaluación), el déficit hídrico alcanzó valores de $-1,96$ a $-2,29$ MPa y el contenido de humedad decreció hasta un 42,8% (Figuras 1, 2 y 3). En la etapa final algunas plantas mostraron decaimiento inicial de la yema apical; sin embargo, volvieron a recuperarse del estrés hídrico al que estuvieron expuestas, una vez que se regaron en forma abundante.

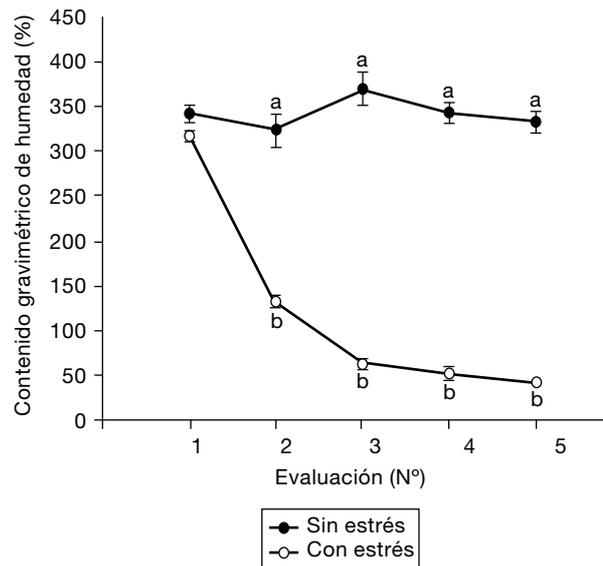


Figura 2. Contenido gravimétrico de humedad promedio del sustrato, por fecha de evaluación, en los tres ciclos de estrés hídrico evaluados. Letras diferentes para la misma evaluación indican diferencias significativas ($p < 0,01$).

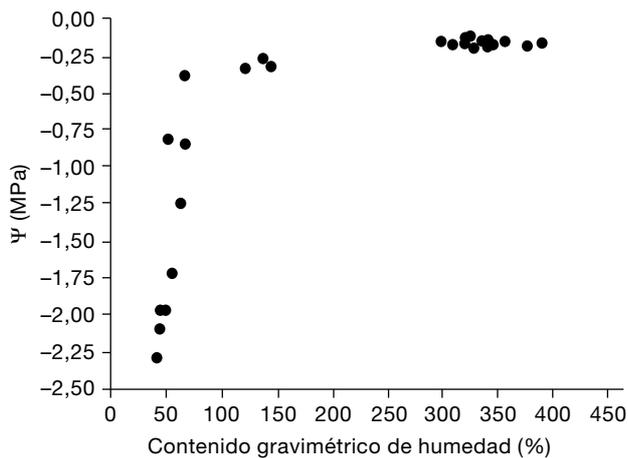


Figura 3. Variación del potencial hídrico de las plantas con relación al contenido gravimétrico de humedad en el sustrato.

En la Figura 3 se observa la relación que existió entre el contenido gravimétrico de humedad del sustrato y el potencial hídrico de las plantas. Cuando la humedad del sustrato fue superior al 100%, el potencial hídrico de las plantas fluctuó entre $-0,11$ y $-0,34$ MPa, mientras que cuando el contenido de humedad disminuyó a menos del 100%, el déficit de humedad en las plantas aumentó en forma considerable y alcanzó valores de hasta $-2,29$ MPa.

Morfología de las plantas

Las plantas regadas continuamente (sin estrés) incrementaron en forma notable su crecimiento en altura y diámetro, así como la producción de fitomasa; en tanto que las sometidas a estrés hídrico tuvieron cambios menores en dichas variables. En el tratamiento sin restricción de humedad la altura se incrementó en 3,42 cm, mientras que cuando se les limitó la disponibili-

dad hídrica sólo aumentó 0,21 cm. Por otro lado, el diámetro del cuello fue más sensible en las plantas regadas diariamente al incrementar 2,90 mm, mientras que en las sometidas a estrés hídrico tuvieron tan solo un acumulado de 0,41 mm de aumento (Tabla 2).

