

El potencial de crecimiento radical en planta de vivero de *Pinus halepensis* Mill. Influencia de la fertilización

J. Oliet*¹, R. Planelles², F. Artero², E. Martínez Montes³, L. Álvarez Linarejos³,
R. Alejano³ y M. López Arias²

¹ Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba. Avda. Menéndez Pidal, s/n.
14071 Córdoba. España

² Departamento de Medio Ambiente. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
Ctra. de La Coruña, km 7,5. 28040 Madrid. España

³ Departamento de Ciencias Agroforestales. Universidad de Huelva. Escuela Politécnica Superior.
21819 Palos de la Frontera (Huelva). España

Resumen

Dado el interés que posee el atributo Potencial de Crecimiento Radical de la planta de vivero como predictor de la respuesta postrasplante, este trabajo analiza el efecto de varios tratamientos de fertilización en vivero (5g/L de Osmocote 15-8-11; 3, 5, 7 g/L de Osmocote 9-13-18, idem de Osmocote 17-10-10) sobre el Potencial de Crecimiento Radical de planta de pino carrasco de una savia, concluyéndose la existencia de diferencias significativas que discriminan grupos de formulaciones a favor de las tres dosis de 9-13-18, que produjeron los mejores resultados (hasta 74 raíces mayores de 1 cm en promedio para 7 g/L). Sin embargo, no se han encontrado relaciones univariadas significativas entre atributos morfológicos o fisiológicos de la planta y Potencial de Crecimiento Radical. Por otra parte, todos los tratamientos sobrevivieron en plantación con valores superiores al 70 por ciento en condiciones de semiaridez, indicando un buen estado de vigor de todos los lotes ensayados, incluidos los de menor expresión del potencial de formación de nuevas raíces (17 raíces > 1cm).

Palabras clave: potencial de crecimiento radical, *Pinus halepensis*, fertilización

Abstract

Root growth potential in nursery *Pinus halepensis* Mill. seedlings. Fertilization effect

In response to the importance of Root Growth Potential (RGP) attribute as a field performance potential predictor, this paper analyses the relationship between nursery fertilization and this attribute by mean of applying several mineral nutrition treatments (3, 5, 7 g/L Osmocote 9-13-18, Osmocote 17-10-10, 5 g/L Osmocote 15-8-11) in an experiment with Aleppo pine seedlings. Significant differences in the Root Growth Potential response between treatments were found; in particular, seedlings produced with 9-13-18 showed an increase in new roots produced (maximum value of 74 new roots > 1 cm corresponding to 7 g/L of this fertilizer) comparing with other compositions. After seeking univariable relationships between morphological or physiological attributes and RGP, no significant correspondence was found. In addition, seedlings survived over 70 per cent one year after planting in semiarid conditions, irrespective the mineral nutrition treatment considered; this indicates high vigor of the stock, even for the treatment showing a lower response in PCR (17 roots > 1 cm).

Key words: root Growth Potential, *Pinus halepensis*, fertilization

Introducción

La caracterización de la calidad de la planta forestal de vivero está basada en una clasificación definida ya a primeros de la década de los ochenta, y que

distingue en primer lugar entre dos grandes tipos de atributos (Chavasse, 1980; Duryea, 1985): atributos materiales, directa e inmediatamente medibles; y atributos de respuesta o comportamiento, que hacen referencia a la respuesta de la planta cuando es sometida a unas condiciones ambientales particulares. Dentro de los atributos materiales cabe distinguir entre los que se refieren a cualidades morfológicas de las plantas

* Autor para la correspondencia: ir1olpaj@uco.es
Recibido: 23-01-02; Aceptado: 12-08-02.

como altura, diámetro, biomasa (aérea y radical), fibrosidad de las raíces, índices de equilibrio entre las distintas fracciones, etc. (Thompson, 1985; Mexal y Landis, 1990; Puttonen, 1997; South, 2000); y atributos referidos a su situación o estado fisiológico, que tratan de caracterizar aspectos tales como la tolerancia a la sequía y al frío o el estado de letargo. Atributos materiales fisiológicos son las reservas minerales o de carbohidratos, la funcionalidad de las membranas en el control de los movimientos iónicos hacia el exterior y el interior de las células, la capacidad de ajuste osmótico, la elasticidad de las paredes celulares y un largo etcétera (Duryea y McClain, 1984; Hawkins y Binder, 1990; Puttonen, 1997; Gil y Pardos, 1997; McKay, 1999; Grossnickle, 2000). Cada uno de estos atributos materiales expresa alguna condición de la planta que debe de estar relacionada con su calidad, es decir, con la potencial respuesta en supervivencia y crecimiento postrasplante. Pero la condición o condiciones expresadas representan subsistemas específicos de la planta, que proporcionan una información fragmentada de la calidad de la planta (Folk y Grossnickle, 1997a).

Sin embargo, los atributos de comportamiento, al evaluar una respuesta que es fruto de la integración de múltiples condiciones de la planta, se pueden considerar atributos de síntesis, ya que poseen la capacidad de resumir en uno o pocos parámetros muchos caracteres morfofisiológicos (materiales) de calidad (Burdett, 1990). Los atributos de comportamiento se caracterizan por el tipo de condiciones ambientales a las que son sometidas las plantas, así como por la variable de respuesta que se mide. Además del Potencial de Crecimiento Radical (PCR), Potencial de Regeneración Radical o Capacidad de Regeneración Radical, hay otros atributos de comportamiento como la tasa de fotosíntesis tras un episodio de estrés hídrico o térmico, el índice de daño por bajas temperaturas, la supervivencia en condiciones óptimas de crecimiento tras ser sometidas a desecación, etc. (Chavasse, 1980; McCreary y Duryea, 1985; Duryea, 1985; Grossnickle *et al.*, 1991; Simpson *et al.*, 1994; Grossnickle *et al.*, 1996; Folk y Grossnickle, 1997b; Grossnickle, 2000).

