

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

CRESCIMENTO RADICULAR DE ESPÉCIES UTILIZADAS COMO COBERTURA DECORRENTE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO⁽¹⁾

R. H. SILVA⁽²⁾ & C.A. ROSOLEM⁽³⁾

RESUMO

O experimento foi realizado em vasos com terra proveniente de um Latossolo Vermelho-Escuro textura franco-arenosa, com o objetivo de avaliar o efeito da compactação subsuperficial do solo no crescimento radicular de seis espécies utilizadas para cobertura em sistemas de semeadura direta (aveia preta, guandu, milho, mucuna preta, sorgo granífero e tremoço azul). Os tratamentos foram constituídos por três densidades do solo: 1,12, 1,36 e 1,60 Mg m⁻³, aplicadas a 15 cm de profundidade. As espécies foram cultivadas durante 37 a 39 dias, quando então foram colhidas, avaliando-se a produção de matéria seca, comprimento e diâmetro das raízes em cada camada do vaso, bem como a matéria seca da parte aérea das plantas. Os estados de compactação impostos em subsuperfície não impediram o crescimento de raízes de aveia preta, guandu, milho, mucuna preta, sorgo e tremoço azul, indicando que, em solo arenoso, a densidade crítica para essas espécies é superior a 1,6 Mg m⁻³ (correspondente à resistência à penetração de 1,22 MPa). O milho apresentou-se como a espécie mais indicada para cobertura, por suas características de produção de matéria seca e crescimento radicular.

Termos de indexação: densidades do solo, gramíneas, leguminosas.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado apresentada pelo primeiro autor à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista - UNESP. Financiada pela FAPESP. Recebido para publicação em novembro de 1999 e aprovado em janeiro de 2001.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista - UNESP. Caixa Postal 237, CEP 18603-970 Botucatu (SP). Bolsista da FAPESP.

⁽³⁾ Professor do Departamento de Agricultura e Melhoramento Vegetal, FCA/UNESP. E-mail: rosolem@fca.unesp.br

SUMMARY: *ROOT GROWTH OF PLANTS USED AS GREEN COVER AS AFFECTED BY SOIL COMPACTION*

This experiment was carried out in pots containing a Dark Red Latosol (Acrortox, loamy sand), to evaluate the effect of sub-soil compaction on root growth of six cover crop species (black oats, pigeonpea, pearl millet, black mucuna, sorghum and blue lupin). The treatments consisted of three sub-soil compaction rates at a 15 cm depth, where bulk densities of 1,12, 1,36 and 1,60 Mg m⁻³ were established. Cover crop species were grown for a period of 37 to 39 days after emergence, when they were harvested. Root dry matter weight, length and diameter and shoot dry matter were evaluated. Sub-soil compaction up to 1.6 Mg m⁻³ (1,22 MPa) at a 15 cm depth, in this sandy soil, is not critical for the cover crop species root growth. Considering its shoot and root growth, pearl millet showed to be the best species to be used as cover crop.

Index terms: bulk density, gramineous plants, leguminous plants.

INTRODUÇÃO

O método mais utilizado para eliminar camadas compactadas do solo é a utilização de subsoladores que, por meio de hastes penetrando e se movimentando dentro da camada, conseguem quebrá-la, amenizando, assim, o impedimento ao desenvolvimento das raízes. Outra alternativa para reduzir a compactação refere-se ao uso de rotação de culturas com espécies que tenham sistema radicular vigoroso, com capacidade de crescer em solos com altas resistências à penetração.

Plantas que produzem raízes profundas, com crescimento inicial rápido e agressivo, podem recuperar solos fisicamente degradados. Muitas vezes, deve-se adotar o consórcio de duas ou mais espécies, ou mesmo a rotação adequada de culturas, para que os resultados sejam rapidamente evidenciados (Nuernberg et al., 1986). Neste caso, é necessário conhecer as espécies que podem ser incluídas em determinado sistema de rotação de culturas, bem como as características do sistema radicular de cada uma delas, visando adequá-las corretamente na área onde serão estabelecidas.

