

CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE *QUERCUS PYRENAICA* BAJO DISTINTOS NIVELES DE RADIACIÓN Y COMPACTACIÓN DEL SUELO

L. Bejarano¹, A. M. Murillo^{1,3}, R. Villar^{1*}, J.L. Quero², R. Zamora²

¹ Area de Ecología, Edificio C-4, Campus de Rabanales, Universidad de Córdoba, 14071 Córdoba

² Dpto. Biología Animal y Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva, s/n, 18071 Granada

³ Dpto. Ingeniería Forestal, Silvopascicultura, ETSIAM, Universidad de Córdoba, Avda. Menendez Pidal s/n 14004 Córdoba

* Correo electrónico: bv1vimor@uco.es

Resumen

El objetivo de este trabajo es conocer la importancia que puede tener las variaciones en la disponibilidad de luz y la compactación del suelo en el crecimiento y distribución de biomasa a hojas, tallos y raíces en el roble melojo (*Q. pyrenaica*). El estudio se realizó en invernadero con dos niveles de luz (100 y 3 % de luz incidente) y bajo un rango amplio de compactación del suelo (valores de resistencia a la penetración desde 0,02 a 3 MPa). La biomasa total fue mucho mayor en el tratamiento de 100% luz, con una mayor proporción de hojas, pero menor proporción raíz y tallo. La longitud del tallo fue también un parámetro altamente influenciado por la radiación, siendo mayor en el tratamiento de sombra. Se encontró una correlación negativa y muy significativa entre la longitud de la raíz y la resistencia a la penetración ($r = -0,76$; $P < 0,0001$). En los niveles más elevados de compactación, la longitud de la raíz se redujo a la mitad con respecto a los niveles bajos de compactación. Esto indica que la compactación del suelo puede tener grandes consecuencias para la supervivencia de las plantas leñosas, al limitar el crecimiento en longitud de las raíces y por tanto el acceso al agua en niveles más profundos del suelo.

Palabras clave: longitud raíces, biomasa hojas, biomasa raíces, longitud tallo

INTRODUCCIÓN

Los factores abióticos (principalmente radiación, temperatura y la disponibilidad de nutrientes y agua) afectan al crecimiento y supervivencia de las especies (CANHAM, 1996; HOLMGREN, 2000; SACK, 2004). Además, cada especie responde de forma diferente a distintos niveles de recursos y condiciones. Esta información es esencial desde un punto de vista básico y aplicado, ya que permite conocer los requerimientos de las distintas especies y así, poder realizar repoblaciones de la forma mas adecuada y exitosa.

En general, la mayor parte de la investigación se ha centrado en los factores abióticos que parecen más limitantes, tales como la radiación, el agua y los nutrientes. Numerosos estudios han versado sobre los efectos de la radiación sobre crecimiento y supervivencia de especies. Por lo general, se produce un descenso en el crecimiento con respecto a la disminución de la radiación (ver por ejemplo SACK & GRUBB, 2002) pero en cambio un descenso en la radiación puede condicionar en determinadas condiciones una mayor supervivencia (MARAÑÓN et al., 2005).

Sin embargo, se cuenta con muy poca información acerca de cómo influyen otros factores abióticos relativos al suelo en el crecimiento y supervivencia de las plantas mediterráneas. Entre las características físicas importantes del suelo están su textura, estructura y compactación (variación del volumen del suelo para una masa determinada), que condicionan el tamaño y proporción de espacios vacíos en el suelo. Una mayor compactación provoca una disminución tanto en el tamaño como en la proporción de espacios vacíos del suelo (destrucción progresiva de la estructura) que va llevando al apelmazamiento del mismo y que determina dos problemas principales. Por un lado, se produce una disminución de la conductividad hidráulica y gaseosa, provocando problemas a las plantas para la absorción de agua, encharcamientos en caso de lluvia, y empobrecimiento del nivel de oxígeno de la atmósfera del suelo. Por otro lado, aumenta la dificultad para enraizar, ya que con la compactación, aumenta el trabajo que ha de realizar la raíz y por tanto supone un mayor coste energético, que se puede traducir en efectos sobre el crecimiento y la supervivencia.

