

SEÇÃO VI - MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA

VARIABILIDADE TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM LATOSSOLO ARGILOSO SOB SEMEADURA DIRETA COM ROTAÇÃO DE CULTURAS⁽¹⁾

S. A. GENRO JUNIOR⁽²⁾, D. J. REINERT⁽³⁾ & J. M. REICHERT⁽³⁾

RESUMO

O desenvolvimento radicular é afetado pela resistência mecânica do solo e altera o potencial de produção das culturas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência à penetração de um solo argiloso com distintos sistemas de cultura em semeadura direta. O experimento foi realizado no campo tecnológico da Cotrijuí, no município de Ijuí (RS), em um Latossolo Vermelho distroférico típico com 0,68 kg kg⁻¹ de argila, manejado sob semeadura direta, com quatro seqüências de culturas: sucessão soja/trigo, milho/aveia/milho + guandu/trigo/soja/trigo, guandu/trigo/soja/trigo/soja/aveia e crotalária/trigo/soja/aveia/milho/trigo. A resistência à penetração (RP), a umidade e a densidade do solo foram avaliadas em distintas épocas e profundidades. Em todos os sistemas de culturas no Latossolo argiloso com semeadura direta, o maior estado de compactação foi verificado na camada em torno de 0,1 m de profundidade e o menor na camada até 0,07 m. A RP teve grande variação temporal e foi associada à variação do teor de água para cada condição de densidade do solo ou estado de compactação. Durante o ciclo das culturas, valores de RP restritivos ao crescimento das plantas foram atingidos na camada de cerca de 0,03 a 0,23 m de profundidade, quando o teor de água do solo variou de 0,14 a 0,28 kg kg⁻¹. O efeito de plantas de cobertura de estação quente, com sistema radicular abundante e formador de poros biológicos, na redução da resistência mecânica do solo à penetração não foi observado no tempo estudado.

Termos de indexação: plantio direto, compactação, bioporos, raízes, propriedades mecânicas.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Financiada com recursos da FAPERGS e do PRONEX. Recebido para publicação em maio de 2003 e aprovado em março de 2004.

⁽²⁾ Pesquisador da Estação Experimental do Arroz, convênio IRGA/CAAL. Caixa Postal 29, CEP 94930-030 Cachoeirinha (RS). E-mail: silvio_irga@redemeta.com.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CEP 97119-900 Santa Maria (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: dalvan@ccr.ufsm.br; reichert@ccr.ufsm.br

SUMMARY: *TEMPORAL VARIATION OF SOIL PENETRATION RESISTANCE IN A CLAYEY OXISOL UNDER NO-TILLAGE AND CROP ROTATION*

Root growth is affected by mechanical soil resistance and affects the crop yield potential. This study evaluated the soil penetration resistance on a clayey Oxisol under distinct no-tillage cropping systems. The experiment was carried out at the technological field of Cotrijui in southern Brazil. The soil was a Haplorthox with a clay content of 0.68 kg kg⁻¹ and it has been under four no-tillage cropping systems: succession soybean/wheat; corn/black oat/corn + velvet bean/wheat/soybean/wheat; velvet bean/wheat/soybean/wheat/soybean/black oat; and crotalaria/wheat/soybean/black oat/corn/wheat. Soil penetration resistance (PR), soil moisture, and soil bulk density were evaluated at different times and soil depths. For all four cropping systems on this clayey Oxisol under no-tillage, the highest compaction state was observed at about 0.1 m depth and the lowest in the surface layer (0 to 0.07 m). The PR showed great temporal variation and was associated with soil moisture for each soil bulk density or compaction state. PR values restrictive for plant root growth were found at depths varying from 0.03 to 0.23 m, at soil moistures between 0.14 and 0.28 kg kg⁻¹. The effect of inclusion of warm-season cover crops, which have an aggressive rooting system responsible for biological pore formation, was not observed for the studied time.

Index terms: no-tillage, compaction, biopores, roots, mechanical properties.

INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul, em especial nas regiões do Planalto Médio e Missões com predominância de solos argilosos, o cultivo em sucessão de trigo e soja afetou várias propriedades físicas do solo, acarretando a diminuição da produtividade dessas culturas. A maioria dessas áreas é atualmente cultivada sob semeadura direta, onde a mobilização do solo fica restrita à linha de semeadura, mas a ocorrência sistemática do tráfego causa compactação na superfície do solo (Tormena et al., 1998). Essa compactação tem motivado alguns agricultores, ainda que esporadicamente, à mobilização do solo em camadas mais profundas com a utilização de escarificadores e até mesmo ao retorno do preparo convencional, visando corrigir essa limitação. Contudo, uma das alternativas propostas, porém não testada, para reduzir o problema da compactação em solo argiloso, é a utilização de leguminosas de estação quente (Cubilla et al., 2002), nos sistemas de produção que incluam rotações culturais.