Ao crescer, a raiz exerce uma pressão contra as partículas do solo, afastando-as, para permitir o seu alongamento (Bennie, 1996). Quando há impedimento mecânico, ou seja, na presença de camada com estado de compactação superior à capacidade de penetração das raízes, alguns estudos mostram que o diâmetro radicular aumenta e o seu comprimento diminui (Bennie, 1996). Este fenômeno, dependendo da planta, leva a diferentes comportamentos. Em algumas espécies, há um desvio no crescimento das raízes, que passam a ter maior crescimento lateral, paralelo à superfície do solo (Iijima & Kono, 1991). Em outras espécies, há um aumento no diâmetro das raízes, resultando em aumento na pressão de crescimento, propiciando a penetração na camada

compactada (Materechera et al., 1992). Quando há compactação, o número de poros do solo de tamanho e diâmetro similares às raízes diminui, permitindo a fácil penetração de raízes mais finas na camada compactada (Shierlaw & Alston, 1984).

Resultados têm comprovado que as espécies apresentam diferentes capacidades de crescimento radicular em camadas compactadas. Assim, a resistência à penetração de 0,69 MPa ocasionou a redução de 50% no crescimento radicular da soja (Rosolem et al., 1994a), mas, para o milho, redução equivalente somente foi observada numa resistência de 1,42 MPa (Rosolem et al., 1994b). De acordo com Mielniczuk et al. (1985), o tremoço amarelo e o tremoço branco apresentaram 72 e 24% de penetração de raízes, respectivamente, em uma camada de solo com 2,4 MPa de resistência à penetração. Para o guandu, houve redução da densidade de raízes, de forma mais acentuada, em densidades do solo de até 1,35 Mg m⁻³, mas o crescimento foi mantido constante em maiores densidades (Alvarenga, 1996). Por outro lado, Kirkegard et al. (1992) observaram que a resistência à penetração de 3,5 MPa reduziu o crescimento de raízes de guandu em aproximadamente 60%.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o crescimento comparado das raízes de algumas espécies utilizadas para cobertura em sistemas de semeadura direta, bem como a habilidade destas em crescer em camadas compactadas de solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no período de abril a maio de 1997 em casa de vegetação na Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP, Campus de Botucatu.

Foram utilizadas amostras deformadas de solo provenientes da camada arável de um Latossolo Vermelho-Escuro textura franco-arenosa, com 690 g kg⁻¹ de areia, 150 g kg⁻¹ de silte e 160 g kg⁻¹ de argila, determinados pelo método Bouyoucos (Kiehl, 1979), com valores iniciais de densidades de partículas e global de 2,6 e 1,2 Mg m⁻³, respectivamente. Os resultados da análise química, realizadas conforme Rajj & Quaggio (1983), mostraram pH em CaCl₂ de 5,3, 3 mg dm⁻³ de P, 0,7, 13 e 9 mmol_c dm⁻³, respectivamente, de K, Ca e Mg, e saturação por bases de 51%. Trata-se de um solo localizado em meia-encosta, numa vertente extensa, com 6% de declividade, relevo suavemente ondulado, cujo material de origem são sedimentos cretácicos retrabalhados no Cenozóico.

Após a coleta das amostras, o solo foi peneirado em malha de 4 mm para separação de torrões, raízes e palha. Fez-se a calagem com 0,650 g vaso⁻¹ de calcário, com PRNT 100% (32% de CaO e 18% MgO), calculada para elevar a saturação por bases a 70%, e adubação com P, K, Zn e B, nas doses de 150, 120, 1,0 e 0,5 mg dm⁻³, respectivamente.

O experimento foi instalado em esquema fatorial 3x6, inteiramente casualizado, com seis repetições, onde os tratamentos foram três densidades do solo: 1,12, 1,36 e 1,60 Mg m⁻³, e seis espécies de plantas: aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) cv. Comum, guandu (*Cajanus cajan* (L.) Milsp) cv. Fava Larga, milho (*Pennisetum americanum* (L.) Leek), mucuna preta (*Stilobolus aterrimum* Pip. et Trac.), sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Híbrido A-6304 e tremoço azul (*Lupinus angustifolius* (L.) cv. IAPAR 24. As densidades de solo corresponderam a resistências à penetração de 0,12, 0,56 e 1,22 MPa, respectivamente. De acordo com a literatura, tais resistências devem prejudicar, mas não impedir o crescimento radicular (Mielniczuk et al., 1985; Kirkegaard et al., 1992; Rosolem et al., 1994a,b; Alvarenga et al. 1996).