En condiciones naturales, las diferencias en compactación pueden venir determinadas por un aumento del contenido arcilloso en horizontes subsuperficiales, sobrepastoreo, aumento de la carga de herbivoría, etc. (KOZLOWSKI, 1999). Algunos trabajos han demostrado que la compactación del suelo

condiciona el desarrollo de la raíz, ralentizando su crecimiento (PASSIOURA *et al.*, 2002; VERDU, 1996), pudiendo afectar también al crecimiento del tallo (WOLFE *et al.*, 1995).

Sin embargo, no existen trabajos en los que se combinen diferentes niveles de compactación del suelo con distintas intensidades luminosas. Los efectos de la compactación sobre crecimiento y supervivencia pueden diferir en plantas crecidas en condiciones de sombra de aquellas crecidas con suficiente luz, ya que una menor disponibilidad de luz afectaría a la tasa de fotosíntesis y por tanto a una menor entrada de energía.

En este estudio se ha elegido a una especie leñosa, *Quercus pyrenaica*, caracterizada por presentar un gran desarrollo de la biomasa radical. El roble melojo forma bosques en zonas donde se conjugan una serie de factores ambientales tales como suelo ácido o neutro, orientación umbrosa o cabeceras de valles y altitudes elevadas por encima de los 1000-1200 m. En Andalucía encontramos bosques en Sierra Nevada, la Sierra de los Alcornoques y Sierra Morena (BLANCO CASTRO *et al.* 1998).

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de distintos niveles de radiación y la compactación sobre el crecimiento y la distribución de biomasa a hojas, tallos y raíces en *Quercus pyrenaica*.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en los invernaderos del Campus Universitario de Rabanales (Universidad de Córdoba, España), durante los meses de marzo a septiembre de 2004. Se utilizaron bellotas de *Quercus pyrenaica* procedentes del Parque Natural de la Sierra de Cardena y Montoro, al Noreste de la provincia de Córdoba. Las bellotas se colocaron durante un día en agua y posteriormente se conservaron en cámara frigorífica a 5 °C en atmósfera a saturación de humedad. Se eligieron al azar 30 bellotas recién germinadas (aproximadamente 1-2 cm de radícula) y se sembraron en cilindros de PVC de 50 cm de altura y 11 cm de diámetro. El suelo utilizado fue una mezcla de arena y turba (en relación 3:1) y a distintos niveles de compactación. Una submuestra del suelo se pesó en fresco y en seco tras 3 días en una estufa a 65°C y se determinó el porcentaje de humedad.

Se prepararon hasta siete niveles diferentes de compactación, y para cada uno se hicieron cuatro réplicas, dos de las cuales serían sometidas a condiciones de radiación normales y las otras dos a una menor intensidad de radiación (3 %).

Los dos tratamientos de luz considerados fueron: “sombra” bajo una malla verde que tan sólo permitía el paso de un 3 % de la radiación incidente, y “luz” sometidas a la luz solar que entraba a través de los cristales del invernadero.

Los distintos grados de compactación del suelo se calcularon de la siguiente forma. Se consideró como nivel cero de compactación, al cilindro lleno hasta los 49 cm sin presionar el sustrato, y como nivel máximo de compactación, al cilindro lleno hasta los 49 cm con el sustrato lo más compactado posible mediante presión manual. Para conocer cuántos gramos de sustrato diferenciaban a cada nivel, se calculó la diferencia de peso entre ambos extremos (máximo y mínimo de compactación) y se dividió entre tantos niveles menos uno como queríamos obtener. Así se llegó a que cada grado de compactación se diferenciaba del anterior en que en el mismo volumen (cilindros idénticos) tenía aproximadamente 360 g más de sustrato.

Se calculó la densidad inicial y final de cada maceta como masa de sustrato entre el volumen ocupado al principio y al final del experimento, respectivamente (Tabla 1). Transcurridos los 7 meses del experimento se observó que la altura a la que llegaba el sustrato disminuyó, como consecuencia de un apelmazamiento natural del sustrato. Transcurridas varias semanas después de la siembra de las bellotas, se midió el grado de compactación del suelo para cada maceta con un penetrómetro (P1.52-1, Penetrologer, Eijkelkamp, NL). La compactación del suelo se expresó en términos de resistencia a la penetración (RP), es decir, como la presión requerida para introducir en el suelo una sonda cilíndrica con punta cónica (PASSIOURA *et al.*, 2002).

