

CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE *Pinus greggii* Engelm. EN RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN

Ana Rita Román Jiménez¹, J. Jesús Vargas Hernández¹,
Gustavo Adolfo Baca Castillo², Antonio Trinidad Santos²,
Manuel Pomoso Alarcón Bustamante³

RESUMEN

Con el fin de analizar bajo condiciones de invernadero los efectos directos y las interacciones de los tres nutrimentos principales: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) sobre el desarrollo de *Pinus greggii*, se utilizó el diseño "San Cristóbal" para generar funciones de crecimiento representadas mediante superficies de respuesta. Además, las variables altura, diámetro y biomasa aérea, radical y total se usaron para calcular los índices morfológicos que estimarán la calidad de planta. Los resultados indicaron que los nutrimentos por sí solos, son menos importantes que las interacciones entre ellos y que esta relación nutrimental dinámica afecta de manera significativa la morfología de las plantas, especialmente, en lo que se refiere a la acumulación y distribución de biomasa. El valor obtenido para los índices de calidad (índice de calidad de Dickson y el índice de esbeltez) fue pobre, debido a la presencia de un gran crecimiento aéreo con respecto al radical, originado por concentraciones excesivas de uno u otro nutrimento. En particular, las concentraciones altas de nitrógeno estimularon el crecimiento de la parte aérea. Fue evidente, entonces, que el balance nutrimental es primordial para el desarrollo de las plántulas en la etapa de vivero y que es necesaria la realización de estudios sobre regímenes y dosis de cada nutrimento, que permitan determinar el óptimo fisiológico y operativo para *P. greggii*.

Palabras clave: Calidad de planta, diseño San Cristóbal, fertilización de plántulas, funciones de crecimiento, índices de calidad de planta, *Pinus greggii*.

Fecha de recepción: 10 de febrero de 1999.

Fecha de aceptación: 10 de febrero de 2004.

¹ Colegio de Postgraduados. Programa Forestal. Km. 36.5 Carr. Fed. México-Texcoco, Montecillo 56230 México. arita@colpos@yahoo.com; vargashj@colpos.mx

² Colegio de Postgraduados. Especialidad en Edafología. bacag@colpos.mx y trinidad@colpos.mx

³ Campo Experimental La Campana-Madera. CIRNOC - INIFAP. malarconbustamante@yahoo.com

ABSTRACT

The "San Cristóbal" design was used in seedlings of *Pinus greggii* growing in nursery conditions, to analyze the direct effects and the interaction effects of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in their growth and development in this condition. The data obtained from the development of seedlings were used in growth functions and represented in surface responses. In addition, the height, diameter, and shoot, root and total biomass were used to construct morphological indexes which are helpful to estimate seedling quality. Results showed that nutrients effects are less important than the interactions between them, and the dynamic nutrient relationship significantly affects seedling morphology, especially biomass accumulation and distribution. The values obtained for the quality indexes (Dickson and thinning) were poor, mainly because of an excessive shoot growth over root growth due to an excess in one nutrient or another, specially the high concentration of nitrogen, which promote the shoot growth. It was evident than nutrient balance is a key issue on nursery seedling development, thus, it is advisable to conduct experiments assessing single-nutrient doses and regimes in search for both physiological and operational optimum for *P. greggii*.

Key words: Seedling quality, San Cristobal design, seedling fertilization, growth functions, seedling quality indexes, *Pinus greggii*.

INTRODUCCIÓN

La velocidad de remoción del arbolado en los bosques, debida a extracción o a cambios en el uso del suelo, excede la capacidad de repoblación natural en la mayoría de los sitios forestales. Los programas de reforestación han sido la respuesta a este problema, de modo que en la actualidad se cuenta ya con algunas técnicas y procedimientos estandarizados para la producción de plantas en los viveros de México. Sin embargo, la supervivencia es el asunto clave en la reforestación y hasta hace algunos años, no se consideraba este aspecto crítico en los sistemas de producción de los viveros, los cuales deben garantizar, en la medida de lo posible, cada vez mayores porcentajes de establecimiento en campo, con individuos vigorosos, capaces de tolerar el estrés asociado al trasplante y de mantener una tasa de crecimiento adecuada en el sitio de plantación (Duryea, 1985).

Cada vez es más frecuente el uso de fertilizantes en los sistemas de producción de planta forestal en México, bajo la premisa de que un régimen de nutrición correcto mejora su calidad y favorece su nivel de desempeño en condiciones de campo (Duryea y McClain, 1984; Landis, 1985). A pesar de ello, no se han desarrollado procedimientos y rutinas de fertilización particulares para cada especie y se desconoce, en la mayoría de ellas, su efecto en el crecimiento de las plántulas.

La sobre aplicación de fertilizantes, además de implicar mayores costos, puede tener efectos tóxicos o provocar un desequilibrio en el crecimiento con efectos negativos o perjudiciales en la mayoría de los casos (Duryea y McClain, 1984; Landis *et al.*, 1989; Bigras *et al.*, 1996). Al contrario, una dosis balanceada, o con los requerimientos apropiados de nutrimentos para cada especie, mejorará la morfología y fisiología de las plantas de acuerdo con los estándares establecidos en cada vivero (Cano *et al.*, 1998).

A partir de la caracterización morfológica se generan índices o relaciones que estiman la calidad de la planta, mediante un valor numérico fácil de obtener; ejemplo de tales relaciones son la razón parte aérea/raíz, el coeficiente de robustez, y el índice de calidad de Dickson (Duryea y Landis, 1984).

Pinus greggii Engelm. se ha convertido en una de las especies predilectas de los viveristas en México debido a sus características de crecimiento (Cano *et al.*, 1998; Salazar *et al.*, 1999), variabilidad genética y adaptabilidad (Ramírez *et al.*, 1997; López-Ayala *et al.*, 1999), tolerancia a la sequía y a otras condiciones adversas (Vargas, 1985), además de que su tasa de crecimiento en altura se mantiene en toda la amplitud de su distribución natural, aún al ser desplazada hacia sitios relativamente alejados de sus fuentes de producción de semilla (Eguiluz, 1978; Cano *et al.*, 1998; López-Ayala *et al.*, 1999; Salazar *et al.*, 1999). Para el manejo de *P. greggii* en vivero se tienen rutinas estandarizadas bajo diferentes sistemas, que incluyen el uso de contenedores de plástico en condiciones de invernadero (Cano *et al.*, 1998). No obstante, los regímenes de fertilización utilizados son adecuados para esta especie y sí favorecen la aparición rápida de características deseables de crecimiento.

Con base en lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo identificar los efectos directos (individuales) y la interacción de los tres principales nutrimentos nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) sobre el crecimiento inicial de *P. greggii* en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones del estudio

El estudio se llevó a cabo en el área de invernaderos del Colegio de Postgraduados, Campus México, en Montecillo, Edo. de Méx., durante los meses de septiembre de 1997 a mayo de 1998, cuyas naves son estructuras con paredes y techo de cristal; tienen ventanas móviles para permitir la ventilación y regular la humedad ambiental, y el piso está cubierto con roca volcánica porosa (tezontle). La temperatura se mantuvo entre 12 y 32°C con la intención de reducir la fluctuación en algunos días muy calurosos, se regó el piso de la nave durante 30 a 45

minutos. Además, todos los días se abrieron las ventanas por la mañana y se cerraron al anochecer.