Os vasos utilizados constaram da sobreposição de três anéis de PVC, de 10 cm de diâmetro interno, tendo o superior e o inferior, com 15 cm de altura cada um, recebido solo com densidade de 1,12 Mg m⁻³, e o intermediário, com 3,5 cm de altura, recebeu os tratamentos de compactação.

Foi determinada a curva característica de água do solo por meio do método da placa porosa, como descrito por Kiehl (1979). Para obter os níveis de compactação, foram adicionadas quantidades calculadas de solo com 8% de umidade (aproximadamente 80% da retenção de água) a um anel de volume conhecido. Em seguida, este anel sofreu golpes sucessivos de uma massa de ferro até atingir a espessura de 3,5 cm, quando então foram medidas a massa e a resistência dessas camadas, obtendo-se as densidades finais de 1,12, 1,36 e 1,60 Mg m⁻³. A resistência à penetração foi medida com penetrômetro de bolso de cone de 30° em cinco

anéis adicionais para cada tratamento de compactação.

Após a montagem, os vasos foram pesados, obtendo-se, assim, a referência para a manutenção da umidade inicial durante o experimento. As espécies foram semeadas, controlando-se a umidade por meio de pesagens diárias e regas pela superfície.

Cultivou-se uma planta de guandu, mucuna preta e tremoço azul, duas plantas de sorgo e três plantas de aveia preta e milho por vaso. As populações foram definidas numa tentativa de simular as proporções das populações de cada espécie no campo.

Dezoito dias após a emergência das plantas, realizou-se uma adubação de cobertura com 50 mg kg⁻¹ de nitrogênio.

O corte das plantas foi realizado quando da constatação da presença de raízes nos fundos dos vasos dos tratamentos com o menor nível de compactação, o que correspondeu a 36 dias após a emergência para a mucuna preta, 37 dias para o milho, guandu e soja, 38 dias para o sorgo e tremoço azul e 39 dias para a aveia preta.

As produções de matéria seca da parte aérea e das raízes em cada uma das camadas do vaso foram avaliadas em três das seis repetições de cada tratamento. As outras três repetições foram utilizadas para medidas de comprimento e diâmetro radicular. Para essas avaliações, os vasos foram desmontados, considerando separadamente cada uma das três camadas de solo, e as raízes foram separadas da terra por lavagem sobre peneira de 0,5 mm de malha, separando-se os debrís manualmente.

O comprimento radicular foi determinado pelo método de Tennant (1975) e o diâmetro de acordo com Hallmark & Barber (1984).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste DMS, a 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aumento da densidade do solo na camada intermediária (15-18,5 cm) causou respostas variadas no desenvolvimento das raízes na camada superior (0-15 cm) (Figura 1). Para o guandu e o tremoço azul, não houve alteração significativa, enquanto, para as outras espécies, pelo menos uma das características foi alterada.

Alguns autores relataram que, tanto em condições de vaso (Silva et al., 1992; Rosolem et al. 1994a,b), em experimentos de curta duração, como no campo (Iijima & Kono, 1991), as raízes têm dificuldade em penetrar verticalmente em camadas de solo compactadas, causando maior desenvolvimento na camada suprajacente.