El peso seco de los componentes parte aérea, sistema radical y total, también tuvo diferencias significativas entre tratamientos, encontrándose que las plantas sin restricción de agua superaron en cerca del doble a la planta sometida a estrés hídrico. El cociente obtenido de la relación peso seco de la parte aérea con el sistema radical fue estadísticamente igual ($p > 0,05$) en la planta con y sin estrés hídrico. Una característica de esta relación es que en la evaluación inicial, previo al inicio del experimento, los valores eran superiores en cerca del doble en ambos tratamientos y disminuyeron considerablemente debido a que la producción de fitomasa se incrementó en mayor proporción en el sistema radical de las plantas. El índice de lignificación se incrementó en mayor proporción en el tratamiento con estrés hídrico. Estos resultados muestran cómo la planta sin estrés siguió aprovechando el agua suministrada sin restricción y continuó su crecimiento; sin embargo, la proporción de fitomasa producida, con relación al agua contenida en las plantas, fue mayor en las plantas sometidas a estrés hídrico (Tabla 2).

Discusión

Potencial hídrico de las plantas

Los resultados obtenidos coinciden con Landis *et al.* (1989) quienes indican que cuando la humedad del sustrato se mantiene alta, las plantas no son afectadas

Tabla 2. Resultados de las variables morfológicas en planta sin y con estrés hídrico, al inicio del experimento, 21 de septiembre de 2003, y al final del mismo, 27 de octubre de 2003

	Valor inicial	Valor final		Incremento (%)	
		Sin estrés	Con estrés	Sin estrés	Con estrés
Altura del tallo (cm)	16,49 ± 0,61	19,91 ± 0,87 a	16,70 ± 0,29 b	20,7	1,3
Diámetro (mm)	4,18 ± 0,17	7,08 ± 0,44 a	4,59 ± 0,31 b	69,4	9,8
Peso seco parte aérea (g)	1,49 ± 0,10	3,15 ± 0,20 a	2,29 ± 0,23 b	111,4	53,7
Peso seco raíz (g)	0,37 ± 0,03	1,39 ± 0,10 a	0,93 ± 0,11 b	275,6	151,3
Peso seco total (g)	1,86 ± 0,13	4,54 ± 0,30 a	3,22 ± 0,30 b	144,1	73,1
Relación peso seco:					
— Parte aérea-raíz	4,71 ± 0,37	2,27 ± 0,01 a	2,46 ± 0,28 a	-107,5	-91,5
— Índice de lignificación	16,99 ± 0,23	21,21 ± 0,53 b	29,16 ± 0,50 a	24,8	47,8

Letras diferentes para la misma variable indican diferencias significativas ($p < 0,01$).

por escasez de agua al estar fácilmente disponible, lo cual sucedió en ambos tratamientos en la primera evaluación de cada ciclo de estrés hídrico.

A pesar de que las especies tienen diferente sensibilidad al estrés hídrico, es recomendable regar cuando el potencial hídrico en la madrugada disminuye por debajo de $-0,5$ MPa (Landis *et al.*, 1989), condición que prevaleció en la planta sometida a estrés hídrico hasta el tercer día de haber dejado de regar. Potenciales hídricos entre $-0,5$ y $-1,0$ MPa se consideran moderados y mantener estos niveles en forma continua es adecuado cuando se requiere reducir el crecimiento, inducir el letargo, incrementar la resistencia al frío y favorecer la lignificación de las plantas (Lopushinsky, 1990). Cuando el estrés hídrico varía entre $-1,0$ y $-1,5$ MPa se restringe el crecimiento y el precondicionamiento es variable; aunque, Cleary *et al.* (2003) manifiestan que en coníferas que pueden soportar altos niveles de estrés hídrico, valores de hasta $-1,2$ MPa no afectan al crecimiento.