Las plantas procedieron de semilla colectada en 1994 en la localidad de "El Piñón", en el estado de Hidalgo. El lote consistió en una mezcla de diferentes árboles de esta población. Antes de sembrar, las semillas se remojaron en agua durante 48 hrs. La siembra se realizó en contenedores cónicos de plástico negro de 90 cc, a una profundidad de 0.5 cm; los envases fueron llenados previamente con sustrato hasta 2.5 cm del borde, se dejó un espacio suficiente para aplicar 10 cc de riego. La mezcla de "peat-moss" utilizada se considera inerte, ya que consistió en "peat-moss", vermiculita y perlita en proporción volumétrica 3:1:1; a pesar de que el primero es de origen orgánico, el período de evaluación no fue suficiente para que el medio de crecimiento hiciera una aportación significativa de nutrimentos. Para prevenir daños por hongos se aplicó Captán-50 durante las primeras diez semanas, en solución de 2.5 g L⁻¹ una vez por semana.

Diseño de tratamientos y soluciones nutritivas

Se utilizó un diseño factorial incompleto denominado "Diseño San Cristóbal", que fue desarrollado para investigación cañera en México a partir de trabajos clásicos sobre diseños incompletos (Box y Wilson, 1951; Rojas, 1962; Martínez, 1988), para reducir el número de tratamientos en los experimentos de fertilización que involucran tres o más factores, con la especial bondad de permitir una aproximación eficiente a la búsqueda del óptimo económico mediante superficies de respuesta (Martínez, 1988), sin la necesidad de incluir todas las posibles combinaciones de tratamientos de un diseño factorial completo, lo que aumentaría en gran medida el tamaño del experimento.

A pesar de la reducción en el número de tratamientos, la combinación de los factores permite una representación multidimensional de los mismos. En el caso del presente estudio la representación del diseño es tridimensional, ya que el experimento involucra tres factores (Figura 1).

Los factores representados en los ejes son: en el eje X presión osmótica (P_o) que expresa directamente la absorción de fósforo (P), en el eje Y la concentración de nitrógeno (N); y en el eje Z la concentración de potasio (K), de manera que los tratamientos representados son 12. Cada punto corresponde a la conjunción de tres de los cuatro niveles de factores incluidos en el diseño (0, 1, 2 y 3). El tratamiento 8 con dos niveles de cada factor es el centroide (2-2-2) del experimento.

Se debe recordar que el diseño San Cristóbal es un factorial incompleto, por lo tanto, sus principales desventajas son el no ser ortogonal y sus consecuentes

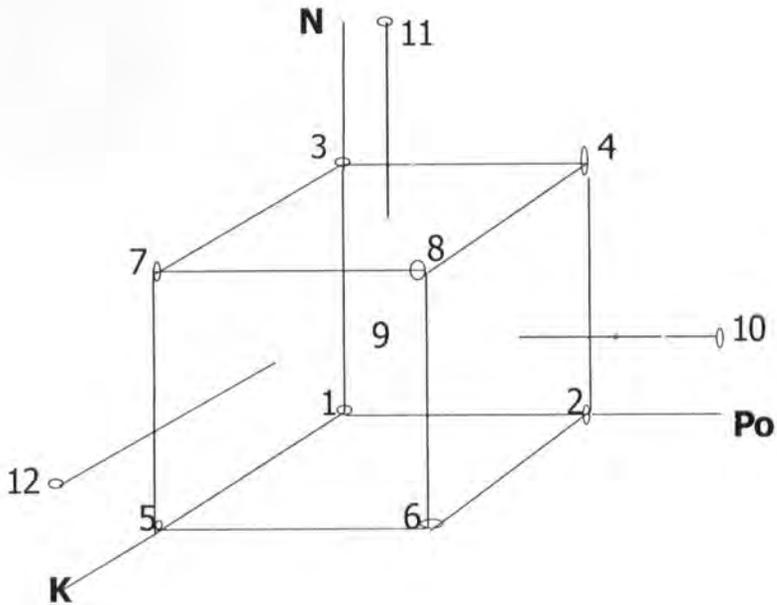


Figura 1. Cubo de tratamientos del "Diseño San Cristóbal" con tres factores de variación.

posibilidades de sesgo. En cambio, sus principales virtudes son: a) el número óptimo de tratamientos; es decir, el mínimo necesario para cumplir el objetivo del análisis de los efectos individuales de cada factor y sus interacciones; y b) su mayor poder de precisión en los estimadores, característica en la que supera ampliamente a las Matrices Plan Puebla II y III y a otros diseños factoriales incompletos como el diseño Box-Myers, el diseño Box, el Cuadrado Doble y el Cuadrado Doble modificado de Escobar (Turrent y Laird, 1975).

Las soluciones nutritivas se prepararon *ex professo* para cumplir con las características del presente estudio y en condiciones de balance osmótico total en el Laboratorio de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados (Cuadro 1). En estas mezclas de sales, el factor fósforo (P) estuvo implícito en el factor presión osmótica (Po), bajo el supuesto de que su aplicación en la planta induce un diferencial osmótico que favorece su absorción; de tal forma que la

concentración absorbida es directamente proporcional a los valores de presión osmótica; es decir, al aumentar la P_o , mayor absorción de fósforo.

Cuadro 1. Soluciones nutritivas con sus niveles y concentraciones de nitrógeno (N) y potasio (K) en meq L^{-1} y ppm^\dagger , y fósforo asociado al potencial osmótico (P_o) en atm, utilizadas como tratamientos de nutrición en el experimento[‡].

Tratamientos	N			Po			K	
	Nivel	meq L^{-1}	ppm	Nivel	p.o.(atm)	Nivel	meq L^{-1}	Ppm
1	0	6	42	0	0.36	0	1	18
2	0	6	84	2	0.72	0	1	39
3	2	12	84	0	0.36	0	1	18
4	2	12	168	2	0.72	0	1	39
5	0	6	42	0	0.36	2	7	137
6	0	6	84	2	0.72	2	7	273
7	2	12	84	0	0.36	2	7	137
8	2	12	168	2	0.72	2	7	273
9	1	9	94	1	0.54	1	4	117
10	1	9	158	3	0.90	1	4	195
11	3	15	158	1	0.54	1	4	117
12	1	9	94	1	0.54	3	10	293

[†] meq L^{-1} = miliequivalentes por litro de agua; ppm = partes por millón; y atm = atmósferas de presión.

[‡] Para generar la presión osmótica requerida la composición química definitiva de las soluciones nutritivas está expresada en partes por millón.

El tratamiento 8 es la Solución de Steiner (Steiner, 1961) la cual posee una relación equivalente de aniones (N) y cationes (K); los demás tratamientos son desigualdades iónicas basadas en ella, donde el efecto fisiológico de una dosis absoluta cambia en relación con el potencial osmótico (Steiner, 1984).

Estas soluciones se elaboraron en las cantidades adecuadas (soluciones madre) para ser diluidas posteriormente con agua destilada en recipientes de 30 L.

La aplicación de las soluciones nutritivas se realizó por separado, para cumplir con las concentraciones previstas; a cada planta se le adicionaron 10 ml. por ocasión. El inicio del experimento fue cinco semanas después de la fecha de siembra, con una periodicidad semanal durante la época fría (octubre a febrero) y cada 48 hrs. a partir de marzo, hasta el final del estudio. De manera complementaria a los tratamientos de fertilización, se hicieron riegos con agua destilada en función de las condiciones ambientales del invernadero y necesidades de las plantas. Pese a que se utilizó agua destilada para minimizar la alteración en las concentraciones de los nutrientes agregados con los tratamientos de fertilización, es necesario mencionar que en condiciones económicas óptimas (sin limitaciones económicas) todos los riegos deberían proporcionarse con solución nutritiva.

Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cinco repeticiones. El factor de bloques fue la velocidad de germinación de las semillas, definida con base en el número de días para la emergencia de las plántulas que considera el posible efecto del vigor, aunque también, puede deberse a variaciones microambientales. En el bloque uno se incluyeron los individuos que crecieron primero (entre los 11 y los 17 días después de la siembra) y así sucesivamente hasta el bloque cinco, el cual comprendió las plántulas que emergieron al final (entre los 25 y 29 días posteriores a la siembra). El factor de bloques tuvo como propósito reducir, en lo posible, las diferencias en el tamaño inicial de las plántulas y separarlas del efecto de las soluciones nutritivas. Cada bloque estuvo constituido por 12 parcelas (soluciones nutritivas), la unidad experimental fue de 30 plantas, para un total de 1800.