En este sentido, el PCR es un atributo de comportamiento que se define como la capacidad de una planta de iniciar y alargar nuevas raíces en un plazo de tiempo determinado y en condiciones óptimas para el crecimiento radical (Ritchie, 1985). El PCR es uno de los atributos de comportamiento más ampliamente uti-

lizados en la caracterización de la planta de vivero, habiéndose incorporado en algunos países de forma operativa para la clasificación de lotes de planta por calidades (Simpson y Ritchie, 1997; Grossnickle, 2000). Y esto debido a la coherencia de la hipótesis que fundamenta su capacidad predictiva sobre la supervivencia y el crecimiento postrasplante. Dicha hipótesis afirma que la superación del impacto negativo que supone la plantación sólo puede realizarse con el rápido crecimiento de nuevas raíces que favorezca el íntimo contacto de éstas con el suelo y restablezca el equilibrio hídrico en la planta (Margolis y Brand, 1990; Burdett, 1990). En este sentido, multitud de trabajos han corroborado la existencia de una relación funcional entre el PCR y la supervivencia y el crecimiento postrasplante. Así, McKay (1999) cita varias recopilaciones que tratan la cuestión de las relaciones entre PCR y desarrollo postrasplante, concluyendo que en un 80 por ciento de los estudios analizados se presentó una relación positiva entre porcentaje de supervivencia y el PCR.

De cualquier forma, bien por la capacidad predictiva directa del PCR sobre la respuesta postrasplante en determinadas circunstancias o bien indirectamente por medio de su relación con el estado fisiológico global de la planta (Ritchie y Tanaka, 1990; Grossnickle, 2000), maximizar la expresión del potencial de crecimiento radical en la planta de vivero parece un objetivo conveniente, por lo que supone en la mejora simultánea de la calidad de la planta. Dentro de las prácticas de cultivo con influencia en el PCR pueden destacarse la administración del riego, la fertilización, la temperatura del vivero, el tiempo de aviveramiento o el transporte y manipulación de la planta hasta plantación (Ritchie, 1985; Sutton, 1990; Villar-Salvador *et al.*, 1999). Todas estas prácticas pueden afectar al vigor de la planta o a otros atributos relacionados con la capacidad de regenerar el sistema radical.

En este sentido, la fertilización, a través de las relaciones que se establecen con la concentración y el contenido, así como sobre otros atributos de naturaleza morfofisiológica, afecta sin duda al PCR. Por otra parte, un suministro deficiente produce un estrés nutricional que afectará a la capacidad funcional y al vigor general de la planta, y particularmente al PCR. Sin embargo, no son muchos los estudios realizados para mejorar el conocimiento de la naturaleza de estas relaciones. Puede mencionarse el trabajo de van den Driessche (1992) y en particular los de Oliet (1995), Domínguez *et al.* (2000) y Planelles

et al. (2001), realizados en especies de ámbito mediterráneo.

Este trabajo presenta los resultados del efecto de diferentes formulaciones y dosis de fertilizantes de liberación lenta sobre el Potencial de Crecimiento Radical de plantas de vivero de *Pinus halepensis*, con objeto de contribuir a la mejora del conocimiento de este atributo de calidad en varios aspectos: estudio de las relaciones fertilización-PCR y exploración de las relaciones entre ciertos atributos materiales y el PCR.

Materiales y métodos

Cultivo de la planta y tratamientos

Se empleó semilla de *Pinus halepensis* recogida en los pinares naturales de la Sierra de Lúcar, en la provincia de Almería (Región de procedencia 15, «Bética meridional», Gil *et al.* 1996). El cultivo se realizó en el Centro de Investigación y Desarrollo Hortícola de La Mojonera, situado en el T.M. de El Ejido, en la misma provincia. La planta se produjo en contenedor Super Leach tipo «frondosas», de 230 cm³ de capacidad, y con un sustrato a base de turba rubia tipo *Sphagnum* y vermiculita, en proporción 75-25 por ciento en volumen al que se incorporó, en mezcla, el fertilizante. Los tratamientos de fertilización aplicados consistieron en diferentes dosis de tres formulaciones de Osmocote (Sierra Chemicals Co.), un fertilizante sólido de liberación controlada recubierto de un polímero sintético que le confiere la propiedad de ser liberado de forma gradual y lenta en respuesta únicamente a la temperatura. La formulación N-P-K (porcentaje de Nitrógeno - porcentaje de P₂O₅ - porcentaje de K₂O, respectivamente) de los fertilizantes empleados fue: 9-13-18 (OS9), 17-10-10 (OS17) y 15-8-11 (OS15), todas ellas de la misma duración media (12-14 meses a 21 °C). Las dos primeras formulaciones (OS9 y OS17) fueron aplicadas a razón de 3, 5 y 7 g/L de sustrato, al que se añadió 0,2 g/L de una mezcla sólida de microelementos Micromax (Sierra Chemicals Co.). Osmocote 9-13-18 aporta gran cantidad de fósforo y de potasio en relación al nitrógeno; Osmocote 17-10-10 es una formulación rica en nitrógeno, con la que se pretende comprobar los efectos de las altas concentraciones de este elemento; y la tercera formulación (Osmocote 15-8-11) se aplicó en una sola dosis, 5 g/L, que ya incluía en su composición microelementos. Es-

Tabla 1. Dosis de cada producto y cantidades aportadas por planta y elemento

Formulación	Dosis- (g/l)	N (mg/ envase)	P (mg/ envase)	K (mg/ envase)
Osm 9-13-18	1-3	62,1	39,1	103,1
	2-5	103,5	65,2	171,8
	3-7	144,9	91,2	240,6
Osm 17-10-10	1-3	117,3	30,1	57,3
	2-5	195,5	50,2	95,5
	3-7	273,7	70,3	133,6
Osm 15-8-11	1-5	172,5	40,1	105,0

ta última mantiene unas proporciones en los macroelementos N-P-K ajustadas aproximadamente a las recomendaciones para la fertilización de coníferas (Timmer, 1991). El empleo de una dosis intermedia permite la comparación de los tratamientos de OS9 y OS17 con éste, que actúa así de control. Las cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio elementales aportadas por planta en cada uno de los tratamientos de fertilización se recogen en la Tabla 1.

A estos siete tratamientos se agregó un octavo, consistente en una mezcla al 50 por cien en volumen del sustrato turba *Sphagnum*-vermiculita en la proporción citada anteriormente, y de un sustrato a base de tierra, turba negra y mantillo de pinar en la proporción 60-20-20, sin aporte fertilizante (TU+MA). La concentración N-P-K elementales de este sustrato en porcentaje de peso seco fueron, respectivamente 0,4-0,33-0,79; la utilización de este tratamiento pretende aportar información sobre la respuesta en PCR de las plantas a cierta carencia nutritiva, así como para incorporar pares de valores en el ajuste de los modelos de regresión construidos. La disposición de los ocho tratamientos fue en cuatro bloques completos al azar, siendo la unidad experimental una bandeja o bastidor de 70 plantas de cada tratamiento. La siembra se realizó el 9 de noviembre de 1994, instalándose el ensayo en el interior de un invernadero tipo «parral», con plástico de 800 galgas de espesor. El cultivo se mantuvo durante el invierno y parte de la primavera en estas condiciones, hasta el 23 de mayo, fecha en la que se trasladó, manteniendo la misma disposición de las unidades experimentales, a un umbráculo constituido por una malla de sombreo del 80 por ciento. La Figura 1 recoge la temperatura media durante el cultivo; el valor medio de las medias diarias para el periodo de cultivo fue de 20,1 °C.