Um dos indicadores de compactação no solo é a resistência do solo à penetração, que descreve a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo (Pedrotti et al., 2001). Os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Ehlers et al. (1983), Nesmith (1987), Merotto Jr. & Mundstock (1999) e Canarache (1990) indicaram valores de 1, 2, 3,5 e 5 MPa, respectivamente, como sendo o limite crítico de resistência à penetração de raízes. Muitos pesquisadores, contudo, utilizam o valor de 2 MPa como o limite crítico, conforme Taylor et al. (1966).

A resistência do solo à penetração geralmente aumenta com a compactação do solo (incremento da densidade) e com a redução da umidade do solo, sendo indesejável para o crescimento das plantas, ocasionando redução de crescimento do sistema radicular (Bengough & Mullins, 1990). Falta, contudo, estabelecer quantitativamente a relação matemática da resistência com a densidade e umidade do solo para os diversos solos e ecossistemas.

A resistência do solo à penetração das raízes está relacionada com a permanência da continuidade dos poros. Poros formados pela ação das raízes no solo são mais estáveis, pois a decomposição dessas por microrganismos gera materiais que atuam como cimentantes nas paredes desses poros, proporcionando maior durabilidade, se comparados com aqueles formados por implementos mecânicos (Abreu, 2000).

O trabalho teve como objetivo a avaliação temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso com distintos sistemas de culturas, incluindo leguminosas de estação quente.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho distroférico típico (EMBRAPA, 1999), apresentando valores médios de 0,68 kg kg⁻¹ de argila; 0,22 kg kg⁻¹ de silte; 0,10 kg kg⁻¹ de areia e 0,026 kg kg⁻¹ de matéria orgânica. O experimento foi desenvolvido no campo tecnológico da COTRIJUI, no município de Ijuí (RS). O clima do município é classificado, segundo o sistema Köppen, como Cfa,

isto é, subtropical úmido, sem estiagem típica. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C e do mês mais frio é inferior a 18 °C. A precipitação média anual é maior do que 1.600 mm, com tendência de maiores precipitações na primavera e verão. O relevo local é suave ondulado com declividade em torno de 3 %.

O experimento foi iniciado no ano agrícola de 1998/1999. Até o inverno de 1998, a área vinha sendo cultivada com milho (grão e silagem), soja, trigo e aveia branca, por preparo convencional. O preparo convencional usado constava de operações de aração e gradagem para as culturas de verão e gradagem para as culturas de inverno, realizadas com trator de porte médio (potência entre 75 e 95 HP). O tráfego adicional que a área recebia anualmente estava associado às operações de controle fitossanitário e colheita. Entretanto, a área, antes da instalação do experimento, tinha uma variabilidade espacial associada ao manejo anterior e à sua gênese, que, juntamente com o relevo, orientaram a localização dos blocos.

Foram instalados quatro sistemas de rotação de culturas, com quatro repetições, em parcelas de 150 m². Os sistemas de rotações tinham, a cada três anos, o cultivo de aveia, seguido por uma safra de milho semeado em setembro e colhido em janeiro com a inclusão de uma leguminosa de verão (guandu anão) semeada em janeiro, que se desenvolveu até a entrada da cultura do trigo. A inclusão dessa leguminosa objetivou aliviar a compactação para as culturas principais (soja e trigo). No primeiro ano, contudo, foram semeadas duas espécies de leguminosas de verão (Quadro 1), guandu e crotalária, na mesma época da semeadura da soja e do milho e não em sucessão ao milho.

A partir do início do experimento, todas as culturas foram introduzidas com semeadura direta, usando uma semeadora de porte médio com mecanismo de disco duplo para semeadura e incorporação do adubo. A mobilização da superfície do solo, expressa em área sem cobertura, foi em torno de 10 a 15 %, para as culturas de maior espaçamento entre linhas (milho – 0,9 m); 25 a 30 %, para culturas de espaçamento médio (soja, guandu e crotalária – 0,4 m), e 80 % ou pouco mais, para as culturas de pequeno espaçamento (trigo e aveia – 0,17 m). A