El modelo matemático derivado del "Diseño San Cristóbal" es una función de regresión que obedece a un factorial selectivo del tipo p factores, cada uno en cuatro niveles equidistantes. Si los niveles son 0, 1, 2 y 3, las combinaciones elegidas entre todas las posibles son: a) un factorial completo del tipo 2^p donde se ubican los niveles 0 y 2 de cada factor (N , P_0 y K); b) el punto central (nivel 1 de los tres factores) y los p puntos axiales (3,1,1), (1,3,1), y (1,1,3); esto se expresa como:

$$Y = b_0 + b_1n + b_2p_0 + b_3k + b_4n^2 + b_5p_0^2 + b_6k^2 + b_7np_0 + b_8nk + b_9p_0k$$

Donde:

Y = La característica que se desea estimar en función de N , P_0 y K

b_0 = La ordenada al origen; la estimación de Y debida al nivel 0 de cada factor ($N = P_0 = K = 0$);

b_1 , b_2 y b_3 estiman los efectos lineales de N , P_0 y K , respectivamente

b_4 , b_5 y b_6 estiman los efectos cuadráticos respectivos

b_7 , b_8 y b_9 estiman las interacciones de primer orden entre los factores

No existen en este modelo interacciones de segundo orden

Antes de modelar matemáticamente el crecimiento y la producción de biomasa de las plantas, se efectuó un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey, para identificar en forma tradicional las diferencias existentes entre los tratamientos con $p \leq 0.05$. A continuación se utilizó el modelo general de regresión descrito arriba como base para crear distintas funciones de respuesta con el procedimiento GLM del paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 1985), para explicar el efecto de las soluciones nutritivas sobre el crecimiento y la producción de biomasa de las plantas.

A partir de este modelo general se evaluaron las funciones que representaron las combinaciones de sólo efectos lineales, efectos lineales con interacciones, efectos cuadráticos con interacciones y lineales con efectos cuadráticos con interacciones, de acuerdo al procedimiento descrito por Rojas (1979). Se seleccionaron sólo aquellas funciones que presentaron diferencias estadísticas significativas en un nivel $\alpha \leq 0.5$, para cada característica de crecimiento evaluada.

De este modo, en las funciones nutrimentales resultantes no se interpreta el crecimiento de las plantas como respuesta a un tratamiento, sino a cada nutrimento probado en forma lineal y cuadrática, y a la combinación de ellos en sus interacciones. Este análisis matemático modeló la variación tridimensional explorada por el diseño de tratamientos, y se representó con superficies de respuesta que permitieron visualizar con facilidad el comportamiento de las plantas a las interacciones nutrimentales (Martínez, 1988).

VARIABLES EVALUADAS

Se realizaron tres mediciones del crecimiento: la primera a los cuatro meses de edad a partir de la siembra (22 de enero de 1998); la segunda a los seis meses (25 de marzo de 1998); y la última a los ocho meses y medio de edad (22 de mayo de 1998). En cada ocasión se hizo un muestreo destructivo con seis de las 30 plantas de cada parcela; es decir, se eliminaron 360 individuos en cada fecha de evaluación, por lo que el remanente final fue de 720 plantas. En este documento se presentan y discuten los resultados obtenidos al final del estudio, luego de ocho meses y medio de crecimiento.

Las variables evaluadas en cada ocasión fueron: la altura de planta, el diámetro del tallo y la biomasa aérea, radical, y total. A partir de estas se estimaron el

índice de esbeltez, la relación parte aérea/raíz y el índice de calidad de Dickson. La altura se midió en centímetros, desde el borde del contenedor hasta la yema apical. El diámetro del tallo se midió en milímetros, en el borde del contenedor, con un vernier digital Mitutoyo, con aproximación a 0.001 mm. La biomasa aérea (tallo + hojas), radical y total se obtuvo en gramos, después de secar las muestras en estufa hasta peso constante (70° durante 72 hrs.). El peso se determinó con una balanza analítica con precisión a miligramos.

El índice de esbeltez se calculó mediante el cociente de la altura entre el diámetro del tallo. Se denominó de esta manera debido a que en el sistema actual de los viveros en México, las plantas producidas en contenedores cónicos o bloques de unicel son en general altas y delgadas (Cano *et al.*, 1998). Este índice es otra forma de referirse al cociente de robustez, llamado así porque a menores valores del índice las plantas son más robustas (Thompson, 1985). La relación parte aérea/raíz se estimó como el cociente adimensional entre la biomasa aérea (g) y la biomasa radical (g). El Índice de Calidad de Dickson (ICD) resultó de integrar los valores de biomasa total, el índice de esbeltez y la relación parte aérea/raíz, del modo siguiente:

$$ICD = \frac{\text{Biomasa total (g)}}{\frac{A \text{ (cm)}}{D \text{ (mm)}} + \frac{\text{Biomasa aérea (g)}}{\text{Biomasa radical (g)}}}$$

Donde:

A = altura

D = diámetro

En esta relación, los valores grandes del índice indican plantas de mejor calidad (Thompson, 1985).

Además de las variables anteriores, también se determinó el contenido de nitrógeno total (N), fósforo (P) y potasio (K) en porcentaje del peso del tejido vegetal (hojas), en cinco muestras de 0.5 g, para cada uno de los 12 tratamientos (n = 60). Para el caso del N se utilizó el método Kjeldahl (Bremen, 1965) y para los contenidos de P y de K un espectrómetro de emisión atómica de acoplamiento inducido por plasma (ICP-AES), marca Liberty, modelo Varian II. Munter y Grande (1981) describieron ampliamente el principio de funcionamiento de este equipo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las soluciones nutritivas afectaron de manera significativa el crecimiento de las plantas. La presencia de diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$)

entre tratamientos se utilizó sólo como referencia para la generación de las funciones de crecimiento y producción de biomasa en respuesta a los factores de fertilización (Cuadro 2).

Cuadro 2. Altura, diámetro, producción de biomasa (biomasa aérea, radical y total) y relación parte aérea/raíz a los 8.5 meses de edad en plántulas de *Pinus greggii* Engelm., fertilizadas con diferentes tratamientos de nutrición.

Tratamientos [†]	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Biomasa aérea (g)	Biomasa de raíz (g)	Biomasa total (g)	RPA/R [‡]
1	18.99 d [§]	1.656 c	0.555 b	0.170a	0.725a	3.26
2	22.06abcd	1.859 bc	0.719ab	0.182a	0.902a	3.95
3	21.73abcd	1.841 c	0.672ab	0.172a	0.845a	3.90
4	21.92abcd	1.815 c	0.686ab	0.153a	0.839a	4.48
5	20.85 cd	1.691 c	0.594ab	0.158a	0.752a	3.76
6	24.37ab	2.070ab	0.747a	0.200a	0.948a	3.73
7	21.60 bcd	1.860 bc	0.645ab	0.169a	0.814a	3.82
8	24.92a	2.149a	0.695ab	0.171a	0.866a	4.06
9	22.27abc	1.845 bc	0.663ab	0.176a	0.840a	3.77
10	21.46 bcd	1.850 c	0.676ab	0.172a	0.848a	3.93
11	22.14abcd	1.837 bc	0.674ab	0.150a	0.824a	4.49
12	21.94abcd	1.862 bc	0.689ab	0.163a	0.853a	4.23

[†]Las concentraciones de nitrógeno (N) y potasio (K) y la presión osmótica (Po) de cada tratamiento se presentan en el Cuadro 1.

