

# VI. ADUBAÇÃO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

## SISTEMA RADICULAR E NUTRIÇÃO DA SOJA EM FUNÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO <sup>(1)</sup>

CIRO ANTONIO ROSELEM <sup>(2,4)</sup>, ANA CRISTINA DA SILVEIRA ALMEIDA <sup>(3)</sup>  
e LUIZ VITOR SILVA DO SACRAMENTO <sup>(3)</sup>

### RESUMO

A compactação do solo diminui o crescimento radicular, podendo afetar tanto o desenvolvimento quanto a produtividade da soja. No presente trabalho, estudaram-se os efeitos da compactação subsuperficial na morfologia radicular da soja (*Glycine max* L. Merrill), procurando relacioná-los ao crescimento e à nutrição da planta. O 'Primavera' foi cultivado até os 37 dias da emergência, em vasos onde a camada de 15-18,5 cm de profundidade foi compactada a 1,03, 1,25, 1,48 e 1,72 g/cm<sup>3</sup>, em um latossolo vermelho-escuro com 80% de areia e 16% de argila e cuja compactação em subsuperfície levou a um acúmulo de raízes na camada superficial do vaso, sem grandes conseqüências na nutrição da planta. Na densidade aparente de 1,72 g/cm<sup>3</sup>, as raízes não conseguiram penetrar, embora já houvesse alguma restrição ao crescimento na densidade de 1,25 g/cm<sup>3</sup>. Quando a camada compactada apresentava resistência à penetração de 0,69 MPa, houve uma redução de 50% no crescimento radicular da soja.

**Termos de indexação:** *Glycine max* L. Merrill, resistência à penetração, impedância do solo, crescimento de raízes.

### ABSTRACT

#### SOYBEAN NUTRITION AND ROOT GROWTH AS AFFECTED BY SOIL COMPACTION

Soil tillage can originate compacted layers in the soil subsurface. This compaction reduces root growth, plant development and eventually soybean yields. This study examined the effects of subsurface compaction on soybean root growth and morphology as related to plant growth and mineral nutrition. Soybean plants cv. Primavera were

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em 8 de abril e aceito em 15 de julho de 1994.

<sup>(2)</sup> Departamento de Agricultura e Melhoramento Vegetal, Universidade Estadual Paulista, Caixa Postal 237, 18603-970 Botucatu (SP).

<sup>(3)</sup> Alunos do Curso de Pós-Graduação em Agricultura, FCA/UNESP, Botucatu (SP).

<sup>(4)</sup> Com bolsa de pesquisa do CNPq.

grown up to 37 days from seedling emergence in pots where a compacted layer was set at the 15.0 to 18.5 cm depth. This layer was compacted to bulk densities of 1.03, 1.25, 1.48 and 1.72 g/cm<sup>3</sup>, corresponding to cone penetrometer resistances of 0.05, 3.0, 7.5 and 2.0 MPa, respectively. The soil was a Dark Red Latosol (Haplortox), sandy loam, with 80% of sand and 16% of clay. Soil subsurface compaction led to a higher concentration of roots in the surface layer of the pots, without significant effects on plant canopy growth and nutrition. In the presence of a compacted layer the roots were shorter, but nutrient absorption/cm of root was higher. There was some restriction to root growth in the bulk density of 1.25 g/cm<sup>3</sup>, but there was necessary a bulk density of 1.72 g/cm<sup>3</sup> to inhibit completely the root growth. Soybean root growth was decreased by 50% when the penetrometer resistance reached 0.69 MPa.

**Index terms:** *Glycine max* L. Merrill, penetrometer resistance, soil impedance, root growth.

## 1. INTRODUÇÃO

A soja é largamente cultivada sob práticas agrícolas mecanizadas, podendo ocorrer, com o cultivo intenso do solo e seu preparo em condições inadequadas, a formação de camadas compactadas em subsuperfície, as quais oferecem resistência ao crescimento das raízes.