Cuando el potencial hídrico varía entre $-1,5$ y $-2,5$ MPa se entiende que el estrés es severo, y existe el riesgo que las plantas sufran daños, esto hace que la mayoría de las plantas cierren los estomas para evitar su desecación. Además, reducen las tasas de fotosíntesis y disminuye el crecimiento (Lopushinsky, 1990; CEFORA, 1994; Humara *et al.*, 2002; Cleary *et al.*, 2003; Thie y Manninen, 2003; Rahman *et al.*, 2003). En este experimento, pese a que el estrés hídrico final fluctuó entre $-2,0$ y $-2,3$ MPa, las plantas no sufrieron daños físicos evidentes; igual sucedió con Cornejo (1999) quien sometió a la misma especie a estrés hídrico hasta $-1,4$ MPa. Si el déficit alcanza valores inferiores a $-2,5$ MPa, el estrés hídrico es extremo y las plantas pueden sufrir daños físicos o incluso morir (Landis *et al.*, 1989). Aunque, Villar *et al.* (1997a) y Villar *et al.* (1997b) encontraron que en *Pinus halepensis* Mill. se incrementó la resistencia a déficits de humedad al someterlas a estrés hídrico hasta $-2,2$ MPa.

La resistencia de las plantas al estrés hídrico también debe considerar la procedencia de la especie; estudios realizados por Cregg y Zhang (2001) en *Pinus sylvestris* L., Calamassii (2001) en *Pinus halepensis* Mill., y Martínez *et al.* (2002) en *Pinus leiophylla* Schl. *et. Cham.*, encontraron que la planta proveniente de sitios más secos, tiene mayor resistencia al estrés hídrico.

Morfología de las plantas

Los resultados finales de las variables crecimiento en altura, incremento en diámetro, producción de fitomasa e índice de lignificación, consideradas impor-

tantes para definir a la planta objetivo (Kooistra y Brazier, 1999), resaltan la importancia que tiene el riego durante su producción en vivero. A pesar de que las plantas estuvieron sometidas a estrés hídrico sólo durante tres ciclos, comprendidos en un lapso de 36 días, la respuesta de las mismas fue inmediata al haberse obtenido menores tasas de crecimiento. Sin duda, este tema ha sido ampliamente estudiado a nivel mundial en diversas especies del género *Pinus* y la mayoría de los resultados coinciden en el sentido de que el estrés hídrico es uno de los factores que más restringe el crecimiento de las plantas (McDonald, 1984; Joly, 1985; Seller y Johnson, 1985; O'Reilly *et al.*, 1989; Lopushinsky, 1990; Villar *et al.*, 1997a; Cetina, 1999; Cetina *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2002; Humara *et al.*, 2002; Thie y Manninen, 2003; Rojas, 2003).

En cambio, Cornejo y Emmingham (2003) encontraron que, con excepción de *Pinus durangensis* Mart., el estrés hídrico no influyó en el crecimiento en vivero de *Pinus engelmannii* Engelm., *Pinus durangensis* Mart., *Pinus arizonica* Engelm. y *Pinus ponderosa* Laws., resultados que se atribuyen en gran parte a que la evaluación se realizó durante la estación de frío y al corto período de evaluación (dos meses y medio).

Los resultados presentados destacan la importancia que tiene precondicionar las plantas a menores necesidades de agua, que sirva como herramienta de manejo para inducir las a que entren en estado de letargo e incrementen su resistencia al frío y en consecuencia se aumenten las posibilidades de éxito en las plantaciones que se establezcan. En cambio, niveles de humedad abundantes pueden retardar el inicio del letargo e interrumpir la secuencia de eventos necesarios para que desarrollen resistencia al frío, y por lo tanto resulten más susceptibles a sufrir daños por estrés (Joly, 1985).

El restringir la humedad con el objeto de provocar estrés hídrico, es diferente a cuando se riega continuamente pero de forma deficitaria. Johnson (1986) menciona que cuando esto sucede se limita el crecimiento y la parte inferior del sistema radical carece de raicillas vivas debido a que el agua no alcanza a bajar hasta la parte final del cepellón. Por ello, cuando se someta planta a estrés hídrico es recomendable que cada cierto tiempo se humedezca el sustrato hasta que se sature.