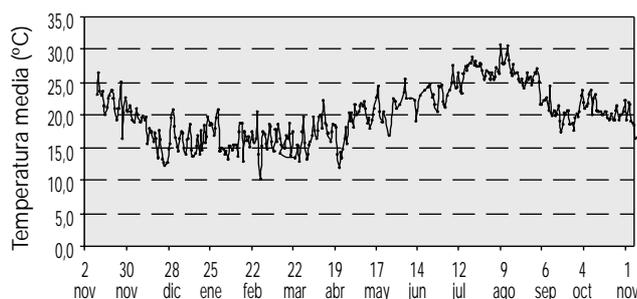


Figura 1. Temperatura media diaria durante el período de cultivo en vivero (invernadero y umbráculo): 9 de noviembre de 1994 a 9 de noviembre de 1995.

Caracterización de la planta producida y test de Potencial de Crecimiento Radical

La recogida de muestras para la caracterización material de la planta tuvo lugar a mediados del mes de octubre de 1995. Se tomaron siete plantas de cada unidad experimental, haciendo un total de 28 plantas por tratamiento. Tras ser lavadas para separar las raíces del sustrato, se midió la altura de la parte aérea y el diámetro del cuello de la raíz, se contó el número de ramillos, se separaron las distintas fracciones (acículas, tallo y raíz) y se secaron en estufa a 65°C durante 48 horas para la determinación de la biomasa seca de cada fracción en cada planta. Con estos valores se calcularon los siguientes índices morfológicos: el cociente parte aérea:parte radical en peso; la esbeltez o cociente entre la longitud aérea y el diámetro del cuello de la raíz; el Índice de Dickson, cuya expresión es el cociente entre el peso seco total de la planta y la suma de su esbeltez más la relación parte aérea:parte radical en peso seco (Thompson, 1985); y el Balance de Agua en la Planta o cociente entre el peso seco aéreo y el producto del diámetro del cuello de la raíz por el peso radical (Grossnickle y Major, 1991).

A continuación se agruparon las fracciones procedentes de la misma unidad experimental o bloque para proceder al análisis de nutrientes. El nitrógeno se determinó mediante el analizador Leco, modelo CHN-600; los elementos fósforo, potasio, calcio y magnesio se determinaron mediante espectrometría de emisión atómica (espectrómetro ICP modelo 400, Perkin Elmer). El contenido total de cada elemento se calculó, para cada muestra, como el producto de la concentración por el peso seco medio de esa fracción (acícula, tallo o raíz).

Para la evaluación del Potencial de Crecimiento Radical, otras veinte plantas por tratamiento fueron to-

madas sistemáticamente (cinco de cada bloque) a primeros de noviembre. El tamaño de muestra utilizado responde a la gran variabilidad que suele presentar el PCR (Sutton, 1990). Tras medir altura y diámetro en cuello de cada planta, se procedió a limpiar el cepellón dejando las raíces desnudas. Así preparadas, las plantas se plantaron en envases troncocónicos de 22 cm de altura y 1580 cm³ de volumen, llenos de sustrato compuesto por turba rubia tipo *Sphagnum* y vermiculita, en proporción 50-50 por cien en volumen, sin fertilizar. El riego se produjo con la frecuencia que permitiera mantener siempre un nivel de humedad en el sustrato no limitante para el crecimiento de las raíces. Los envases se dispusieron aleatoriamente en invernadero sobre una cama caliente mantenida a 20°C de forma constante; la temperatura del aire se mantuvo entre 16 y 20 °C aproximadamente, correspondiendo los menores valores a la noche; el fotoperíodo se modificó a valores 16 horas día 8 horas noche, prolongando la exposición de las plantas a la luz mediante lámparas fluorescentes de 40 W. Todas estas condiciones se aplicaron para favorecer el crecimiento de las raíces (Carlson, 1986; Burdett, 1987; Tinus, 1996; Simpson y Ritchie, 1997) durante 28 días, la duración más frecuente cuando el test se realiza en invernadero. Transcurrido dicho plazo se extrajeron las raíces de los envases, se lavaron los restos de sustrato adheridos a las mismas y se cortaron las raíces nuevas, claramente distinguibles en su mayoría por un color más blanco y un mayor grosor. La evaluación del potencial se realizó por conteo de las raíces nuevas de cada planta mayores de 1 cm. Dicho parámetro se correlaciona muy bien con la longitud total de raíces nuevas (Burdett, 1987) y es más fácil de medir que éste.

Asimismo, para evaluar la respuesta al trasplante de los distintos tratamientos, se realizó una plantación experimental en el paraje denominado «El Caballón» (T.M. Carboneras) situado en la Sierra Cabrera, dentro del P.N. de Cabo de Gata-Níjar (Almería). La zona pertenece al piso termomediterráneo inferior con ombroclima árido-semiárido, de precipitación media anual 181 mm y suelo perteneciente a la unidad Regosol calcárico, sobre materiales calizos (M.A.P.A., 1989), de pedregosidad abundante. La plantación se dispuso sobre una ladera de pendiente suave, en cuatro bloques completos al azar. La unidad experimental consistió en una línea de 30 plantas por tratamiento, por lo que el número de plantas empleadas fue de 120 por tratamiento y de 1.080 en total. La plantación tuvo lugar en noviembre de 1995, coincidiendo con la

realización del ensayo de potencial de crecimiento radical. El primer conteo de supervivencia y medición del crecimiento se realizó en enero de 1997, transcurrido un periodo vegetativo. La precipitación durante el periodo considerado, medida por medio de un pluviómetro registrador, fue de 177 mm.

Análisis de datos

El análisis de la varianza realizado corresponde al de una vía, partiendo del modelo lineal de efectos fijos (no se apreció efecto de bloque sobre el PCR). Se empleó el test de Tukey para la determinación de diferencias significativas *a posteriori* entre tratamientos.