Segundo Taylor & Brar (1991) e Oussible et al. (1992), a compactação provoca modificações na estrutura do solo (porosidade total, número de macroporos), na disponibilidade de água (condutividade hidráulica) e na difusão de gases. A disponibilidade de nutrientes também é afetada (Silberbush et al., 1983). Todos esses fatores têm influência marcante no crescimento radicular.

A compactação diminui o volume de solo explorado pelas raízes, podendo, assim, reduzir a absorção de P e K, especialmente em solos com baixos níveis desses nutrientes (Dolan et al., 1992). Também Borges et al. (1988) verificaram, em soja, que à medida que se aumentou a compactação, houve aumento de sintomas de deficiências de nutrientes nas folhas, semelhantes aos descritos para nitrogênio e potássio.

Respostas da soja à compactação do solo têm sido inconsistentes e dependem da precipitação pluvial no período de crescimento da planta (Johnson et al., 1990). Em experimento em vasos, Singh et

al. (1971) notaram decréscimo na altura da planta, na massa da parte aérea e no número de folhas, quando elevaram a densidade de dois solos de 1,1 para 1,6 g/cm<sup>3</sup>.

Porções de solo compactadas na superfície reduziram 15% a produção de soja, enquanto porções de solo compactadas em subsuperfície provocaram redução na altura das plantas. Esse decréscimo no crescimento vegetativo não resultou em decréscimo proporcional na produtividade de grãos (Johnson et al., 1990).

Moraes (1988) determinou que a produção de matéria seca de raízes de soja era reduzida 50% quando a resistência à penetração era de, aproximadamente, 0,12 MPa em uma terra roxa estruturada, e de cerca de 0,20 MPa em latossolo roxo. O crescimento radicular foi impedido quando a densidade global atingiu 1,3 e 1,23 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, para os dois solos. Embora não se tenham encontrado outras referências na literatura, tais valores são muito baixos quando comparados aos obtidos para outras culturas, como milho, algodão (Misra et al., 1986), ervilha (Bengough & Young, 1993), amendoim e tomate (Dexter, 1987).

O presente trabalho teve como objetivo estudar os efeitos da compactação subsuperficial do solo no crescimento radicular, na produção de matéria seca e na nutrição de plantas de soja.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em casa de vegetação, na Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Câmpus de Botucatu, em setembro-novembro de 1992. Utilizou-se terra proveniente da camada arável de um latossolo vermelho-escuro de textura média com 80% de areia, 4% de silte e 16% de argila. A análise química mostrou pH em  $\text{CaCl}_2$  de 5,0, 7 mg de P/dm<sup>3</sup>, 0,07 cmol de K/dm<sup>3</sup>, 0,8 cmol de Ca/dm<sup>3</sup>, 0,4 cmol de Mg/dm<sup>3</sup> e saturação por bases de 48% (Raij & Quaggio, 1983).

Passou-se a terra coletada por peneira de 2 mm de malha e efetuou-se a calagem para elevar a saturação por bases a 70%, mantendo-se o solo em incubação, úmido, por 30 dias. Em seguida, procedeu-se à adubação com 200 mg/kg de P na forma de superfosfato triplo, 0,3 cmol de K/dm<sup>3</sup>, na forma de KCl, 3 mg/kg de Zn como sulfato de zinco e 1 mg/kg de B como ácido bórico. Na semeadura, realizou-se uma adubação nitrogenada com 50 mg/kg de N na forma de uréia dissolvida em água.

Os vasos utilizados no experimento constaram da sobreposição de três anéis de PVC, de 10 cm de diâmetro interno, sendo que o superior e o inferior, com 15 cm de altura cada um, receberam solo com densidade igual a 1,2 g/cm<sup>3</sup> e o intermediário, com 3,5 cm de altura, recebeu os tratamentos de compactação, de forma a atingir os valores de densidade aparente: 1,03, 1,25, 1,48 e 1,72 g/cm<sup>3</sup>, correspondendo a resistência à penetração, medida com penetrômetro de bolso, de 0,05, 0,3, 0,75 e 2,0 MPa. A densidade aparente natural do solo era de 1,2 g/cm<sup>3</sup>.