regulagem da profundidade de semeadura foi sempre inferior a 0,07 m. O tráfego associado à instalação plantio das culturas, assim como associado aos tratamentos fitossanitários, não foi controlado ou foi aleatório, porém o efeito imediato era localizável e as amostragens e determinações evitaram esse efeito. A cobertura do solo foi consequência da cultura anterior ao longo do tempo, com solo coberto por massa seca de culturas, suficiente para boa proteção do solo. Ao longo do tempo, a exposição do solo esteve associada à mobilização do solo nas linhas de semeadura para plantio das culturas. Mesmo após as leguminosas (soja, guandu e crotalária), a aveia era plantada e cobria rapidamente a área, permanecendo com boa cobertura. Em todos os tratamentos, anualmente, tinha-se um cultivo de gramínea (trigo ou aveia) com alta produção de massa seca e de decomposição lenta, contribuindo para manutenção de palha na superfície do solo.

A avaliação da resistência do solo à penetração (RP) foi realizada em sete datas durante o experimento, a saber: 5/5, 24/5 e 3/11/2000; e 9/1, 23/10, 12/11 e 23/11/2001, com penetrômetro eletrônico de ponta cônica de 30 °. O penetrômetro foi introduzido manualmente no solo, até à profundidade de 0,40 m, segundo método descrito por Bradford (1986). Nessas sete datas, foram feitas nove determinações de RP por parcela, associadas à determinação da umidade gravimétrica, nas profundidades de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m. As variações da umidade do solo para camadas mais profundas foram menores, razão por que foi medida a camada mais espessa na terceira camada estudada. Amostras indeformadas de solo foram coletadas nas entrelinhas das culturas em anéis metálicos com 0,0536 m de diâmetro e 0,03 m de altura, para determinação de sua densidade e porosidade, em três profundidades (0-0,03; 0,10-0,13 e 0,20-0,23 m), no mês de outubro do ano agrícola 2000/2001. Foram coletados três cilindros por profundidade por parcela. Essas amostras foram saturadas e submetidas aos potenciais de -1 e -6 kPa, em mesa de tensão, e aos potenciais de -33, -100, -300 e -500 kPa, em câmara de Richards.

Usando todos os dados de resistência à penetração (RP), densidade do solo (DS) e umidade volumétrica (Uv), ajustou-se um modelo não-linear

Quadro 1. Rotação de culturas utilizada para o período de 1998/2001 no campo tecnológico da COTRIJUI, Ijuí (RS)

	Tratamento	Verão 1998/1999	Inverno 1999	Verão 1999/2000	Inverno 2000	Verão 2000/2001	Inverno 2001
T ₁		Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo
T ₂		Milho	Aveia	Milho/guandu	Trigo	Soja	Trigo
T ₃		Guandu	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Aveia
T ₄		Crotalária	Trigo	Soja	Aveia	Milho	Trigo

aos dados observados, para descrever a variação da RP em função da U_v e DS ($RP = a \times U_v^{-b} \times DS^c$), sendo a , b e c coeficientes de ajuste.

A análise de variância foi feita com base em um delineamento inteiramente casualizado e, quando houve diferenças significativas entre tratamentos, realizou-se a comparação de médias, usando a diferença mínima significativa (DMS) a 5 % de probabilidade de erro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variação temporal da resistência do solo à penetração

Em 5/5/2000, dezoito meses após o início do experimento que ocorreu com a semeadura das culturas de verão no ano agrícola 1998/1999, o

tratamento T2 (Quadro 1) apresentou maior resistência à penetração (RP) ao longo das profundidades estudadas, em relação aos demais tratamentos. Na camada de 0,05 a 0,20 m, o T2 apresentou resistência à penetração acima de 3 MPa, sendo o maior estado de compactação observado para profundidade aproximada de 0,10 m (Figura 1a).

Uma provável explicação para tal comportamento nesse tratamento é que a cultura do guandu, instalada neste tratamento em 2000, apresentou sistema radicular de grande densidade e comprimento, preenchendo grande proporção do sistema poroso do solo, especialmente os macroporos, aumentando a rigidez do sistema. Para profundidades abaixo de 0,20 a 0,25 m, os valores de RP foram semelhantes entre tratamentos, atingindo valores médios de 2 MPa. A RP diminuiu com o aumento da profundidade, a partir de 0,10 m. Esse fato reafirma observações de que a maior compactação verificada nos solos sob semeadura