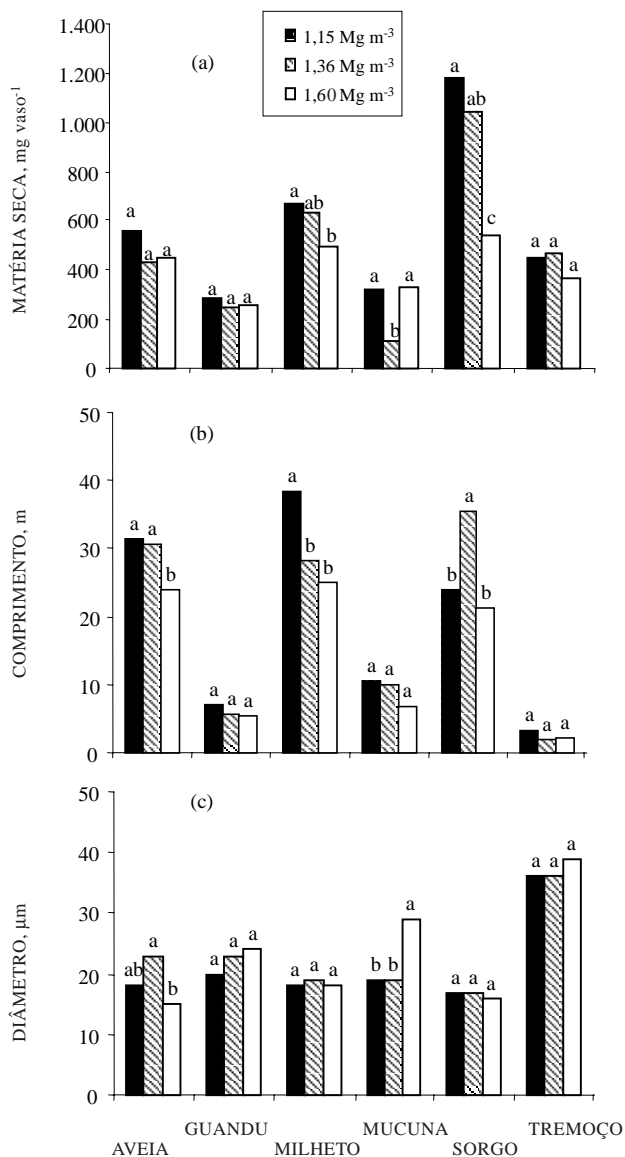


Figura 1. Produção de matéria seca (a), comprimento (b) e diâmetro (c) das raízes na profundidade de 0-15 cm, considerando as densidades do solo impostas na profundidade de 15-18,5 cm.

No presente trabalho, este efeito não foi comum, visto que, no caso do milho e sorgo, percebeu-se menor produção de matéria seca de raízes na camada superior do vaso, nos tratamentos com maior densidade do solo. Além disso, foi notada diminuição no comprimento radicular com o aumento da densidade do solo, ainda que não houvesse significância estatística em alguns casos. Na camada superior dos vasos, notou-se significativo engrossamento das raízes de mucuna preta na máxima densidade do solo.

O maior crescimento radicular observado em trabalhos semelhantes (Silva et al., 1992; Rosolem et al., 1994a,b), na camada superficial, sempre esteve associado ao menor crescimento radicular na camada compactada, o que não foi observado no presente trabalho.

Na camada intermediária (Figura 2), onde se esperava um efeito mais acentuado dos tratamentos, para a maioria das espécies, não houve efeito do aumento da densidade do solo. A produção de matéria seca de raízes do milho foi maior na densidade de 1,36 Mg m⁻³, diminuindo na densidade de 1,60 Mg m⁻³. Para o sorgo, o aumento gradual da densidade causou redução na matéria seca de raízes. Com base nestes resultados, concluiu-se que o aumento da densidade para 1,60 Mg m⁻³ provocou incremento de estresse mecânico para o crescimento radicular dessas duas espécies.

Nas espécies estudadas, o comprimento das raízes na camada intermediária não foi alterado significativamente pelo aumento da densidade do solo (Figura 2). Entretanto, notou-se aumento no diâmetro radicular somente para a mucuna preta.

Autores, como Borges et al. (1988) e Keisling et al. (1995), observaram que as raízes desenvolvem-se melhor em pontos de menor resistência oferecidos pelo solo, razão por que ocorrem modificações na morfologia da raiz, como redução no comprimento e aumento no diâmetro, quando estas encontram restrição ao crescimento (Borges et al., 1988). Assim, era esperado que tais modificações ocorressem no presente trabalho, mas somente houve aumento no diâmetro, sem redução no comprimento, de raízes da mucuna preta.

O milho e o sorgo, apesar de produzirem menos matéria seca de parte aérea quando a densidade foi de 1,60 Mg m⁻³, tiveram maior desenvolvimento radicular na camada compactada do que as outras espécies, expressos pelos valores de matéria seca e comprimento das raízes (Figura 2). Materechera et al. (1992) atribuíram a habilidade das raízes em penetrar camadas compactadas ao aumento do diâmetro, proporcionando, assim, maior pressão de crescimento. No presente trabalho, somente foi notado aumento de diâmetro radicular, na camada compactada, no caso da mucuna. Entretanto, esta modificação na morfologia não fez com que esta espécie apresentasse maior crescimento radicular, seja em comprimento, seja em acúmulo de matéria seca.