Con relación a los parámetros de crecimiento evaluados, se considera que, en general, éstos fueron aceptables en ambos tratamientos. Así, la altura final quedó en el rango de 15 a 25 cm, recomendada por Prieto *et al.* (1999) para las coníferas de México. Mexal y Landis (1990) indican que cuando el diámetro está en-

tre 5 y 6 mm es posible que se logren tasas de supervivencia superiores al 80%. En esta variable el diámetro en el tratamiento con estrés fue un poco menor a los 5 mm (Tabla 3).

Los valores finales de las relaciones peso seco de la parte aérea y del sistema radical están en los rangos recomendados por Thompson (1985), quien indica que generalmente la fitomasa de la parte aérea es mayor al de la raíz y el cociente de esa relación no debe ser mayor a 2,5. La importancia de que exista un equilibrio en este índice radica, según Birchler *et al.* (1998) y Domínguez y Návar (2000) en que define el balance entre la parte transpirante y la parte absorbente de la humedad.

Aunque en la literatura se le ha dado poca atención a las funciones del sistema radical, éste es parte integral de la anatomía de las plantas y generalmente es más susceptible al frío y a la desecación que el tallo; por lo tanto, la condición fisiológica del sistema radical puede considerarse como criterio para definir la calidad (Ritchie, 1984). De ahí la importancia que tiene la producción de fitomasa radical y su relación con el tallo. En el caso de este estudio el incremento de peso seco del sistema radical con relación al de la parte aérea, fue mayor en ambos tratamientos, aspecto favorable para lograr un mayor equilibrio entre ambas variables.

Conclusiones

La reducción del potencial hídrico hasta $-2,29$ MPa no provocó daños físicos a *Pinus engelmannii* Carr.; sin embargo, sí limitó su crecimiento en altura, diámetro del cuello y producción de fitomasa, en contraste con el tratamiento sin restricción de humedad, que se mantuvo a potenciales hídricos entre $-0,13$ y $-0,20$ MPa. En las plantas sometidas a sequía el índice de lignificación fue mayor, al reducir la succulencia debido a la restricción de humedad a que estuvieron sujetas.

Agradecimientos

Al INIFAP y al CONACyT por la beca otorgada al primer autor para realizar estudios de Doctorado. A la Fundación Produce Durango, A.C. por el financiamiento brindado. Al Departamento Forestal de la UAAAN, Saltillo, Coahuila, México, por las facilidades otorgadas para el uso de la bomba de presión. Al C. Javier Falcón por su ayuda en la toma de datos de campo. A los revisores anónimos por su valiosa contribución para mejorar la calidad de este artículo.

Bibliografía

- BIRCHLER T., ROSE R.W., ROYO A., PARDOS M., 1998. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. Invest Agr: Sist Recur For 7(1 y 2), 110-121.
- CALAMASSII R., DELLA R.G., FALUSI M., PAOLETTI E., STRATI S., 2001. Resistance to water stress in seedlings of eight European provenances of *Pinus halepensis* Mill. Ann For Sci 58, 663-672.
- CEFORA, 1994. Viveros y reforestación en México. En: Curso internacional de entrenamiento. 4-22 Junio 1994. Centro de Forestación para las Américas. NMSU. Servicio Forestal de los Estados Unidos. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre en México.
- CETINA A.V., 1997. Tres tipos de manejo en vivero de *Pinus greggii* Engelm. y su efecto en la calidad de la planta. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 72 pp.
- CETINA A.V.M., ORTEGA D.M.L., GONZÁLEZ H.V.A., VARGAS H.J., COLINAS L.M.T., VILLEGAS M.A., 2001. Fotosíntesis y contenido de carbohidratos de *Pinus greggii* Engelm. en respuesta a la poda y al régimen de riego en vivero. Agrociencia 35, 599-607.
- CETINA A.V.M., GONZÁLEZ H.V.A., ORTEGA D.M.L., VARGAS H.J., VILLEGAS M.A., 2002. Supervivencia y crecimiento en campo de *Pinus greggii* Engelm., previamente sometidos a podas o sequía en vivero. Agrociencia 36, 233-241.
- CLEARY B., ZAERR J., HAMEL J., 2003. Guidelines for measuring plant moisture stress with a pressure chamber. Disponible en <http://www.pmsinstrument.com> (Consulta: 1 Agosto 2003).
- CORNEJO O.E., 1999. Regeneration aspects of three Mexican *Pinus* species field and greenhouse studies. Thesis Doctor of Philosophy. Department of Forest Science, College of Forestry. Oregon State University, Corvallis. Oregon, US. 218 pp.
- CORNEJO O.E., EMMINGHAM W., 2003. Effects of water stress on seedling growth, water potential and stomatal conductance of four *Pinus* species. Crop Res 25(1), 159-190.
- CREGG B.M., ZHANG J.W., 2001. Physiology and morphology of *Pinus sylvestris* seedlings from diverse sources under cyclic drought stress. Forest Ecology and Management 154, 131-139.
- DAY R.J., WALSH S.J., 1980. A manual for using the pressure chamber in nurseries and plantations. Silv. Rept. 1980-2. Lakehead University. School of forestry. Thunder Bay, Ontario, Canada.
- DOMÍNGUEZ C.P.A., NÁVAR CH.J.J., 2000. Einfluss der Pflanzenqualität von *Pinus pseudostrobus* Lindl. Auf überlebensrate und Wuchsleistung bei Aufforstungen in der östlichen Sierra Madre Mexikos. Forstarchiv, 71. Heft 1. 9-13.
- EGUILUZ P.T., 1977. Los pinos del mundo. Pub. esp. N° 1. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. 74 pp.
- FOREST SERVICE BRITISH COLUMBIA, 1999. Seedling stock type selection. In: British Columbia. Ministry of forests. Canada.

