

DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES FINAS DE *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* Y SU RELACIÓN CON ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO**FINE ROOT DISTRIBUTION OF *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* IN RELATION TO SOME SOIL PROPERTIES**Juan José Gaitán¹ Eduardo Augusto Penón² María Cristina Costa³**RESUMEN**

El objetivo del presente trabajo fue determinar la distribución vertical de la densidad de raíces finas (hasta 2 mm de diámetro) de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* y su relación con algunas propiedades del suelo hasta una profundidad de 0,5 m. Las raíces fueron muestreadas en la zona cercana al tronco de 10 árboles, utilizando el método del cilindro. La distribución de raíces finas fue influenciada por las propiedades físicas y químicas del suelo. La mayor densidad de raíces finas (DRF) fue hallada en los primeros 20 cm del suelo, mientras que la menor DRF fue observada en el horizonte arcilloso. DRF se correlacionó positivamente con el contenido de carbono orgánico y fósforo extractable y negativamente con la densidad aparente del suelo.

Palabras clave: raíces finas; *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii*; propiedades edáficas.

ABSTRACT

A study was conducted to determine the vertical distribution of *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* fine root (with diameters of up to 2 mm) density to a depth of 0,5 m and their relationships with soil properties. Roots were sampled near the stem of 10 trees with the soil corer method. Fine root distribution is influenced by soil physical and chemical properties. A very high density of fine roots was found at 20 cm depth, while a low density was observed in the clayey horizon. Fine root density (DRF) correlated positively with organic C and extractable P and negatively with soil bulk density.

Key words: fine root; *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii*; soil properties.

INTRODUCCION

Las raíces constituyen el sistema de fijación para los árboles y efectúan las funciones vitales de absorción y transporte de agua y nutrientes (Pritchett, 1986). En estudios del sistema radical es necesario distinguir entre raíces gruesas o estructurales y raíces finas (RF) o de absorción (Ares y Peinemann, 1992), aún cuando las raíces de los árboles presentan una intergradación continua de características morfológicas y funcionales, por lo tanto cualquier clasificación basada en el tamaño es arbitraria (Leshem, 1965, apud Moir y Bachelard, 1969).

Las RF son las estructuras principalmente responsables de la absorción de agua y nutrientes (Baker *et al.*, 2001; Bowen, 1984) ya que representan entre un 90 y 95% de la longitud total del sistema radical (Bowen 1984.; Nambiar, 1990) y por lo tanto constituyen la superficie de contacto con el suelo.

Especies del género *Eucalyptus* han sido plantadas en varias regiones del mundo debido a su alta productividad, aún en áreas donde suelen ocurrir deficiencias de agua y nutrientes (Fabiao *et al.*, 1994). Según Carbon *et al.* (1980) la buena adaptación de estas especies a diferentes condiciones ambientales, puede estar relacionada con la alta plasticidad de su sistema radical.

El crecimiento de los árboles es indirectamente dependiente de las características edáficas debido a su influencia sobre el desarrollo de las raíces (Fabiao *et al.*, 1994). En tal sentido Pritchett (1986) señala que el volumen de suelo disponible para las raíces, determinado por la profundidad del suelo, es uno de los principales factores que influye en el crecimiento de los árboles al afectar la disponibilidad de agua y nutrientes. Sin embargo la profundidad del suelo es generalmente determinada por convención, conveniencia o arbitrariamente, más que por la observación directa del sistema radical (Stone, 1987; apud Sutton, 1991). Por lo tanto un mejor conocimiento de la densidad y distribución, en profundidad, de las raíces más activas de los árboles y su relación con las propiedades del suelo puede constituir una herramienta importante en la

1. Ingeniero Agrónomo, Ayudante de Primera Ordinaria, Edafología, Dpto. de Tecnología, Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y 7 (6700) Bs. As., Argentina. jgaitan58@latinmail.com

2. Ingeniero Agrónomo, Jefe de Trabajos Prácticos, Edafología, Dpto. de Tecnología, Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y 7 (6700) Bs. As., Argentina. pili@mail.unlu.edu.ar

3. Ingeniera Agrónoma, Profesora Adjunta, Edafología, Dpto. de Tecnología, Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y 7 (6700) Bs. As., Argentina. mcosta@mail.unlu.edu.ar

elaboración de modelos de crecimiento para predecir la productividad del sitio.

La evaluación de los factores que influyen sobre el crecimiento y función de las raíces ha sido restringido a plántulas, especialmente de cereales y otros cultivos anuales creciendo en macetas o soluciones nutritivas (Eissennstat y Van Rees, 1994). Si bien sus resultados son importantes no pueden ser directamente aplicados a las condiciones de campo (Pritchett, 1986).

