

CRESCIMENTO AÉREO E RADICULAR DA SOJA E DE PLANTAS DE COBERTURA EM CAMADAS COMPACTADAS DE SOLO⁽¹⁾

José Salvador Simoneti Foloni⁽²⁾, Sergio Lázaro de Lima⁽³⁾ & Leonardo Theodoro Büll⁽⁴⁾

RESUMO

O cultivo de plantas de cobertura com sistema radicular vigoroso em rotação de culturas pode melhorar a qualidade física de solos compactados. O objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento aéreo e radicular da soja e de cinco espécies utilizadas como plantas de cobertura de verão (guandu, guandu anão, mucuna preta, labe labe e crotalária juncea), em solo submetido a três níveis de compactação em subsuperfície. Utilizou-se um Nitossolo Vermelho argiloso em vasos montados com anéis de PVC sobrepostos, com diâmetro interno de 20 cm e altura de 50 cm. A camada compactada localizada de 20–30 cm de profundidade foi caracterizada pelas densidades do solo de 1,13, 1,34 e 1,56 g cm⁻³ e 0,26, 0,66 e 1,98 MPa de impedância mecânica, respectivamente. Aos 60 dias da emergência das plantas, determinaram-se as massas da matéria seca da parte aérea e das raízes, a densidade do comprimento radicular e o diâmetro médio radicular. Apesar de alterar a distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo, o impedimento físico em subsuperfície não diminuiu a produção total de raízes da soja e dos adubos verdes, com exceção da crotalária juncea. A mucuna preta foi a leguminosa mais tolerante e a soja a mais sensível à compactação do solo. O sistema radicular da crotalária juncea apresentou potencial de formação de “bioporos” compatível ao da mucuna preta, apesar de ter sido relativamente mais sensível à compactação do solo. O diâmetro médio das raízes da soja e da crotalária juncea apresentou correlação significativa com o crescimento radicular dentro da camada de solo compactado.

Termos de indexação: adubos verdes, raízes, rotação de culturas, densidade do solo, *Glycine max*.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em março de 2004 e aprovado em agosto de 2005.

⁽²⁾ Professor da Faculdade de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE. Campus II, Rodovia Raposo Tavares, km 572, Limoeiro, CEP 19067-175 Presidente Prudente (SP). E-mail: sfoloni@unoeste.br

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Recursos Naturais – FCA/UNESP. Caixa Postal 237, CEP 18603-970 Botucatu (SP). E-mail: sergiolima@fca.unesp.br

⁽⁴⁾ Professor Titular do Departamento de Recursos Naturais. E-mail: bull@fca.unesp.br

SUMMARY: SHOOT AND ROOT GROWTH OF SOYBEAN AND COVER CROPS AS AFFECTED BY SOIL COMPACTION

*The cultivation of cover crops with vigorous root systems in crop rotation can improve the physical quality of compacted soils. The objective of this study was to evaluate shoot and root growth of soybean (*Glycine max*) and five species used as summer cover crops (*Cajanus cajan*, *Cajanus cajan* var. *small*, *Mucuna aterrima*, *Dolichos lab lab* and *Crotalaria juncea*) in a soil submitted to three different levels of subsurface compaction. Plants were grown in pots assembled with three PVC rings, 50 cm high and with 20 cm internal diameter, filled with a clay-textured Red Nitosol. The soil layer at 20–30 cm depth was compacted to a bulk density of 1.13, 1.34 and 1.56 g cm⁻³ with 0.26, 0.66 and 1.98 MPa mechanical impedances, respectively. Sixty days after plant emergence, plants were harvested and it was determined the shoot and root dry matter, root length density, and root mean diameter. In spite of altering the root system distribution along the soil profile, the subsoil physical impediment did not reduce the total root dry matter of soybean and cover crops, except for *Crotalaria juncea*. *Mucuna aterrima* was the most tolerant and soybean the most sensitive of the leguminous species to soil compaction. *Crotalaria juncea* roots showed a potential of forming “biopores” comparable to those of *Mucuna aterrima*, in spite of being relatively more sensitive to soil compaction. Mean root diameter of soybean and *Crotalaria juncea* showed significant correlation to root growth in the compacted soil layer.*

Index terms: green manures, roots, crop rotation, soil bulk density, Glycine max.

INTRODUÇÃO

Solos que apresentam alta resistência mecânica à penetração de raízes são comuns em áreas agrícolas onde se utilizam máquinas ou em locais submetidos ao pisoteio intenso de animais (Camargo & Alleoni, 1997). Um solo compactado tem o arranjo estrutural, a porosidade total, a difusão de gases, a infiltração e o armazenamento de água comprometidos, que, por consequência, afetam o crescimento radicular das plantas (Taylor & Brar, 1991). Por sua vez, o rompimento de camadas compactadas do solo por meio de equipamentos motomecanizados tem custo elevado (Dias Junior, 2000).

Dexter (1991) argumenta que raízes de plantas podem amenizar a impedância mecânica do solo. Segundo Bennie (1996), o sistema radicular provoca desarranjos no solo ao penetrar camadas com alta resistência mecânica e, ao sofrer decomposição, deixa canais (“bioporos”) que contribuem para a infiltração de água e difusão de gases, melhorando a qualidade física do solo para as culturas subseqüentes. Além disso, o crescimento radicular pode incrementar a matéria orgânica ao longo do perfil do solo, a qual promove a estabilização dos agregados, reduzindo a susceptibilidade do solo à compactação (Roth et al., 1992).

