

Metodologias de laboratório para compactação de solos para análise de desenvolvimento de plantas

Plântulas de guandu (cultivar Caqui) com sete dias



densidade do solo = $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$



densidade do solo = $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$

ISSN 1980-6841

Dezembro, 2007

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Pecuária Sudeste
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 74

Metodologias de laboratório para compactação de solos para análise de desenvolvimento de plantas

Rodolfo Godoy
Osny Oliveira Santos Bacchi
Fernando Almeida Moreira

São Carlos, SP
2007

Embrapa Pecuária Sudeste

Rodovia Washington Luiz, km 234
Caixa Postal 339 - 13560-970 - São Carlos, SP
Fone: (16) 3361-5611
Fax: (16) 3361-5754
Home page: <http://www.cppse.embrapa.br>
Endereço eletrônico: sac@cppse.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Alberto C. de Campos Bernardi
Secretário-Executivo: Edison Beno Pott
Membros: Carlos Eduardo Silva Santos, Maria Cristina C. Brito,
Odo Primavesi, Sônia Borges de Alencar

Revisor de texto: Edison Beno Pott
Normalização bibliográfica: Sônia Borges de Alencar
Foto da capa: Rodolfo Godoy
Editoração eletrônica: Maria Cristina Campanelli Brito

1ª edição on-line

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação - CIP Embrapa Pecuária Sudeste

Godoy, Rodolfo

Metodologias de laboratório para compactação de solos para análise de desenvolvimento de plantas [Recurso eletrônico]/ Rodolfo Godoy.— Dados eletrônicos. — São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007.

Modo de acesso: <http://www.cppse.embrapa.br/servicos/publicacao/gratuita/documentos/Documentos74.pdf/view>.

Título da página na Web (acesso em 21 de dezembro 2007).

35 p. — (Documentos / Embrapa Pecuária Sudeste, 74).
ISSN: 1980-6841

1. Metodologias de laboratório- Compactação de solos - Plantas. I. Bacchi, Osny Oliveira Santos. II. Moreira, Fernando Almeida. III. Título. IV. Série.

CDD: 631.4

© Embrapa 2007

Autor

Rodolfo Godoy

Engenheiro Agrônomo, Dr., Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, Rod. Washington Luiz, km 234, Caixa Postal 339, CEP: 13560-970, São Carlos, SP.
Endereço eletrônico: godoy@cppse.embrapa.br

Osny Oliveira Santos Bacchi

Professor do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo
Endereço eletrônico: osny@cena.usp.br

Fernando Almeida Moreira

Aluno de graduação do Curso de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia da Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba; estagiário da Embrapa Pecuária Sudeste; bolsista do Convênio Embrapa-Unipasto

Sumário

Introdução	7
Equipamentos utilizados	11
Solos	16
Ensaio	17
Conclusões	33
Literatura Citada	34

Metodologias de laboratório para compactação de solos para análise de desenvolvimento de plantas

Rodolfo Godoy

Osny Oliveira Santos Bacchi

Fernando Almeida Moreira

Introdução

Dadas as vantagens que a utilização de determinadas espécies de plantas oferece para a descompactação de solos, há tendência atual de a pesquisa buscar espécies e cultivares mais apropriadas para essa finalidade. Para tanto, há necessidade de ser testado grande número de genótipos, em laboratório ou em casa de vegetação. Esses experimentos necessitam ser conduzidos com metodologias apropriadas, pois há dificuldades na interpretação de dados de densidade de raízes, principalmente em razão da grande variação dos valores entre repetições, em tratamentos em que a estrutura do solo não é uniforme (De Maria et al., 1999). Várias metodologias para a confecção e para a manutenção de blocos de solo compactados têm sido relatadas. Uma restrição importante e comum a essas metodologias é a dificuldade prática de se manter constante a resistência do solo à penetração quando ocorre variação da umidade do solo. Uma das mais interessantes é a descrita por Materechera et al. (1991), que, para testar a capacidade de penetração de raízes de várias espécies em camadas de solo compactadas, utilizaram câmaras de compressão cilíndricas, de

bronze, de 70 mm de diâmetro e de 63 mm de altura. Cada câmara continha 270 g de solo arenoso seco, com baixa compressibilidade e alto ângulo de fricção, densidade de $1,35 \text{ Mg.m}^{-3}$ e porosidade total de $0,49 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Após o plantio de uma plântula de várias espécies no centro da câmara, o solo era molhado até a capacidade de campo com solução nutritiva e um êmbolo era colocado sobre o solo, para suportar peso de 5 kg. Esse êmbolo tinha, além do furo central para a plântula, dois furos para receber a agulha do penetrômetro. As massas do êmbolo e do peso produziram pressão vertical de 14,2 kPa sobre o solo. Com isso, esses autores conseguiram, ao final de dez dias, medidas de resistência à penetração entre 4,14 e 4,28 MPa e teores de água do solo entre 0,195 e 0,202 kg.kg^{-1} .

Alvarenga et al. (1996) utilizaram um Latossolo Vermelho-Amarelo álico, muito argiloso, secado ao ar e passado em peneira de 4 mm. A unidade experimental foi constituída pela sobreposição de três tubos de PVC. O tubo superior, com 10 cm de altura e 9,5 cm de diâmetro interno, foi preenchido com solo até a altura de 8 cm. Os outros dois tubos, intermediário e inferior, possuíam diâmetro interno de 19,5 cm e altura de 10 e 12 cm, respectivamente. O tubo superior e o tubo inferior foram enchidos com solo de modo que sua densidade fosse de $1,0 \text{ kg.dm}^{-3}$. O tubo intermediário continha solo cuja densidade variava conforme o tratamento de compactação: 1,0; 1,1; 1,2; 1,3 e $1,4 \text{ kg.dm}^{-3}$. A compactação do solo foi feita em prensa hidráulica, com volume de uma subamostra de solo calculado de modo que se obtivesse um bloco compactado de 11 cm de altura. Inicialmente, essa subamostra foi dividida em quatro outras subamostras, as quais, depois de receberem os nutrientes e de serem umedecidas, foram compactadas. Cada uma delas, de 2,75 cm de altura, teve sua superfície escarificada, para permitir melhor