Con objeto de ajustar las diferencias de respuesta en PCR a la fertilización por la morfología de la planta, se realizó un análisis de la covarianza empleando la altura o el diámetro del cuello de la raíz iniciales de cada planta sometida al test de PCR como covariables (Doménech, 1999). El empleo de una u otra covariable produjo resultados muy similares, por lo que sólo se presenta el resultado para la altura inicial.

Las relaciones entre atributos de calidad y PCR se han explorado mediante un análisis de correlación univariante usando los valores medios de los atributos y el valor medio de PCR de cada uno de los tratamientos.

Resultados

El análisis de la varianza indica un efecto altamente significativo del factor fertilización sobre el potencial de crecimiento radical (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados del análisis de la varianza y de la covarianza para la fertilización empleando como covariable la altura de la planta antes de iniciar el test de PCR

Fuente de variación	g.l.	ANOVA Cuadrado medio	F	P
Fertilización	7	6724,58	4,40	0,0002
Error	150	1529,35		

Fuente de variación	g.l.	ANCOVA Cuadrado medio	F	P
Fertilización	7	6661,69	4,33	0,0002
Error	149	1539,37		

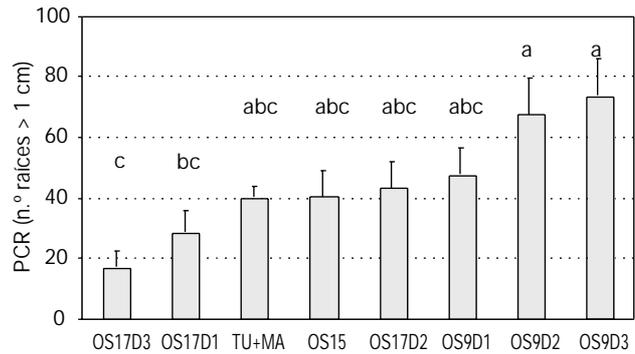


Figura 2. Potencial de Crecimiento Radical (+ error estándar) para los tratamientos ensayados (barras con distintas letras indican diferencias significativas).

La Figura 2 recoge gráficamente los valores de PCR por tratamientos. El test de comparaciones múltiples discriminó significativamente a las dosis 2 y 3 de Osmocote 9-13-18 (5 y 7 g/L de sustrato, respectivamente), con valores en torno a 70, de las dosis 3 y 1 de Osmocote 17-10-10 (3 g/L de sustrato) y dosis 3 de Osmocote 17-10-10 (7 g/L de sustrato). Dentro del tratamiento OS9, se aprecia una respuesta creciente del PCR a la dosis aportada. Los resultados obtenidos no permiten discriminar más grupos, debido a la alta variabilidad de la respuesta en casi todos los tratamientos, oscilando entre 0 raíces producidas en algunas plantas de la mayoría de los tratamientos hasta más de 170 en otras (Figura 3).

La introducción de la covariable (altura o diámetro del cuello de la raíz de las plantas empleadas en el test de PCR, antes del inicio del mismo) en el análisis no afectó a los valores de F o p (Tabla 2), debido a la ausencia de relación significativa entre las covariables utilizadas y el potencial de crecimiento radical. La Figura 3 evidencia esta ausencia de relación para el total de plantas utilizadas.

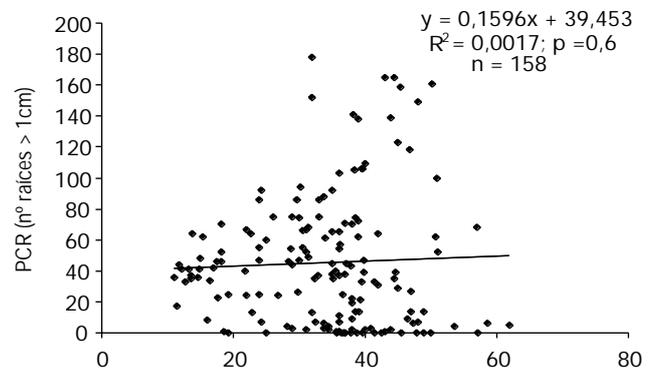


Figura 3. Diagrama de dispersión PCR=altura inicial.

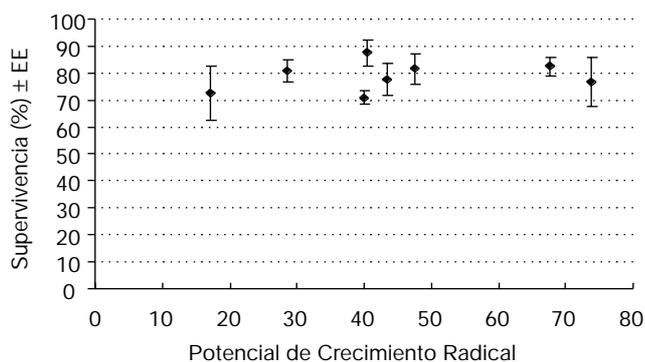


Figura 4. Gráfico de dispersión de la supervivencia al año de plantación sobre el PCR (n.º raíces > 1 cm).

El Anexo recoge los valores de los principales atributos estudiados en respuesta a la fertilización. Se ha realizado un estudio de correlación de cada uno de estos atributos con la variable PCR, no habiéndose encontrado relación univariable significativa. El modelo de regresión lineal más significativo se encontró con la variable Balance de Agua en la Planta (BAP), aunque el grado de significación del modelo ($R^2 = 0,35$, $p = 0,124$) no alcanzó los estándares de significación estadística.

La supervivencia en plantación al primer año de los distintos tratamientos ensayados se recoge en el diagrama de dispersión de la Figura 4, que representa a la supervivencia sobre el PCR. En todos los casos, los valores de supervivencia superan el 70 por ciento, siendo el valor máximo el 87,5 por ciento que corresponde al tratamiento 5 g/L de Osmocote 15-8-11. No obstante, las escasas diferencias en la supervivencia postrasplante impiden detectar diferencias significativas entre tratamientos.

Analizando la relación entre el crecimiento en altura o en diámetro en la base del tallo tras un año de plantación y el PCR tampoco se encontraron relaciones de asociación significativas (datos no mostrados).