[‡]RPA/R = relación parte aérea/raíz; [§]Valores en una columna seguidos por la misma letra son estadísticamente iguales.

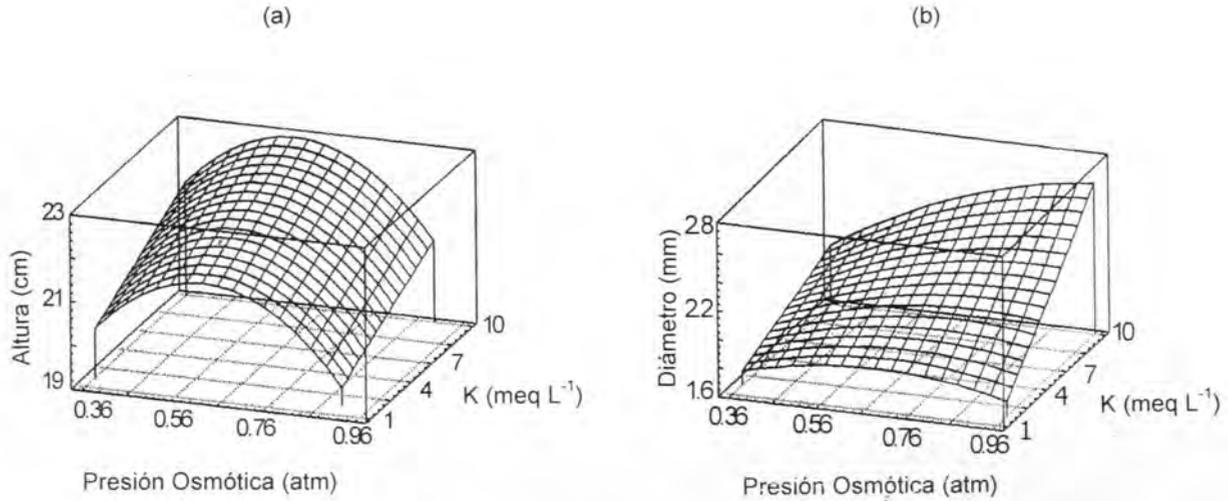
Crecimiento en altura y en diámetro

La diferencia en altura a los ocho meses y medio de crecimiento estuvo relacionada con los efectos lineal y cuadrático de la presión osmótica de las soluciones nutritivas y el efecto lineal del potasio (Figura 2a). Como puede observarse, el crecimiento en altura respondió en proporción directa al efecto de la presión osmótica de la solución nutritiva hasta un punto situado entre los niveles 2 y 3 del factor (0.54 a 0.72 atm), que es la región de la superficie de respuesta donde se aprecia la mayor expresión del crecimiento; valores inferiores o superiores de presión osmótica ocasionaron efectos menores. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Steiner (1984), quien demostró que la presión osmótica es el factor más importante en la respuesta de las plantas a las soluciones nutritivas.

El crecimiento en altura se relacionó de manera lineal con el contenido de potasio de la solución, por lo que se esperaba que su concentración mínima de potasio ($1 \text{ meq L}^{-1} \text{ K}$) produjera plantas con menor altura y con la máxima (10 meq L^{-1}) fueron más altas. Sin embargo, debido a la presión osmótica la mayor altura, casi 25 cm, se obtuvo con la concentración de $7 \text{ meq L}^{-1} \text{ K}$ a 0.72 atm de P_o ; este resultado fue 25% superior al obtenido con $1 \text{ meq L}^{-1} \text{ K}$, el cual produjo plántulas de 19 cm de altura.

Un potencial osmótico elevado en la raíz es un requisito para la turgencia, el transporte de solutos y el balance de agua en las plantas, los que en principio son responsables de la extensión celular. Además, el potasio es el soluto inorgánico más importante en esos procesos, por lo que la extensión celular de tallos y hojas está muy relacionada con los niveles de potasio (Marschner, 1990). Esto coincide con los datos del presente trabajo y contribuye a la opinión de que el potasio es un nutrimento importante para el alargamiento celular y en definitiva para el crecimiento general de las plantas.

Con respecto al diámetro del tallo, nuevamente la presión osmótica y su interacción con el potasio determinaron el crecimiento (Figura 2a-b). El diámetro del tallo manifestó su máxima expresión (2.15 mm), a una presión osmótica de 0.54 a 0.72 atm; por arriba de esta región no se presentaron incrementos significativos en diámetro lo que puede explicarse a partir de lo citado por Steiner (1984), quien señaló que la mayoría de los cultivos soportan las concentraciones iónicas totales de las soluciones nutritivas hasta límites fisiológicos particulares y, si se rebasan dichos límites, las plantas ya no responden en crecimiento, debido a sobredosis o a deficiencia en los nutrimentos. No obstante, hasta la fecha no existe información para otras especies del género *Pinus* fertilizadas con soluciones de las que se conozca su contenido iónico real que corroboren el efecto antes descrito.



$$\text{Altura} = 13.074 + 27.231(Po) + 0.167(K) - 22.650(Po)^2$$

$$R^2 = 0.283$$

$$\text{Diámetro} = 1.344 + 1.467(Po) - 1.316(Po)^2 + 0.114(Po \cdot K)$$

$$R^2 = 0.402$$

Figura 2a. Crecimiento en altura (a) y diámetro (b) de plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a la presión osmótica (Po) y al potasio (K) de las soluciones nutritivas.

El diámetro del tallo también respondió en forma lineal a las concentraciones de potasio en las soluciones aplicadas, (Figura 2a-b). Aunque, a diferencia de la altura, la concentración máxima de potasio (10 meq L^{-1}) si ocasionó el mayor diámetro en las plantas; los valores mayores se obtuvieron con los tratamientos 8 y 6 (ambos con 7 meq L^{-1} de K y 0.72 atm de Po). El diámetro del tallo en estos tratamientos fue 23% superior al alcanzado en el tratamiento 1 (1 meq L^{-1} de K y 0.36 atm de Po), que a su vez fue el menor con $2.11 > 1.65 \text{ mm}$. Al respecto, Dralle y Larsen (1995) determinaron en individuos adultos de *Picea abies* (L.) Karst, que la fertilización con fósforo y potasio provocó incrementos en diámetro de hasta 100%, mientras que los niveles de nitrógeno no tuvieron ningún efecto importante sobre el crecimiento en diámetro de *P. abies*.

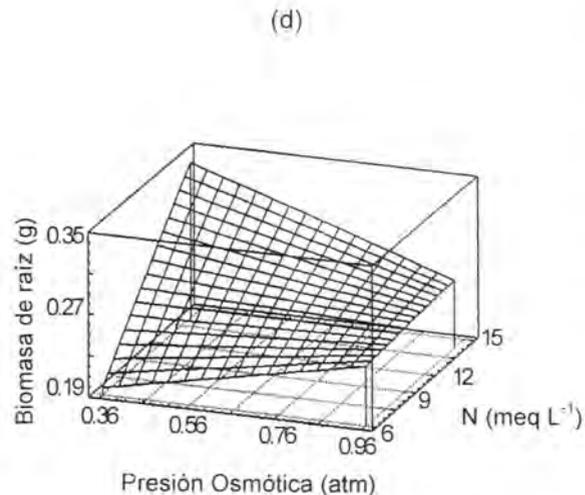
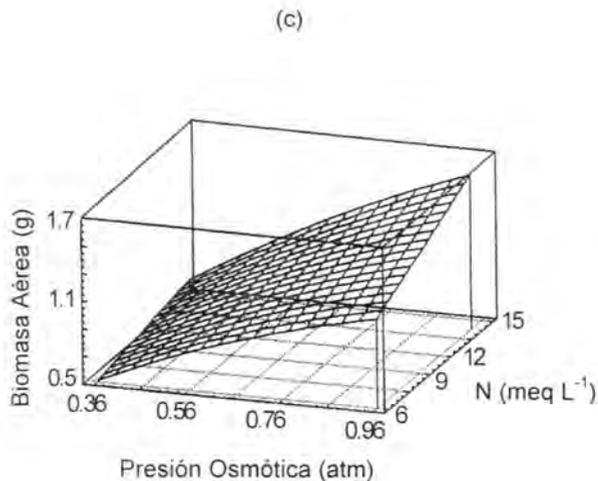
En este estudio, el diámetro alcanzado por las plantas a los ocho meses y medio de edad es 17% menor al esperado para la especie en la mayoría de los viveros tecnificados de México ($2.11 < 2.51 \text{ mm}$), según lo consignado por Cano *et al.* (1998). Al relacionar esos resultados con el trabajo de Dralle y Larsen (1995) se puede señalar que a pesar del efecto benéfico del potasio, el aumento en la presión osmótica resultó un factor adverso para el crecimiento en diámetro (Figura 2a-b).