contato com a próxima camada, eliminando-se assim uma superfície de menor resistência dentro do bloco compactado. Depois disso, a camada de solo excedente ao tubo, de 0,5 cm em cada extremidade, foi aparada com um arame de aço. Em seguida, o bloco de solo compactado foi retirado do tubo e aparado de modo que seu diâmetro fosse reduzido a 17,5 cm. Foi então colocado em tubo e a interface solo-PVC, preenchida com caulim. Na seqüência, foi feito um furo de 1 cm de profundidade e de 10 cm de diâmetro, no qual foi encaixado o tubo superior. O tubo inferior foi unido ao tubo intermediário com fita adesiva. Antes do preparo dos tubos, o solo foi molhado até 80% da capacidade de campo e deixado em repouso por 48h, para distribuição uniforme da umidade. O experimento teve a duração de quatro dias após o plantio, durante os quais os vasos foram irrigados duas vezes ao dia. A resistência do solo à penetração, no início do experimento, variou de 637 a 1961 kPa, nas densidades de 1,0 a 1,6 kg.dm⁻³, com umidade em torno de 31%.

Rosolem et al. (1999) utilizaram amostras de cinco solos, com três tensões de água, compactadas em tubos de PVC de 10 cm de comprimento por 4,30 cm de diâmetro. Os tubos foram preenchidos com quantidades de solo correspondentes às densidades de 1,07; 1,18; 1,36 e 1,53 g.cm⁻³. A compactação foi realizada mediante golpes com um cilindro de ferro. Foi avaliada a resistência do solo à penetração tanto na parte inferior como na parte superior do tubo de PVC, por meio de penetrômetro de bolso. Plântulas de milho foram colocadas nos tubos e após 48h tiveram suas raízes avaliadas. Foram encontradas relações entre o teor de argila e o teor de areia dos solos, e entre o teor de água e a resistência à penetração.

Queiroz-Voltan et al. (2000) utilizaram quatro níveis de compactação de massas conhecidas de solo – 0,95 (solo original); 1,20; 1,35 e 1,50 kg.L⁻¹ –, obtidos com prensa hidráulica, em cilindros de ferro de 150 mm de altura. Esses cilindros foram colocados em vasos com solo normal, que foram diariamente irrigados. Plantas de soja tiveram seu sistema radicular avaliado morfológicamente após 91 dias. Não foram encontradas diferenças entre os tratamentos.

Para conseguir as densidades desejadas (0,85 – natural; 1,15; 1,20 e 1,25 g.cm⁻³), Silva et al. (1992) também utilizaram massas conhecidas de solo em tubos de PVC, que foram submetidos a pressão mediante queda de cilindro de ferro. O solo foi umedecido até 50% de sua capacidade de campo e durante os 60 dias do experimento procurou-se manter o solo próximo à capacidade de campo. Não foram feitas medidas de resistência do solo à penetração e foi feita avaliação apenas visual do sistema radicular das cinco gramíneas utilizadas, porque houve acúmulo de raízes na superfície da camada compactada, o que tornou impossível saber se aquelas raízes pertenciam ou não à camada compactada.

Para testar o potencial de diversas espécies vegetais, Cintra & Mielniczuk (1983) construíram aparelho compactador constituído por caixa de madeira em que massas conhecidas de solo eram colocadas em tubos plásticos e recebiam golpes de um peso que deslizava por estaca de 80 cm de altura. O número de golpes necessário para atingir os níveis desejados de compactação foi determinado experimentalmente. Foram utilizados quatro níveis de compactação e cinco culturas, que ficaram em casa de vegetação por períodos de 37 a 53 dias. Durante o experimento, o teor de água do solo foi ajustado diariamente de acordo com o peso do vasos.

Diferenças entre espécies quanto à sua capacidade de vencer camadas de solo compactadas têm sido relatadas. Foloni et al. (2003) citaram que plantas de milho não conseguiram vencer camada com 1,4 MPa de resistência à penetração, enquanto Silva & Rosolem (2002) relataram que plantas de soja conseguiram vencer camada com 1,3 MPa de resistência. O guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) freqüentemente é citado como espécie de grande poder de descompactação de solos (Miranda et al., 1991; Alvarenga et al., 1997).

A Embrapa Pecuária Sudeste possui coleção de quarenta linhagens puras de guandu, selecionadas por várias características agrônômicas. Algumas dessas linhagens, em observações realizadas em solo compactado de talhão de cana-de-açúcar, pareceram ter sistema radicular com maior poder de penetração do que o das cultivares comerciais, motivo pelo qual se decidiu então testar essas quarenta linhagens quanto a essa capacidade. Para tanto, houve a necessidade de adaptar e de desenvolver equipamentos e metodologia para a compactação e a manutenção de blocos de solo que permitissem essa seleção, bem como para a tomada de medidas do solo durante os experimentos e para a separação das raízes.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver essas etapas, imprescindíveis para o sucesso do programa de seleção de linhagens com maior capacidade de penetração em camadas compactadas de solo.

Equipamentos utilizados

Para uso como recipiente da camada de solo compactada, foram utilizados tubos de PVC com paredes de 15 mm de espessura e 143 mm de diâmetro interno, que foram inicialmente cortados em anéis de 90 mm de altura (Figura 1).

A compactação de camadas de solo foi feita em uma prensa hidráulica, em que se adaptaram um tubo de ferro de diâmetro compatível com o tubo de PVC, de modo que servisse de êmbolo, e duas presilhas laterais ajustáveis, que serviram de marcadores da altura do solo compactado (Figura 1).



Figura 1. Prensa hidráulica com tubo de PVC posicionado para a compactação de bloco de solo.

Inicialmente, para a determinação da resistência do solo à penetração, foi utilizado penetrômetro desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, de Piracicaba, SP, e descrito por Neves Jr. (2006). Esse aparelho possui características próprias para efetuar medidas de resistência do solo à penetração em pequenos blocos (Figura 2).