Por outro lado, Shierlaw & Alston (1984) levantaram a hipótese de que raízes finas poderiam crescer em solos compactados com maior facilidade que as grossas. No presente trabalho, o tremoço, que mostrou, em média, maior diâmetro radicular, teve, em média, o menor crescimento radicular (em comprimento) na camada compactada (Figura 2). Entretanto, todas as outras espécies tiveram diâmetro radicular médio em torno de 20 µm, mas o

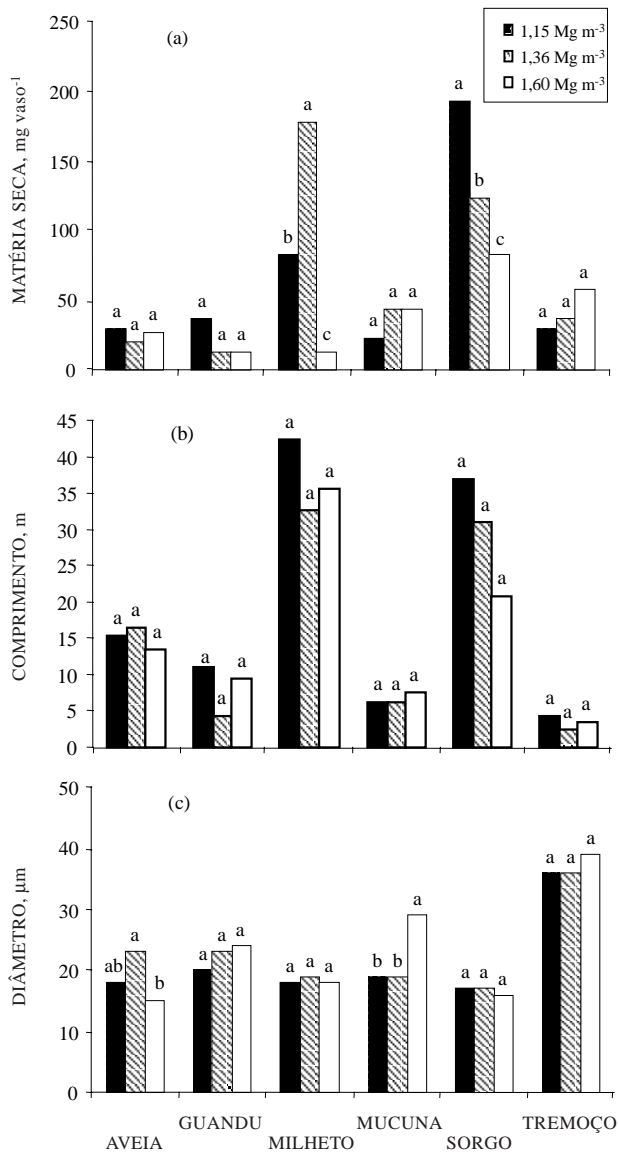


Figura 2. Produção de matéria seca (a), comprimento (b) e diâmetro (c) das raízes na profundidade de 15-18,5 cm, considerando as densidades impostas nesta camada.

milheto e o sorgo granífero tiveram maior comprimento radicular na camada compactada, seguidos da aveia preta. Desta forma, as adaptações morfológicas não foram suficientes para promover maior crescimento nas espécies que, geneticamente, têm menor densidade radicular.

As espécies estudadas mostraram maior capacidade de crescimento radicular em camadas adensadas que o milho e a soja, que, segundo Rosolem et al. (1994a,b), tiveram reduções de 50% no crescimento quando a resistência à penetração foi de 1,42 e 0,69 MPa, respectivamente. Para o

guandu, Kirkegaard et al. (1992), em solo argiloso, observaram redução de 60% no crescimento quando a resistência à penetração foi de 3,5 MPa, enquanto Alvarenga et al. (1996) verificaram efeito quando a densidade do solo (com 620 g kg⁻¹ de argila) foi de 1,35 Mg m⁻³, valores bem diferentes dos obtidos no presente trabalho, com solo arenoso.

Na camada inferior do vaso (Figura 3), observou-se aumento na produção de matéria seca das raízes da mucuna preta e do tremoço azul com o aumento da densidade do solo na camada intermediária. Esse efeito poderia ser devido ao aumento do diâmetro das raízes, no caso da mucuna preta, considerando a redução do comprimento e o aumento do diâmetro de suas raízes. O mesmo não ocorreu para o tremoço azul, para o qual nem o comprimento nem o diâmetro das raízes foram significativamente alterados com aumento da densidade do solo. Para a aveia preta e o guandu, houve diminuição na produção de matéria seca na densidade de 1,60 Mg m⁻³.