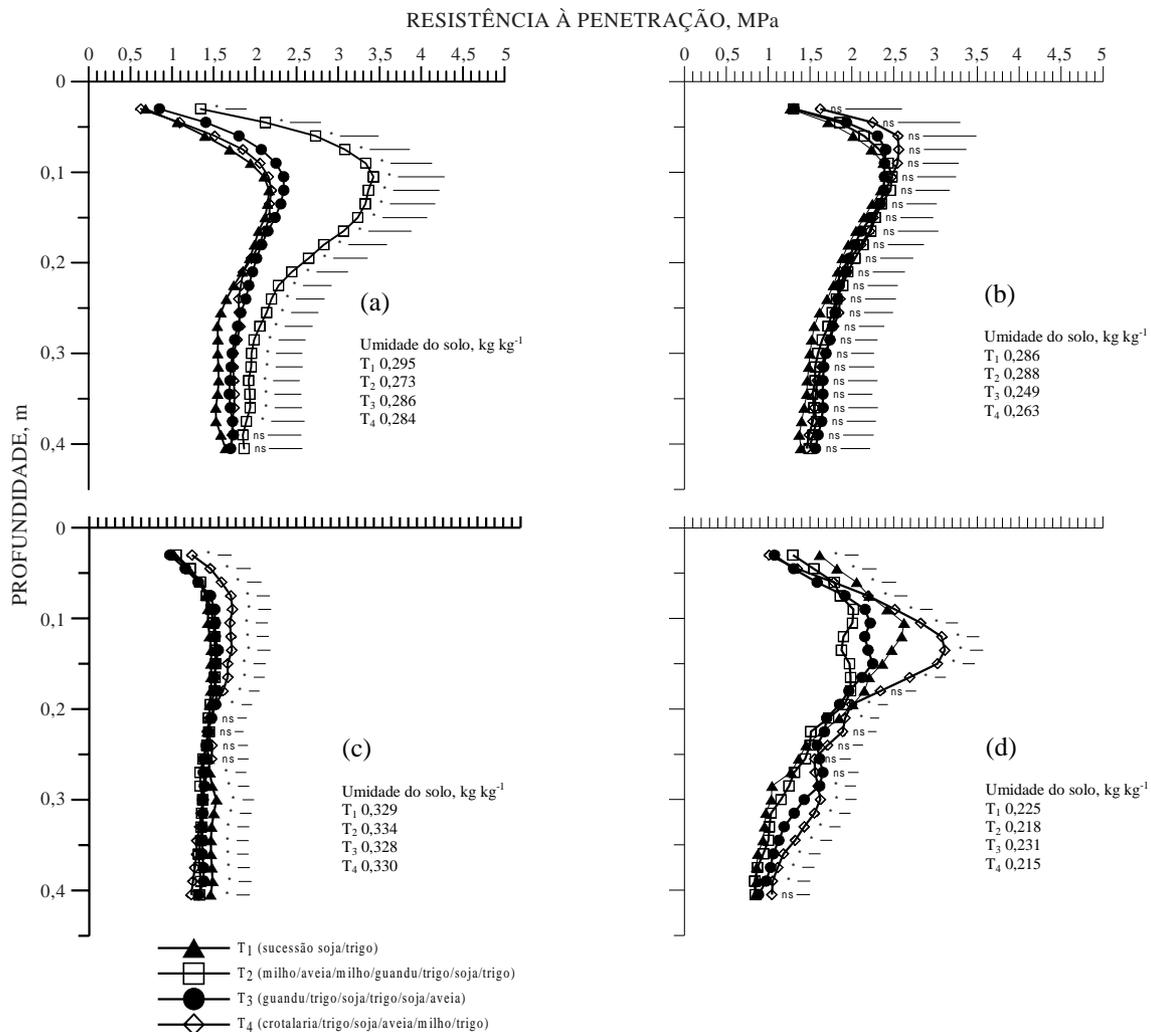


Figura 1. Resistência à penetração ao longo do perfil do solo para diferentes rotações de culturas, nos dias 5/5/2000 (a), 24/5/2000 (b), 3/11/2000 (c) e 9/1/2001 (d). *Significativa pelo teste DMS a 5 % de probabilidade de erro.

direta encontra-se nas profundidades menores que as observadas em sistemas com excessiva mobilização do solo, que se situam em torno de 0,20 a 0,30 m de profundidade (Silva et al., 2000; Genro Junior, 2002; Silva, 2003; Secco, 2003; Streck, 2003).

A RP determinada no dia 24/5/00, após a colheita das plantas, mostra que os tratamentos apresentaram similaridade de RP em profundidade (Figura 1b). O tratamento T2, o qual teve a maior resistência à penetração em 5/5/00 (Figura 1a), apresentou valores semelhantes aos demais. Em todos os tratamentos, a RP foi superior a 2 MPa na camada de 0,05 a 0,20 m de profundidade.