El hábito de arraigamiento, que está relacionado con la forma, dirección y distribución de las raíces gruesas, tiende a estar bajo control genético, mientras que la intensidad del sistema radical, que está asociada con la distribución de RF, es más sensible a las condiciones del suelo (Pritchett, 1986).

Los principales factores que afectan el crecimiento de las raíces de las plantas son: edad, especie, disponibilidad de agua y nutrientes, factores abióticos tales como temperatura, grado de compactación del suelo, aireación y presencia de sustancias tóxicas (Makkonen y Helmisaari, 1998).

Fabiao *et al.* (1994) concluyeron que la abundancia y distribución de RF de *Eucalyptus globulus* depende de las características del sitio, tales como textura y disponibilidad de agua y nutrientes. La distribución de RF en el perfil del suelo se halló principalmente determinada por la densidad aparente.

El consumo de agua y nutrientes por parte de las plantas depende de la habilidad de las raíces para absorberlos, de la capacidad del suelo para suministrarlos y de la accesibilidad de los mismos, que está determinada por el tamaño y configuración del sistema radical. La compactación del suelo afecta la configuración del sistema radical y por lo tanto el consumo de agua y nutrientes (Misra *et al.*, 1988; Droogers *et al.*, 1997).

En suelos compactados, varios factores físicos y biológicos pueden limitar el crecimiento radical, incluyendo la disponibilidad de agua y aire y la resistencia mecánica que ofrece el suelo a ser deformado por las raíces en crecimiento (Bengough *et al.*, 1997).

El objetivo del presente trabajo es evaluar la influencia de algunas variables edáficas sobre la distribución de raíces finas de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* en el perfil del suelo.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se llevó a cabo sobre una parcela de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* ubicada en el campo experimental de la Universidad Nacional de Luján, provincia de Buenos Aires, Argentina (34° 34' lat. S; 89° 04' long. O). La parcela fue plantada en octubre de 1997, por lo que al momento de la realización del presente trabajo las plantas tenían 4,5 años de edad. Las labores de plantación fueron: labranza primaria con arado de reja y vertedera y labranza secundaria con rastra de discos, el control de malezas se realizó en forma mecánica y no se aplicaron fertilizantes.

El clima de la región, según la clasificación climática de Koeppen, corresponde al templado con precipitación anual distribuida uniformemente. La temperatura media de los meses de verano es de 25 °C, con valores máximos en los meses de Enero y Febrero. La temperatura media invernal es de 9,5 °C, correspondiendo los valores mínimos a los meses de Junio y Julio. Las precipitaciones oscilan alrededor de los 950 mm anuales, distribuidas a lo largo del año con máximas en otoño y primavera, y mínimas en invierno; sin determinar estaciones contrastantes.

La parcela de estudio se halla ubicada sobre una loma plana, siendo el suelo representativo un Argiudol típico con una secuencia de horizonte del tipo: A-AB-Bt1-Bt2-BC-C.

El muestreo de raíces se realizó, sobre 10 árboles escogidos al azar, con un barreno de acero inoxidable de 50 mm de diámetro, hasta 50 cm de profundidad, en capas de 10 cm de espesor: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm. En cada árbol se fijaron 4 puntos de muestreo ubicados a 50 cm de distancia del tronco sobre dos líneas imaginarias, una localizada sobre la línea de plantación y la otra perpendicular a esta.

Con las muestras extraídas con el barreno se calculó la densidad aparente en las 5 capas del suelo en cada micrositio.

En la zona cercana al tronco de cada árbol se realizó un pozo de aproximadamente 60 cm de profundidad para describir la secuencia y espesor de los horizontes de acuerdo a las Normas de Reconocimiento de Suelos (Soil Survey Staff, 1993).

Se consideraron raíces finas aquellas de diámetro inferior a 2 mm, las cuales fueron cuidadosamente separadas del suelo en forma manual. Las raíces fueron lavadas sobre un tamiz de 1 mm de apertura de malla,

secadas en estufa a 70 °C hasta peso constante y pesadas con balanza de precisión ($\pm 0,0001$ g)

Se tomo una fracción de la muestra de suelo que fue secada a 105 °C hasta peso constante para determinar el contenido de humedad y su posterior análisis químico.

A las muestras de suelo secas en estufa y tamizadas por malla de 0,5 y 2 mm se les midió carbono orgánico (método de Walkey y Black) y fósforo extractable (método de Kurtz y Bray I), respectivamente.