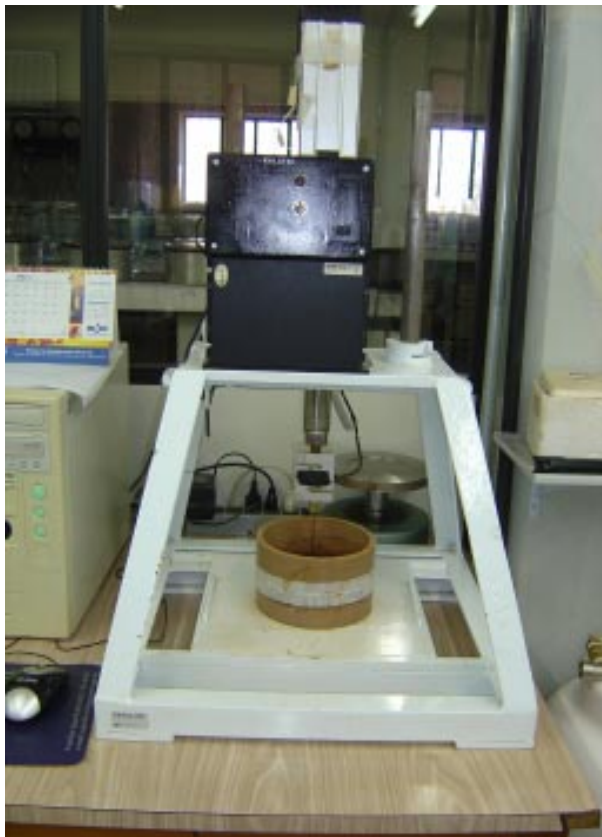


Figura 2. Penetrômetro do Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, em funcionamento.

Posteriormente, foi adquirido penetrômetro digital, originalmente construído para obtenção de medidas de campo (Figura 3). Para que esse equipamento pudesse funcionar adequadamente com o tipo de amostra utilizado neste trabalho, foram construídas agulhas especiais, de pequeno diâmetro (Figura 4) e o aparelho foi configurado para utilização dessas agulhas. Também foi construído aparelho para servir de suporte ao penetrômetro, de maneira que a agulha pudesse ser gradualmente introduzida no solo com o auxílio de alavanca graduada, conforme mostra (Figura 3).



Figura 3.
Equipamento de suporte ao penetrômetro de campo adaptado para uso em laboratório.

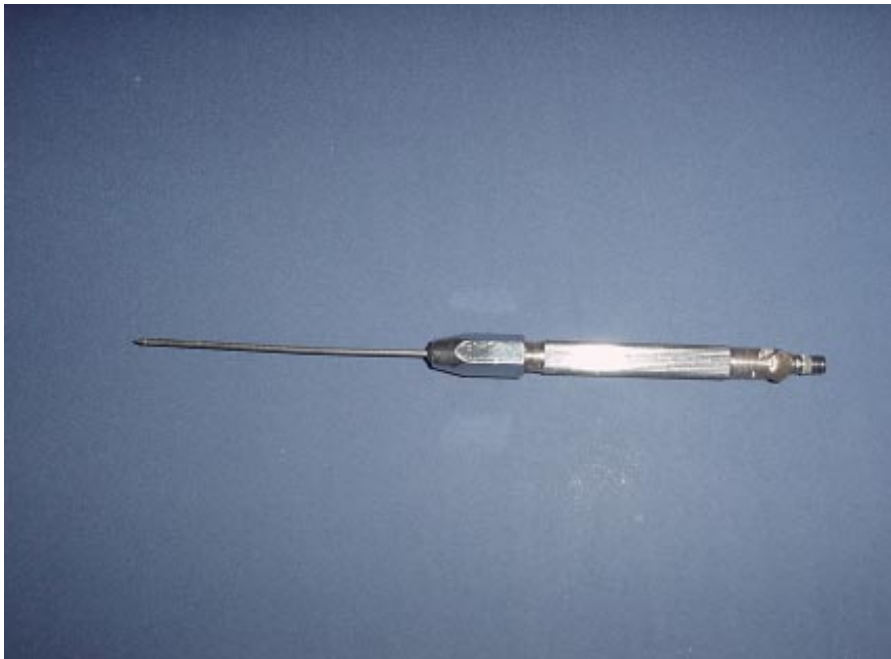


Figura 4. Agulha de pequeno diâmetro especialmente construída para uso em pequenos blocos de solo compactado no penetrômetro mostrado na Figura 3.

Para a quantificação das raízes nas camadas compactadas do solo, foi construído equipamento (Figura 5) para lavar os blocos de solo compactados. Esse equipamento consta de dois tubos de PVC de diâmetros diferentes, o menor encaixado no fundo do maior e aberto nas duas extremidades. As amostras de solo foram colocadas entre os dois tubos. Água foi então injetada sob pressão no sistema por dois canos laterais do aparelho, para lavar o solo e separá-lo das raízes. Quando a água atingia a altura do tubo interno, levando as raízes, ela escorria para dentro dele e passava por peneiras, onde eram recolhidas as raízes.



Figura 5. Equipamento construído para separar raízes das camadas de solo compactado.

Solos

Inicialmente o solo escolhido para os experimentos foi o Latossolo Vermelho-Escuro, com base nos trabalhos de Queiroz-Voltan et al. (1998), Queiroz-Voltan et al. (2000) e Beutler & Centurion (2003). Sua análise granulométrica, realizada pelo método do densímetro (Embrapa, 1999), apresentou teores de areia, de silte e de argila de 23,5; 31,5 e 45,0 g.kg⁻¹, respectivamente (classe textural: argila). Esse solo possuía as seguintes características químicas: pH (em CaCl₂) = 5,0; matéria orgânica (g.dm⁻³) = 11; K, Ca, Mg, H + Al, Al, capacidade de troca da cátions e S (mmol_c.dm⁻³), respectivamente: 0,8; 20; 6; 28; 1; 55 e 27; saturação por bases (V%) = 49. O solo foi secado ao ar e peneirado com malhas de 2 mm.

Face às dificuldades encontradas no início do trabalho, conforme descrito em “Ensaio”, tentativas foram feitas para adaptar a metodologia empregada por Materechera et al. (1991), com a utilização de solo arenoso. Foi então providenciado tal tipo de solo, cuja análise granulométrica, realizada pelo método do densímetro (Embrapa, 1999), apresentou teores de areia, de silte e de argila de 96,4; 1,6 e 2,0 g.kg⁻¹, respectivamente. Esse solo foi secado ao ar e passado em peneira com malha de 2 mm.