Discusión

A pesar de la gran diferencia de los valores medios del PCR entre tratamientos no se discriminan muchos grupos en razón de la respuesta en PCR, debido a la alta variabilidad intrínseca del atributo PCR. Esta cualidad del atributo, que ha sido destacada en la literatura (Sutton, 1990), impide separar fácilmente grupos y obliga al empleo de muestras grandes para una estimación precisa del PCR medio del lote. Sólo aparecen

diferencias significativas entre el grupo OS17D3 con OS17D1, y el formado por las dosis 2 y 3 de Osmocote 9-13-18, quedando la dosis de OS15 en lugar intermedio. De esta forma, la proporción NPK del fertilizante parece afectar al PCR, siendo la formulación 9-13-18 más eficaz en elevar los valores de este atributo que el resto. El mayor aporte de fósforo, que ha promovido asimismo mayores concentraciones de este elemento en tejidos, particularmente en raíces (Anexo), puede explicar las diferencias significativas encontradas (Domínguez *et al.*, 2000; Planelles *et al.*, 2001). Los bajos niveles de concentración de este elemento en el tratamiento TU+MA (Anexo) podrían también ser responsables de los menores valores del PCR alcanzados en comparación con las dosis mayores de Osmocote 9-13-18.

Por otra parte, otros atributos no considerados aquí, como los carbohidratos de reserva, podrían explicar la menor respuesta en PCR de los tratamientos OS17 y OS15 (Rose, 1992; Noland *et al.*, 1997). En particular, la dosis máxima de OS17 condujo a planta grande, con altos valores de concentración de nitrógeno que, sin embargo, no estimularon, sino más bien al contrario, la producción de nuevas raíces. La fertilización puede afectar a la concentración de reservas, produciendo un efecto dilución cuando los aportes se traducen en incrementos de la biomasa por encima del incremento de la tasa de fotosíntesis (Marshall, 1985; Planelles *et al.*, 2001). Esto sería particularmente relevante si el pino carrasco dependiera principalmente de las reservas para el enraizamiento, aspecto no suficientemente conocido (Tinus *et al.*, 2000). Asimismo, altas concentraciones de nitrógeno pueden retrasar la entrada en dormición de las plantas, disminuyendo temporalmente el PCR (Hawkins *et al.*, 1995; Puértolas *et al.*, 2001).

Por otra parte, los valores del PCR alcanzados por las dosis 2 y 3 de Osmocote 9-13-18 son muy elevados, si comparamos otros estudios realizados en esta especie, en condiciones de realización del test más favorables para el crecimiento que las aquí ensayadas, o con duraciones del test mayores: Royo *et al.* (1997a) presentan valores máximos de 7,5 raíces nuevas tras cuatro semanas en cultivo hidropónico y cámara de crecimiento; Royo *et al.* (1997b), tras medir el PCR medio de lotes de pino carrasco procedentes de distintos viveros, dan valores máximos de 50 raíces nuevas después de cuatro semanas en cultivo hidropónico; Villar-Salvador *et al.* (1999) dan valores máximos de 43 raíces superiores a 1 cm en un test de 40 días de duración en

invernadero; Vallas *et al.* (1999) obtuvieron valores máximos de 82 raíces mayores de 1 cm en un test de 28 días realizado en invernadero; Tinus *et al.* (2000) consiguen valores estacionales máximos de 80 raíces superiores a 0,5 cm en pino carrasco tras 13 días en cultivo aeropónico, máximo que coincidió con la salida de la dormición invernal previa al crecimiento aéreo.

En todo caso, la fertilización (particularmente la formulación) ha promovido una diferenciación significativa en la respuesta en Potencial de Crecimiento Radical, diferenciación que, para todos los individuos en su conjunto, no parece explicarse por la morfología de las plantas. La combinación de varios atributos morfológicos y fisiológicos podría explicar este comportamiento.

Por otra parte, no hay diferencias apreciables en supervivencia entre los distintos tratamientos (Figura 4). Esto puede explicarse porque el valor mínimo de 17 es suficientemente alto como para garantizar buenos porcentajes de supervivencia; muchos autores coinciden en un intervalo de 5 a 10 raíces superiores a 0,5 ó 1 cm como la zona de PCR asociada a unos porcentajes de supervivencia satisfactorios para la repoblación, indicando un alto vigor de la planta (Burdett *et al.*, 1983; Simpson *et al.*, 1994; Grossnickle *et al.*, 1995; Simpson y Vyse, 1995; Folk y Grossnickle, 1997a; Fernández y Royo, 1998; Grossnickle, 2000). Todos estos trabajos están realizados con diversas especies de coníferas y las condiciones de realización del test son diferentes para cada caso. Sin embargo, la coincidencia en este intervalo puede estar indicando un orden de magnitud dominante en lo que a valores de PCR óptimo se refiere. En pino carrasco, Royo *et al.* (1997a) obtienen valores de supervivencia de cien por cien con planta de PCR no superior a 7 raíces en cultivo hidropónico, y Vallas *et al.* (1999) presentan resultados de PCR (correspondientes a un test de la misma duración y condiciones al de este trabajo) relacionados con la supervivencia, y concluyen que para valores medios de 15 a 20 raíces se obtienen porcentajes de supervivencia superiores al 80 por ciento. Dado que todos los tratamientos han demostrado proporcionar planta vigorosa y con capacidad de supervivencia elevada, la relación entre esta última variable y el PCR queda enmascarada porque la variación existente dentro de la respuesta óptima es pequeña. Por otra parte, las condiciones durante el momento de la plantación (baja demanda evaporativa y agua relativamente abundante en el suelo) pueden actuar anulando la posible la relación entre el PCR y la supervivencia (Simpson y Ritchie, 1997).

Conclusiones

El Potencial de Crecimiento Radical ha respondido significativamente a los tratamientos de fertilización aplicados, resultando la formulación 9-13-18 más eficaz en la maximización de este atributo que el resto de los tratamientos ensayados. En términos de atributos morfológicos o fisiológicos individualmente considerados, no se ha encontrado ninguna relación significativa con el PCR.

Por otra parte, ha resultado una gran variabilidad de la respuesta del PCR entre individuos, lo que obliga a utilizar muestras grandes para estabilizar los valores medios por lote.

En las condiciones ensayadas, valores de PCR por encima de 17 raíces mayores de 1 cm obtienen porcentajes de supervivencia superiores al 80 por ciento en plantación.

Agradecimientos

A D. José Ramón Francia Martínez, del Centro de Investigación y Fomento Agrario de la Junta de Andalucía, por su colaboración en la instalación y seguimiento de los ensayos.