Se realizó el análisis de varianza ($p < 0,05$) de la densidad de raíces finas (DRF) entre capas de suelo, efectuándose la comparación de medias a través del test LSD. La relación entre la DRF y las variables edáficas se analizó por técnicas de regresión simple y múltiple, utilizando modelos lineales y no lineales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suelo presentó una secuencia de horizontes A-AB-Bt en todos los micrositios. El espesor del horizonte A fue variable entre 12 y 40 cm, el del transicional entre 4,5 y 17 cm y la profundidad hasta el horizonte Bt osciló entre 18 y 48 cm (Figura 1).

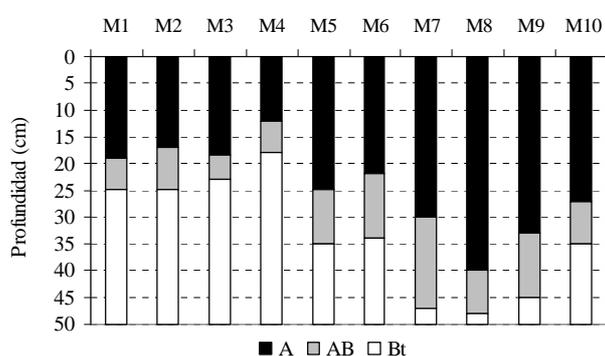


FIGURA 1: Secuencia y espesor de los horizontes del suelo en los 10 micrositios.

FIGURE 1: Sequence and thickness of soil horizons in 10 microsites.

Se observó una disminución en el contenido de carbono orgánico y fósforo extractable (Figura 2) y un incremento de la densidad aparente (Figura 3) con la profundidad del suelo.

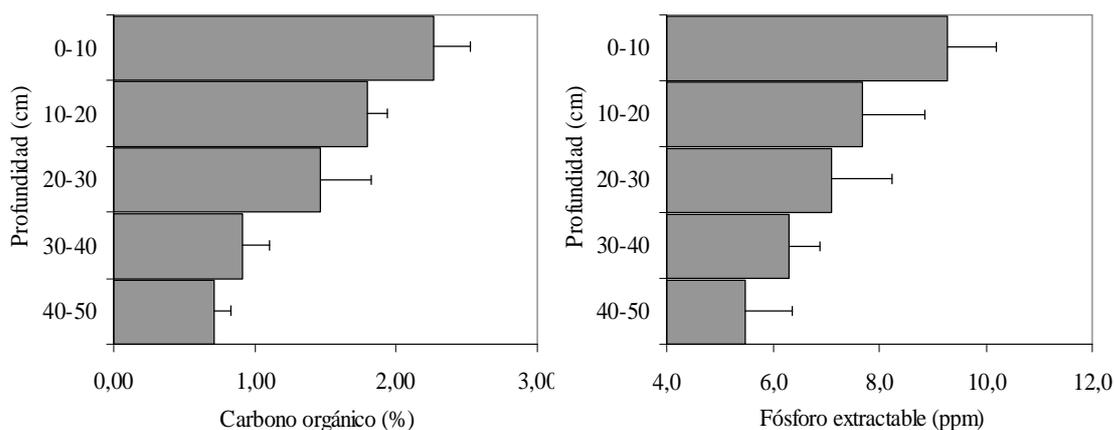


FIGURA 2: Contenido carbono orgánico y fósforo extractable en los primeros 50 cm del perfil del suelo. Promedio de 10 micrositios. Las líneas sobre las barras indican el desvío estándar.

FIGURE 2: Soil organic carbon content and extractable phosphate in the top 50 cm of soil profile. Mean of 10 microsites. The lines over the bars are the standard deviation.

Este tipo de relación entre el contenido de carbono y fósforo con la profundidad del suelo ha sido

ampliamente reconocido (Lynch y Brown, 2001; Jobbágy y Jackson, 2001) y se debe a que el aporte de material orgánico se concentra en los primeros centímetros del suelo.

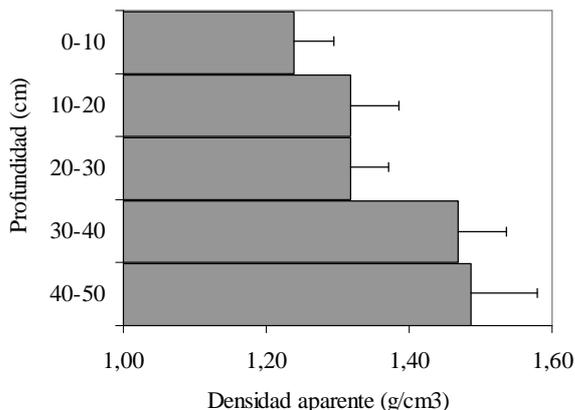


FIGURA 3: Densidad aparente en los primeros 50 cm del perfil suelo. Promedio de 10 micrositios. Las líneas sobre las barras indican el desvío estándar.

FIGURE 3: Soil bulk density in the top 50 cm of soil profile. Mean of 10 microsites. The lines over the bars are the standard deviation.