Com relação ao comprimento, o sorgo granífero e a mucuna preta mostraram valores significativamente menores na maior densidade de solo. No caso da mucuna preta, foi observado engrossamento significativo das raízes nas camadas superiores do vaso, bem como crescimento muito pequeno na camada mais profunda. No caso do sorgo, já se tinha notado tendência de menor comprimento na camada compactada (Figura 2). Na camada mais profunda, a diferença foi significativa (Figura 3). Deste modo, estas duas espécies foram as mais sensíveis à compactação do solo, pelo menos até 35-40 dias após a emergência das plantas.

Rosolem et al. (1994b), assim como Masle & Farquhar (1988), atribuíram o menor desenvolvimento das raízes após atravessarem a camada compactada ao fato de elas não conseguirem recuperar-se do estresse ao qual foram submetidas, tendo tal esforço provocado maior gasto de fotoassimilados. Esta pode ter sido a razão do menor comprimento radicular observado nos casos do sorgo e da mucuna na camada mais profunda dos vasos.

A produção de matéria seca da parte aérea, o comprimento total e a produção de matéria seca total das raízes (Figura 4) do guandu e tremoço azul não foram alterados com o aumento da compactação na camada intermediária. Para aveia preta, milheto e sorgo, a produção de matéria seca da parte aérea somente foi reduzida na maior densidade do solo, enquanto, para mucuna preta, a redução ocorreu já na densidade de 1,36 Mg m⁻³.

É controverso o efeito da compactação do solo sobre a produção de matéria seca da parte aérea das plantas. Masle & Passioura (1987) relataram que a produção de matéria seca da parte aérea está negativamente associada à resistência do solo, o que, segundo Atwell (1990) seria decorrente do deficiente suprimento de nutrientes e, ou, água. Assim, numa condição de vasos, não faltando água e nutrientes,

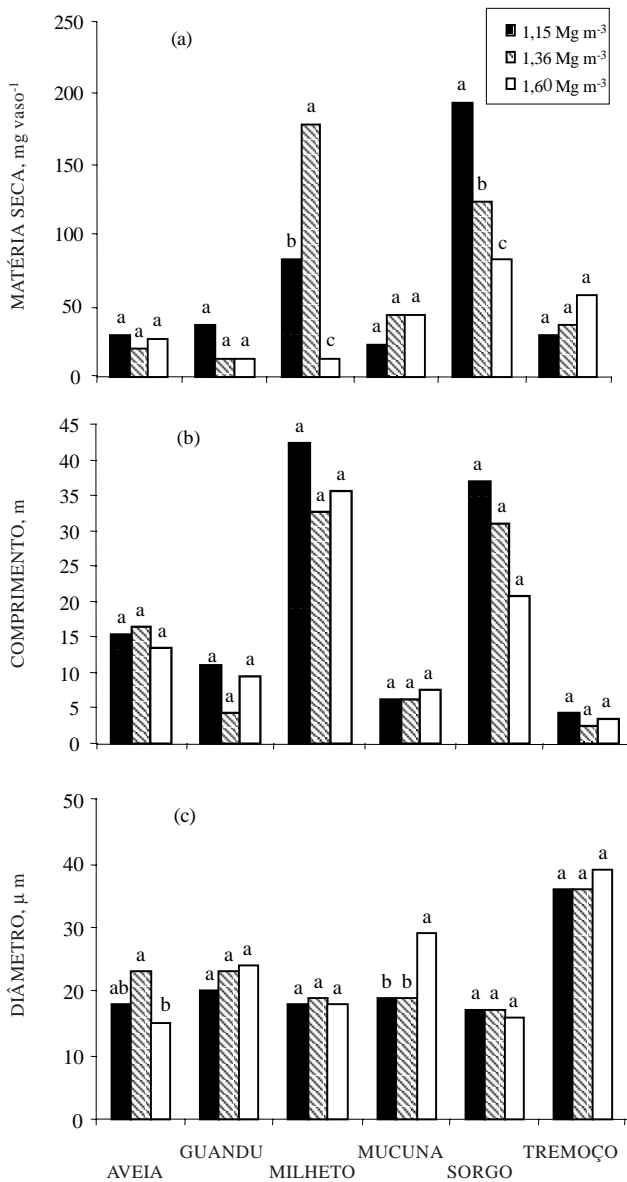


Figura 3. Produção de matéria seca (a), comprimento (b) e diâmetro (c) das raízes na profundidade de 18,5-33,5 cm, considerando as densidades do solo impostas na profundidade de 15-18,5 cm.