Camargo & Alleoni (1997) denominam “plantas descompactadoras” aquelas que apresentam raízes com capacidade elevada de penetração em camadas de solo com alta impedância mecânica. O alongamento radicular só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que

a resistência mecânica do solo à penetração (Passioura, 1991). De acordo com Materechera et al. (1992), a compactação do solo pode promover o engrossamento das raízes em razão de mudanças morfológicas e fisiológicas do sistema radicular, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem. Por outro lado, Russel & Goss (1974) relatam que o aumento da resistência mecânica do solo à penetração pode estimular a proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas e capazes de crescer em poros do solo de diâmetro reduzido.

Os adubos verdes ou plantas de cobertura são cultivados para minimizar a erosão do solo, promover a reciclagem de nutrientes, produzir cobertura para evitar a evaporação de água e incrementar a matéria orgânica do solo (Calegari, 1995). No caso das leguminosas de verão utilizadas para adubação verde, Oliveira et al. (2002) argumentam que são espécies referenciadas principalmente por fixarem N₂ atmosférico e por apresentarem altas taxas de crescimento vegetativo. Alvarenga et al. (1996), Müller et al. (2001), Silva & Rosolem (2001) e Rosolem et al. (2002) discutem o potencial das plantas de cobertura para serem utilizadas em sistemas de rotação de culturas, visando à melhoria da qualidade física de solos compactados. Contudo, o maior entrave para o cultivo dos adubos verdes de verão é a competição por área com culturas comerciais, como a soja, por exemplo.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar, comparativamente, o crescimento aéreo e radicular da soja e de cinco leguminosas de verão utilizadas para adubação verde, de acordo com a compactação do solo em subsuperfície.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação do Departamento de Produção Vegetal, da Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA), UNESP, em Botucatu (SP), durante os meses de outubro a dezembro de 1998. Utilizou-se no trabalho uma porção de solo coletada na camada arável (0–20 cm de profundidade), com auxílio de pá e enxadão, de uma área agrícola explorada com culturas anuais em ambiente de sequeiro, da Fazenda Experimental Lageado, da FCA-UNESP, em uma formação de solo classificada como Nitossolo eutrófico (Carvalho et al., 1983; Embrapa, 1999), de textura muito argilosa. A porção de solo coletada, após secagem ao ar, foi passada em peneira com malha de 2 mm e homogeneizada, e amostras deformadas foram retiradas para as análises: granulométrica (Embrapa, 1997) e química (Raij & Quaggio, 1983), bem como para a caracterização da capacidade de retenção de água do solo pelo aparelho extrator de Richards (Embrapa, 1997) (Quadro 1).

Aplicou-se calcário dolomítico (CaO: 39 %, MgO: 13 % e PRNT: 91 %) em todo solo peneirado para elevar a saturação por bases a 60 %, de acordo com recomendação de Raij et al. (1997), para a cultura da soja e para o cultivo de adubos verdes. Após a calagem, o solo foi separado em porções de 20 dm³, umedecido até à capacidade de campo, permanecendo acondicionado em sacos de plástico por 30 dias. Em seguida, as porções de solo foram secas ao ar e adubadas com 150 mg dm⁻³ de P (superfosfato simples) e 120 mg dm⁻³ de K (cloreto de potássio), seguindo proposta de adubação realizada por Rosolem et al. (1994a,b), em trabalhos com cultivo de espécies vegetais submetidas à compactação do solo em condições controladas. Durante o experimento, foram feitas duas adubações nitrogenadas em cobertura aos 15 e 30 dias da

emergência das plântulas, totalizando 100 mg dm⁻³ de N na forma de Uréia.

Os vasos foram montados com três anéis de PVC sobrepostos, com diâmetro interno de 20 cm. A altura dos anéis (superior e inferior) dos vasos foi de 20 cm, e a do anel intermediário, no qual foram localizados os diferentes níveis de compactação do solo, de 10 cm. Os anéis foram unidos com fita adesiva de plástico e fechados ao fundo.

Para evitar o crescimento de raízes em pontos de menor resistência mecânica, compreendidos entre a parede interna do anel e o solo compactado, aderiu-se uma pasta aquosa de caulim (300 g kg⁻¹ de água) na periferia da superfície superior da camada compactada, baseado em estudo de Alvarenga et al. (1996). A análise química do caulim (Raij & Quaggio, 1983) revelou os seguintes valores: pH (CaCl₂, 0,1 M) 4,0; 1,0 mg dm⁻³ de P_{resina}; 3,0 g dm⁻³ de M.O.; 34,0 mmol_c dm⁻³ de H + Al; 0,4 mmol_c dm⁻³ de K; 1,0 mmol_c dm⁻³ de Ca; 0,0 mmol_c dm⁻³ de Mg; 1,4 mmol_c dm⁻³ de SB; 35,4 mmol_c dm⁻³ de CTC e 3,9 % de saturação por bases (V). Sobre o caulim, foram colocadas fitas adesivas de plástico de cerca de 3,0 cm de largura dobradas da periferia para o centro da superfície superior da camada compactada, para reforçar a barreira ao crescimento radicular na interface solo-PVC, conforme proposta de Müller et al. (2001). Algumas raízes cresceram embaixo da fita de plástico e penetraram na camada de caulim, as quais foram separadas e consideradas como sendo pertencentes à camada superior dos vasos.