Según Sutton (1991) la densidad aparente generalmente se incrementa con la profundidad a medida que el contenido de materia orgánica y la actividad biológica se reduce.

La DRF presentó una tendencia decreciente con la profundidad, hallándose los menores valores en la zona del perfil del suelo correspondiente al horizonte arcilloso (Figura 4).

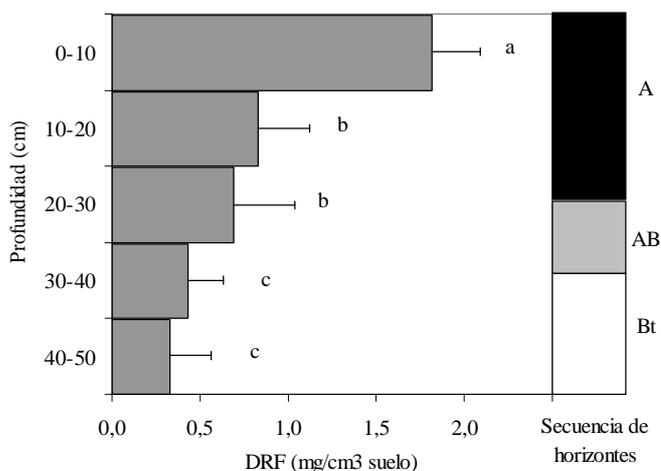


FIGURA 4: Densidad de raíces finas de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* y secuencia de horizontes en los primeros 50 cm del perfil del suelo. Los datos son promedios de 10 micrositios. Letras minúsculas distintas entre capas indican diferencias significativas de la DRF (LSD, $p < 0,05$). Las líneas sobre las barras indican el desvío estándar.

FIGURE 4: Fine root density (DRF) of *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* and horizon sequence in the top 50 cm soil profile. Means of 10 microsites. a, b and c denote significant differences at $p < 0,05$ LSD test. The lines over the bars are the standard deviation.

Cozzo (1976) señala como una de las principales limitaciones para el desarrollo forestal la existencia de horizontes arcillosos cercanos a la superficie debido a la escasa penetrabilidad de los mismos. La escasa presencia de raíces finas en horizontes arcillosos también ha sido constatada por Donoso *et al.* (1999) en *Eucalyptus globulus* y por Ares y Peinemann (1992) en varias especies de coníferas.

Entre un 55 y 83 % de la biomasa de raíces finas se halló en los primeros 20 cm del suelo. Estos resultados son similares a lo indicado por otros autores. Fabiao *et al.* (1994), analizaron la distribución de RF (<2 mm) en los primeros 70 cm del suelo en dos rodales de *Eucalyptus globulus* de 12 y 18 años y hallaron que el 71,9 % y el 57,9 %, respectivamente, de la biomasa de RF se encontraba en los 20 cm superficiales. Baker *et al.* (1991) observaron que el 74 % de RF (<3 mm) de un bosque de *Quercus* sp., *Liquidambar* sp. y *Acer* sp. se hallaban en los 15 cm superficiales, al analizar los primeros 45 cm del perfil del suelo. Nambiar y Sands (1992) analizaron la distribución de RF (<1mm) de *Pinus radiata* hasta 1,9 m de profundidad y observaron que estas raíces están confinadas en los 30 cm superficiales (72,8 %), declinando exponencialmente con la profundidad.

Según Sands y Mulligan (1990) la densidad de raíces es mayor cerca de la superficie del suelo, decreciendo exponencialmente con la profundidad. El crecimiento radical se ve favorecido en la zona cercana a la superficie donde la disponibilidad de nutrientes, resistencia mecánica, aireación y temperatura son más favorables que en profundidad. Sin embargo la distribución del sistema radical puede ser modificado por cambios en las condiciones edáficas, especialmente en la distribución de agua y nutrientes.

El contenido de carbono orgánico fue la variable que mejor se relacionó con la DRF (Figura 5).

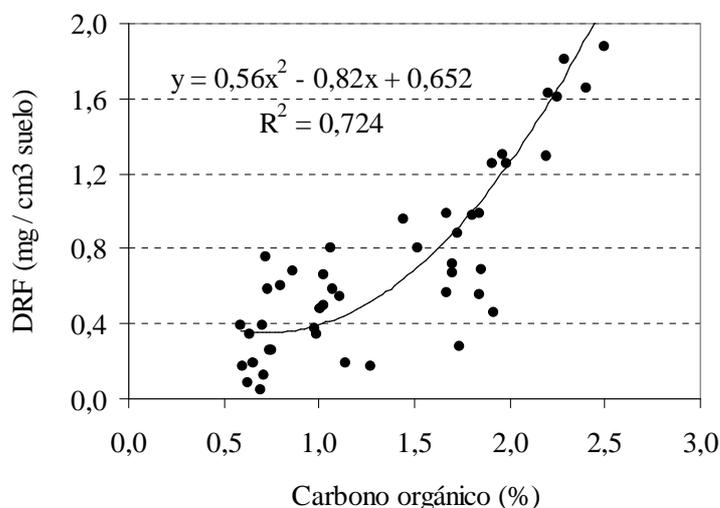


FIGURA 5: Relación entre el contenido de carbono orgánico del suelo y la densidad de raíces finas (DRF) de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenni*.