não seria esperado efeito da compactação na produção de matéria seca da parte aérea. Por outro lado, Masle & Farquhar (1988) relacionaram o efeito da compactação com o fato de que o carbono fixado, disponível para o crescimento da parte aérea, pode ser limitado, uma vez que a demanda das raízes é alta, pois mais carboidratos são necessários para o crescimento de raízes em solos compactados. Além disso, a quantidade necessária para sintetizar o mesmo comprimento de raízes é muito maior quando a raiz encontra resistência ao crescimento.

De acordo com Brown & Scott (1984), existe um equilíbrio funcional entre o crescimento das raízes e da copa, um interferindo no outro. Assim, para isolar-se o efeito direto da compactação no crescimento da parte aérea, é necessário que ele seja avaliado antes da ocorrência do efeito secundário, causado pelo menor crescimento radicular, causado pelo menor crescimento radicular (Figura 4).

Dentre as plantas estudadas neste trabalho, o guandu e o tremoço azul foram menos prejudicados quanto à produção de matéria seca da parte aérea, quando cultivados na maior compactação. Entretanto, foram as espécies que produziram, em

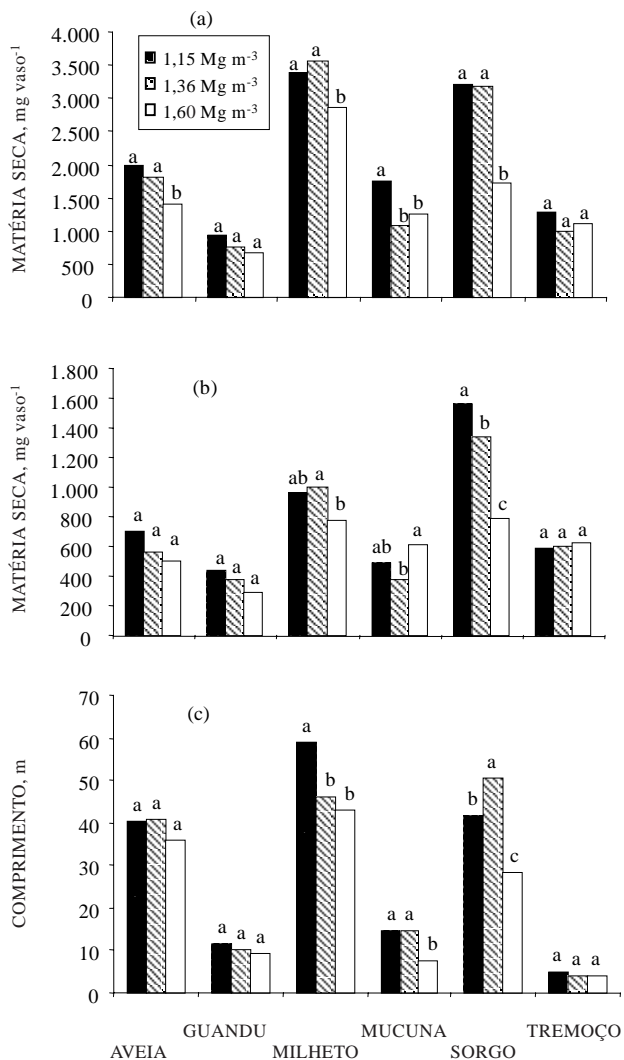


Figura 4. Produção de matéria seca da parte aérea (a), matéria seca (b) e comprimento (c) das raízes no vaso inteiro, considerando as densidades do solo impostas na profundidade de 15-18,5 cm.

média, as menores quantidades de matéria seca e que tiveram os menores comprimentos radiculares.