Dado que la absorción de fósforo está relacionada con el nivel de presión osmótica y que tanto el fósforo como el potasio tienen un efecto positivo sobre el diámetro, se esperaría una relación directa entre la presión osmótica y el diámetro. Los resultados, sin embargo, no confirman esta respuesta, por lo que es necesario investigar con mayor detalle la relación entre presión osmótica y absorción de fósforo en especies forestales.

Producción de biomasa

La mayor acumulación de biomasa aérea se logró con el tratamiento 6 y la menor con el tratamiento 1; en este caso, los efectos más importantes y significativos ($p \leq 0.01$) fueron la presión osmótica y el nitrógeno (Figura 2b-c). La biomasa aérea producida con bajas concentraciones nutrimentales y la menor presión osmótica de la solución (0.36 atm) fue de sólo 0.555 g , y la obtenida con concentraciones intermedias y la presión osmótica de 0.72 atm fue de 0.747 g , 35% más que la anterior.

Aparentemente, según la función de respuesta, deberían utilizarse soluciones con presión osmótica alta, ya que estimulan la producción de biomasa aérea. Sin embargo, los tratamientos no permitieron explorar la zona de máxima respuesta producida por el modelo (15 meq L^{-1} de N y 0.90 atm de Po), por lo que no existen datos que apoyen este comportamiento; además la biomasa de la parte aérea no es lo único importante, ya que debe existir un balance apropiado con la biomasa de raíz, según los requerimientos del sitio de plantación.



$$\text{Biomasa aérea} = -0.0044 + 1.5402(Po) - 0.7017(Po)^2 + 0.059(Po \cdot N); R^2 = 0.257$$

$$\text{Biomasa de raíz} = 0.0285 + 0.2350(Po) + 0.0239(N) - 0.0253(Po \cdot N); R^2 = 0.262$$

Figura 2b. Producción de biomasa aérea (c) y de raíz (d) de plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a la presión osmótica (Po) y al nitrógeno (N) de las soluciones nutritivas.

Los resultados del estudio muestran que la composición de las soluciones nutritivas son una herramienta útil para manipular el balance entre la biomasa aérea y la radical en plantas de *Pinus greggii*, hecho que coincide con otras coníferas (Van den Driessche, 1992). Las actividades en vivero podrían incluir o combinar la fertilización con la poda aérea, que ha resultado una acción importante en la modificación de la respuesta fisiológica de las plantas, a nivel de redistribución de carbohidratos (Cetina *et al.*, 2001) sobre todo al aumentar la formación de raíces (Cetina *et al.*, 1999). El conjunto de estas prácticas contribuye a optimizar el balance entre la parte aérea y las raíces, con los requerimientos de los sitios de plantación.

La interacción de la presión osmótica con el nitrógeno tuvo un efecto significativo sobre la biomasa de raíz (Figura 2b-d). Con base en la superficie de respuesta, los mayores valores de biomasa radical se obtendrían combinando la menor presión osmótica (0.36 atm) y el mayor nivel de nitrógeno (15 meq L⁻¹); aunque en el ensayo no se incluyó dicho tratamiento. Si se observa la Figura 2b-d, el incremento en la presión osmótica (Eje X) eleva la biomasa de raíces sólo si se utiliza el mínimo de nitrógeno en la solución nutritiva.

Por otro lado, la biomasa radical aumenta en forma importante con la concentración de N (Eje Z), cuando se utilizan los valores mínimos de presión osmótica en la solución. Sin embargo, los tratamientos incluidos en el ensayo no exploraron completamente la variación representada en la superficie de respuesta; por lo que en el tratamiento 6 se alcanzó el mayor valor de biomasa de raíces (0.200 g), seguido del tratamiento 2 con 0.182 g. En ambos casos debe notarse que, de acuerdo con los valores esperados de la función de respuesta, el nivel de nitrógeno es mínimo (6 meq L⁻¹) pero el valor de presión osmótica (0.72 atm) no es el máximo. Esto es importante porque la fertilización en vivero tiene efectos contrastantes en la producción de biomasa aérea y de raíces.

Se ha comprobado que las fórmulas con mayor concentración de nutrimentos inhiben el crecimiento radical (Van den Driessche, 1992); este efecto, en particular del nitrógeno, se ha observado también en clones de híbridos del género *Populus* (Friend *et al.*, 2000).

Relación parte aérea/raíz

La relación parte aérea/raíz (RPA/R) obtenida con las soluciones nutritivas (Cuadro 2) fueron muy superiores al máximo de 2.5 recomendado tradicionalmente (Thompson, 1985) y son inconvenientes desde el punto de vista de calidad de las plantas. El criterio de calidad con base en esta característica es que la parte aérea sea lo más cercano posible a la biomasa de la raíz (RPA/R ≈ 1), porque esto puede garantizar una mayor supervivencia en campo, al evitar que

la transpiración de la parte aérea exceda a la capacidad de absorción de agua por las raíces (May, 1984).

Los resultados indican que todos los tratamientos aplicados promovieron más el crecimiento aéreo de las plantas que el de las raíces. Duryea y Landis (1984) citan que la fertilización, presenta un efecto similar, estimula más el crecimiento de la parte aérea que el de la raíz. Los tratamientos 4 (RPA/R = 4.48) y 11 (RPA/R = 4.49) fueron muy superiores (80%) a los valores recomendados para otras especies de coníferas (Thompson, 1985), pero aún son 32% menores que los registrados para la misma especie en el sistema de viveros tecnificados en México (Cano *et al.*, 1998).

El modelo de la relación parte aérea/raíz (RPA/R) evidencia que la interacción entre los niveles de presión osmótica (P_o) y de nitrógeno (N) de las soluciones nutritivas fue el factor determinante (Figura 3). Es interesante destacar que la superficie de respuesta obtenida muestra que la RPA/R disminuye ligeramente conforme aumenta el nivel de nitrógeno, y esta pérdida es mayor en el menor nivel de presión osmótica; lo que difiere de lo propuesto por Landis *et al.* (1989), quienes mencionan que a mayores niveles de nitrógeno la relación parte aérea/raíz por lo general se incrementa. Sin embargo, de nuevo, esos extremos

$$\text{Relación parte aérea/raíz} = 2.3535 + 4.8871(P_o) - 0.0935(N) \text{ con } R^2 = 0.328.$$

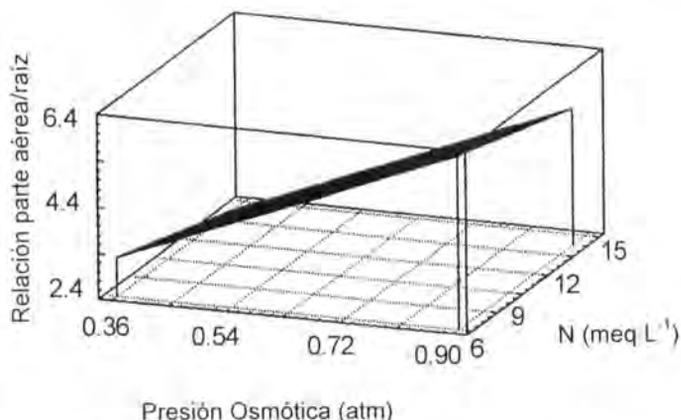


Figura 3. Relación parte aérea/raíz (RPA/R) en plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a la presión osmótica (P_o) y al nitrógeno (N) de la solución nutritiva.

de la superficie de respuesta no fueron explorados por los tratamientos de este trabajo, por lo que no existe evidencia concluyente.