- GARCÍA A.A., GONZÁLEZ E.S., 1998. Pináceas de Durango. CIIDIR-IPN. Instituto de Ecología, A.C. Durango, México.
- HUMARA J.M., CASARES A., MAJADA J., 2002. Effect of seed size and growing media water availability on early seedling growth in *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management* 167, 1-11.
- JOHNSON J.D., 1986. Irrigation and its implications for seedling growth and development. Proceedings of the Southern Forest Nursery Association. July 22-24, 1986. Pensacola, Florida.
- JOLY R.J., 1985. Techniques for determining seedling water status and their effectiveness in assessing stress. In: Duryea, M.L. (ed). 1985. Evaluating seedling quality: Principles, procedures and predictive abilities of major tests. Workshop held. October 16-18, 1984. Forest Research Laboratory. Oregon State University. Corvallis. U.S.
- KOOISTRA C., BRAZIER D., 1999. Seedling standards and need for them. In: Landis, T.D.; Barnett, J.P. Tech. coords. National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations. 1998. Gen. Tech. Rep. SRS-25. Asheville, NC:USDA, Forest Service. Southern Research Station.
- LANDIS T.D., TINUS R.W., McDONALD S.E., BARNETT J.P., 1989. Seedling nutrition and irrigation. Vol. 4. The container tree nursery manual. USDA, Forest Service. Agric. Handbk. 674.
- LANDIS T.D., TINUS R.W., McDONALD S.E., BARNETT J.P., 1992. Container nursery environment. Vol. 3. The Container tree nursery manual. USDA, Forest Service. Agric. Handbk. 674.
- LOPUSHINSKY W., 1990. Seedling moisture status. In: Target Seedling Symposium: Proceedings, combined meeting of the Western forest nursery associations. August 13-17, 1990. Gen. Tech. Rep. RM-200. USDA, Forest Service. Fort Collins, CO. U.S.
- MARTÍNEZ T.T., VARGAS H. J.J., MUÑOZ O.A., LÓPEZ U.J., 2002. Respuesta al déficit hídrico de *Pinus leiophylla*: Consumo de agua y crecimiento en plántulas de diferentes poblaciones. *Agrociencia* 36, 365-376.
- McDONALD S.E., 1984. Irrigation in forest tree nurseries: Monitoring and effects on seedlings growth. In: Duryea, M.L. and Landis, T.D. (eds.) 1984. Forest Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. Forest Research Laboratory, Oregon State University. Corvallis. pp. 107-122.
- MEXAL J.G., LANDIS T.D., 1990. Target seedlings concepts: Height and diameter. pp. 17-36. In: Rose, R., S.J. Campbell and T.D. Landis (eds.). Target seedling Symposium: Proceedings, combined meeting of the Western forest nursery associations. August 13-17, 1990. Gen. Techn. Rep. RM-200. USDA. Forest Service. Fort Collins, CO.
- O'REILLY C., ARNOTT J.T., OWENS J.N., 1989. Effects of photoperiod and moisture availability on shoot growth, seedling morphology and cuticle and epicuticular wax features of container-grown western hemlock seedlings. *Can J For Res* 19, 122-131.
- PEÑUELAS R.J.L., OCAÑA B.L., 1996. Cultivo de plantas forestales en contenedor. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-prensa. Madrid, España. 190 pp.