Os níveis de compactação desejados foram obtidos adicionando-se quantidades determinadas de solo com 13% de umidade ao anel de volume conhecido. A seguir, o anel sofria golpes sucessivos de uma massa de ferro, até atingir o valor desejado.

Sementes do cultivar de soja Primavera, sem inoculação, foram pré-germinadas e plantadas em número de quatro por vaso. Após cinco dias da emergência, foi realizado o desbaste, deixando-se uma planta por vaso. As necessidades hídricas das plantas foram supridas adequadamente durante todo o período experimental por pesagem dos vasos e

adição de água pela superfície, em quantidade suficiente para manter o solo com aproximadamente 80% de sua capacidade de retenção de água.

Aos 37 dias da emergência, as plantas foram seccionadas na altura do colo e as partes aéreas colocadas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, para secagem até peso constante. Os vasos foram desmontados e as raízes, retiradas das colunas de solo mediante lavagem com água corrente, sobre peneira de 0,5 mm de malha. Em seguida, determinaram-se a massa fresca, o comprimento (Tenant, 1975), o raio médio (Hallmark & Barker, 1984) e a massa seca das raízes. Na matéria seca das plantas, determinaram-se N, P, K, Ca e Mg (Malavolta et al., 1989).

Os dados obtidos foram submetidos à análise da variância com transformação em  $(x + 0,5)^{0,5}$  quando apropriado. O delineamento experimental foi um fatorial 3 x 4 inteiramente casualizado, com quatro repetições. Nas médias das observações, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Aos resultados de comprimento e superfície radiculares, foram ajustadas equações, escolhendo-se a de melhor coeficiente de determinação para cada caso.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aumento da densidade da camada subsuperficial levou à diminuição significativa na massa seca das raízes. A produção de matéria seca da parte aérea da planta também mostrou tendência de diminuição, de maneira que a relação raiz:parte aérea praticamente não foi modificada (Quadro 1). Seria esperada diminuição significativa na produção de matéria seca da parte aérea (Singh et al., 1971, Borges et al., 1988), porém esse efeito depende não só da compactação, mas, ainda, da umidade do solo (Johnson et al., 1990) e da sua capacidade em fornecer nutrientes (Marschner, 1986).

Além da diminuição da quantidade de raízes produzidas, na maior densidade global, praticamente todo o sistema radicular se concentrou na camada de 0-15 cm do vaso (Quadro 2), resultado esse que tem sido observado em diversas culturas (Marschner, 1986).

Entretanto, tais modificações na morfologia do sistema radicular da soja não implicaram grandes modificações na nutrição da planta (Quadro 3). Apenas a absorção de nitrogênio foi significativamente prejudicada. Para os demais nutrientes, que dependem mais da difusão para entrar em contato com a raiz (Barber, 1984), a exploração de menor volume de solo foi compensada pela melhor exploração desse volume, uma vez que, na camada superficial, a concentração de raízes passou de 0,89 para 1,91 cm/cm<sup>3</sup>. Em condições de campo, a soja pode apresentar densidades de comprimento até de 19,0 cm/cm<sup>3</sup> (Wright & Smith, 1987). Por outro lado, existem indicações de que aumentos na densidade

de comprimento até 5 ou 6 cm/cm<sup>3</sup> seriam benéficos para a absorção de fósforo, e que somente haveria competição intra-radicular para absorção de K quando as raízes estivessem com distâncias médias entre si menores que 4 mm (Yamaguchi & Tanaka, 1990). De acordo com a fórmula apresentada por Baldwin et al. (1973), no presente caso, somente na maior densidade global a distância média entre raízes chegou a 4,1 mm.

Dessa forma, seria esperado que o sistema radicular, embora menor, tivesse condições de melhorar a absorção por unidade de comprimento, mantendo a nutrição da planta, o que de fato aconteceu (Quadro 4).