Contenido nutrimental en la planta

El contenido de nitrógeno en la parte aérea de las plantas presentó diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.01$) entre tratamientos, con valores que variaron entre 2.62 y 3.66%, como sucede en otros cultivos en medios hidropónicos (Cuadro 3). Estas concentraciones son superiores a las recomendadas por Youngberg (1984) y Duryea y McClain (1984), autores que han establecido como óptimo un contenido entre 1.7 y 2.2%. El tratamiento 5 propició una concentración de nitrógeno 34% mayor que el promedio de los niveles definidos como óptimos, mientras que los tratamientos 4, 8 y 10 excedieron en 80% ese valor.

Las soluciones preparadas provocaron un exceso de nutrición en las plantas (sobrefertilización), además de que la absorción de los nutrimentos no estuvo en proporción directa a la concentración de las soluciones, como por ejemplo en los tratamientos 5, 7 y 10 para el potasio, y el 2, 6 y 11 para el nitrógeno (Cuadros 1 y 3). Lo anterior hace evidente la necesidad de considerar cuidadosamente las interacciones nutrimentales que ocurren al manipular concentraciones de elementos en soluciones nutritivas. En el futuro si se quiere modelar el efecto nutrimental sobre otras especies forestales será necesario ensayar dosis más bajas de nitrógeno y conceder atención a las de fósforo y potasio.

En lo que respecta al fósforo, la mayor concentración (0.23%) en el tejido vegetal se presentó en el tratamiento 1 y la menor (0.15%) en el 4. Al igual que en el caso del nitrógeno, la acumulación de fósforo en los tejidos tampoco estuvo relacionada en forma directa con el nivel de presión osmótica de los tratamientos. Por ejemplo, en el tratamiento 10, con la presión osmótica más alta (0.90 atm) se observó una absorción total de 1.22 mg de fósforo, mientras que en los tratamientos 2, 4 y 6, donde el potencial osmótico fue menor (0.72 atm), la absorción de fósforo varió entre 1.03 y 1.41 mg (Cuadros 1 y 3).

De nuevo, los resultados indican que la concentración absoluta de un elemento en la solución nutritiva no es determinante en el crecimiento de las plantas; la respuesta final depende más de la concentración de un elemento dado con las concentraciones de los otros nutrimentos en la solución, que en conjunto definen el potencial osmótico de ésta.

Como se discutió en el caso del nitrógeno, los datos sugieren que el balance nutrimental en las soluciones nutritivas genera respuestas distintas en el crecimiento, como se ha demostrado en otras especies forestales (Van den Driessche, 1980; Ritchie, 1984). Esto se refleja en el tratamiento 1, el cual se

Cuadro 3. Contenido total (mg) y porcentaje (%) de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en la parte aérea de plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a diferentes soluciones nutritivas.

Tratamientos [†]	N		P		K							
	(mg)	%	(mg)	%	(mg)	%						
1	15.87	c [‡]	2.86	bc	1.28	a	0.23	a	9.69	d	1.75	cd
2	23.58	ab	3.28	abc	1.30	a	0.18	ab	11.80	cd	1.64	cd
3	20.43	abc	3.04	abc	1.19	a	0.18	ab	10.65	cd	1.58	cd
4	23.46	ab	3.42	ab	1.03	a	0.15	b	10.46	cd	1.52	d
5	15.56	c	2.62	c	1.13	a	0.19	ab	10.36	d	1.74	cd
6	21.51	ab	2.88	abc	1.41	a	0.19	ab	17.92	ab	2.40	abc
7	20.12	abc	3.12	abc	1.17	a	0.18	ab	14.55	bcd	2.26	bcd
8	25.44	a	3.66	a	1.30	a	0.19	ab	19.59	ab	2.82	ab
9	19.23	bc	2.90	abc	1.23	a	0.18	ab	14.90	bcd	2.25	bcd
10	23.25	ab	3.44	ab	1.22	a	0.18	ab	16.07	abc	2.38	abc
11	22.11	ab	3.28	abc	1.18	a	0.17	ab	14.57	bcd	2.16	bcd
12	19.98	bc	2.90	abc	1.35	a	0.19	ab	21.58	a	3.13	a

[†]Las concentraciones de nitrógeno (N) y potasio (K) y la presión osmótica (Po) de cada tratamiento se presentan en el Cuadro 1.

[‡]Valores en una columna seguidos por la misma letra son estadísticamente iguales.

observó la mayor absorción relativa de fósforo (0.23%), coincide con las plantas de menor tamaño; es decir, hubo un efecto significativo de acumulación del elemento (P) en el tejido verde debido a su menor tasa de crecimiento, asociada probablemente al efecto indirecto de los otros elementos (N y K) en la solución nutritiva, cabe destacar que este tratamiento aportó las concentraciones menores de nitrógeno (6 meq L⁻¹) y potasio (1 meq L⁻¹), así como el menor nivel

de presión osmótica (0.36 atm) de todo el estudio (Cuadro 1) y fue el que originó la relación parte aérea/raíz más adecuada de todas (Cuadros 2 y 4).

Para el potasio la concentración promedio en el tejido vegetal fue de 2.14%, valor muy superior al sugerido como óptimo (1.0%) por Landis *et al.* (1989). Esta concentración también presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos (Cuadro 3). En tanto que en el tratamiento 12 se obtuvo una concentración promedio de 3.13% de potasio, en el cuatro la concentración fue de sólo 1.52%, menos de la mitad que en el primero. A diferencia de lo que ocurrió con el nitrógeno (N) y el fósforo (P), en el potasio (K) si hubo tendencia a incrementar la absorción total del elemento, al aumentar su concentración en la solución nutritiva (Cuadros 1 y 3).

Indicadores de calidad de planta

Aunque los valores de la relación parte aérea/raíz encontrados en este estudio son muy superiores a los considerados adecuados en términos de calidad de planta, se incluyeron para mostrar gráficamente los efectos del desbalance nutricional originado por las soluciones nutritivas utilizadas.

El Cuadro 3 muestra que el menor valor promedio de la relación parte aérea/raíz (RPA/R) fue mayor que 3.0. En general para especies de coníferas la RPA/R óptima no debe sobrepasar un valor de 2.5 (Thompson, 1985); a pesar de ello, para *P. greggii* en un sistema de producción tecnificado en México fueron superiores a los de este estudio (Cano *et al.*, 1998). Lo más importante es hacer notar algunos excesos en las concentraciones elementales de las soluciones nutritivas, junto con el efecto multiplicativo de la presión osmótica sobre la absorción del nitrógeno y el potasio. Este comportamiento es claro en los tratamientos 4 y 11, en los que la relación parte aérea/raíz fue 4.5, seguidos por los tratamientos 12 y 8, con una relación mayor a 4.0 (Cuadro 4).