En septiembre de 2004 se cosecharon todas las plántulas y se midió para cada una: biomasa seca de hojas, tallo y raíz y la longitud del tallo y de la raíz principal. Se calculó la fracción de biomasa dedicada a hojas (LMR), tallo (SMR) y raíz (RMR) como la proporción de biomasa del órgano dividido por el total de biomasa (VILLAR *et al.*, 2004). Posteriormente, las raíces se separaron en dos fracciones, raíces con diámetro superior a 0,5 cm y las de diámetro inferior y se calculó el peso seco de cada una de estas fracciones y la longitud total de la fracción que correspondía a las raíces más grandes (con diámetro superior a 0,5 cm). Se calculó para las raíces con diámetro superior de 0,5 cm la relación peso/ longitud, así como la relación entre el peso de las raíces grandes / peso de las raíces más pequeñas.

Se llevaron a cabo análisis de varianza para conocer la influencia de la radiación sobre ciertas

variables y correlaciones entre distintas variables. Los datos de biomasa se transformaron a logaritmo y los de LMR, RMR y SMR a arcoseno, para cumplir con los requerimientos del ANOVA (distribución normal y homogeneidad de varianzas). Para las proporciones de raíz y tallo, estas transformaciones no corrigieron la heterogeneidad de las varianzas y por ello se realizó un test no paramétrico (U de Mann-Whitney). Los análisis estadísticos se realizaron con Statistica v6 (STATSOFT, 2004).

RESULTADOS

Densidad del suelo y compactación

Un aumento en el nivel de compactación del suelo resultó en incrementos significativos en la densidad del mismo, así como en la resistencia a la penetración medida por el penetrómetro (Tabla 1).

La densidad final fue mayor que la densidad inicial, debido a la disminución de la altura del sustrato como consecuencia del apelmazamiento. De todas formas, la relación entre densidad inicial del suelo (al principio del experimento) y la densidad final (al cabo de 7 meses) fue muy alta (Figura 1 A; $r = 0,95$; $P < 0.001$). La densidad final o inicial estuvieron correlacionadas positivamente con la resistencia a la penetración con un modelo de tipo exponencial (Figura 1 B, $r = 0,79$; $P < 0.001$).

Efectos de la radiación sobre características de las plantas

La biomasa total fue muy dependiente del grado de radiación recibida, siendo mucho mayor en el tratamiento de luz (Fig. 2 A). El porcentaje de la biomasa destinada a hojas, raíz y tallo también se vio afectado por la radiación. Las plantas sometidas al tratamiento de luz presentaron mayor proporción de hojas (Fig. 2 B) y menor proporción raíz (Fig. 2 C), no existiendo diferencias en la proporción de tallo (Fig. 2 D). Sin embargo, la longitud del tallo fue un parámetro altamente influenciado por la radiación, siendo mayor en el tratamiento de sombra (Fig. 2 E). La longitud de la raíz principal no mostró diferencias entre los dos tratamientos de luz (Fig. 2 F). Tanto la relación peso/ longitud de raíces gruesas y peso de raíces gruesas/ raíces finas también se vieron afectadas por la radiación recibida siendo menor en los tratamientos de sombra (datos no mostrados).

Influencia de la compactación sobre características de las plantas

Se encontró una correlación muy significativa entre la longitud de la raíz y la resistencia a la penetración (Fig. 3 A, $r = -0,76$; $P < 0.0001$). Las correlaciones también fueron negativas y significativas cuando se analizó por separado las plántulas del tratamiento de luz y sombra ($r = -0,58$; $P < 0.05$ y $r = -0,84$; $P < 0.05$; respectivamente). La biomasa total no estuvo correlacionada con la resistencia a la penetración (Fig. 3 B). No se encontraron correlaciones significativas entre la resistencia a la penetración y otras variables de las plántulas como las proporciones de biomasa dedicadas a hojas, tallo y raíz o la longitud del tallo (datos no mostrados). Tampoco fueron significativas las correlaciones entre la compactación y la razón del peso y longitud de las raíces más gruesas, ni tampoco con la relación peso raíces gruesas/ finas.