Quadro 1. Produção de matéria seca de soja e relação raiz:parte aérea em função da compactação do solo em subsuperfície

Densidade	Raiz	Parte aérea	Raiz/P.aérea
g/cm <sup>3</sup>	mg/planta		
1,03	351a ( <sup>1</sup> )	933a	0,38
1,25	320ab	885a	0,36
1,48	304b	858a	0,35
1,72	266c	793a	0,34
CV (%)	15,0	19,2	—

(<sup>1</sup>) Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (P < 0,05).

Quadro 2. Distribuição porcentual, em massa, de raízes de soja em cada profundidade dos vasos, em função da presença de camada compactada de 15 a 18,5 cm

Densidade aparente	Profundidade (cm)		
	0-15	15-18,5	18,5-33,5
g/cm <sup>3</sup>	%		
1,03	35,0	8,6	56,4
1,25	41,1	7,7	52,2
1,48	56,8	4,2	40,0
1,72	99,9	0,1	00,0

Quadro 3. Absorção de nutrientes por planta de soja, em função da compactação subsuperficial do solo

Densidade aparente	N	P	K	Ca	Mg
g/cm <sup>3</sup>	mg/planta				
1,03	36,9a ( <sup>1</sup> )	0,67a	23,2a	23,6a	11,4a
1,25	36,1ab	0,55a	21,2a	22,6a	10,6a
1,48	36,2ab	0,66a	20,9a	21,6a	10,4a
1,72	29,9b	0,59a	19,8a	20,0a	9,9a
CV (%)	17,8	28,5	20,6	27,0	24,7

(<sup>1</sup>) Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (P < 0,05).

Normalmente, quando crescem em solos com alta impedância, as raízes apresentam diâmetro aumentado (Bengough & Mullins, 1990; Sarquis et al., 1991). Esse engrossamento seria devido a um achatamento das células, de maneira que a área de membranas por unidade de comprimento da raiz aumenta (Barber, 1984), o que poderia também explicar o aumento de absorção verificado.

Entretanto, no presente caso, essa hipótese fica prejudicada, já que não houve efeito significativo da densidade global no diâmetro das raízes (Quadro 5) que justificasse o comportamento observado.

Uma vez que, em geral, não houve modificação no diâmetro das raízes, com exceção da camada compactada a  $1,72 \text{ cm/cm}^3$ , as variações observadas na superfície radicular foram consequência exclusiva das variações no comprimento das raízes (Figura 1).

À medida que aumentou a densidade global do solo na camada subsuperficial, ocorreu aumento exponencial no comprimento das raízes na camada superficial do vaso (Figura 1A). Esta parece ser uma resposta ao aumento na resistência à penetração na camada subjacente, a qual também foi exponencial (Figura 2), enquanto foi aumentada a densidade global. Esse tipo de resultado é comum na literatura (Bengough & Young, 1993).

Não havendo limitação de água e nutrientes, a planta concentra suas raízes nas camadas onde o crescimento é mais fácil, procurando, com isso, manter a relação raiz:parte aérea e prejudicar ao mínimo possível a absorção de água e nutrientes (Marschner, 1986). Segundo Bengough & Young (1991), essa reação da planta pode ser devida a reguladores de crescimento produzidos nas raízes, ou pode ainda haver algum mensageiro químico envolvido.