Segundo Lund & Elkins (1978) raízes crescidas em camadas compactadas criaram poros por onde as raízes da cultura subsequente podem crescer. Por outro lado, é de conhecimento geral que uma planta de cobertura, para ser utilizada em sistemas de semeadura direta, deve produzir boa quantidade de matéria seca na parte aérea no menor tempo possível. Assim, dentre as espécies estudadas no presente trabalho, guandu e tremoço azul seriam as menos indicadas, pois, apesar de menos sensíveis à compactação do subsolo, produziram menos matéria seca na parte aérea e tiveram menor comprimento radicular que as demais. O milho e o sorgo granífero, apesar de sensíveis à compactação, produziram mais matéria seca e tiveram maior comprimento radicular. Por sua vez, a mucuna preta foi muito sensível à compactação, não conseguindo estabelecer um bom sistema radicular abaixo da camada compactada. A aveia preta situou-se em posição intermediária.

CONCLUSÕES

1. Densidades do solo de até $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$, correspondentes a uma resistência à penetração de $1,22 \text{ MPa}$, em solo arenoso, não foram suficientes para suprimir o crescimento radicular de aveia preta, guandu, milho, mucuna preta, sorgo granífero e tremoço azul.

2. Considerando a produção de matéria seca da parte aérea, a sensibilidade à compactação do solo e a densidade do sistema radicular, o milho seria a espécie mais indicada como planta de cobertura em solos com compactação subsuperficial.

3. O guandu e o tremoço azul, apesar de pouco sensíveis à compactação do solo, produziram pouca matéria seca e mostraram baixa densidade radicular, não sendo as mais indicadas como plantas de cobertura em solos compactados.

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.
- ATWELL, B.J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering. I. Growth, development and root structure. New Phytol., 115:29-35, 1990.
- BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A. & KAFKAFI, U., eds. Plants roots: the hidden half. 2.ed. New York, Marcel Dekker, 1996. p.453-470.
- BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; FERNANDEZ, B. & BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. R. Ceres, 35:553-568, 1988.
- BROWN, D.A. & SCOTT, H.D. Dependence of crop growth and yield on root development and activity. In: BARBER, S.A. & BOULDIN, D.R., eds. Roots, nutrient and water influx, and plant growth. Madison, American Society of Agronomy, 1984. p.101-136.
- 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. Agron. J., 76:209-212, 1984.
- IJIMA, M. & KONO, Y. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. Jap. J. Crop Sci., 60:130-138, 1991.
- KEISLING, T.; BATCHELOR, J.T. & PORTER, O.A. Soybean root morphology in soils with and without tillage pans in the lower Mississippi River Valley. J. Plant Nutr., 18:373-384, 1995.
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia: relações solo:planta. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262p.
- KIRKEGAARD, J.A.; SO, H.B.; TROEDSON, R.J. & WALLIS, E.S. The effect of compaction on the growth of pigeonpea on clay soils. I. Mechanisms of crop response and seasonal effects on a vertisol in a sub-humid environment. Soil Till. Res., 24:107-127. 1992.
- LUND, Z.F. & ELKINS, C.B. Creating soil conditions favourable to rooting. In: BROWN, J.M., ed. BELT-WIDE COTTON PRODUCTION-MECHANIZATION CONFERENCE, Dallas, 1978. Proceedings. Dallas, 1978. p.9-12.
- MASLE, J. & FARQUHAR, G.D. Effects of soil strength on the relation of water-use efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. Plant Physiol., 86:32-38, 1988.
- MASLE, J. & PASSIOURA, J.B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. Aust. J. Plant Physiol., 14:643-656, 1987.
- 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.
- MIELNICZUK, J.; CARPENEDO, V. & PEDÓ, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. Lav. Arroz., 38:357-358, 1985.
- NUERNBERG, N.J.; STAMMEL, J.G. & CABEDA, M.S.V. Efeito de sucessão de culturas e tipos de adubação em características físicas de um solo da encosta basáltica sulrio-grandense. R. Bras. Ci. Solo, 10:185-190, 1986.
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 31p. (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.; 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.

- SHIERLAW, J. & ALSTON, A.M. Effects of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant Soil*, 77:15-28, 1984.
- SILVA, G.P.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. Respostas de espécies de gramíneas forrageiras a camadas compactadas de solo. *R. Ceres*, 39:31-43, 1992.
- TAYLOR, H.M. & RATLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci.*, 108:113-119, 1969.
- TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.*, 63:995-1001, 1975.