FIGURE 5: Relationship between soil organic carbon content and fine root density of *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenni*.

Estos resultados apoyan lo señalado por St. John *et al.* (1983) quienes concluyeron que las raíces exploran selectivamente el suelo, concentrándose en los sitios con mayor contenido de materia orgánica. Ares y Peinemann (1992) observaron que la materia orgánica del suelo fue la variable que mejor se relacionó con la DRF de *Pinus halepensis*, *Pinus radiata*, *Cedrus deodara* y *Cupressus sempervirens*. Resultados similares fueron hallados por Davis *et al.* (1983) en *Pinus radiata* y Curt *et al.* (2001) en *Pseudotsuga menziesii*.

El carbono orgánico puede ser considerado como una variable de síntesis del medio físico donde se desarrollan las raíces ya que interviene en la formación y estabilidad de la estructura del suelo y, por lo tanto, influye en la dinámica del agua y del aire; su mineralización determina la disponibilidad de nitrógeno, azufre (Echeverría *et al.*, 1996) y fósforo (Giufre *et al.*, 1998) y, debido a su elevada capacidad de intercambio

catiónico, el contenido de carbono orgánico se relaciona positivamente con la disponibilidad de calcio, potasio y magnesio (Brejda *et al.*, 2000).

Los nutrientes están distribuidos en el suelo en forma heterogénea (Kotliar y Wiens, 1990; Jackson y Caldwell, 1993). En varios estudios se ha demostrado la habilidad de las plantas para ubicar sus raíces de absorción en las zonas del perfil con mayor disponibilidad de nutrientes (Crick y Grime, 1987; Jackson y Caldwell, 1989; Bilbrough y Caldwell, 1995). La distribución y configuración del sistema radical es particularmente importante para la absorción de nutrientes poco móviles, tales como fósforo y potasio (Barley, 1970; Schenk y Barber, 1980), estos nutrientes cuya movilidad ocurre a través del mecanismo de difusión solo se mueven escasos milímetros debido a su intensa interacción con la matriz del suelo (Barber, 1962). Los nutrientes móviles (principalmente nitrógeno y azufre) se mueven por convección o flujo masal y se desplazan por mayores distancias en el suelo. Una exploración más intensiva del suelo por parte de las raíces puede no tener incidencia sobre la absorción de nutrientes móviles pero puede incrementar la absorción de fósforo (Sands y Mulligan, 1990; Robinson, 1996).

La disponibilidad de fósforo es más elevada en el horizonte superficial y decrece en profundidad, por lo tanto una mayor DRF en los primeros centímetros del suelo permitiría una adquisición más eficiente de este nutriente (Lynch y Brown, 2001). La relación positiva entre la DRF y la disponibilidad de fósforo (Figura 6) parece confirmar esta hipótesis, indicando que las raíces más activas de los árboles tienden a proliferar en las zonas del perfil con mayor disponibilidad de fósforo. Relaciones positivas entre la densidad de raíces finas y la disponibilidad de fósforo también han sido observadas por Davis *et al.* (1983), Sainju y Good (1993), Strong y La Roi (1985).

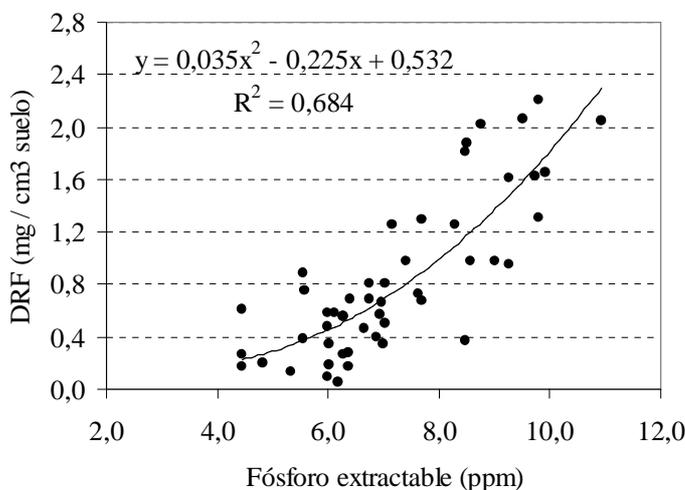


FIGURA 6: Relación entre el contenido de fósforo extractable del suelo y la densidad de raíces finas (DRF) de *Eucalyptus globulus ssp. maidenii*.