Ensaio

Foram preparados dois tubos com 60 mm de altura, encheidos com solo argiloso secado ao ar, com densidades de 1,5 e de 1,7 g.cm⁻³, sem adição de água. As médias da resistência à penetração foram de 5,87 MPa na densidade de 1,5 g.cm⁻³ e de 20,50 MPa na densidade de 1,7 g.cm⁻³. Devido à espessura da camada compactada, entretanto, a resistência mostrou-se muito variável ao longo da amostra, o que dificultaria a interpretação dos resultados. Por esse motivo se decidiu reduzir a altura da camada de solo compactado para 30 mm; dessa forma, foi possível compactar com sucesso amostra de solo secado ao ar com densidade de 1,6 g.cm⁻³.

Nestas condições, verificou-se que a variação da resistência ao longo do perfil das amostras foi menor. Isso fez com que o solo fosse praticamente uniforme em seu perfil (Figura 6) e, portanto, mais adequado aos propósitos deste trabalho.

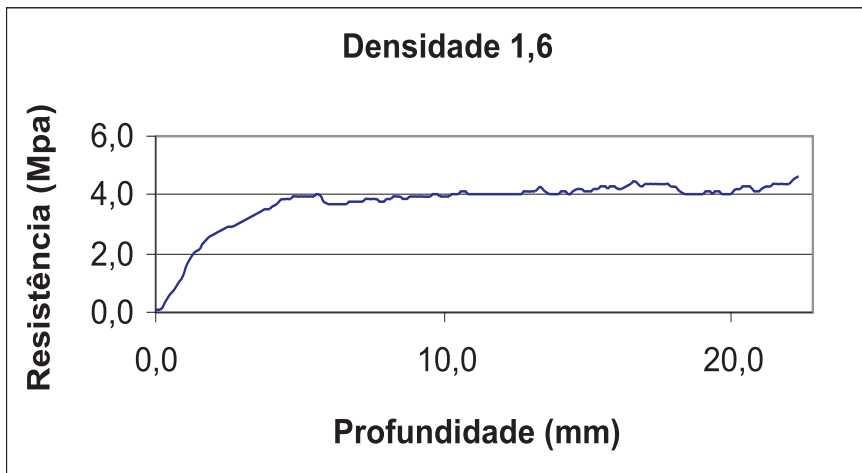


Figura 6. Variação da resistência das amostras à penetração ao longo da camada de 30 mm de solo com densidade de $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$.

Foi então iniciado estudo para verificação dos níveis de água adequados para a condução dos experimentos. Inicialmente, blocos de solo compactados com densidade de $1,3$; $1,5$; $1,8$ e $1,9 \text{ g.cm}^{-3}$ foram saturados com água por capilaridade. Houve sensível queda na resistência dos solos à penetração, que caiu para $0,52$; $0,51$; $0,73$ e $0,37 \text{ MPa}$, respectivamente, níveis não adequados ao propósito deste trabalho. Em decorrência das dificuldades do método, optou-se por tentar adaptar a metodologia utilizada por Materechera et al. (1991).

Inicialmente, procurou-se fazer essa adaptação de maneira que a pressão fosse exercida por molas em vez de pesos, de modo a tornar o sistema mais prático, para utilização com grande número de vasos. Assim, após sua

compactação no tubo ($1,65 \text{ g.cm}^{-3}$), o solo foi colocado entre chapas de metal. Entre a chapa superior e o solo foi colocado um êmbolo com três furos, para passagem da agulha do penetrômetro, de forma que este ficasse meio centímetro dentro do tubo. Um furo era central e dois (a1 e a2), periféricos. As chapas foram presas com quatro parafusos. Na extremidade superior dos parafusos havia molas e porcas, que foram atarraxadas conforme necessário; pretendia-se controlar o aperto das porcas com torquímetro. Entretanto, não foi possível encontrar aparelho com a precisão necessária, o que fez com que as medidas de resistência fornecessem resultados variáveis ao longo da superfície da amostra. Com a utilização de molas e com o solo seco, a média de resistência obtida foi de 3,58 MPa. Em solo com cerca de 30% de água, foram obtidos valores de 2,06; 2,34; 3,68 e 4,48 MPa. Com o mesmo bloco, mas com porcas mais atarraxadas, foi obtido valor de 12,4 MPa.

Foi então testado sistema com camada de solo compactado de 85 mm de altura com densidade de $1,65 \text{ g.cm}^{-3}$. A pressão exercida pelas molas, em função do grau de atarraxamento das porcas no parafuso, novamente seria controlada por torquímetro. Foram feitas várias medidas de resistência do solo à penetração, de várias maneiras, conforme mostrado na coluna "Descrição" da Tabela 1.

Tabela 1. Médias de resistência de solo arenoso à penetração, medida de várias maneiras.

Descrição	Média de resistência (MPa)
Furo central, com solo seco	3,58
Furo central, com solo úmido	2,06
Furo central, com solo úmido	2,34
Furo central, com solo úmido	3,68
Furo a1, com solo úmido	4,48
Furo a2, com solo úmido e porcas bem atarraxadas	12,4

Obs.: O furo a1 e o furo a2 são periféricos.

Dadas as variações encontradas nas medidas de resistência à penetração, a altura dos cilindros de PVC foi reduzida de 90 para 43 mm e novas medições foram efetuadas em blocos de solo compactado ($1,6 \text{ g.cm}^{-3}$) com altura de 40 mm, com o mesmo esquema anteriormente descrito. Em seguida, essas mesmas amostras foram saturadas com água por capilaridade e novas medidas de resistência à penetração foram feitas. Os resultados encontrados são mostrados na Tabela 2.

Esses resultados mostram que o sistema não proporcionou medidas constantes de resistência do solo à penetração. Esse problema deveu-se, em parte, à pouca precisão do torquímetro utilizado.