Referencias bibliográficas

- BURDETT A.N., SIMPSON W.R., THOMPSON C.F., 1983. Root development and plantation establishment success. *Plant and Soil* 71, 103-110.
- BURDETT A.N., 1987. Understanding root growth capacity: theoretical considerations in assessing planting stock quality by means of root growth tests. *Canadian Journal of Forest Research* 17, 768-775.
- BURDETT A.N., 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research* 20, 415-427.
- CARLSON W.C., 1986. Root system considerations in the quality of loblolly pine seedlings. *South Journal of Appl. For.* 10, 87-92.
- CHAVASSE C.G., 1980. Planting stock quality, a review of factors affecting performance. *New Zealand Journal of Forest* 25, 144-171.
- DOMÉNECH J.M., 1999. Análisis multivariante en ciencias de la salud: modelos de regresión. Universitat Autònoma de Barcelona. Laboratori d'Estadística Aplicada i de Modelització. Ed. Signo.
- DOMÍNGUEZ LERENA S., OLIET J., CARRASCO I., PEÑUELAS J.L., SERRADA R., 2000. Influencia de la re-

- lación N-P-K en el desarrollo en vivero y en campo de planta de *Pinus pinea*. Actas del 1er Simposio del pino piñonero (*Pinus pinea* L.). Tomo I, pp. 195-202.
- DURYEA M., McCLAIN K., 1984. Seedling physiology and reforestation success. Nijhoff/Junk Publishers. Boston.
- DURYEA M.L., 1985. Evaluating seedling quality: importance to reforestation. En: Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major test. Duryea, M.L., ed. Forest Research Laboratory. Oregon State University, pp. 1-4.
- FERNÁNDEZ M., ROYO A., 1998. Estudios realizados en la cátedra de anatomía, fisiología y genética forestal para el control de calidad de la planta. Jornadas sobre producción de planta forestal en contenedor. Valsaín (Segovia), noviembre de 1998.
- FOLK R.S., GROSSNICKLE S.C., 1997a. Determining field performance potential with the use of limiting environmental conditions. *New Forests* 13, 121-138.
- FOLK R., GROSSNICKLE S.C., 1997b. Stock quality assessment: still an important component of operational reforestation programs. National Proceedings, Forest and Conservation Nursery Associations. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-419. Portland, OR: U.S.D.A. Forest Service, Pacific NW Research Station, pp. 109-119.
- GIL L., DÍAZ-FERNÁNDEZ P.M., JIMÉNEZ M.P., ROLDÁN M., ALÍA R., AGÚNDEZ D., DE MIGUEL Y DEL ÁNGEL J., MARTÍN S., DE TUERO Y REINA M., 1996. Las regiones de procedencia de *Pinus halepensis* Mill. en España. Organismo Autónomo Parques Nacionales, 113 pp.
- GIL L., PARDOS J., 1997. Aspectos funcionales del arraigo. La calidad fisiológica de la planta forestal. Cuadernos de la S.E.C.F. N° 4, 27-33.
- GROSSNICKLE S., MAJOR I.E., 1991. Stock quality assessment through an integrated approach. *New Forests* 5(2), 77-91.
- GROSSNICKLE S., ARNOTT J., MAJOR J.E., TSCHAPLINSKIT., 1991. Influence of dormancy induction treatments on Western hemlock seedlings. 1.- Seedling development and stock quality assessment. *Canadian Journal of Forest Research* 21, 164-174.
- GROSSNICKLE S., FOLK R., RADLEY R., AXELROOD P., 1995. Root damage assessment models for seedling quality programs. Proceedings of the 1995, 1996, 1997 Forest Nursery Association of British Columbia Meetings, pp. 32-37.
- GROSSNICKLE S., FOLK R., ABRANS S.R., DUNSTAN D.I., ROSE P.A., 1996. Performance of interior spruce seedlings treated with abscisic analogs. *Can. J. For. Res.* 26, 2061-2070.
- GROSSNICKLE S.C., 2000. Ecophysiology of Northern Spruce Species: The Performance of Planted Seedlings. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada, 409 pp.
- HAWKINS C.D., BINDER W.D., 1990. State of the art seedling stock quality tests based on seedling physiology. En: Target seedling symposium. Gen. Tech. Rep. USDA Forest Service, pp. 91-121.
- HAWKINS B.J., DAVRADOU M., PIER D., SHORTT R., 1995. Frost hardiness and winter photosynthesis of *Thuja plicata* and *Pseudotsuga menziesii* seedlings grown at three rates of nitrogen and phosphorus supply. *Can. J. For. Res.* 25, 18-28.
- M.A.P.A., 1989. Mapa de suelos. Escala 1:100.000. Carboneras (1046). ICONA. Universidad de Granada.
- MARGOLIS M.A., BRAND D.G., 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Can. J. For. Res.* 20, 375-390.
- MARSHALL J.D., 1985. Carbohydrate status as an index of seedling quality. En: Evaluating seedling quality. Principles, procedures and predictive abilities of major test. Duryea, M., ed. Forest Research Lab. Oregon State University. Corvallis.
- McKAY H.M., 1999. Root electrolyte leakage and root growth potential as indicators of spruce and larch establishment. *Silva Fennica* 32(3), 241-252.
- McCREARY P.D., DURYEA M., 1985. OSU vigor test: principles, procedures and predictive ability. En: Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major test. Duryea, M. ed. Forest Research Lab. Oregon State University. Corvallis.
- MEXAL J.G., LANDIS T.D., 1990. Target seedling concepts: height and diameter. En: Target seedling symposium. Gen. Tech. Rep. USDA Forest Service, pp. 17-35.
- NOLAND T.L., MOHAMMED G.H., SCOTT, M. 1997. The dependence of root growth potential on light levels, photosynthetic rate, and root starch content in jack pine seedlings. *New Forests* 13, 105-119.
- OLIET J., 1995. Influencia de la fertilización en vivero sobre la calidad de la planta y la supervivencia en campo de varias especies forestales. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.
- PLANELLES R., OLIET J., ARTERO F. LÓPEZ ARIAS M., 2001. Efecto de distintas dosis N-P-K sobre la calidad funcional de planta de *Ceratonia siliqua*. Respuesta en plantación. Actas III Congreso Forestal Español, Granada. Tomo II, pp. 599-605.
- PÚERTOLAS J., ALONSO J., RODRÍGUEZ M., GIL L., PARDOS J.A., 2001. Efecto del densado de temperatura y la fertilización nitrogenada sobre el endurecimiento de plantas de *Pinus halepensis* Mill. Actas III Congreso Forestal Español, Granada. Tomo II, pp. 366-372.
- PUTTONEN P., 1997. Looking for the «silver-bullet» - can one test do it? *New Forests* 13(1-3), 9-27.
- RITCHIE G., 1985. Root growth potential: principles, procedures and predictive ability. En: Evaluating seedling quality. Principles, procedures and predictive abilities of major test. Duryea, M. ed. Forest Research Lab. Oregon State University. Corvallis.
- RITCHIE G.A., TANAKA Y., 1990. Root growth potential and the target seedling. En: Target seedling symposium. Gen. Tech. Rep. USDA Forest Service, pp. 37-51.
- ROSE R., 1992. Root growth potential and starch differences in seedlings of six families of genetically improved loblolly pine. *Forest Science* 38(2), 448-456.
- ROYO A., GIL SÁNCHEZ L., PARDOS J.A., 1997a. La resistencia al frío y el potencial de regeneración radical en plantas de *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinaster* Ait. y