FIGURE 6: Relationship between extractable phosphorus content and fine root density of *Eucalyptus globulus ssp. maidenii*.

Se observó una relación negativa entre la DRF y la densidad aparente del suelo (Figura 7). El establecimiento de un umbral crítico de densidad aparente ($DA_{crit.}$) provee una herramienta útil para el monitoreo de la condición estructural del suelo. Debido a la interacción entre aireación, humedad y resistencia mecánica $DA_{crit.}$ depende de la textura del suelo. Según Daddow y Warrington (1983), $DA_{crit.}$ disminuye al aumentar el contenido de limo + arcilla del suelo. El establecimiento de $DA_{crit.}$ depende además de los niveles de reducción del crecimiento vegetal que se tomen como criterio. Daddow y Warrington (1983) consideraron como umbral crítico el valor de densidad aparente que produce una reducción del crecimiento radical del 80%. Este límite implica una virtual detención del crecimiento radical difícilmente observada a campo. Bowen (1981) sugiere que se debería prestar más atención a restricciones parciales del crecimiento de raíces. Un valor de referencia utilizado es el 50% del crecimiento máximo. En el presente trabajo la DRF máxima se redujo a la

mitad con valores de densidad aparente de 1,30 g/cm³.

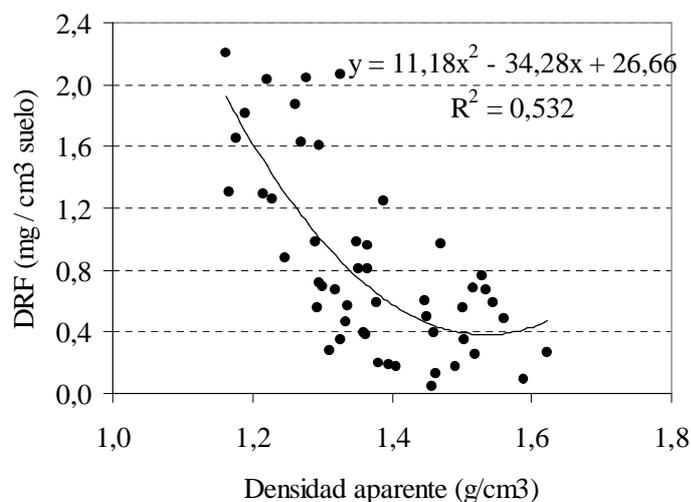


FIGURA 7: Relación entre la densidad aparente del suelo y la densidad de raíces finas (DRF) de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidennii*.

FIGURE 7: Relationship between soil bulk density and fine root density of *Eucalyptus globulus* ssp. *maidennii*.

Relaciones negativas entre la densidad aparente del suelo y la densidad de raíces finas han sido halladas por Ares y Peinemann (1992) y Sainju y Good (1993) en condiciones de campo y por Sands y Bowen (1978) bajo condiciones controladas.

El modelo de regresión múltiple con las tres propiedades edáficas analizadas permitió explicar el 83,2% de la variabilidad en la DRF (Figura 8). Este modelo puede ser expresado como:

$$DRF = 0,0681 + EXP(-2,191 + 0,700 CO + 0,188 PE - 0,499 Dap)$$

Donde: *CO* = porcentaje de carbono orgánico; *PE* = contenido de fósforo extractable; *Dap* = densidad aparente del suelo.

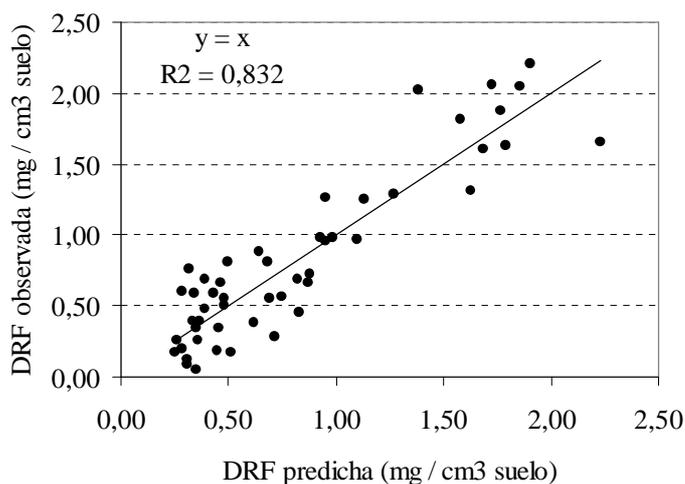


FIGURA 8: Relación entre la densidad de raíces finas (DRF) predicha vs. DRF observada.