Nova tentativa foi feita com solo arenoso, por meio da utilização de pesos, conforme proposto por Materechera et al. (1991). No primeiro experimento, utilizou-se coluna de solo acondicionada em tubo de PVC de 143 mm de diâmetro interno e 43 mm de altura, em cujo centro foi colocado um conduíte com 40 mm de altura e 19 mm de diâmetro, através do qual posteriormente seria passado um parafuso. O solo foi secado ao ar e passado em peneira com malha de 2 mm, acondicionado e prensado dentro do tubo, até atingir a densidade de 1,65 MPa.

Tabela 2. Médias de resistência à penetração de solo arenoso com densidade de 1,6 MPa, antes e após saturação com água.

Descrição	Média de resistência à penetração (MPa)
Furo central, com solo seco	1,84
Furo a1, com solo seco	2,43
Furo central, com solo saturado com água	0,83
Furo a1, com solo saturado com água	1,16
Furo central, com solo saturado com água	0,88
Furo a2, com solo saturado e porcas bem atarraxadas	3,41
Furo central, com solo saturado e porcas bem atarraxadas	1,76

Obs.: O furo a1 e o furo a2 são periféricos.

Esses resultados mostram que o sistema não proporcionou medidas constantes de resistência do solo à penetração. Esse problema deveu-se, em parte, à pouca precisão do torquímetro utilizado.

Nova tentativa foi feita com solo arenoso, por meio da utilização de pesos, conforme proposto por Materechera et al. (1991). No primeiro experimento, utilizou-se coluna de solo acondicionada em tubo de PVC de 143 mm de diâmetro interno e 43 mm de altura, em cujo centro foi colocado um conduíte com 40 mm de altura e 19 mm de diâmetro, através do qual posteriormente seria passado um parafuso. O solo foi secado ao ar e passado em peneira com malha de 2 mm, acondicionado e prensado dentro do tubo, até atingir a densidade de 1,65 MPa.

Após a compactação, foi colocado sobre o solo um êmbolo de 10 mm de espessura com perfurações; o sistema foi fechado com placa de metal na parte inferior. Foi colocado parafuso que atravessava o êmbolo, o solo (pelo conduíte) e a placa de metal; na extremidade inferior do parafuso foram

colocadas mola, arruela e porca. Pesos de 5, 10, 15, 20 kg foram pendurados nessa porca, com o auxílio de uma corrente, para comprimir a coluna de solo. Para cada peso foi feita apenas uma amostra, que foi saturada por capilaridade e deixada a escorrer por dois dias, após o que foram tomadas quatro medidas de resistência à penetração.

As médias de resistências à penetração obtidas foram respectivamente de 1,30; 1,24; 1,46 e 1,78 MPa. A Figura 7 mostra os valores de resistência à penetração obtidos em diferentes profundidades do solo com os quatro pesos utilizados.

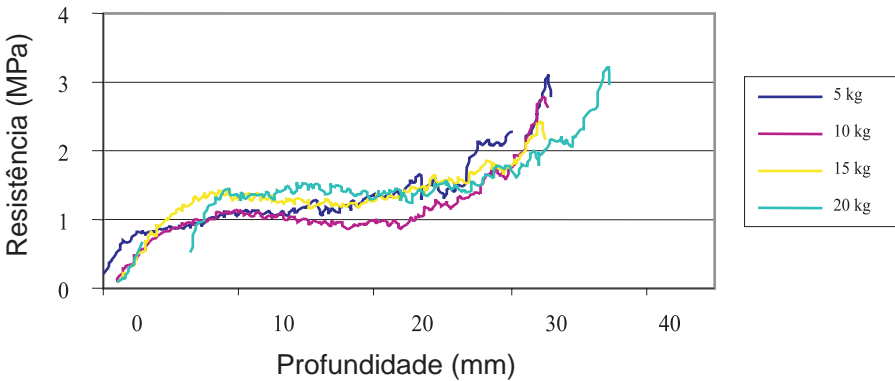


Figura 7. Resistência à penetração em várias profundidades de solo arenoso tracionado por diferentes pesos.

Um segundo ensaio foi conduzido, para o qual foram preparadas três amostras com camadas de solo de 40 mm e no qual foram utilizados pesos de 25 kg. Várias medidas de resistência do solo à penetração foram tomadas; as médias destas medidas são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Médias de resistência à penetração em três amostras de solo com camada de 4 cm tracionadas por peso de 25 kg.

Amostra	Local	Média da resistência (Mpa)
A1	Furo a*	1,40
	Furo b	1,19
	Furo c	1,52
	Furo a'	1,07
	Furo b'	1,47
	Furo c'	1,46
A2	Furo a	1.16
	Furo b	1.52
A3	Furo a	1,64
	Furo b	1,48

*Localização dos furos no êmbolo, por onde passou a agulha do penetrômetro; denominações de furos a', b' e c' significam que o êmbolo foi deslocado, a fim de se obter mais medidas.

Apesar de terem sido obtidos resultados relativamente uniformes, o método teria de utilizar, para este tipo de tubo, pesos muito grandes para a obtenção de níveis de resistência à penetração adequados para a seleção de genótipos, ou seja, níveis acima de 3 MPa. Concluiu-se então pela inviabilidade deste método. Materechera et al. (1991) aparentemente conseguiram melhores resultados com este método, por utilizarem tubos de menor diâmetro. No entanto como fizeram apenas uma medida de resistência do solo à penetração, não é possível avaliar adequadamente os resultados relatados por esses autores no que diz respeito à manutenção das condições iniciais de compactação. Decidiu-se então voltar à utilização de solo argiloso.

Para tanto, foi montado ensaio com o objetivo de acompanhar o aumento da resistência do solo à penetração com o passar do tempo, em solo compactado, com 30% de umidade (v.v⁻¹). Foi utilizado o mesmo Latossolo Vermelho-Escuro, acondicionado nos mesmos tubos de PVC. O solo foi secado ao ar, passado em peneira com malha de 2 mm, acrescido de água e homogeneizado. A seguir, o solo foi compactado dentro do tubo de PVC até a altura de 40 mm, de modo a ficar com densidade de 1,6 g.cm⁻³. Em cima da camada de solo compactado foi colocado um êmbolo igual ao do experimento anterior com solo arenoso, para que funcionasse como barreira à evaporação de água. Imediatamente após a confecção da amostra foram feitas três medidas de resistência à penetração, que foram repetidas uma e duas semanas após. Esses resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Médias de resistência à penetração de solo compactado até a densidade de 1,6 g.cm⁻³, com 30% de umidade, imediatamente e uma e duas semanas após a compactação.