Após dois anos da semeadura inicial da área, no dia 3/11/00, a RP (Figura 1c) para o T1, T2 e T3 não diferiu ao longo da profundidade e foi menor que 2 MPa. O T4 apresentou maior resistência à penetração a partir da camada superficial de 0,03 m até cerca de 0,20 m de profundidade. Nesse dia, os valores de umidade do solo foram superiores aos relatados até esta avaliação, sendo em torno de 0,33 kg kg⁻¹ e próximos à capacidade de campo desse solo, pois a coleta ocorreu um dia após uma chuva, uniformizando os valores de umidade. Isso é uma indicação clara de que o estado de compactação atual desse solo provoca pouca ou nenhuma limitação ao crescimento radicular, quando sua umidade estiver próxima à capacidade de campo, porém pode ocasionar limitações para valores de umidade abaixo de 0,28 kg kg⁻¹.

A avaliação de RP realizada em 9/1/01 mostrou grande variabilidade entre tratamentos ao longo da profundidade (Figura 1d). Houve diferenças significativas até à profundidade de 0,17 m e entre 0,25 e 0,35 m de profundidade. Esses resultados podem indicar que a profundidade da máxima compactação foi um pouco mais profunda ou que houve alívio a profundidades menores. Os valores médios de umidade do solo ficaram em torno de 0,22 kg kg⁻¹. Os valores de RP foram significativamente menores no T2, para profundidade de maior estado de compactação, mas sem evidência clara de ter sido efeito da inclusão do guandu no esquema de rotação/sucessão após o milho no ano anterior. O guandu tem sido recomendado (Cubilla et al., 2002) por ter sistema radicular agressivo, com alta densidade e comprimento, e por crescer em solos com estado de compactação restritivo às culturas produtoras de grãos. Após cessar o ciclo, as raízes se decompõem e formam-se bioporos que, apesar de representarem pequeno volume em relação ao volume total de poros, são altamente funcionais e reduzem a resistência do solo, especialmente por formar macroporos que podem ser comprimidos quando há pressões aplicadas ao solo.

Na avaliação realizada em 23/10/01, quando a aveia estava no estágio final de floração e o trigo apto à colheita, encontrou-se similaridade nos valores de RP para os tratamentos até à

profundidade de 0,05 m, e diferenças de 0,05 a 0,35 m (Figura 2a). Novamente, a maior RP no T3 pode estar associada ao fato de que, no pleno desenvolvimento das plantas de aveia, o sistema radicular pode ocupar volume considerável de poros aumentando a resistência do solo e a rigidez do sistema. As raízes de trigo na época já se encontravam em senescência. A máxima compactação ocorreu na profundidade aproximada de 0,12 m, confirmando a tendência geral do estudo onde o estado de máxima compactação ocorreu de 0,10 a 0,15 m, com valor médio em torno de 0,12 m. A média geral dos valores de umidade do solo foi a mais baixa de todas as avaliações, com valores em torno de 0,16 kg kg⁻¹, induzindo os maiores valores de RP, confirmando a observação que vem sendo feita de que as diferenças de RP entre diferentes estados de compactação aumentam com a redução da umidade. Esse fato é altamente relevante, pois há referências metodológicas que aconselham a medir a RP na capacidade de campo e excluir a determinação da umidade do solo.

Após três anos do início do experimento, no dia 12/11/01, depois da ocorrência de chuva e antes da semeadura da soja, a RP foi similar para todos os tratamentos até à profundidade de 0,075 m. A partir dessa profundidade, o T1 apresentou a menor resistência à penetração até os 0,20 m de profundidade (Figura 2b), porém todos os tratamentos tiveram valores de RP baixos, não ultrapassando 2 MPa. Houve pouca variação de umidade do solo entre os tratamentos, porém houve variação entre as profundidades, com valores médios situando-se em torno de 0,31 kg kg⁻¹.