Para preparar os anéis da camada compactada, foram separadas porções do solo corrigido e adubado que tiveram o teor de água e massa determinados. Na seqüência, corrigiu-se a umidade do solo a 270 g kg⁻¹ (correspondente a 90 % da capacidade de campo). Em seguida, o solo umedecido foi submetido a uma prensa hidráulica desenvolvida por Foloni

Quadro 1. Atributos químicos⁽¹⁾, textura e capacidade de retenção de água de amostras deformadas da porção de solo utilizada no experimento

pH (CaCl ₂)	M.O.	P resina	H + Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	CTC	V	B	Zn	Mn	Fe
	g dm ⁻³	mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³					%		mg dm ⁻³		
5,1	15,0	8,0	38,0	30,0	9,0	1,2	40,2	78,2	51,4	0,28	1,8	31,2	28
Textura ⁽²⁾				Capacidade de retenção da água ⁽³⁾ (MPa)									
	Areia	Silte	Argila										
	g kg ⁻¹			g kg ⁻¹									
	110,0	190,0	700,0				299,0	284,7	278,5	276,7	247,9	241,4	

⁽¹⁾ Raij & Quaggio (1983). ⁽²⁾ Embrapa (1997). ⁽³⁾ Aparelho extrator de Richards, de acordo com Embrapa (1997).

(1999), que, pela variação de volume, permitiu atingir os três níveis de compactação utilizados no experimento. Os anéis, superior e inferior, dos vasos foram preenchidos com o solo fertilizado e umedecido (270 g kg^{-1} de água), sem o uso da prensa.

Os níveis de compactação do solo utilizados no experimento foram definidos por meio de um ensaio preliminar, com quatro repetições, quando foram colocados três anéis de aço (diâmetro interno de 40 mm e altura de 25 mm) dentro da massa de solo que sofreu prensagem, para determinar a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (Embrapa 1997). A resistência mecânica à penetração do solo da camada compactada foi determinada com o auxílio de um penetrômetro de bolso, acionado manualmente, munido de ponteira cônica (base do cone de 18 mm, altura de 40 mm e ângulo do vértice de 23°), acoplada a uma mola de aço envolta por suporte cilíndrico, cuja variação de deformação expressou os valores de pressão por meio de escala devidamente calibrada.

As amostras de solo foram umedecidas a 90 % da capacidade de campo, tiveram a massa definida e foram colocadas em anéis de PVC de 20 cm de diâmetro e 10 cm de altura, que, por sua vez, foram posicionados dentro de suporte de aço para serem levados à prensa hidráulica. Imediatamente após a prensagem, sem que houvesse perdas significativas de água das amostras de solo, foram efetuadas seis medições de resistência mecânica à penetração na superfície superior do solo compactado, para cada uma das quatro repetições do ensaio, em pontos equidistantes definidos aleatoriamente, com o penetrômetro de bolso posicionado perpendicularmente à superfície superior do solo. Em seguida, os anéis de PVC foram desmontados, e os anéis de aço inseridos dentro da massa de solo compactado foram coletados e levados à secagem em estufa de aeração forçada (Figura 1).

As leguminosas avaliadas foram o guandu (*Cajanus cajan* (L.) Mill sp.), o guandu anão (*Cajanus cajan* (L.) Mill sp., variedade anão), a mucuna preta (*Mucuna aterrima* Piper e Tracy), o labe labe (*Dolichos lab lab* L.), a crotalaria juncea (*Crotalaria juncea* L.) e a soja (*Glycine max.* (L.) Merrill, variedade IAC-19). Foram colocadas seis sementes pré-germinadas por vaso, deixando-se, após sete dias da emergência, duas plantas. O monitoramento do teor de água do solo durante o cultivo das plantas foi feito com o auxílio de microtensiômetros munidos de cápsulas de porcelana porosa (50 mm de comprimento por 10 mm de diâmetro externo), que foram fixados de tal forma que as cápsulas ficaram imediatamente acima da camada de solo compactado (de 15 a 20 cm de profundidade). Utilizou-se um microtensiômetro para cada tratamento experimental, instalado em um mesmo bloco. A irrigação foi feita diariamente para repor a água evapotranspirada até 299 g kg^{-1} .

Os procedimentos de instalação e uso dos microtensiômetros seguiram as recomendações de Faria & Saraiva (1987).

Após 60 dias de cultivo, os vasos foram desmontados e as raízes foram coletadas por camada (superior, compactada e inferior). As raízes foram separadas do solo por lavagem com jatos de água dirigidos sobre peneiras de plástico com 0,5 e 0,25 mm de malha. Em seguida, as raízes foram acondicionadas em recipientes, submersas em solução aquosa com 30 % de álcool etílico. Imagens das raízes foram digitalizadas em um "scanner" de leitura ótica, na resolução de 250 dpi, e analisadas pelo programa "Win Mac Rhizo", versão 3.8-b (Regente Instrument Inc., Quebec-Canadá). Avaliaram-se as variáveis densidade do comprimento radicular e diâmetro médio radicular. Posteriormente, as raízes foram secas em estufa a 60°C por 48 h e tiveram suas massas determinadas. A parte aérea das plantas foi seca em estufa a 60°C , por 72 h, e, posteriormente, pesada.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso, num esquema fatorial 6×3 (seis espécies de leguminosas e três níveis de compactação do solo), com quatro repetições. Os dados originais foram submetidos à análise de regressão, e foram consideradas as equações significativas até 5 % pelo teste F, que apresentaram o maior coeficiente de determinação (R^2). Fez-se também um estudo de correlação entre as variáveis densidade do comprimento radicular e diâmetro médio das raízes que cresceram dentro da camada de solo