- Quercus ilex* L. cultivadas en contenedor. Actas II Congreso Forestal Español, Navarra. Tomo II, pp. 579-584.
- ROYO A., FERNÁNDEZ M., GIL L., PARDOS J.A., 1997b. Predicción de la supervivencia y crecimiento de las plantas de vivero mediante medidas de parámetros fisiológicos pre y post-trasplante. Cuadernos de la S.E.C.F. 4, 103-111.
- SIMPSON D.G., THOMPSON C.F., SUTHERLAND C.D. 1994., Field performance potential of interior spruce seedlings: effects of stress treatments and prediction by root growth potential and needle conductance. Can. J. Forest Res. 24, 576-586.
- SIMPSON D.G., VYSE A., 1995. Planting stock performance: site and RGP effects. The Forest Chronicle 71(6), 739-742.
- SIMPSON D.G., RITCHIE G.A., 1997. Does RGP predict field performance? A debate. New Forests 13(1-3), 253-277.
- SOUTH D.B., 2000. Planting morphologically improved pine seedlings to increase survival and growth. Forest and Wildlife Series No 1. Alabama Agricultural Experiment Station. Auburn University, 14 pp.
- SUTTON, R. 1990. Root growth capacity in coniferous forest trees. Hortscience 25, 259-266.
- THOMPSON B., 1985. Seedling morphological evaluation. What can you tell by looking. En: Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major test. Duryea, M., ed. Forest Research Laboratory. Oregon State University, pp. 59-69.
- TIMMER V.R. 1991. Interpretation of seedling analysis and visual symptoms. En: Mineral nutrition in conifer seedlings. Van den Driessche, R., ed. CRC Press. Pp. 113-134.
- TINUS R.W., 1996. The value of seedling quality testing. Tree Planters' Notes 47(2), 45-46.
- TINUS R.W., BURR, K.E., ATZMON, N., RIOV, J., 2000. Relationships between carbohydrate concentration and root growth potential in coniferous seedlings from three climates during cold hardening and dehardening. Tree Physiology 20, 1097-1104.
- VALLAS J., VILLAR-SALVADOR P., PEÑUELAS J.L., HERRERO N., DOMÍNGUEZ LERENA S. PERAGÓN N., 1999. Efecto del aviveramiento prolongado sin riego en la calidad funcional de los brinzales de *Pinus halepensis* Mill. y su desarrollo en campo. Montes 58, 51-58.
- 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. Forest Res. 22(5), 740-749.
- VILLAR-SALVADOR P., OCAÑA L., PEÑUELAS J.L., CARRASCO I., 1999. Effects of water stress conditioning on the water relations, root growth capacity, and the nitrogen and non-structural carbohydrate concentration of *Pinus halepensis* Mill. (Aleppo pine) seedlings. Ann. For. Sci. 56, 459-465.

Anexo. Atributos de calidad en los distintos tratamientos. Media y error estándar (EE)