DISCUSIÓN

La biomasa de las plántulas de *Quercus pyrenaica* sometidas a una intensidad de radiación normal (100 %) es considerablemente mayor a la de aquellas en tratamiento de sombra (3%). Los valores de radiación luminosa en este tratamiento de sombra han sido bajos, pero realistas dado que sus valores son parecidos a los encontrados en zonas de sotobosque de bosques de alcornoques y quejigos en el Parque de Los Alcornocales (MARAÑÓN *et al.*, 2005). Esta reducción tan fuerte en la radiación tiene en general una traducción en un menor crecimiento. Por ejemplo, SACK & GRUBB (2002) encuentra que plantas en sombra profunda tienen un crecimiento mucho menor (entre un 50 a un 70% menos biomasa que las plantas sin sombra).

La limitación de luz, no solo afecta la biomasa total, sino también el reparto de biomasa a los distintos órganos. Es sorprendente que en condiciones de sombra la proporción de hojas sea menor que en luz completa, cuando en otros estudios se encuentra lo contrario (SACK, 2004). Da la impresión de que las plántulas de roble bajo condiciones de sombra limitante, responden distribuyendo gran parte de los recursos a la raíz, seguramente procedentes de la bellota. Las consecuencias de una menor proporción de raíz en condiciones de luz podría suponer una menor capacidad de resistencia a la sequía, ya que estas plantas tendrían en verano una mayor demanda hídrica que no podrían satisfacer dada la menor proporción de raíz.

Considerando el método usado en este trabajo para crear diferentes niveles de compactación se puede decir que además de ser bastante sencillo es efectivo. Como se puede observar en la Figura 1 B, la densidad final estaba correlacionada fuertemente con la resistencia a la penetración. Sin embargo, se

observa como a partir de determinados valores de densidad final (aproximadamente $1,3 \text{ g cm}^{-3}$) la resistencia a la penetración aumenta exponencialmente y no linealmente.

La resistencia a la penetración limita el crecimiento en longitud de la raíz principal (Figura 3 A). Este efecto negativo es mucho más acusado cuando la resistencia a la penetración sobrepasa el valor de 1 MPa. La longitud de la raíz de plantas crecidas en un suelo sometido a una compactación de unos 3 MPa es menos de la mitad que la medida en los niveles más bajos de compactación. Sin embargo, no se puede afirmar aun qué valor de compactación o densidad del suelo detiene por completo el crecimiento de la raíz; sería necesario continuar los estudios en este sentido.

Sin embargo, un aumento en la compactación del suelo no afecta negativamente al desarrollo de la parte aérea de *Quercus pyrenaica* (tanto a biomasa destinada a hojas y tallo como a la longitud de éste último). Por tanto, la demanda de agua y nutrientes para un correcto desarrollo de estructuras aéreas de la planta ha debido de quedar satisfecha a pesar de la disminución en longitud de la raíz. Esto se ha podido deber, en primer lugar a que las plántulas han estado regadas diariamente y tal vez en condiciones más limitantes de agua, los resultados serían distintos. Por otro lado, un aumento en la densidad del suelo lleva aparejado un aumento en la cohesión de las partículas y al mismo tiempo en su adhesión a la superficie de la raíz, con lo que se facilitaría también la absorción y se mitigarían los efectos negativos que podría tener sobre el correcto desarrollo de la parte aérea una reducción en la longitud de la raíz.