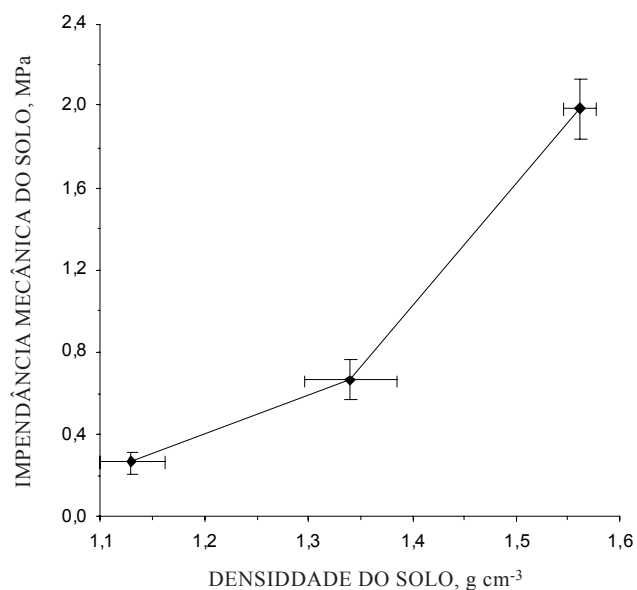


Figura 1. Resistência mecânica à penetração e densidade do solo das diferentes camadas compactadas utilizadas no experimento. Barras verticais e horizontais em cada ponto representam os desvios-padrão das médias.

compactado, e os valores foram comparados pelo teste t a 5 %. Os procedimentos estatísticos seguiram os métodos propostos por Pimentel-Gomes (2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de matéria seca da parte aérea dos adubos verdes guandu, guandu anão e crotalária juncea não foi prejudicada pela compactação do solo em subsuperfície (Figura 2a). Ao contrário do que ocorreu com a mucuna preta e com o labe labe, que tiveram o crescimento aéreo reduzido em 17 e 15 %, respectivamente, quando a impedância mecânica do solo foi aumentada de 0,26 para 1,98 MPa. Silva & Rosolem (2001) também constataram que o crescimento aéreo do guandu manteve-se estável e o da mucuna preta foi reduzido com o aumento da compactação do solo em subsuperfície.

Destaca-se que, no caso da soja, o aumento da impedância mecânica do solo de 0,26 para 1,98 MPa na camada compactada, localizada de 20–30 cm de profundidade, não causou prejuízos à sua produção de matéria seca da parte aérea (Figura 2a). No trabalho de Borges et al. (1988), das cinco variedades de soja submetidas à compactação do solo, três tiveram a produção de matéria seca da parte aérea incrementada por um leve aumento da impedância mecânica do solo em subsuperfície, quando comparado ao tratamento testemunha. No trabalho de Rosolem et al. (1994a), o aumento da resistência mecânica do solo à penetração de 0,05 para 2 MPa, na camada localizada de 15 a 18,5 cm de profundidade, não causou prejuízos à produção de matéria seca da parte aérea da soja.

De acordo com Silva et al. (2002), um nível de resistência mecânica do solo à penetração da ordem de 2 MPa é considerado restritivo ao crescimento da parte aérea e do sistema radicular da maioria das plantas cultivadas, apesar de tais autores fazerem observações sobre a necessidade de considerar as relações entre a impedância mecânica do solo, a aeração e o potencial de água do solo, para melhor compreender as restrições causadas pela compactação. Por outro lado, Rosolem et al. (1994a) argumentam que, se a camada compactada subsuperficial inibir o crescimento radicular em profundidade, o desenvolvimento da parte aérea das plantas passa a ser dependente da oferta de água e nutrientes do solo da camada superficial (acima da camada compactada).

No caso do cultivo em vasos sob condições controladas, como foi feito no presente trabalho, no de Silva & Rosolem (2001), no de Rosolem et al. (1994a) e no de Borges et al. (1988), o aumento da impedância mecânica do solo em camadas subsuperficiais não foi limitante ao crescimento

aéreo da maioria das espécies estudadas, pois a oferta de água e nutrientes no volume de solo acima da camada compactada foi relativamente alta. Se fossem consideradas condições de campo, onde períodos de escassez de chuva são comuns no decorrer do cultivo das culturas, prejudicando a absorção de água e nutrientes pelas plantas, a alta impedância mecânica do solo em subsuperfície poderia ter sido mais prejudicial ao crescimento aéreo da soja e das leguminosas de cobertura.