- PRIETO R.J.A., VERA C.G., MERLÍN B.E., 1999. Factores que influyen en la calidad de brinzales y criterios para su evaluación en vivero. Folleto técnico 12. INIFAP. SAGAR. Durango, Dgo., México. 23 pp.
- RAHMAN M.S., MESSINA M.G., NEWTON R.J. 2003. Performance of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings and micropropagated plantlets on an east Texas site. II. Water relations. *Forest Ecology and Management* 178, 257-270.
- RITCHIE G.A., 1984. Assessing seedling quality. In: Duryea, M.L. and Landis, T.D. (eds.) 1984. Forest Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. Forest Research Laboratory, Oregon State University. Corvallis. pp. 243-259.
- ROJAS G.M., 2003. La resistencia a la sequía. *Ciencia UANL* 6(3), 326-331.
- SELLER J.R., JOHNSON J.D., 1985. Photosynthesis and transpiration of loblolly pine seedlings as influenced by moisture-stress conditioning. *For Sci* (31)3, 742-749.
- SHIBU J., MERRITT C., RAMSEY C.L., 2003. Growth, nutrition, photosynthesis and transpiration responses of longleaf pine seedlings to light, water and nitrogen. *Forest Ecology and Management* 180, 335-344.
- STARKEY T.E., 2002. Irrigation and fertilization type, rate and frequency of application. In: Barnett, J.P.; Dumroese, R.K.; Moorhead, D.J., (eds.). 2002. Proceedings: Growing longleaf pine in containers-1999 and 2001 workshops. Gen. Tech. Rep. SRS. Asheville, NC:USDA, Forest Service. Southern Research Station. pp. 30-34.
- THIE D.L., MANNINEN S., 2003. Ozone and water deficit reduced growth of Aleppo pine seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry* 41, 55-63.
- THOMPSON B.E., 1985. Seedling morphological evaluation-what you can tell by looking. pp. 59-71. In: Duryea, M.L. (ed). Proceedings: evaluation seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major test. Oregon State University. Forest Research Laboratory. Corvallis, OR.
- TIMMER V.R., ARMSTRONG G., 1989. Growth and nutrition of containerized *Pinus resinosa* seedlings at varying moisture regimes. Disponible en <http://www.forestry.auburn.edu/sfnmc/class/fy614/irrigate.html> (Consulta: 15 Marzo 2004).
- TORAL I.M., 1997. Concepto de calidad de plantas en viveros forestales. Documento técnico No. 1. Programa de Desarrollo Forestal Integral de Jalisco. Fundación Chile. Consejo Agropecuario de Jalisco. Guadalajara, Jalisco, México.
- VILLAR S.P., OCAÑA B.L., PEÑUELAS R.J.L., CARRASCO M.I., DOMÍNGUEZ L.S., 1997a. Efecto de diferentes niveles de endurecimiento por estrés hídrico en el contenido de nutrientes y la resistencia a la desecación de plántulas de *Pinus halepensis* L. In: Actas del II Congreso Forestal Español. pp. 673-678.
- VILLAR S.P., OCAÑA B.L., PEÑUELAS R.J.L., CARRASCO M.I., DOMÍNGUEZ L.S., RENILLA E.I., 1997b. Relaciones hídricas y potencial de formación de raíces en plántulas de *Pinus halepensis* Mill. sometidas a diferentes niveles de endurecimiento por estrés hídrico. In: Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 4, 81-92.