Otros estudios han demostrado que con el aumento de la densidad del suelo se produce una disminución en el número de poros pequeños y por consiguiente en la cantidad de oxígeno disponible para la planta (MOSENA & DILLENGURG, 2004), pero esto no parece interponerse en el correcto desarrollo de *Quercus pyrenaica* ya que tanto la biomasa total como la destinada a parte aérea no se ve afectada negativamente en el intervalo de densidades en el que se ha trabajado. Posteriores estudios con otros suelos de mayor densidad, nos permitirán explorar los posibles efectos de la compactación sobre la parte aérea de las plántulas. Así como se ha demostrado que una disminución en la longitud de la raíz de *Quercus pyrenaica* como consecuencia de una elevada resistencia a la penetración del suelo no resulta en un problema en la captación de nutrientes y agua en las condiciones del experimento, y por tanto en su correcto desarrollo de biomasa (tanto aérea como subterránea), sí parece lógico afirmar que aquellas plantas cuyo sistema radical es menos profundo están en desventaja ante períodos de sequía en los que el agua en el suelo pasa a ser factor limitante y sólo puede obtenerse a profundidades mucho mayores. Este hecho cobra mayor importancia en las plántulas recién emergidas en primavera, las cuales tienen que desarrollar una raíz pivotante antes de que llegue la época crítica para la continuación del ciclo regenerativo, la sequía estival. El bosque mediterráneo se caracteriza por presentar largos períodos de estiaje en los que los niveles freáticos sufren un gran descenso por lo que un sistema de raíces profundo resulta imprescindible no solo para el correcto desarrollo sino también para su supervivencia. Por otro lado, la función de las raíces como soporte físico de la planta es tan importante como la de captación de nutrientes y agua. La planta adulta estará más establemente fijada al suelo cuanto mejor desarrollado tenga su sistema radical. Por tanto, una disminución en la longitud de la raíz de la planta adulta podría ser negativo para su supervivencia al suponer un problema, no sólo para su capacidad de acceso a agua en períodos secos, sino también para su capacidad de mantenerse erguida y anclada al sustrato.

Agradecimientos

El estudio ha sido posible gracias a la beca de colaboración financiada por el MEC que disfrutó Loles Bejarano y a la financiación del proyecto REN2002-04041 CO2-02. Esta línea de investigación coordinada forma parte de REDBOME (Red Andaluza de Estudios del Bosque Mediterráneo, <http://www.ugr.es/~redbome>) y de la red temática nacional GLOBIMED (<http://www.globimed.net/>).

BIBLIOGRAFÍA

- BLANCO CASTRO, E.; CASADO GONZÁLEZ, M.A.; COSTA TENORIO, M.; ESCRIBANO BOMBÍN, R.; GARCÍA ANTÓN, M.; GÉNOVA FUSTER, M.; GÓMEZ MANZANEQUE, A.; GÓMEZ MANZANEQUE, F.; MORENO SAIZ, J.C.; MORLA JUARISTI, C.; REGATO PAJARES, P. y SAINZ OLLERO, H. 1998. *Los Bosques Ibéricos*. Editorial Geoplaneta. Barcelona.
- CANHAM, CD.; BERKOWITZ, AR.; KELLY, VR.; LOVETT, GM.; OLLINGER, SV. & SCHNURR, J. 1996. Biomass allocation and multiple resource limitation in tree seedlings. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere* 26(9):1521-1530.
- HOLMGREN, M.; 2000. Combined effects of shade and drought on tulip poplar seedlings: trade-off in

tolerance or facilitation? *Oikos* 90: 67-78.

KOZLOWSKI, T.T. 1999. Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14 (6): 596-619.

MARAÑÓN, T.; ZAMORA, R.; VILLAR, R.; ZAVALA, M.A.; QUERO, J.L.; PÉREZ-RAMOS, I.; MENDOZA, I. y CASTRO, J. 2004. Regeneration of tree species and restoration under contrasted Mediterranean habitats: field and glasshouse experiments. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 30: 187-196.

MOSENA, M. & DILLENBURG, L.R. 2004. Early growth of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia* [Bertol.] Kuntze) in response to soil compaction and drought. *Plant and Soil* 258 (1): 293-306.

PASSIOURA, J.B. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant Cell and Environment* 25 (2): 311-318.

SACK, L. & GRUBB, P.J. 2002. The combined impacts of deep shade and drought on the growth and biomass allocation of shade-tolerant woody seedlings. *Oecología* 131: 175-185.

STATSOFT, INC. 2004. *Statistica* (data analysis software system), version 6. Tulsa (Oklahoma,EEUU).

VERDU, M. & GARCIA FAYOS, P. 1996. Nucleation processes in a Mediterranean bird-dispersed plant. *Functional Ecology* 10 (2): 275-280.

VILLAR, R.; RUIZ-ROBLETO, J.; QUERO, J.L.; POORTER, H.; VALLADARES, F. y MARAÑÓN, T. 2004. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. En: F. Valladares (ed.) *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*: 191-227. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

WOLFE, D.W.; TOPOLESKI, D.T.; GUNDERSHEIM, N.A.& INGALL, B.A. 1995. Growth and yield sensitivity of 4 vegetable crops to soil compaction. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120 (6): 956-963.