A soma das massas da matéria seca das raízes das camadas superior, compactada e inferior dos vasos não foi alterada com o aumento da impedância mecânica do solo em subsuperfície, com exceção das raízes da crotalária juncea (Figura 2b). Portanto, a camada compactada, localizada de 20–30 cm de profundidade, modificou a distribuição do sistema radicular das plantas ao longo do perfil do solo

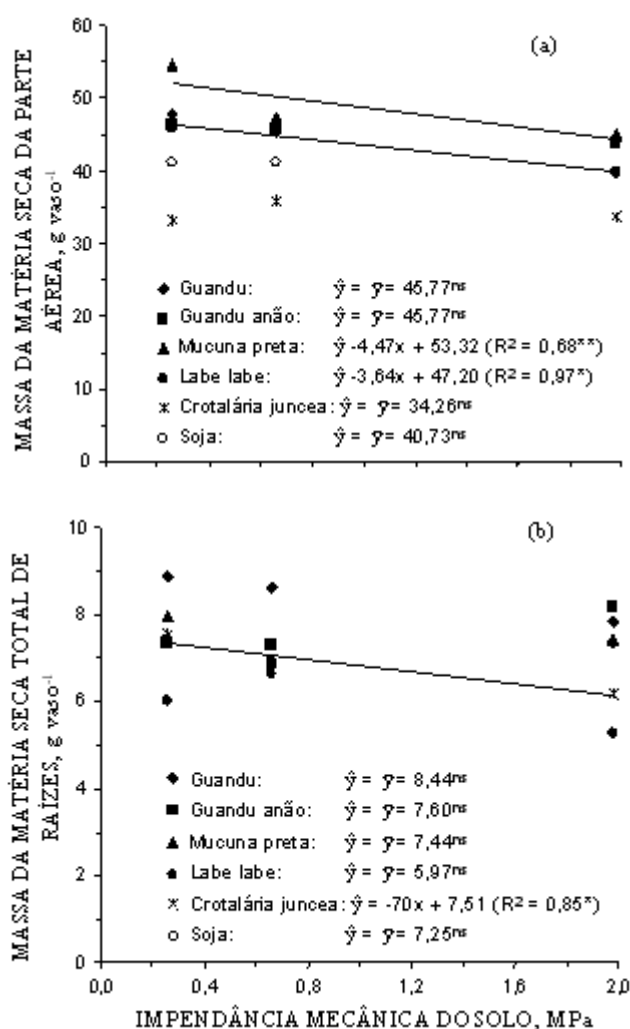


Figura 2. Massa da matéria seca da parte aérea (a) e massa da matéria seca total de raízes (b), das plantas de cobertura e da soja resultante da impedância mecânica do solo. * e ** significativos a 5 e 1 %, respectivamente. ns: não-significativo.

(Figuras 3a e 3b), porém não diminuiu a produção total de matéria seca das raízes da soja, do guandu, do gandu, do gandu anão, da mucuna preta e do labe labe.

Resultados semelhantes foram constatados por Silva & Rosolem (2001), em que o aumento da resistência mecânica do solo à penetração de 0,05 para 2 MPa, na camada compactada localizada de 15 a 18,5 cm de profundidade, não prejudicou a produção total de matéria seca do sistema radicular da aveia preta, do guandu, da mucuna preta e do tremoço branco.

Foloni et al. (2003) e Rosolem et al. (1994b) também verificaram que a produção total de matéria seca do sistema radicular do milho não foi prejudicada pelo

aumento da impedância mecânica do solo em camadas compactadas localizadas abaixo de 10 cm de profundidade. Nos trabalhos com plantas de milho submetidas à compactação do solo, verificou-se que o crescimento radicular foi inibido na camada compactada e abaixo dela, mas a intensificação da impedância mecânica do solo em subsuperfície causou um incremento de raízes na camada superficial, de modo que o nível mais alto de resistência mecânica do solo à penetração não resultou em menor produção total de matéria seca radicular, quando comparado ao tratamento-testemunha.