Data	Medida	Média da resistência à penetração (MPa)	Média do tubo
24/11/05	1	3,72	3,91
	2	4,50	
	3	3,90	
30/11/05	1	5,82	5,79
	2	5,83	
	3	5,72	
07/12/05	1	8,55	8,71
	2	8,07	
	3	9,42	

Verificou-se aumento na resistência do solo à penetração de 1,9 MPa, em média, entre 24/11/05 e 30/11/05 e de 2,9 MPa entre 30/11/05 e 07/12/05. De 24/11/05 até 07/12/05, houve aumento da ordem de 4,8 MPa.

Nessa mesma linha, um segundo experimento foi conduzido, com o objetivo de comparar a resistência à penetração de solos compactados com diferente densidade e acompanhar o aumento da resistência à penetração com o passar do tempo. Com a mesma metodologia e com o mesmo material do ensaio anterior, foram compactadas camadas de solo de 30 mm de altura, para produzir densidades do solo de 1,2; 1,4 e 1,6 g.cm⁻³ sobre as quais também foi colocado um êmbolo. Foram preparados seis cilindros, dois com cada densidade. Medidas de resistência à penetração foram feitas logo após a confecção das amostras e sete dias após, exceto nos tubos com a menor densidade, que apresentaram valores muito baixos já nas primeiras medidas e foram então descartados. Em cada ocasião, em cada tubo, foram feitas medidas de resistência em vários pontos do solo. As médias dos resultados são apresentados na Tabela 5.

Concluiu-se que a densidade de 1,2 g.cm⁻³ neste solo não se prestaria para os objetivos deste trabalho, enquanto as outras duas densidades podem ser apropriadas, em face dos valores de resistência encontrados. A escolha da densidade correta para este tipo de trabalho é importante, uma vez que, a determinado nível de umidade, será a responsável pela resistência à penetração do solo. Alvarenga et al. (1996), em solo com umidade de 32%, verificaram que o aumento da densidade de até 1,35 kg.dm⁻³ provocou resistência à penetração acima de 1,7 MPa e tendeu a reduzir o crescimento radicular de guandu. A partir desse ponto, o crescimento se manteve praticamente constante. O guandu reduziu a densidade radicular de forma mais acentuada nos primeiros níveis de compactação e manteve crescimento constante, a partir dos níveis de maior compactação.

Tabela 5. Médias de resistência à penetração de solos compactados em três densidades, com 30% de umidade, imediatamente e uma semana após a compactação.

Densidade (g.cm ⁻³)	Data	Cilindro	Amostra	Média da resistência à penetração (MPa)	Média por cilindro (MPa)	Média geral (MPa)	
1,2	29/11/2005	A	1	0,56	0,56	0,51	
			2	0,56			
			3	0,56			
		B	1	0,46	0,47		
			2	0,46			
			3	0,46			
1,4	29/11/2005	A	1	1,31	1,40	1,49	
			2	1,46			
			3	1,44			
		B	1	1,57	1,58		
			2	1,59			
			3	1,79			
	06/12/2005	A	1	1,69	1,83	1,86	
			2	1,93			
			3	1,87			
		B	1	2,08	1,96		
			2	2,0			
			3	1,79			
1,6	29/11/2005	A	1	4,10	4,30	4,30	
			2	3,92			
			3	4,18			
	06/12/2005	A	1	5,57	5,30		5,30
			2	5,18			
			3	5,25			

Ensaio preliminar foi então instalado, utilizando-se duas densidades de solo, de 1,4 e de 1,5 g.cm⁻³, e três cultivares de guandu, Anão, Caqui e Fava Larga, com o mesmo tipo de solo argiloso e a mesma metodologia, tendo sido a resistência do solo à penetração determinada por amostragem ao final do ensaio. Foram feitos seis cilindros, três com cada densidade e um para cada cultivar. Cada conjunto era constituído por três cilindros de PVC de 46 mm de altura, sendo o inferior e o

superior enchidos com vermiculita e o central com solo compactado. No cilindro superior foram semeadas cinco sementes. A irrigação foi feita de acordo com a perda de água, indicada por teste de pesagem no início do experimento.

Quinze dias após a instalação, os conjuntos foram abertos e as plantas de cada conjunto separadas em quatro partes: parte aérea, raízes no cilindro superior de vermiculita, raízes no cilindro de solo compactado e raízes no cilindro inferior de vermiculita. A parte aérea e as raízes das três camadas foram levadas à estufa a 60°C, onde foram mantidas até serem pesadas, após terem atingido peso constante (Tabela 6).

Quando os conjuntos foram abertos, as médias de resistência à penetração do solo compactado foram de 2,65 MPa no solo com densidade de 1,4 g.cm⁻³ e de 10,02 MPa no solo com densidade de 1,5 g.cm⁻³. Isso sugere que as irrigações efetuadas não foram suficientes para manter a umidade inicial.

Tabela 6. Pesos da matéria seca de partes das plantas de três cultivares de guandu cultivadas em solos com dois níveis de compactação.

Cultivar	DS*	NPI	Peso total (g)				Médias de peso (g) por planta			
			PA	VS	SC	VI	PA	VS	SC	VI
Anão	1,4	5	0,1340	0,1850	0,0100	0,0150	0,0268	0,0370	0,0020	0,0030
Caqui	1,4	4	0,1510	0,3550	0,0150	0,0070	0,0378	0,0888	0,0038	0,0018
Fava Larga	1,4	4	0,1910	0,3490	0,0330	0,0110	0,0478	0,0873	0,0083	0,0028
Anão	1,5	5	0,1590	0,1870	0,0100	-	0,0318	0,0374	0,0020	-
Caqui	1,5	5	0,1460	0,4250	0,0140	-	0,0292	0,0850	0,0028	-
Fava Larga	1,5	5	0,1760	0,1690	0,0010	0,0010	0,0352	0,0338	0,0002	0,0002

*DS = densidade do solo; NPI = nº de plantas vivas no conjunto; PA = parte aérea; VS = raízes na vermiculita superior; SC = raízes no solo compactado; VI = raízes na vermiculita inferior.