Figura 1. (A) Relación entre la densidad inicial del suelo (al principio del experimento) y la densidad final (tras los 7 meses del experimento). La línea representa la regresión lineal. **(B)** Relación entre la densidad final del suelo y la resistencia a la penetración medido con un penetrómetro.

Figura 2. Valores medios (\pm desviación estandar) de **(A)** la biomasa total; **(B)** proporción de hojas (LMR); **(C)** proporción de raíz (RMR); **(D)** proporción de tallo (SMR); **(E)** longitud máxima tallo y **(F)** longitud raíz principal; en las plántulas de *Q. pyrenaica* cultivadas en luz (L) y sombra (S).

Figura 3. (A) Relación entre la longitud de la raíz principal y la resistencia a la penetración y **(B)** relación entre la biomasa total y la resistencia a la penetración. La línea continua representa la regresión lineal significativa y la línea discontinua una regresión lineal no significativa ($P > 0,05$).

Tabla 1. Valores medios de la densidad inicial y final del suelo y resistencia a la compactación en los distintos niveles de compactación estudiados.

	DENSIDAD INICIAL (g/cm ³)		DENSIDAD FINAL (g/cm ³)		RESISTENCIA PENETRACIÓN (Mpa)	
	Media \pm SD		Media \pm SD		Media \pm SD	
0	0,9513	$\pm 0,0371$	1,1831	$\pm 0,0250$	1,5598	$\pm 0,1286$
1	1,0154	$\pm 0,0395$	1,1932	$\pm 0,0233$	2,0191	$\pm 0,5316$
2	1,0846	$\pm 0,0277$	1,1928	$\pm 0,0180$	1,9696	$\pm 0,2402$
3	1,1816	$\pm 0,0113$	1,2705	$\pm 0,0099$	3,3124	$\pm 0,1994$
4	1,2238	$\pm 0,0157$	1,2903	$\pm 0,0027$	6,2029	$\pm 0,8282$
5	1,2739	$\pm 0,0196$	1,3397	$\pm 0,0287$	11,2622	$\pm 3,4870$
6	1,3368	$\pm 0,0077$	1,3646	$\pm 0,0079$	23,5047	$\pm 5,9444$