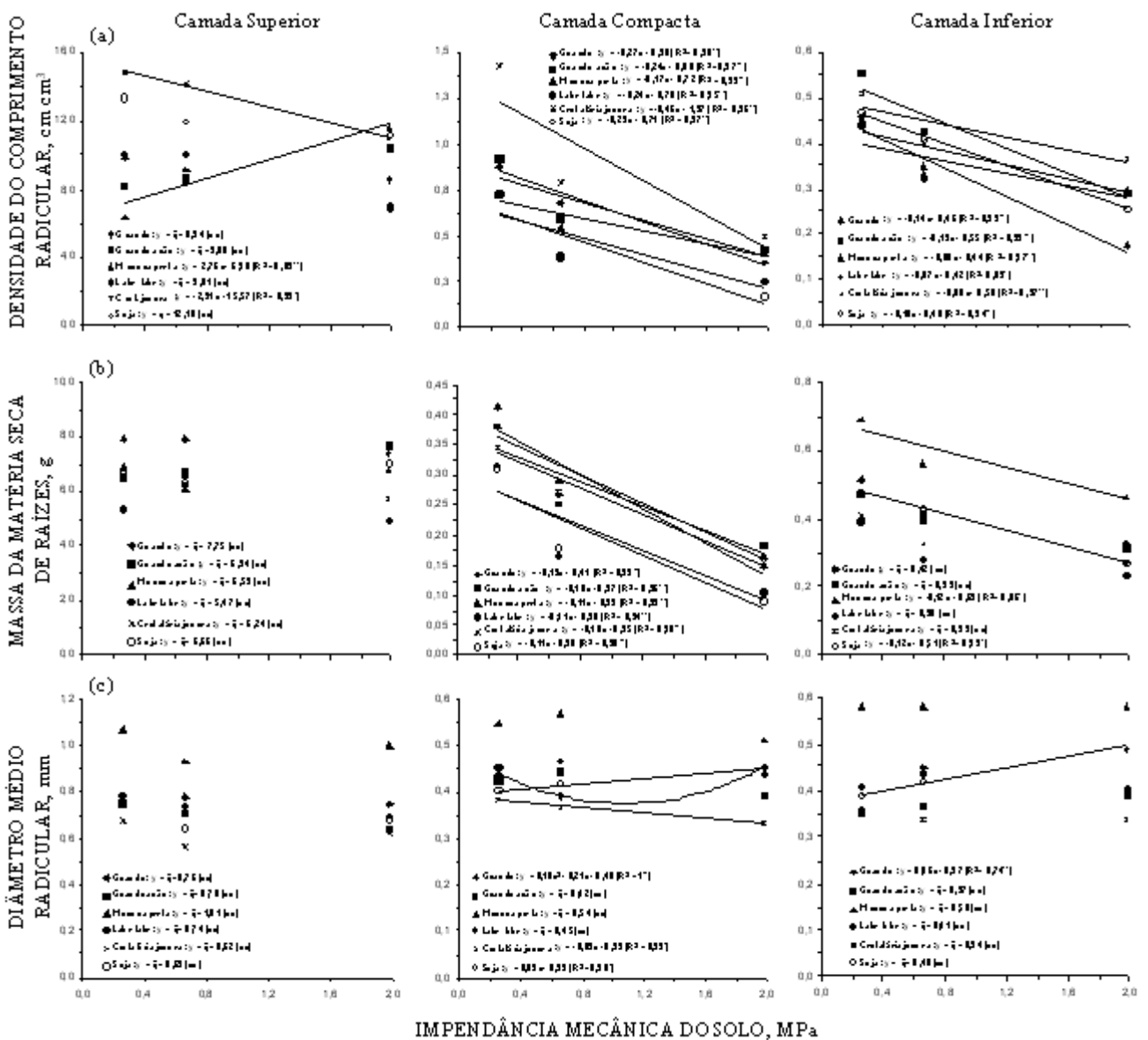


Figura 3. Densidade do comprimento radicular (a), massa da matéria seca de raízes (b) e diâmetro médio radicular (c) das plantas de cobertura e da soja, nas camadas superior, compactada e inferior dos vasos, decorrentes da impedância mecânica do solo. * e ** significativos a 5 e 1 %, respectivamente. ns: não-significativo.

No presente trabalho, o aumento da impedância mecânica do solo, na profundidade de 20–30 cm, não proporcionou incrementos de raízes na camada superior dos vasos (Figuras 3a e 3b); contudo, independentemente do nível de compactação do solo empregado, as raízes que cresceram acima da camada compactada representaram, em média, 92, 91, 89, 92, 91, 93 % de todo o sistema radicular do guandu, do guandu anão, da mucuna preta, do labe labe, da crotalária juncea e da soja, respectivamente. Portanto, o sistema radicular dos adubos verdes e da soja cresceu relativamente pouco abaixo de 20 cm de profundidade, independentemente do grau de compactação do solo, e mesmo havendo inibição ao crescimento radicular na camada compactada e abaixo dela (Figuras 3a e 3b), os valores das somas das massas radiculares das três camadas dos vasos não expressaram adequadamente a sensibilidade dessas espécies à impedância mecânica do solo em subsuperfície (Figura 2b).

Uma forma de comparar o crescimento radicular dentro da camada de solo compactado é por meio do índice $Q_{1/2}$ preconizado por Dexter (1987), que é o valor da resistência mecânica do solo à penetração, medido com penetrômetro, em que o crescimento radicular é reduzido à metade do máximo. No presente trabalho, de acordo com as equações ajustadas para a variável densidade do comprimento radicular dentro da camada de solo compactado (Figura 3a), obtiveram-se os valores de $Q_{1/2}$ de 1,67, 1,83, 2,12, 1,46, 1,49 e 1,22 MPa para o guandu, o guandu anão, a mucuna preta, o labe labe, a crotalária juncea e a soja, respectivamente. Sendo assim, a espécie mais tolerante à compactação do solo foi a mucuna preta e a mais sensível foi a soja.

O $Q_{1/2}$ determinado por Rosolem et al. (1994a) para a soja foi de 0,69 MPa para o crescimento radicular na camada de solo compactado, com as plantas cultivadas em vasos de 2,63 dm³ por 37 dias. Este resultado foi incompatível com o $Q_{1/2}$ de 1,22 MPa determinado para a soja no presente trabalho, que foi cultivada por 60 dias em vasos de 15,71 dm³. Segundo Bennie (1996), é difícil generalizar resultados da literatura, visto que a influência da compactação do solo sobre o crescimento radicular decorre de uma série de fatores, que dependem das características genéticas das plantas, das condições ambientais e do estágio de desenvolvimento do vegetal.

No trabalho de Rosolem et al. (2002), os $Q_{1/2}$ das plantas de milheto, sorgo de guiné, crotalária juncea e girassol, na camada de solo compactado, foram de 0,73, 0,30, 0,97 e 0,86 MPa, respectivamente. Em outro trabalho realizado por Alvarenga et al. (1996), de acordo com os valores apresentados de comprimento radicular na camada de solo compactado, os índices $Q_{1/2}$ foram de 1,28, 1,60, 1,21 e 1,00 MPa, para as leguminosas feijão-de-porco, feijão bravo do ceará, guandu e crotalária juncea, respectivamente. No caso do milho, Foloni et al.