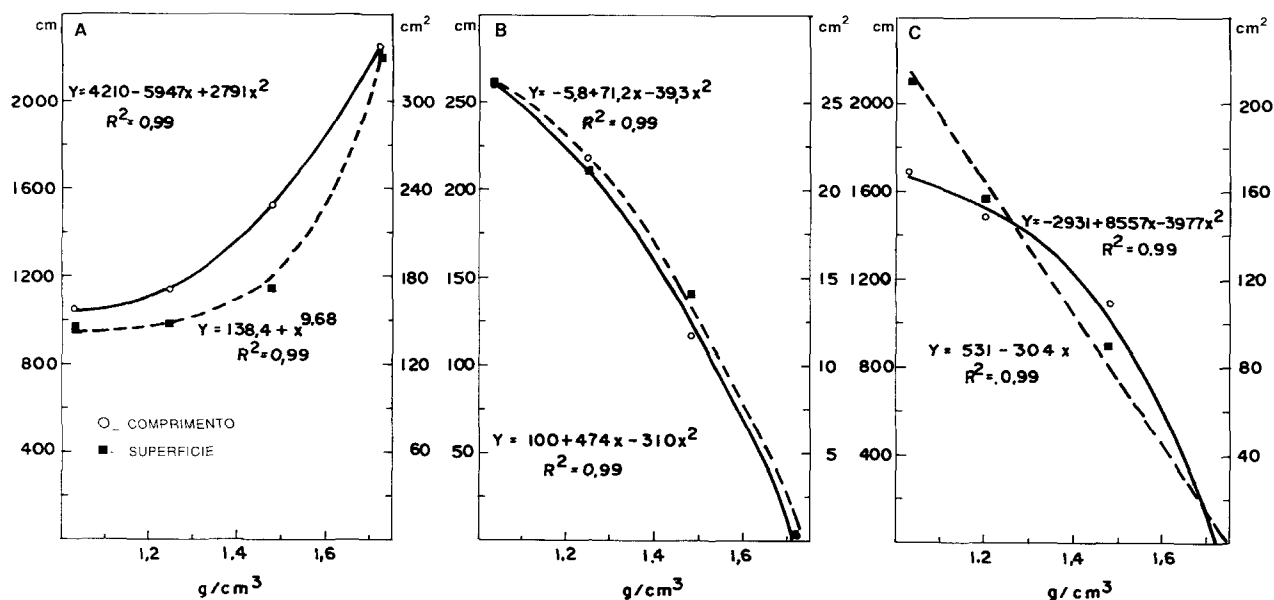


Figura 1. Comprimento (○—) e superfície radicular (■—) de soja em função da presença de camada compactada em subsuperfície. A: camada de 0-15 cm; B: camada de 15-18 cm, e C: camada de 18,5-33,5 cm.

Quadro 4. Absorção de nutrientes em relação ao comprimento radicular em função da compactação do solo na camada subsuperficial

Densidade aparente	N	P	K	Ca	Mg
g/cm <sup>3</sup>	μg/cm		μg/cm		
1,03	9,03b ( <sup>1</sup> )	0,17b	5,73b	5,56b	2,82b
1,25	10,10ab	0,16b	6,05b	6,49ab	3,01b
1,48	8,83ab	0,18b	5,61b	5,85b	2,93b
1,72	13,32a	0,26a	8,83a	8,91a	4,35a

(<sup>1</sup>) Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (P < 0,05).

Na camada compactada, houve diminuição do crescimento radicular já no primeiro tratamento de compactação (1,25 g/cm<sup>3</sup>), mas o crescimento só foi completamente inibido quando a densidade global do solo chegou a 1,72 g/cm<sup>3</sup> (Figura 1). Dessa forma, confirma-se que as raízes da soja são bastante sensíveis à compactação do solo, o que já havia sido observado por outros autores: Borges et al. (1988); Moraes (1988), Johnson et al. (1990). Entretanto, os resultados do presente trabalho indicam que existe crescimento radicular em densidades maiores do que aquelas determinadas por Moraes (1988), embora trabalhando com solos diferentes.

Existem resultados mostrando que um aumento de 0,4 g/cm<sup>3</sup> na densidade global do solo poderia fazer o crescimento radicular decrescer do ótimo para inibição completa (Jones et al., 1991), mas, no presente trabalho, esse aumento chegou próximo a 0,7 g/cm<sup>3</sup>.