Figura 1

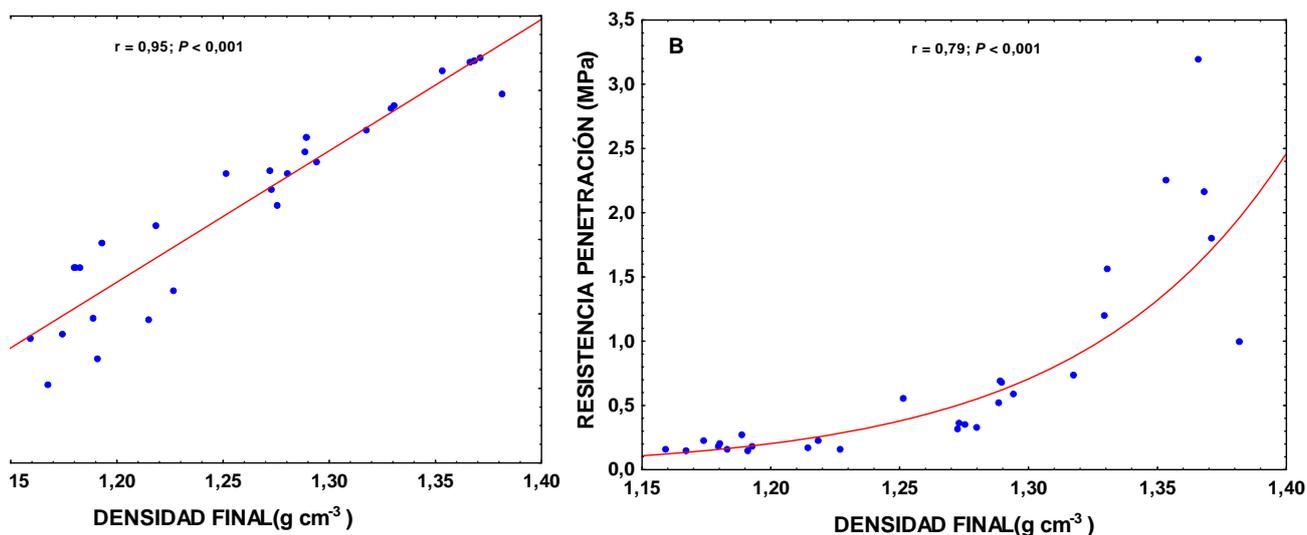


Figura 2

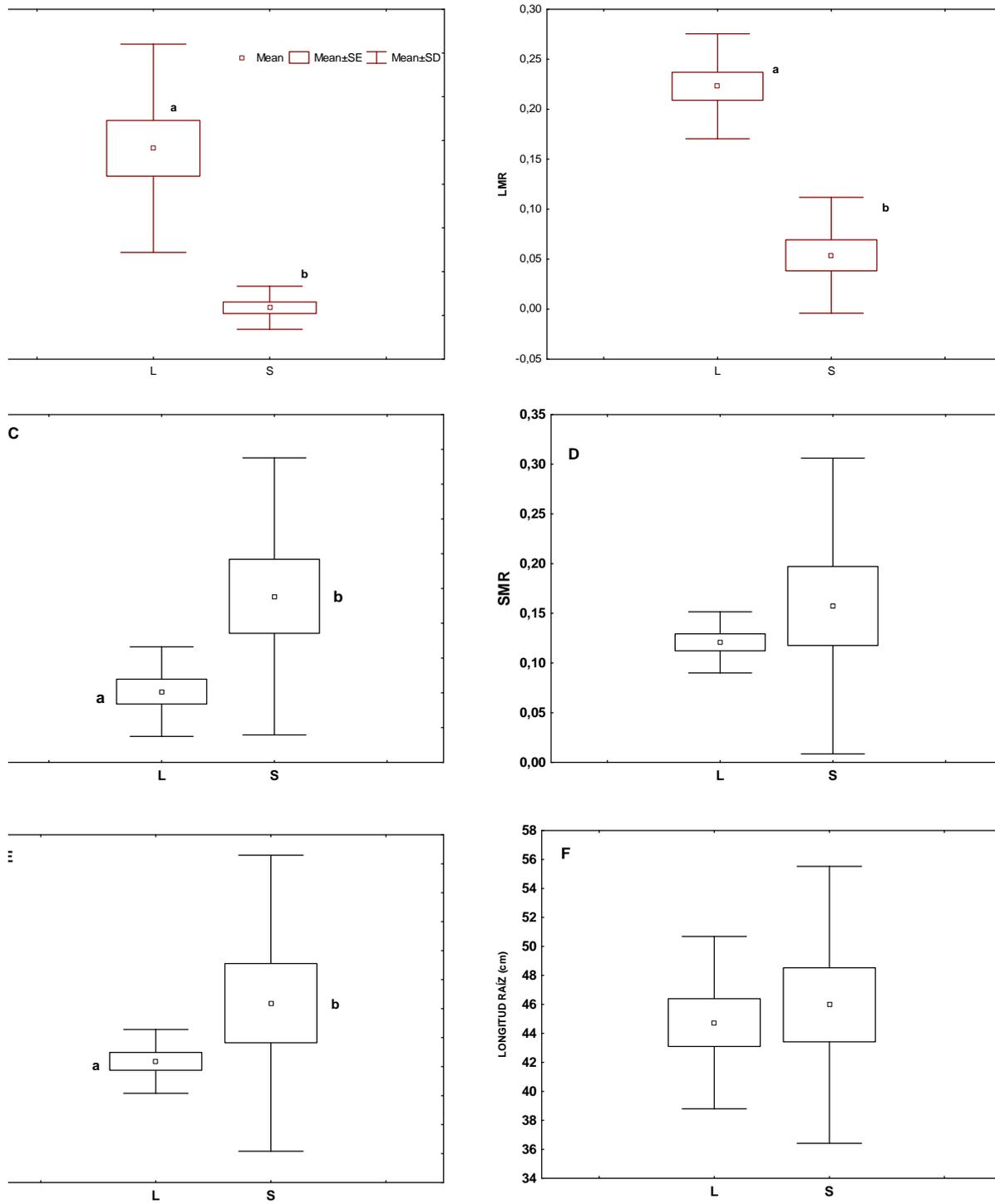


Figura 3