(2003) encontraram um $Q_{1/2}$ médio de 0,75 MPa, para o crescimento radicular na camada compactada.

No trabalho de Dexter (1987), os $Q_{1/2}$ do milho, do algodão, do amendoim e da ervilha foram de 0,73, 1,30, 1,91 e 2,03, respectivamente. Portanto, os valores de $Q_{1/2}$ dos adubos verdes avaliados no presente trabalho mostraram que os sistemas radiculares destas espécies foram relativamente tolerantes à compactação do solo, quando comparados aos $Q_{1/2}$ de espécies comumente utilizadas em sistemas de rotação de culturas, tais como: o milheto, o sorgo, o girassol, o milho, o algodão e o amendoim.

Utilizando o índice $Q_{1/2}$ da soja (1,22 MPa de resistência mecânica à penetração) como critério de comparação para o crescimento radicular das leguminosas na camada de solo compactado, foram obtidos valores de densidade do comprimento radicular de 0,57, 0,59, 0,51, 0,41, 0,81 e 0,36 cm cm⁻³, para o guandu, o guandu anão, a mucuna preta, o labe labe, a crotalária juncea e a soja, respectivamente. Portanto, no nível de compactação do solo em que 50 % do crescimento radicular da soja foi prejudicado, a quantidade de raízes da crotalária juncea, por exemplo, foi mais do que duas vezes superior ao desta leguminosa granífera.

A mucuna preta apresentou o maior $Q_{1/2}$ (2,12 MPa) avaliado, e a densidade do comprimento radicular deste adubo verde neste grau de impedância mecânica do solo foi de 0,36 cm cm⁻³ (Figura 3a). Por sua vez, o crescimento radicular da crotalária juncea a 2,12 MPa de impedância mecânica do solo foi da ordem de 0,39 cm cm⁻³. Ou seja, as raízes da mucuna preta foram mais tolerantes à compactação do solo do que as da crotalária juncea ($Q_{1/2}$ da mucuna preta > $Q_{1/2}$ da crotalária juncea); contudo, as duas leguminosas de cobertura apresentaram potenciais semelhantes para formação de “bioporos” na camada de solo compactado.

Assim, a caracterização da impedância mecânica do solo, em que 50 % do crescimento radicular é prejudicado (índice $Q_{1/2}$), é uma forma de aferir a sensibilidade da espécie à compactação; no entanto, a quantidade de raízes que penetram em determinado volume de solo compactado, mesmo sendo de uma espécie relativamente mais sensível à impedância mecânica, define o potencial da planta em formar “bioporos” e melhorar as condições físicas do solo para a cultura subsequente. Como exemplo, no trabalho de Rosolem et al. (2002), o $Q_{1/2}$ da crotalária juncea foi de 0,97 MPa, enquanto o crescimento radicular da *Crotalaria spectabilis* não foi prejudicado, mesmo quando a resistência mecânica do solo à penetração foi da ordem de 1,34 MPa; contudo, as raízes da crotalária juncea foram mais abundantes do que as da *Crotalaria spectabilis* na camada de solo compactado, com 0,97 MPa de impedância mecânica.

Dentro da camada de solo compactado, o diâmetro médio radicular da soja aumentou e o da crotalária juncea diminuiu de acordo com o aumento da resistência mecânica do solo à penetração (Figura 3c). O diâmetro médio das raízes do guandu também variou significativamente na camada compactada, porém não guardou relação coerente com o aumento da impedância mecânica do solo. A crotalária juncea e a soja foram as únicas espécies dentre as avaliadas que apresentaram coeficientes de correlação significativos para as variáveis densidade do comprimento radicular e diâmetro médio das raízes na camada de solo compactado (Figura 4). No caso da crotalária juncea, os resultados apresentados são condizentes com a argumentação de Russel & Goss (1974), em que o aumento da impedância mecânica do solo pode estimular a proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas e capazes de penetrar poros do solo de diâmetro reduzido, o que, de certa forma, justifica a maior densidade do comprimento radicular da crotalária juncea dentro da camada compactada no nível mais alto de impedância mecânica do solo (Figura 3a).

Em contrapartida, as raízes de soja ficaram mais grossas com o aumento da impedância mecânica do solo. Segundo Camargo & Alleoni (1997), a pressão de crescimento das raízes depende da pressão de turgor das células do meristema radicular em processo de alongamento, e da área de contato da raiz sobre um agente rígido externo. Portanto, quanto maior o diâmetro da raiz, maior é a força exercida no processo de alongamento das células do meristema radicular para penetração em determinada camada de solo. Sendo assim, o engrossamento das raízes da soja pode ser um indicativo da sua

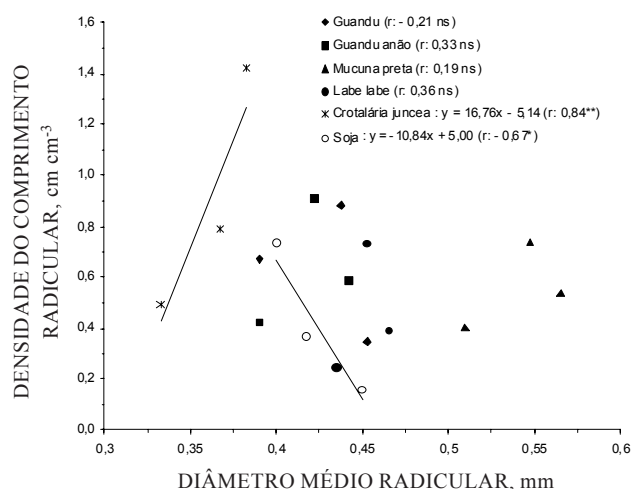


Figura 4. Correlação entre as variáveis diâmetro médio radicular e densidade do comprimento radicular das plantas de cobertura e da soja na camada de solo compactado. * e ** significativos a 5 e 1 % pelo teste t, respectivamente.