Utilizando as equações propostas por Jones et al. (1991) na simulação do crescimento radicular, para este solo, até a densidade de 1,52 g/cm<sup>3</sup> não deveria haver inibição do crescimento, que seria completa na densidade de 1,92 g/cm<sup>3</sup>. Assim, as equações propostas não se ajustam aos resultados ora obtidos. As equações foram desenvolvidas principalmente usando dados de experimentos na América do Norte, em solos, espécies e cultivares diferentes daqueles do Brasil.

O desenvolvimento radicular da soja na camada abaixo da compactada foi tão prejudicado quanto

na compactada. Dessa forma, as raízes que atravessaram a camada de maior resistência não conseguiram recuperar-se do estresse e estabelecer um sistema radicular vigoroso nessa região.

Isso pode ter ocorrido porque, quando a resistência à penetração foi aumentada, houve maior crescimento radicular na camada superficial (Quadro 2, Figura 1A), gastando fotossintetizados para tanto. Uma vez que a proporção raiz:parte aérea não foi muito modificada, não havia necessidade de gastar mais energia para estabelecer raízes em profundidade. Talvez em campo, onde a camada superficial seca mais depressa, impedindo o crescimento radicular, os resultados fossem diferentes.

Quadro 5. Raio médio de raízes de soja em função da compactação do solo em subsuperfície

Densidade aparente	Profundidade		
	0-15	15-18,5	18,5-33,5
g/cm <sup>3</sup>	mm		
1,03	0,23a ( <sup>1</sup> )	0,18a	0,21a
1,25	0,21a	0,16a	0,16a
1,48	0,21a	0,17a	0,16a
1,72	0,24a	0,12a	—
CV (%)	14,6	5,2	3,9

(<sup>1</sup>) Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey (P < 0,05).

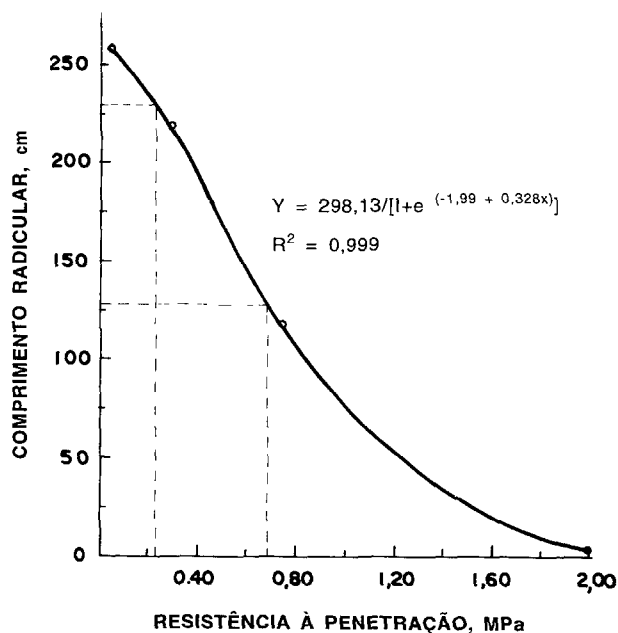


Figura 2. Comprimento radicular da soja, na camada compactada, em função da resistência à penetração medida com penetrômetro de bolso. As linhas tracejadas indicam os pontos de 10 e 50% de redução no comprimento radicular.

Na figura 2, encontra-se a relação entre o crescimento das raízes de soja na camada compactada com a resistência à penetração medida com penetrômetro de bolso. Utilizando a equação ajustada e considerando como valor crítico uma diminuição de 10% no crescimento, a resistência à penetração crítica para soja seria de 0,24 MPa, contrapondo-se a 0,12 e 0,20 MPa, determinados por Moraes (1988) para inibição completa.

Entretanto, um valor mais comum na literatura é o Q1/2 (Dexter, 1987), o qual define a resistência ao penetrômetro em que o crescimento é reduzido à metade do máximo. No presente trabalho, o Q1/2 determinado para soja foi de 0,69 MPa, menor que aqueles relacionados por Dexter (1987) para algodão (0,72), milho (1,3), tomate (1,48), amendoim (1,91) e ervilha (2,03).