A RP determinada em 23/11/01, dez dias após a semeadura de verão no ano agrícola 2001/02, sem a ocorrência de chuva no intervalo, aumentou significativamente (Figura 2c) em relação aos valores observados na avaliação anterior (Figura 2b), graças principalmente à redução de umidade do solo que diminuiu de 0,31 kg kg⁻¹ para valores próximos a 0,27 kg kg⁻¹. Com a diminuição da umidade do solo, as plantas podem sofrer estresse hídrico mais frequente graças ao efeito de compactação do solo, o qual se encontra fora do intervalo hídrico ótimo (Silva et al., 1994). Os tratamentos T1, T2 e T4 apresentaram valores de RP semelhantes até à profundidade de 0,20 m e que ultrapassaram os 3 MPa, valor superior ao normalmente citado na literatura como limitante ao desenvolvimento normal das raízes (Taylor et al., 1966). O T3 apresentou os valores mais baixos de RP, em relação aos outros tratamentos na camada de 3-20 cm de profundidade, e apresentou valores pouco superiores a 2 MPa na camada de 0,125 a 0,175 m de profundidade. Neste tratamento, foi feito o plantio de feijão guandu após o cultivo de milho há cerca de três anos. Não há evidência clara de que essa diferença seja devida ao guandu, porém os efeitos de inclusão dessas espécies, de sistema radicular intenso e agressivo e de alta produção de biomassa,

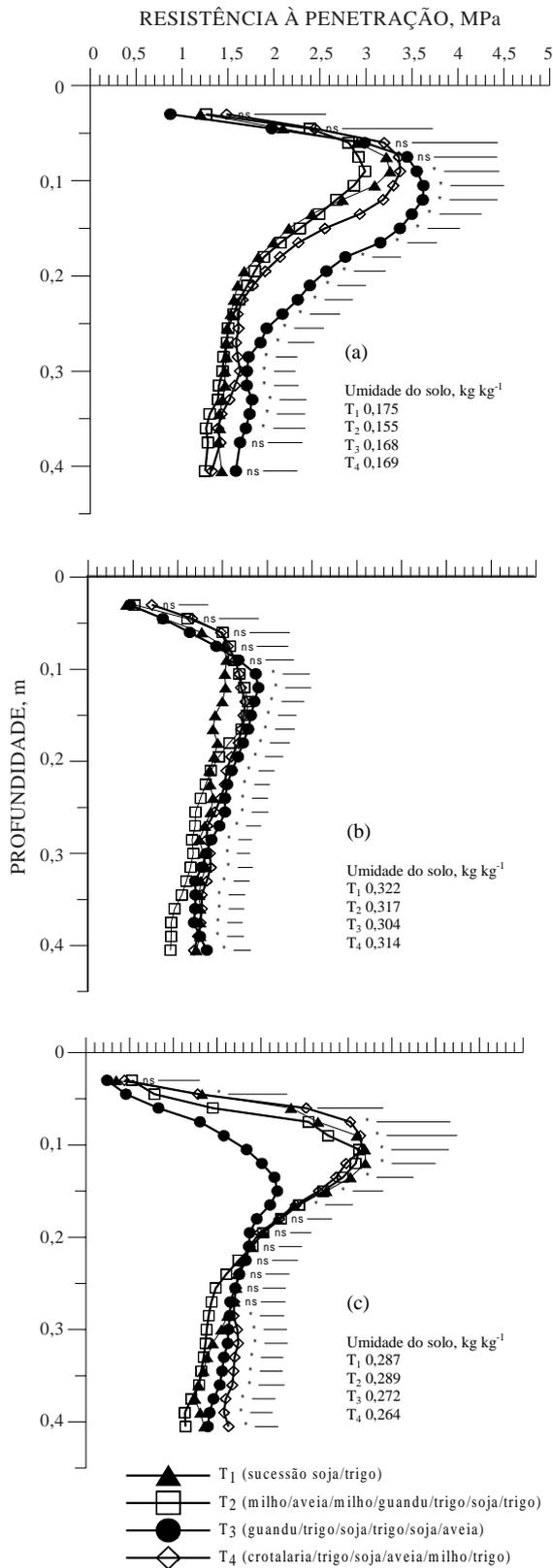


Figura 2. Resistência à penetração ao longo do perfil do solo para diferentes rotações de culturas, nos dias 23/10/2001 (a), 12/11/2001 (b) e 23/11/2001 (c). *Significativa pelo teste DMS a 5 % de probabilidade de erro.

podem aparecer em circunstâncias adversas ao crescimento vegetal, similar ao que ocorre no solo em períodos de estiagens.

Relação da resistência do solo com a densidade e umidade volumétrica do solo

Os resultados de RP nas diversas épocas e profundidades para todos os tratamentos foram função, principalmente, da umidade volumétrica do solo (Uv) e do estado de compactação expresso pela densidade do solo (DS). Como os valores de densidade do solo variaram pouco entre tratamentos e significativamente entre profundidades, a relação da RP com a umidade de solo para cada profundidade foi similar a essa relação para cada estado de compactação (Figura 3).