sensibilidade à compactação do solo e a justificativa para o $Q_{1/2}$ relativamente baixo na camada compactada. No trabalho de Müller et al. (2001), embora diâmetro radicular de algumas gramíneas tenha aumentado com o aumento da compactação do solo, as espécies que apresentaram melhor desempenho de crescimento radicular dentro da camada de solo compactado, de maneira geral, foram as que tiveram menor diâmetro médio de raízes.

Portanto, leguminosas de verão, recomendadas para adubação verde, em virtude da alta capacidade de crescimento vegetativo e incorporação de N ao solo (Oliveira et al., 2002) e da alta adaptabilidade a condições adversas de ambiente (Calegari, 1995), apresentaram potencial para substituir a soja em sistemas de rotação de culturas no que se refere à melhoria da qualidade física do solo.

CONCLUSÕES

1. Em termos de crescimento da parte aérea das plantas, somente a mucuna preta e o labe labe mostraram-se sensíveis ao aumento da compactação do solo.

2. O impedimento físico em subsuperfície não diminuiu a produção total de raízes da maioria das espécies estudadas, apesar de ter alterado a distribuição do sistema radicular ao longo do perfil de solo.

3. O sistema radicular mais tolerante à impedância mecânica do solo foi o da mucuna preta (50 % de redução somente a 2,12 MPa de resistência mecânica à penetração). Todavia, independentemente da sensibilidade à compactação do solo, as raízes da crotalária juncea apresentaram potencial de formação de “bioporos” compatível ao da mucuna preta.

4. O crescimento das raízes da crotalária juncea dentro da camada de solo compactado pode estar associado ao fato de esta espécie ter apresentado redução do seu diâmetro médio radicular decorrente do aumento da impedância mecânica. Ou seja, raízes mais finas têm tendência em crescer mais na camada compactada.

LITERATURA CITADA

- ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W. & REGAZZI, A.J. Crescimento de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. R. Bras. Ci. Solo, 20:319-326, 1996.
- BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A. & KAFKAFI, U., eds. Plant roots. 2.ed. New York, M. Dekker, 1996. p.453-470.

- BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; REGAZZI, A.J., FERNANDES, B. & BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. R. Ceres, 35:553-568, 1988.
- CALEGARI, A. Leguminosas para adubação de verão no Paraná. Londrina, IAPAR, 1995. 118p.
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 132p.
- CARVALHO, W.A.; ESPINDOLA, C.R. & PACCOLA, A.A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado-Estação Experimental "Presidente Médici". Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 1983. 95p.
- DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. Soil Till. Res., 20:87-100, 1991.
- DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. Plant Soil, 98:303-312, 1987.
- DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.55-94.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FARIA, R.T. & SARAIVA, A.C.D. Tensiômetro: Construção, instalação e utilização; um aparelho simples para se determinar quando irrigar. Londrina, Instituto Agronômico do Paraná, 1987. 24p. (Circular técnica, 56)
- FOLONI, J.S.S. Crescimento radicular da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e de cinco adubos verdes em função da compactação do solo. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 1999. 73p. (Tese de Mestrado)
- FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. & LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. Pesq. Agropec. Bras., 38:947-953, 2003.
- MATERECHERA, S.A.; ALSTON, A.M.; KIRBY, J.M. & DEXTER, A.R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. Plant Soil, 144:297-303, 1992.
- MÜLLER, M.M.L.; CECCON, G. & ROSOLEM, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. R. Bras. Ci. Solo, 25:531-538, 2001.
- OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B. & BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema Plantio Direto. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.393-486.
- PASSIOURA, J.B. Soil structure and plant growth. Austr. J. Soil Res., 29:717-728, 1991.
- PIMENTEL-GOMES, F.P. Curso de estatística experimental. 14.ed. Piracicaba, Nobel, 2000. 477p.
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 170p. (Boletim Técnico, 81)
- ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S. & SACRAMENTO, L.V.S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. Bragantia, 53:259-266, 1994a.
- ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S. & TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. Soil Till. Res., 65:109-115, 2002.
- ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSI FILHO, H. & MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. R. Bras. Ci. Solo, 18:491-497, 1994b.
- ROTH, C.H.; CASTRO-FILHO, C. & MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. R. Bras. Ci. Solo, 15:241-248, 1992.
- RUSSEL, R.S. & GOSS, M.J. Physical aspects of soil fertility: the response of roots the mechanical impedance. Nether. J. Agric. Sci., 22:305-318, 1974.
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. & IMHOFF, S. Intervalo Hídrico Ótimo. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L. & FOLONI, J.S.S., org. Qualidade física do solo: Métodos de estudo e sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal, Funep, 2002. p.1-18.
- SILVA, R.H. & ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. R. Bras. Ci. Solo, 25:253-260, 2001.
- TAYLOR, H.M. & BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. Soil Till. Res., 19:111-119, 1991.