Cabe señalar que en dichos tratamientos la característica más evidente es la saturación de al menos uno de los nutrimentos estudiados: del potasio en el tratamiento 12, del nitrógeno en los tratamientos 4 y 11, y de ambos elementos (N y K) en el tratamiento 8. Por otra parte, el tratamiento 6 generó la máxima cantidad de biomasa de raíz (0.200g); pero debido al efecto de la presión osmótica, la biomasa aérea superó con mucho el crecimiento de la raíz, a pesar de la concentración moderada del nitrógeno utilizada en dicho tratamiento (Cuadro 2), a su vez, los contenidos de fósforo y potasio en el tejido verde de las plantas fueron relativamente altos (Cuadro 3) y se obtuvo el "mejor" índice de calidad de Dickson (ICD) (Cuadro 4).

Los valores promedio del índice de esbeltez y del índice de calidad de Dickson (ICD) muestran el desbalance en el crecimiento de las plántulas (Cuadro 4). El

Cuadro 4. Relación parte aérea/raíz, índice de esbeltez e índice de calidad de Dickson (ICD) en plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a diferentes soluciones nutritivas.

Tratamientos [†]	Relación parte aérea/raíz	Índice de esbeltez	Índice de calidad de Dickson
1	3.27 b [‡]	11.48 a	0.0492 a
2	3.97 ab	11.84 a	0.0571 a
3	3.90 ab	11.83 a	0.0537 a
4	4.50 a	12.07 a	0.0506 a
5	3.77 ab	12.31 a	0.0468 a
6	3.85 ab	11.75 a	0.0608 a
7	3.85 ab	11.62 a	0.0526 a
8	4.09 ab	11.56 a	0.0553 a
9	3.77 ab	12.08 a	0.0530 a
10	3.94 ab	11.59 a	0.0546 a
11	4.47 a	12.04 a	0.0500 a
12	4.21 a	11.77 a	0.0534 a

[†]Las concentraciones de nitrógeno (N) y potasio (K) y la presión osmótica (Po) de cada tratamiento se presentan en el Cuadro 1.

[‡]Valores en una columna seguidos por la misma letra son estadísticamente iguales.

índice de esbeltez es una medida de la morfología evidente de las plantas; define individuos altos y delgados, o bajos y robustos. Las plantas de *P. greggii* de este estudio, a los ocho meses y medio de edad corresponden a la primera categoría. Al parecer, el exceso de nitrógeno en las soluciones nutritivas favoreció el crecimiento en altura a expensas del crecimiento en diámetro y del crecimiento de la raíz, como ha sido citado en otras especies forestales (Brissette y Tiarks, 1990; Mishra y Chauhan, 1997). Debido a que las plantas esbeltas son más

susceptibles a los factores ambientales adversos (Sutton, 1979; Chavasse, 1980; Thompson, 1985), a partir de la evidencia proporcionada por los resultados sería necesario modificar el balance nutrimental de las soluciones para favorecer el crecimiento en diámetro, además de disminuir los umbrales máximos al momento de prepararlas.

Estudios realizados en otras especies indican que esto se puede lograr aumentando las concentraciones de fósforo (P) y potasio (K) al tiempo que se reduce la concentración de nitrógeno (Van den Driessche, 1980; Mishra y Chauhan, 1997; Mead *et al.*, 1998). Además el efecto del balance nutrimental sobre la relación parte aérea/raíz también puede depender de la época de aplicación de los fertilizantes y de la etapa de crecimiento de las plantas (Gleason *et al.*, 1990).

Al respecto existe evidencia de que aplicaciones frecuentes de concentraciones bajas de elementos, son más eficientes que concentraciones altas aplicadas una sola vez (Ingestad, 1982), y es necesario considerar que en las fórmulas comerciales, las cantidades en la etiqueta se refieren a los compuestos en los que se asimilan las formas elementales de los nutrimentos y no a sus concentraciones iónicas reales (Binkley, 1986).

Los valores del índice de calidad de Dickson observados en el estudio son muy bajos y bastante menores a los encontrados por Ritchie (1984) en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, y en *Ulmus villosa* Brandis Ex. Gamble por Mishra y Chauhan (1997). Dado que el índice de calidad de Dickson combina la biomasa total de la planta con los dos índices anteriores (relación parte aérea/raíz e índice de esbeltez), los resultados obtenidos son lógicos, puesto que reflejan el desbalance en el crecimiento descrito en párrafos anteriores.

Las interacciones nutrimentales evidenciadas en el presente trabajo son razón suficiente para investigar más a fondo el cambio en la absorción de un nutrimento en presencia de otro, ya que la proporción de las concentraciones y su interacción con la época de crecimiento son factores muy dinámicos. Con relación a esto, Imo y Timmer (1997) determinaron en *Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz que cuando las dosis de fertilización se mantienen constantes, generalmente se ocasiona un efecto de dilución de los nutrimentos conforme crece la planta. Esto significa que para que la absorción sea efectiva, deben diseñarse regímenes de fertilización que modifiquen las concentraciones nutrimentales en función de la época y el ritmo de crecimiento, para lograr en todo el período de crecimiento un equilibrio entre las cantidades aplicadas de los nutrimentos y las absorbidas en el tejido verde de las plantas.

Con base en lo anterior, es obvio que las cantidades utilizadas en el estudio, diseñadas originalmente para especies agrícolas, que por lo regular tienen tasas

de crecimiento más elevadas que las especies leñosas, fueron excesivas para *Pinus greggii*. Debido a la falta de información existente sobre las necesidades nutrimentales de las especies forestales de México en condiciones de vivero, es importante tomar en cuenta los resultados obtenidos para diseñar un régimen de fertilización dinámico para las condiciones específicas de producción de planta en vivero. Las funciones de respuesta generadas son una primera aproximación en la búsqueda de una combinación óptima de nutrimentos, tanto desde el punto de vista fisiológico, como operativo para *P. greggii*.

CONCLUSIONES

Las concentraciones nutrimentales de las soluciones nutritivas tuvieron efectos importantes en el desarrollo de las plantas en todas las características evaluadas, sobre todo en cuanto a la acumulación y la distribución de biomasa.

Las concentraciones elevadas de nitrógeno estimularon en exceso el crecimiento de la parte aérea, por lo que los parámetros de calidad de planta fueron inferiores a los estándares establecidos para la producción de planta en México.

Las interacciones nutrimentales tuvieron mayor influencia que los elementos por sí solos, lo que indica que la absorción es dinámica y depende del balance entre nutrimentos y los patrones de crecimiento de las plantas. El factor principal que condicionó los niveles de absorción nutrimental fue la presión osmótica de la solución nutritiva.

Los resultados de este estudio representan una primera aproximación al análisis del balance nutrimental en especies forestales en condiciones de vivero y plantean la necesidad de explorar dosis específicas de fertilización en la búsqueda de concentraciones nutrimentales óptimas para lograr un equilibrio fisiológico y operativo en la producción de planta de *Pinus greggii*.

REFERENCIAS

- Bigras F. J., A. Gonzalez, A., L. D'aoust y C. Hebert. 1996. Frost hardiness, bud phenology and growth of containerized *Picea mariana* seedlings grown at three nitrogen levels and three temperature regimes. *New Forests* 12: 243-259.
- Binkley, D. 1986. *Forest Nutrition Management*. Wiley-Interscience Pub. John Wiley & Sons. New York, NY. 290 p.
- Box G. E. P., and K. B. Wilson. 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. *Jour. Roy. Stat. Soc. Series B.* 13:1-45
- Bremen J., M. 1965. Total nitrogen. *In*: Black, C., A. (Ed.) *Methods of soil analysis. Part. 2.* Agronomy 9. American Society of Agronomy, Madison, WI., USA. pp.1149-1178.