Para todas as profundidades ou estados de compactação, a relação foi linear e aproximadamente com o mesmo coeficiente angular negativo, indicando decréscimo linear da RP com o acréscimo da umidade. A faixa de umidade observada foi expressiva para esse solo, pois variou de valores próximos à capacidade de campo até valores próximos da umidade do ponto de murcha permanente, ou seja, potencial matricial de -1,5 MPa. As três retas mostram que, para os mesmos valores de umidade, a RP aumenta com a elevação do estado de compactação. Os valores de RP para a profundidade de 0,03 a 0,06 m com DS

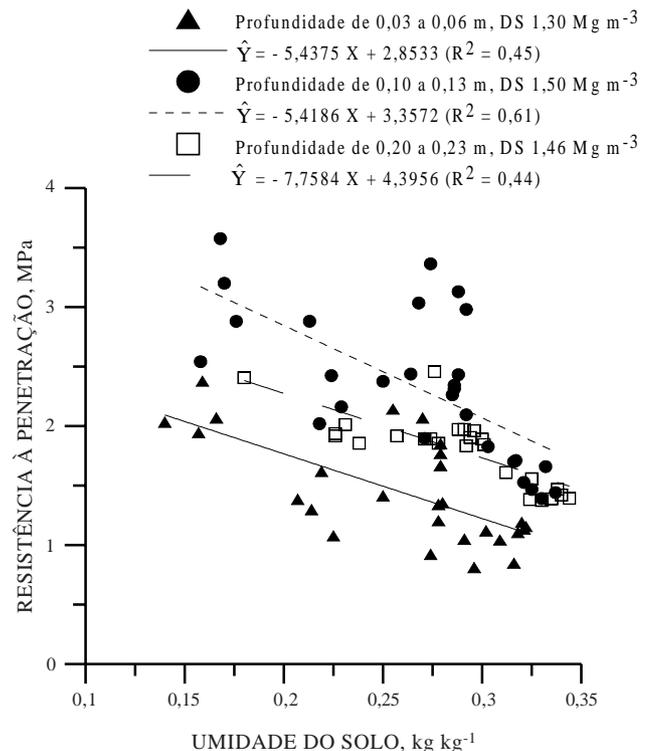


Figura 3. Valores de resistência à penetração para diferentes umidades do solo, considerando a profundidade e densidade do solo (DS).

média de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ foram, na sua maioria, inferiores ao limite crítico relatado na literatura de 2 MPa, independentemente da umidade do solo; os maiores valores de RP foram encontrados quando o solo estava mais seco, com umidade inferior a $0,15 \text{ kg kg}^{-1}$.

Na profundidade de 0,10-0,13 m com DS de $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$, o solo apresentou valores de RP superiores a 2 MPa, quando apresentou umidade menor do que $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$, e ultrapassou 3 MPa em certos casos. Nessa camada, foram observados os maiores valores de RP indicando a profundidade do solo em plantio direto que apresenta o maior estado de compactação. Nessa profundidade, com o aumento da umidade do solo ocorre decréscimo na RP, ficando os valores acima do limitante para o desenvolvimento das raízes, sendo a RP inferior a 2 MPa somente com valores de umidade maiores que $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$. Na profundidade de 0,20-0,23 m, DS de $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$, foram observados valores intermediários de RP, apresentando valores inferiores aos do limite crítico às plantas quando a umidade do solo foi maior do que $0,24 \text{ kg kg}^{-1}$.

O modelo não-linear, envolvendo algumas variáveis mecânicas do solo estudadas, ajustado para descrever a variação da RP em função da Uv e DS foi $RP = 0,29 \times Uv^{-0,623} \times DS^{2,712}$ ($R^2 = 0,49$), em que RP é a resistência à penetração (MPa), Uv é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e DS é a densidade do solo (Mg m^{-3}).

A comparação entre os valores de RP estimados e os observados encontra-se na figura 4. Os valores gerados pelo modelo foram superestimados para a RP menores do que valores próximos a 2 MPa e subestimados para RP maiores do que valores próximos a 2 MPa. Essa tendência indica que, apesar de ser significativa, há necessidade de se aumentar o número de observações para melhorar a relação entre as variáveis do modelo ou construir equações de ajustes específicas para cada coleção de dados. Esse tipo de modelo tem sido frequentemente usado (Silva et al., 1994; Reinert et al., 2001; Silva, 2003) para construir os gráficos para estimativa da faixa de umidade do solo pouco limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Para isso, usa-se o modelo com um valor crítico de RP considerado limitante às raízes (exemplo: 2 MPa) e estima-se o valor de Uv para valores crescentes de DS necessária para atingir a RP crítica (Silva et al., 1994; Betz et al., 1998; Reinert et al., 2001).