FIGURE 8: Relationship between DRF predicted vs. DRF observed.

Estos resultados confirman el importante control que estas propiedades ejercen sobre la distribución de las raíces de absorción de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidennii*.

CONCLUSIONES

La distribución de raíces finas de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* está estrechamente relacionada con las propiedades físicas y químicas del suelo. La mayor parte de las raíces finas se halló en los primeros 20 cm del suelo, donde las condiciones son más favorables que en profundidad. La presencia de horizontes arcillosos reduce severamente el desarrollo de las raíces, limitando de esta forma la absorción de agua y nutrientes de las partes más profundas del perfil.

La utilización de índices relacionados con la distribución vertical del contenido de carbono orgánico, fósforo extractable y densidad aparente del suelo, junto con una apropiada descripción morfológica (secuencia y profundidad de los horizontes) del perfil pueden constituir una herramienta importante para definir la profundidad efectiva del suelo, que es una de las variables más importante para definir la calidad del sitio.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ARES, A.; PEINEMANN, N. Fine-root distribution of coniferous plantations in relation to site in southern Buenos Aires, Argentina. **Can. J. For. Res.**, v.22, p.1575-1582, 1992.
- BAKER, T.T.; CONNER, W.H.; LOCKABY, B.G.; STANTURF, J.A.; BURKE, M.K. Fine root productivity and dynamics on a forested floodplain in south Carolina. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.65, p.545-556, 2001.
- BARBER, S. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.93, p. 39-49, 1962.
- BARLEY, K.P. The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. **Adv. Agron.**, v. 22, p.159-201, 1970.
- BENGOUGH, A.G.; CROSER, C.; PRITCHARD, J. A Biophysical analysis of root growth under mechanical stress. **Plant and Soil**, v.189, p.155-164, 1997.
- BILBROUGH, C.J.; CALDWELL, M.M. The effects of shading and N status on root proliferation in nutrient patches by the perennial grass *Agropyron desertorum* in the field. **Oecologia**, v.103, p.10-16, 1995.
- BOWEN, H. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, C.E. ; TAYLOR, H.M. (Ed.). **Taylor modifying the root environment to reduce crop stress**. 1981. (Am. Soc. Agr. Eng. Monogr.,4)
- BOWEN, G.D. Roots as a component of tree productivity. In : CANNELL , M. G. R. ; JACKSON , J.E. (Ed.). **Attributes of trees as crop plants**. Huntingdon : Institute of Terrestrial Ecology, 1984. p 303-315.
- BREJDA, J.J.; KARLEN, D.L.; SMITH, J.L.; ALLAN, D.L. Identification of regional soil quality factors and indicators: II. Northern Mississippi loess Hills and Palouse Prairie. **Soil. Sci. Soc. Am. J.**, v.64, p.2125-2135, 2000.
- CARBON, B.A.; BARTLE, G.A.; MURRAY, A.M.; MACPHERSON, D.K. The distribuyion of root length and the limits to flow of soil water to roots in a dry sclerophyll forest. **Forest Science**, v.26, p.656-664, 1980.
- COZZO, D. **Tecnología de la forestación en Argentina y América Latina**. Ed. Hemisferio Sur, 1976.
- CRICK, J.C.; GRIME, J.P. Morphological plasticity and mineral nutrient capture in two herbaceous species of contrasted ecology. **New Phytol.**, v.107, p.403-414, 1987.
- CURT, T.; LUCOT, E.; BOUCHAUD, M. Douglas-fir biomass and rootig profile in relation to soils in a mid-elevation area (Beaujolais, France). **Plant and Soil.**, v.233, p.109-125, 2001.
- DADDOW, R.L.; WARRINGTON, G.E. **Growth limiting soil bulk densities as influenced by soil texture**. 1983. (WSDG Report. WSDG-TN 00005).
- DAVIS, G.R.; NEILSEN, W.A.; MCDAVITT, J.G. Root distribution of *Pinus radiata* related to soil characteritics in five tasmanian soils. **Aust. J. Soil. Res.** ,v.121, p.165-171. 1983.
- DONOSO, S.; OBISPO, A.; SANCHEZ, C.; RUIZ, C.; HERRERA, M.A. Efecto del laboreo sobre la biomasa de *Eucalyptus globulus* en el suroeste de España. **Invest. Agr. : Sist. Recur. For.**, v.8, n.2, p.377-386, 1999.
- DROOGERS, P.; VAN DER MEER, F.B.W.; BOUMA, J. Water accesibility to plant roots in different soil structures occurring in the same soil type. **Plant and Soil.**, v.188, p.83-91, 1997.
- ECHEVERRIA, H.E.; SAN MARTÍN, N.F.; BERGONZI, R. Mineralización de azufre y su relación con la de nitrógeno en suelos agrícolas. **Ciencia del Suelo.**, v.14, n.2, p.107-109, 1996.
- EISSENSTAT, D.; VAN REES, K.C.J. The growth and function of pine roots. **Ecological Bulletins.**, v. 43, p.76-91, 1994.
- FABIAO, A.; MADEIRA, M.; STEEN, E.; KÄTTERER, T.; RIBEIRO, C. Growth dynamic and spatial distribution of root mass in *Eucalyptus globulus* plantations in Portugal. In : PEREIRA, J. S. ; PEREIRA, H. (Ed). **Eucalyptus for biomass production : the state of the art**. Brussels : CEC, 1994. p.60-76.
- GIUFFRE, L.; ZUBILLAGA, M.S.; HEREDIA, O.S.; MISSART, F. Mineralización de fósforo en molisoles