	OS15		OS17D1		OS17D2		OS17D3		OS9D1		OS9D2		OS9D3		TURyMAN	
	Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE	Media	EE
<i>Morfol.</i>																
DC(mm)	3,34	0,09	3,50	0,06	3,83	0,07	3,96	0,11	2,92	0,07	3,58	0,08	3,74	0,06	1,62	0,03
NR	30,43	1,59	26,68	1,58	32,07	1,10	32,68	1,53	15,07	1,15	24,11	1,46	30,04	1,69	7,29	0,74
L(cm)	36,34	1,13	34,66	1,37	37,09	1,15	40,59	1,40	23,82	0,89	34,91	1,08	41,00	1,32	12,95	0,33
Ptall(g)	1,15	0,09	1,02	0,07	1,31	0,07	1,63	0,11	0,42	0,03	1,09	0,07	1,33	0,05	0,08	0,00
Pacic(g)	2,45	0,13	2,42	0,10	2,86	0,09	3,08	0,14	1,36	0,06	2,43	0,11	2,73	0,10	0,36	0,01
Praiz(g)	1,42	0,07	1,53	0,04	1,47	0,05	1,45	0,07	1,32	0,06	1,77	0,06	1,69	0,07	0,42	0,02
Esbeltez	109,17	2,09	98,71	3,18	96,87	2,45	103,40	3,48	82,07	2,83	98,28	3,03	110,20	3,73	80,22	1,91
Paereo(g)	3,60	0,22	3,44	0,15	4,16	0,15	4,71	0,23	1,78	0,09	3,52	0,17	4,06	0,14	0,44	0,01
PA/PR	2,55	0,09	2,26	0,09	2,84	0,07	3,34	0,16	1,36	0,04	1,98	0,07	2,46	0,09	1,08	0,04
Ptotal(g)	5,02	0,29	4,96	0,18	5,63	0,18	6,16	0,28	3,11	0,14	5,29	0,22	5,74	0,19	0,86	0,02
Dickson	0,37	0,02	0,41	0,01	0,45	0,02	0,46	0,03	0,33	0,02	0,46	0,02	0,44	0,02	0,10	0,00
BalAgua	0,54	0,02	0,45	0,01	0,52	0,02	0,56	0,02	0,36	0,01	0,39	0,01	0,44	0,01	0,56	0,02
<i>Nutrición (mg/g)</i>																
[N]Acic.	19,74	0,31	16,25	0,25	18,15	0,18	18,53	0,23	11,95	0,07	13,50	0,04	14,88	0,07	12,33	0,21
[P]Acic.	1,55	0,02	1,35	0,03	1,53	0,02	1,54	0,03	2,21	0,03	1,90	0,05	1,78	0,01	0,79	0,02
[K]Acic.	8,47	0,06	5,92	0,15	7,08	0,05	7,45	0,08	5,76	0,05	6,68	0,14	7,47	0,15	8,76	0,16
[Ca]Acic.	3,44	0,04	5,19	0,11	5,78	0,04	6,41	0,14	6,15	0,11	5,38	0,06	5,40	0,06	5,37	0,04
[Mg]Acic.	2,85	0,04	3,57	0,14	3,20	0,03	3,14	0,09	4,71	0,07	3,72	0,07	3,18	0,05	2,99	0,03
[N]Raiz.	19,80	0,23	15,03	0,43	18,03	0,11	20,15	0,18	9,35	0,15	13,10	0,32	14,73	0,11	10,08	0,17
[P]Raiz	2,16	0,03	1,83	0,04	2,62	0,05	3,61	0,10	2,41	0,04	3,49	0,04	4,37	0,13	0,60	0,01
[K]Raiz	6,72	0,13	4,39	0,13	5,22	0,05	4,87	0,12	5,12	0,09	5,67	0,12	5,97	0,16	5,49	0,14
[Ca]Raiz	8,76	0,13	17,75	0,37	16,96	0,09	15,43	0,42	19,50	0,56	15,99	0,14	15,91	0,10	30,06	0,30
[Mg]Raiz	4,46	0,09	5,35	0,15	5,08	0,10	4,36	0,19	6,71	0,17	5,31	0,05	4,81	0,02	4,80	0,09
[N]Tallo	16,51	0,29	12,73	0,27	15,18	0,11	19,73	0,24	6,00	0,09	10,60	0,99	11,15	0,20	6,80	0,15
[P]Tallo	2,71	0,05	1,82	0,06	2,26	0,03	2,81	0,08	3,05	0,07	3,28	0,08	3,56	0,05	0,55	0,01
[K]Tallo	7,27	0,07	5,87	0,14	6,57	0,08	7,76	0,16	5,84	0,16	6,84	0,12	7,82	0,05	7,74	0,25
[Ca]Tallo	1,26	0,02	1,60	0,04	1,75	0,03	1,89	0,04	1,91	0,04	1,56	0,04	1,63	0,03	2,64	0,03
[Mg]Tallo	2,08	0,05	2,45	0,12	2,34	0,02	2,43	0,11	2,86	0,03	2,44	0,04	2,27	0,07	1,99	0,05
<i>Tot. (mg)</i>																
N Acic.	48,10	0,66	39,43	1,50	51,65	0,64	56,92	0,69	16,28	0,24	32,82	0,95	40,56	0,36	4,46	0,09
P Acic.	3,79	0,05	3,24	0,12	4,36	0,10	4,74	0,12	3,00	0,04	4,68	0,23	4,86	0,06	0,29	0,01
K Acic.	20,72	0,40	14,37	0,62	20,21	0,41	22,98	0,47	7,86	0,16	16,27	0,58	20,31	0,30	3,18	0,08
Ca Acic.	8,44	0,21	12,51	0,40	16,55	0,42	19,70	0,42	8,38	0,19	13,16	0,50	14,76	0,33	1,95	0,04
Mg Acic.	6,97	0,16	8,45	0,16	9,14	0,21	9,63	0,25	6,41	0,11	9,12	0,39	8,70	0,25	1,08	0,03
N Raíz	28,10	0,62	23,13	0,96	26,48	0,52	29,25	0,61	12,38	0,27	23,06	0,57	24,78	0,44	4,16	0,05
P Raíz	3,07	0,07	2,79	0,08	3,85	0,10	5,23	0,17	3,20	0,07	6,21	0,20	7,40	0,31	0,25	0,00
K Raíz	9,51	0,20	6,66	0,18	7,68	0,18	7,13	0,32	6,77	0,14	9,97	0,18	10,15	0,42	2,27	0,05
Ca Raíz	12,40	0,22	26,99	0,47	25,04	0,74	22,72	1,18	25,70	0,60	28,34	0,79	26,78	0,48	12,56	0,41
Mg Raíz	6,35	0,20	8,15	0,22	7,54	0,30	6,45	0,44	8,85	0,18	9,40	0,26	8,11	0,17	2,01	0,08
N Tallo	18,85	0,71	13,08	0,79	19,78	0,37	32,17	1,35	2,51	0,09	10,63	0,44	14,79	0,32	0,53	0,02
P Tallo	3,09	0,11	1,85	0,11	2,96	0,10	4,60	0,26	1,30	0,08	3,53	0,14	4,71	0,04	0,04	0,00
K Tallo	8,36	0,33	5,95	0,33	8,60	0,25	12,71	0,63	2,49	0,15	7,37	0,25	10,38	0,12	0,61	0,03
Ca Tallo	1,45	0,06	1,58	0,04	2,27	0,02	3,05	0,11	0,81	0,04	1,65	0,03	2,15	0,02	0,20	0,00
Mg Tallo	2,36	0,08	2,37	0,05	3,04	0,04	3,85	0,09	1,21	0,05	2,61	0,07	3,00	0,09	0,15	0,01
N Planta	95,06	1,87	75,64	2,96	97,90	1,36	118,34	1,75	31,18	0,53	66,52	1,07	80,13	0,65	9,15	0,11
P Planta	9,95	0,22	7,88	0,30	11,17	0,24	14,57	0,45	7,50	0,17	14,42	0,53	16,97	0,39	0,58	0,02
K Planta	38,59	0,82	26,98	0,82	36,50	0,59	42,82	0,93	17,12	0,29	33,61	0,89	40,83	0,49	6,05	0,15
Ca Planta	22,28	0,46	41,08	0,68	43,86	1,10	45,47	1,25	34,89	0,72	43,16	1,31	43,69	0,81	14,71	0,45
Mg Planta	15,69	0,40	18,96	0,41	19,72	0,53	19,93	0,70	16,46	0,31	21,13	0,68	19,80	0,46	3,25	0,10

Morfol. (atributos morfológicos, n = 28): DC = diámetro del cuello de la raíz; NR = número de ramillos; L = altura de la planta; Ptall, Pacic, Praiz = pesos secos; Paereo = Ptall + Pacic; PA/PR = Paereo/Praiz; Índice de Dickson = (Ptotal)/(Esbeltez + PA/PR); BalAgua = Balance de agua en la planta = PA/(DC·PR). **Nutrición (n = 4):** (mg/g) = concentración; **Tot. (mg)** = contenido total en cada fracción.