- Brissette J., C. y A., E. Tiarks. 1990. Nitrogen fertilization affects the partitioning of dry matter growth between shoots and roots of loblolly pine nursery stock. *In*: Coleman S., S. y D.G. Neary (Eds.) Proceedings of the 6th biennial Southern silvicultural research conference. USDA, For. Serv. Southeastern For. Exp. Sta., Gen. Tech. Rep. 70. Asheville, NC. pp: 108-114.
- Cano P., A., J. J. Vargas, H., V. A. González, H., G. Vera, C. y V. M. Cetina, A. 1998. Caracterización morfológica de plántulas de *Pinus greggii* Engelm. en dos sistemas de producción en vivero. *Ciencia Forestal en México* 23 (84):19-27.
- Cetina A., V. M., V. A. González, H. y J. J. Vargas, H. 1999. El manejo en vivero de *Pinus greggii* Engelm., y la calidad de planta. *Agrociencia* 33 (4):423-430.
- Cetina A., V. M., M. L. Ortega, V. A. González, H., J. J. Vargas, H., M. T. Colinas, L. y A. Villegas, M. 2001. Fotosíntesis y contenido de carbohidratos de *Pinus greggii* Engelm., en respuesta a la poda y al régimen de riego en vivero. *Agrociencia* 35 (6):599-607.
- Chavasse, C. G. R. 1980. Planting stock quality: a review of factors affecting performance. *New Zealand J. For.* 25: 144-171.
- Dralle, K. y J. B. Larsen. 1995. Growth response to different types of NPK-fertilizer in Norway spruce plantations in Western Denmark. *Plant and Soil* 168-169: 501-504.
- Duryea, M. L. 1985. Evaluating seedling quality: Importance to reforestation. *In*: Duryea, M. L. (Ed.) Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests. For. Res. Lab. OSU, Corvallis, OR, USA. pp: 1-4.
- Duryea, M. L. y T. D. Landis (Eds.). 1984 *Forest Nursery Manual. Production of bareroot seedlings.* Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. For. Res. Lab., OSU. Corvallis, OR. USA. 385 p.
- Duryea, M. L. y K. M. McClain, 1984. Altering seedling physiology to improve reforestation success. *In*: Duryea, M. L. y G. N. Brown (Eds.) *Seedling physiology and reforestation success.* Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, Boston, USA. pp: 77-114.
- Eguiluz P., T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos del género *Pinus* en México. Tesis Profesional. Departamento de Bosques. Universidad Autónoma Chapingo. México. 446 p.
- Friend, A. L., J. A. Mobley, E.A. Ryan y H. D. Bradshaw, Jr. 2000. Root growth plasticity of Hybrid Poplar in response to soil nutrient gradients. *J. Sust. For.* 10 (1/2):133-140.
- Gleason, J. F., M. L. Duryea, R. Rose y M. Atkinson. 1990. Nursery and field fertilization of 2 + 0 ponderosa pine seedlings: the effect on morphology, physiology, and field performance. *Can. J. For. Res.* 20: 1766-1772.
- Imo, M. and V. R. Timmer. 1997. Vector diagnosis of nutrient dynamics in

- Mesquite seedlings. *For. Sci.* 43 (2): 268-273.
- Ingestad, T. 1982. Relative addition rate and external concentration: driving variables used in plant nutrition research. *Plant, Cell and Environment* 5:443-453.
- Landis, T. D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. *In*: Duryea, M. L. (Ed.), *Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests*. *For. Res. Lab. OSU, Corvallis, OR, USA*. pp: 29-48.
- Landis, T. D., R. W. Tinus, S. E. McDonald and J. P. Barnett. 1989. Seedlings Nutrition and Irrigation, Vol. 4. *The container tree nursery manual, Agric. Handbook*. 674. Washington, D.C.; USDA Forest Service. 119 p.
- López-Ayala, J. L., J. J. Vargas, C. Ramírez H. y J. López U. 1999. Variación intraespecífica en el patrón de crecimiento del brote terminal en *Pinus greggii* Engelm. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 5 (2):133-140.
- Marschner, H. 1990. *Mineral nutrition of higher plants*. Institute of Plant Nutrition, University Hohenheim, Federal Republic of Germany, Academic Press. 674 p.
- Martínez G., A. 1988. Diseños experimentales. Métodos y Elementos de Teoría. Ed. Trillas. México, D. F. pp: 329-404.
- May, J. T. 1984. Nutrients and fertilization. *In*: May, J.T., E. W. Belcher Jr., C. E. Cordell, T. H. Filer Jr., D. South, and C. W. Lantz (Eds.). *Southern pine nursery handbook*. USDA Forest Service, Southern Region, USA. pp: 12-41.
- Mead, D. J., A. Zaidi y K. Chakrabarti. 1998. Fertilizer applications for growing *Cryptomeria japonica* and *Pinus patula* container seedlings. *Indian Forester* 124: 179-183.
- Mishra, V. K. y S. K. Chauhan. 1997. Response of N and P fertilizers on *Ulmus villosa* seedlings. Morphological indices and fertilizer response function. *Indian, J. For.* 20: 74-77.
- Munter, R. C. and R. A. Grande. 1981. Plant tissue and soil extract analysis by ICP-atomic emission spectrometry. *In*: Barnes, R. M. (Ed.). *Developments in Atomic Plasma Spectrochemical Analysis*. Heyden and Son Ltd., London, England. pp: 653-672.
- Ramírez H., C., J. J. Vargas, H., J. Jasso, M., G. Carrillo, C. y H. Guillén, A. 1997. Variación isoenzimática en diez poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. *Agrociencia* 31 (2): 223-230.
- Ritchie, G. A. 1984. Assessing seedling quality. *In*: Duryea, M. L. y T. D. Landis (Eds.). *Forest Nursery Manual: Production of bareroot seedlings*. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. *For. Res. Lab., OSU, Corvallis, OR, USA*. pp: 243-259.
- Rojas, B. A. 1962. The "San Cristóbal" design for fertilizer experiments. *Proc. of the Int. Soc. of Sugarcane Technologists* 11:197-203.

- Rojas, B. A. 1979. Análisis estadístico del diseño San Cristóbal. Temas Didácticos No. 7. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. SARH. México, D. F. 17 p.
- Salazar G., J. G., J. J. Vargas, H., J. Jasso, M., J. D. Molina, G., C. Ramirez, H. y J. López, U. 1999. Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. Madera y Bosques 5 (2):19-34.
- Statistical Analysis System Institute Inc. 1985. User's Guide: Basics. Ver. 5.0 SAS Institute, Inc. Cary, N.C., U.S.A. pp: 959-966.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solution of a certain desired composition. Plant and Soil XV (2):134-154.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In: Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture. ISOSC. Wageningen, The Netherlands. pp: 633-649.
- Sutton, R. F. 1979. Planting stock quality and grading. For. Ecol. Manage. 2: 123-132.
- Thompson B., E. 1985. Seedling morphological evaluation: What you can tell by looking. In: Duryea, M. L. (Ed.). Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests. For. Res. Lab. OSU, Corvallis, OR, USA. pp: 59-71.
- Turrent F., A. y R. J. Laird. 1975. La matriz experimental Plan Puebla para ensayos sobre prácticas de producción de cultivos. Agrociencia 19:117-143.
- Van den Driessche, R. 1980. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on Douglas-fir nursery growth and survival after planting. Can. J. For. Res. 10:65-70.
- Van den Driessche, R. 1992. Changes in drought resistance and root growth capacity of container seedlings in response to nursery drought, nitrogen and potassium treatments. Can. J. For. Res. 22: 740-749.
- Vargas H., J. J. 1985. Respuesta a la sequía de cuatro especies de *Pinus* en estado de plántula. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 94 p.
- Youngberg, C. T. 1984. Soil and tissue analysis: tools for maintaining soil fertility. In: Duryea, M. L. and T. D. Landis (Eds). Forest Nursery Manual: Production of bare-root seedlings. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Pub. For. Res. Lab. OSU. Corvallis, OR. pp: 75-80.