CONCLUSÕES

1. Em todos os sistemas de culturas no Latossolo argiloso com semeadura direta, o maior estado de compactação foi verificado na camada em torno de 0,10 m de profundidade e o menor na camada superficial, até 0,07 m.

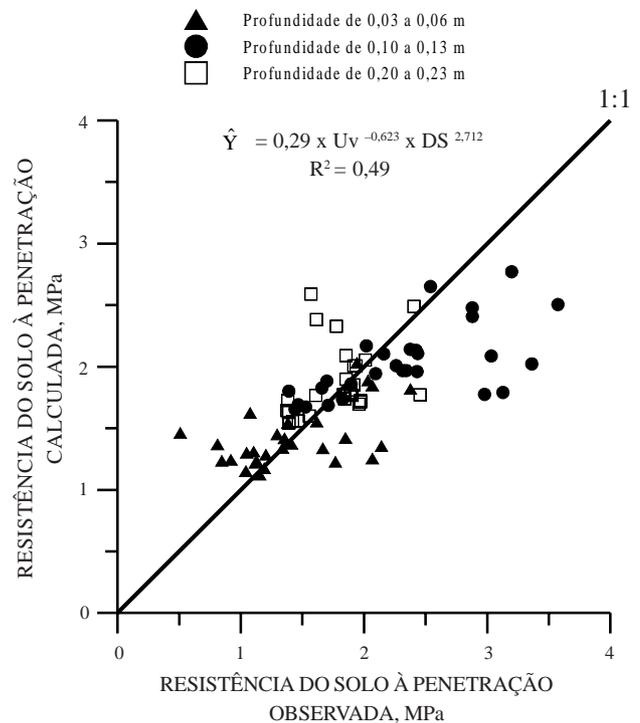


Figura 4. Valores de resistência à penetração observada e resistência calculada em diferentes profundidades.

2. A resistência à penetração teve grande variação temporal e foi associada à variação da umidade do solo para cada condição de densidade do solo ou estado de compactação.

3. Valores de resistência do solo à penetração restritivos ao crescimento das plantas foram atingidos na camada de 0,03-0,23 m de profundidade, durante o ciclo das culturas, quando a umidade gravimétrica do solo variou de 0,14 a $0,28 \text{ kg kg}^{-1}$.

4. O efeito da inclusão de plantas de cobertura de estação quente, com sistema radicular abundante e formador de poros biológicos, na redução da resistência mecânica do solo à penetração não foi observado durante o tempo estudado.

LITERATURA CITADA

- ABREU, S.L. Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um Argissolo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2000. 65p. (Tese de Mestrado)
- BENGHOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, 41:341-358, 1990.
- BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R. & COPELAND, S.M. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1384-1393, 1998.

- BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: physical, chemical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.463-478.
- CANARACHE, A. Penetr – a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil Till. Res.*, 16:51-70, 1990.
- CUBILLA, M.; REINERT, D.J.; AITA, C. & REICHERT, J.M. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. *R. Plantio Direto*, 71:29-32, 2002.
- EHLERS, W.W.; KÖPKE, F. HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and growth root of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.*, 3:261-275, 1983.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. CNPS. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa, 1999. 412p.
- GENRO JUNIOR, S.A. Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2002. 90p. (Tese de Mestrado)
- MEROTTO Jr., A. & MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:135-143, 1999.
- NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:183-186, 1987.
- PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.S. & TURATTI, A.L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:521-529, 2001.
- REINERT, D.J.; WOLKOWSKI, R.P.; LOWERY, B. & ARRIAGA, F.J. Compaction effects on plants water use. In: *PROCEEDINGS OF THE 2001 WISCONSIN FERTILIZER AGLIME & PEST MANAGEMENT CONFERENCE*, Madison, 2001. Anais. Madison, University of Wisconsin, 2001. p.222-232.
- SECCO, D. Estados de compactação de dois Latossolos e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 110p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of least limiting ranges of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, V.R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, intervalo hídrico ótimo e parâmetros físico-hídricos influenciando a produção de culturas anuais. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 180p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. *Ci. Rural*, 30:795-801, 2000.
- STRECK, C.A. Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento e produtividade do feijoeiro e da soja. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 105p. (Tese de Mestrado)
- TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M. & PARKER, J.J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-301, 1998.