Na camada compactada do solo com densidade de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$, houve pequena redução no peso das raízes da cultivar Caqui, em relação ao peso daquelas na densidade de $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$, mas nenhuma redução com a cultivar Anão, ao contrário do que aconteceu com a cultivar Fava Larga. As cultivares Anão e Caqui, nos conjuntos de maior densidade, não produziram raízes na vermiculita inferior. Ao se analisar a média do peso por planta na camada de solo compactada, verificou-se que a cultivar Anão não sofreu redução do sistema radicular quando foi semeada no solo mais compactado, a cultivar Caqui sofreu redução de 26% e a cultivar Fava Larga, de 97%. Esta primeira fase foi terminada com este ensaio. Concluiu-se que seria mais indicada para a fase de seleção das densidades de solo e da cultivar que deveria servir como testemunha o emprego dos mesmos tubos de PVC que vinham sendo usados, de 43 mm de altura, nos quais seriam compactados blocos de solo de 30 mm de altura, com 30% de umidade (em volume).

Após alguns problemas ocorridos com novas tentativas feitas em casa de vegetação, três novos conjuntos, para cada densidade ($1,4$ e $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$) foram montados para novas avaliações de resistência e de evaporação de água. Foi determinada a resistência da camada compactada do solo à penetração em dois dias subseqüentes.

Duas semanas após a montagem dos conjuntos, foram feitas as medições de resistência à penetração nos três conjuntos, a, b e c, para cada densidade ($1,4$ e $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$). A Figura 8 mostra a resistência uniforme obtida em dois dias subseqüentes. Esses resultados demonstram que o controle de umidade estava satisfatório para aquelas condições.

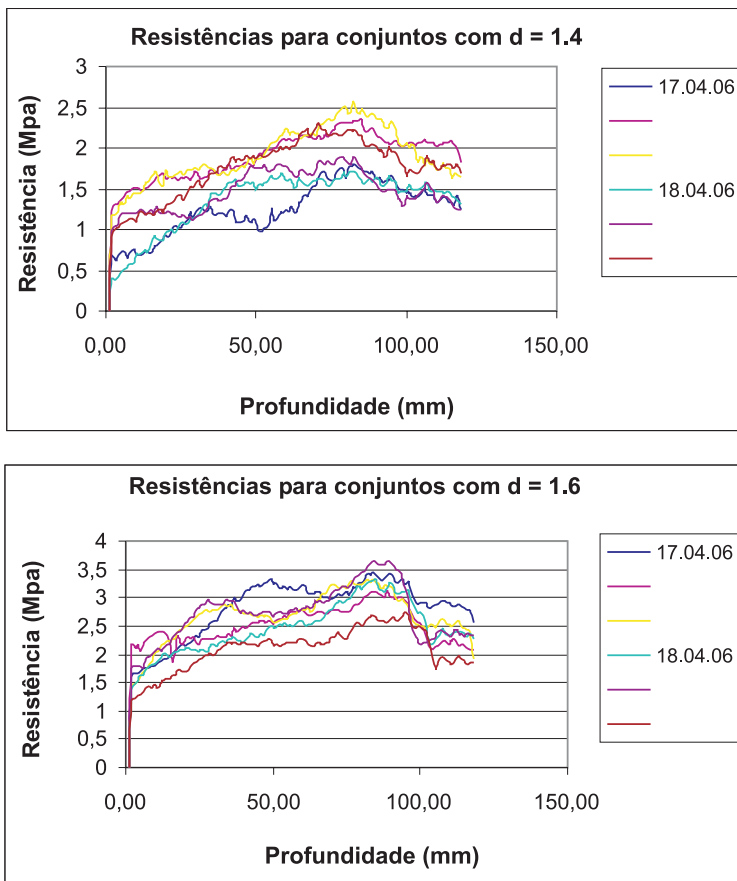


Figura 8. Resistência de solos compactados em densidades de 1,4 e de 1,6 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ em dois dias.

Com base nas observações e nos resultados anteriormente referidos, como o objetivo era determinar a cultivar comercial mais eficiente na biodescompactação, foi instalado novo ensaio, com o mesmo solo argiloso anteriormente descrito. Foram empregados os mesmos tubos de PVC que vinham sendo utilizados, de 46 mm de altura, nos quais foram compactados blocos de solo de 30 mm de altura,

com 30% de umidade (em volume). Após a compactação do solo, idêntico tubo foi colocado sobre aquele, fixado por fita adesiva, tendo-se enchido este segundo tubo com vermiculita úmida, até 20 mm da borda superior. Esses dois tubos foram então colocados sobre bandejas plásticas de 20 cm de diâmetro, contendo vermiculita úmida com 30 mm de altura.

Foram feitos cinco furos na vermiculita, um no centro e os outros quatro eqüidistantes entre si, onde foram transplantadas plântulas uniformes com aproximadamente 20 mm de radícula, oriundas de sementes germinadas em rolos de papel para teste de germinação, a 30°C.

Foram utilizadas duas densidades de solo, 1,4 e 1,6 g.cm⁻³, e três cultivares comerciais de guandu, Anão, Caqui e Fava Larga. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com cinco repetições. Este teste tinha também o objetivo de selecionar a testemunha mais adequada para o teste de genótipos de guandu quanto à capacidade de penetração em solos compactados. As plantas permaneceram por 21 dias em casa de vegetação e foram irrigadas de forma idêntica à do último ensaio. Os conjuntos foram então abertos e cada planta foi separada em quatro partes: parte aérea, raízes no tubo superior de vermiculita, raízes no tubo de solo compactado e raízes na bandeja inferior. A parte aérea e as raízes foram levadas à estufa a 60°C, onde permaneceram até atingir peso constante.

Para controle do peso dos conjuntos e da resistência à penetração das camadas de solo compactadas, foram providenciados dois conjuntos extras, para cada densidade do solo, em que não foram semeadas as cultivares. A irrigação foi mantida com cinco turnos de 1min cada, que resultou no fornecimento diário de cerca de 110 ml de água para cada conjunto. A Tabela 7 mostra as médias da resistência à penetração nessas amostras, obtida em várias datas.