Dessa forma, a soja é realmente uma planta mais sensível à compactação do solo que as culturas relacionadas, mas não tão sensível como havia sido determinado por Moraes (1988).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALDWIN, J.P.; NIE, P.H. & TINKER, P.B. Uptake of solutes by multiple root systems from soil. III. A model for calculating the solute system developing in a finite volume of soil. *Plant and Soil*, Dordrecht, **38**:621-635, 1973.
- BARBER, S.A. *Soil nutrient bioavailability, a mechanistic approach*. New York, John Wiley & Sons, 1984. 398p.
- BENGOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, London, **41**:341-358, 1990.
- BENGOUGH, A.G. & YOUNG, I.M. Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances. *Plant and Soil*, Dordrecht, **149**:129-139, 1993.
- BORGES, E.N.; NOAIS, R.F.; REGAZZI, A.J.; FERNANDES, B. & BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja à compactação do solo. *Revista Ceres*, Viçosa, **35**:553-568, 1988.
- DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. *Plant and Soil*, Dordrecht, **98**:303-312, 1987.
- DOLAN, M.S.; DOWDY, R.H.; VOORHEES, W.B.; JOHNSON, J.F. & BIDWELL-SCHRADER, A.M. Corn phosphorus and potassium uptake in response to soil compaction. *Agronomy Journal*, Madison, **84**:639-642, 1992.
- HALLMARK, W.B. & BARBER, S.A. Root growth and morphology, nutrient uptake and nutrient status of early growth of soybeans as affected by soil P and K. *Agronomy Journal*, Madison, **76**:209-212, 1984.
- JOHNSON, J.F.; VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W. & RANDALL, G.W. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. *Agronomy Journal*, Madison, **82**:973-979, 1990.

- JONES, C.A.; BLAND, W.L.; RITCHIE, J.T. & WILLIAMS, J.R. Simulation of root growth. In: HANKS, J. & RITCHIE, J.T., eds. *Modeling plant and soil systems*. Madison, American Society of Agronomy, 1991. p.91-123.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. *Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações*. Piracicaba, Potafos, 1989. 208p.
- MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. New York, Academic Press, 1986. 403p.
- MISRA, R.K.; DEXTER, A.R. & ALSTON, A.M. Maximum axial and radial growth pressures of plant roots. *Plant and Soil*, Dordrecht, **95**:315-326, 1986.
- MORAES, M.H. *Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja*. Piracicaba, 1988. 105p. Tese (Mestrado em Agronomia) - ESALQ-USP, 1988.
- OUSSIBLE, M.; CROOKSTON, R.K. & LARSON, W.E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agronomy Journal*, Madison, **84**:34-38, 1992.
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. *Métodos de análise de solo para fins de fertilidade*. Campinas, Instituto Agronômico, 1983. 31p. (Boletim técnico, 81)
- SARQUIS, J.I.; JORDAN, W.R. & MORGAN, P.W. Ethylene evolution from maize seedling roots and shoots in response to mechanical impedance. *Plant Physiology*, Lancaster, **96**:1171-1177, 1991.
- SILBERBUSH, M.; HALLMARK, W.B. & BARBER, S.A. Simulation of effects of soil bulk density and P addition on K uptake of soybean. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, **14**:287-296, 1983.
- SINGH, A.; SINGH, J.N. & TRIPATHI, S.K. Effect of soil compaction on the growth of soybean. *Indian Journal of Agricultural Science*, New Delhi, **41**:422-426, 1971.
- TAYLOR, H.M. & BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, **19**:111-119, 1991.
- TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology*, London, **63**:995-1001, 1975.
- WRIGHT, G.C. & SMITH, C.J. Soybeans root distribution under wet soil culture on a red-brown earth. *Plant and Soil*, Dordrecht, **103**:129-133, 1987.
- YAMAGUCHI, J. & TANAKA, A. Quantitative observation on the root system of various crops growing in the field. *Soil Science & Plant Nutrition*, Tokyo, **36**:483-493, 1990.