- pampeanos. **Ciencia del Suelo**, v.16, p. 99-102, 1998.
- JACKSON, R.B.; CALDWELL, M.M. The timing and degree of root proliferation in fertile-soil microsites for three cold-desert perennials. **Oecologia**, v.81, p.149-153, 1989.
- JACKSON, R.B.; CALDWELL, M.M. The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics. **Ecology**, v.74, p.612-614, 1993.
- JOBÁGY, E.G.; JACKSON, R.B. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. **Biogeochemistry**, v.53, p.51-77, 2001.
- KOTLIAR, N.B.; WIENS, J.A. Multiple scales of patchiness and patch structure: a hierarchical framework for the study of heterogeneity. **Oikos**, v.59, p.253-260, 1990.
- LYNCH, J.P.; BROWN, K.M. Topsoil foraging – an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. **Plant and Soil**, v.237, p.225-237, 2001.
- MAKKONEN K., HELMISAARI H. Seasonal and yearly variations of fine-root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. **Forest Ecology and Management**, v. 102, p. 283-290, 1998
- MISRA, R.K.; ALSTON, A.M.; DEXTER, A.R. Root growth and phosphorus uptake in relation to the size and strength of soil aggregates. I. Experimental studies. **Soil Till. Res.** , v.11, p.103-116, 1988.
- MOIR, W.H., BACHELARD, E.P. Distributuion of fine roots in three pinus radiata plantations near Canberra, Australia. **Ecology**, v.50, n.4, p.658-662, 1969.
- NAMBIAR, E.K.. Interplay between nutrients, water, root growth and productivity in young plantations. **Forest Ecology and Management**, v.30, p.213-232, 1990.
- NAMBIAR E.K., SANDS R. Effects of compactation and simulated root channels in the subsoil on root development, water uptake and growth of radiata pine. **Tree physiology** , v.10, p. 297-306, 1992.
- PRITCHETT, W.L. **Suelos forestales** : propiedades, conservación y mejoramiento. Noriega :Ed. Limusa, 1986. 643 pp.
- ROBINSON, D. Resource capture by localized root proliferation: why do plants bother?. **Annals of Botany**, v.77, p.179-185, 1996.
- SAINJU, U.M.; GOOD, R.E. Vertical root distribution in relation to soil properties. **Plant and Soil**, v.150, p.87-97, 1993.
- SANDS, R.; BOWEN, G.D. Compaction of sandy soils in radiata pine forests II. Effects of compaction on root configuration and growth of radiata pine seedlings. **Aust. For. Res.** ,v.8, p 163-170, 1978.
- SANDS, R.; MULLIGAN D.R. Water and nutrient dynamics and tree growth. **Forest Ecology and Management**, v.30, p.91-111, 1990.
- SCHENK, M.K.; BARBER, S.A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. **Plant and Soil**, v.54, p.65-76, 1980.
- ST. JOHN, T.V.; COLEMAN, D.C.; REID, C.P.P. Growth and spatial distribution of nutrient-absorbing organs: selective exploitation of soil heterogeneity. **Plant and Soil**, v.71, p.487-493, 1983.
- STRONG, W.L.; LA ROI, G.H. Root density-soil relationships in selected boreal forests of central Alberta, Canada. **Forest Ecology Management**, v.12, p.233-251, 1985.
- SOIL SURVEY STAFF. **Soil taxonomy**. Second Edition. Washington, D.C : U.S. Dept. of Agric. Natural Resources Conservation Service. U.S. Government Printing Office, 1993.
- SUTTON, R.F. **Soil properties and root development in forest trees: a review**. Ontario : Forestry Canada, Ontario Region, Great Lakes Forestry Centre, 1991.(Information Report O-X-413.)