Tabela 7. Médias de resistência à penetração de blocos de solo com densidade de 1,4 e de 1,6 g.cm⁻³, em várias datas.

Dias após a instalação	Densidade (g.cm ⁻³)	
	1,40	1,60
1	2,71	4,26
5	4,04	5,29
6	4,32	6,67
7	5,12	6,17
8	6,08	7,25
13	6,74	7,30

Verificou-se que houve aumento na resistência à penetração ao longo do tempo. No início do experimento, os conjuntos com densidade de 1,4 g.cm⁻³ tinham em média 2,71 MPa de resistência à penetração e chegaram ao final com 6,74 MPa, enquanto os conjuntos com densidade de 1,6 g.cm⁻³ tinham inicialmente 4,26 e chegaram ao final com 7,30 MPa. Aparentemente, portanto, os solos foram mantidos em condições adequadas ao propósito do experimento.

Durante o ensaio, os conjuntos foram também pesados, para verificar se os níveis de água fornecidos eram suficientes. A média da diferença entre o peso inicial e o peso final, nas amostras com densidade de 1,4 g.cm⁻³, era de -143 g, ou 6,7% do peso inicial. Já nas amostras com densidade de 1,6 g.cm⁻³, era de -80 g, ou seja, 3,7% menor do que o peso inicial. A pouca variação havida em duas semanas sugere ter sido a irrigação apropriada para a manutenção dos níveis iniciais de umidade do solo.

Após duas semanas, foi determinada a produção de matéria seca das partes componentes das plantas, cujos resultados são mostrados na Tabela 8. A análise estatística desses dados e do peso total das plantas revelou valores de F significativos ao nível de 1% de probabilidade apenas no peso da parte aérea e no peso total das cultivares, ao contrário do observado por Silva & Rosolem (2002); esses autores não constataram efeito da densidade do solo na produção de matéria seca da parte aérea da soja, também em experimento de curta duração. Em ambos os casos, pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade, a cultivar Fava Larga foi superior à cultivar Anão. A cultivar Caqui foi estatisticamente igual a ambas, no peso da parte aérea e igual à cultivar Fava Larga no peso total.

Tabela 8. Médias de peso de matéria seca dos vários componentes das plantas em duas densidades de solo (1,4 e 1,6 g.cm⁻³).

Cultivar	Médias de peso de matéria seca corrigidas para cinco plantas (mg)				
	PA *	VS	Solo	VI	Total
Fava Larga	417,1 a	270,8 a	30,4 a	50,6 a	768,9 a
Caqui	315,9 ab	249,0 a	25,5 a	61,5 a	651,9 a
Anão	206,8 b	98,3 a	20,0 a	40,3 a	365,4 b
CV (%)	40,6	25,7	64,0	74,7	31,8
Média	313,2	206,0	25,3	50,8	595,4

* Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Duncan (p<0,05)

* PA = parte aérea; VS = raízes na vermiculita superior; VI = raízes na vermiculita inferior.

Todas as análises estatísticas apresentaram alto coeficiente de variação do peso da matéria seca da parte aérea, das raízes na vermiculita superior, das raízes no bloco compactado, das raízes na vermiculita inferior e do peso total (Tabela 8). De maneira geral, verificou-se melhor desenvolvimento das plantas da cultivar Fava Larga. Devido à

natureza do ensaio, o dado mais importante é a quantidade de raízes encontradas no bloco de solo compactado. Mesmo não havendo diferenças estatísticas, a cultivar Fava Larga apresentou quantidade de raízes 19% superior à da cultivar Caqui e 52% superior à da cultivar Anão. Concluiu-se então que as três cultivares comerciais testadas apresentam bom potencial para descompactação de solos, com destaque para a cultivar Fava Larga.

Porém, em nenhuma das variáveis analisadas foi encontrada diferença significativa entre as densidades de solo de 1,4 e de 1,6 g.cm⁻³. Desta maneira, concluiu-se ser satisfatória a metodologia empregada. Para a próxima fase experimental, de seleção dos genótipos com melhor potencial para a biodescompactação de solos, decidiu-se utilizar como testemunha a cultivar Fava Larga e a densidade de 1,6 g.cm⁻³.

Conclusões

- 1- A densidade de 1,6 g.cm⁻³ foi adequada para a seleção de genótipos de guandu que tenha por objetivo a biodescompactação do solo. Deve-se ressaltar, no entanto, a importância do monitoramento das condições de resistência do solo à penetração, com o uso de um penetrômetro, para garantir que a resistência do solo esteja dentro de valores aceitáveis ao desenvolvimento das plantas. Esses valores devem ser restritivos ao desenvolvimento das plantas, para permitir a seleção, porém não impeditivos.
- 2- A cultivar Fava Larga parece ser a mais eficiente, dentre as cultivares testadas, na penetração de camadas de solo compactadas.
- 3- A umidade inicial do solo de 30% (em volume) é a mais adequada, tanto para a manutenção das plantas como para a resistência do solo à penetração em níveis adequados.

Literatura citada

ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 319-326, 1996.

ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes por leguminosas, em resposta à compactação do solo. **Revista Ceres**, v. 44, n. 254, p. 421-431, 1997.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 38, n. 7, p. 849-856, 2003.

CINTRA, F. L. D; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, n. 2, p. 197-201, 1983.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 703-709, 1999.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

MATERECHERA, S. A.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. **Plant and Soil**, v. 135, n. 1, p. 31-41, 1991.

MIRANDA, J. L.; FORETES, J. L. O.; RUIZ, H. A.; FONTES, L. E. F. Crescimento de leguminosa em cilindros de solo com camada compactada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 1991, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBCS, 1991. p. 172.

NEVES JR., A. F. **Avaliação da qualidade física de solos em pastagens degradadas da Amazônia.** 2006. 65 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 35, n. 5, p. 929-938, 2000.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; PRADO, H.; MORETTI, F. C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob o efeito da compactação do solo. **Bragantia**, v. 57, n. 1, p. 49-55, 1998.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 34, n. 5, p. 821-828, 1999.

SILVA, G. P.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Respostas de espécies de gramíneas forrageiras a camadas compactadas de solo. **Revista Ceres**, v. 39, n.221, p. 31-43, 1992.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 37, n.6, p. 855-860, 2002.