

Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo

José Miguel Reichert⁽¹⁾, Douglas Rodrigo Kaiser⁽¹⁾, Dalvan José Reinert⁽¹⁾
e Ursino Federico Barreto Riquelme⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Solos, Avenida Roraima, nº 1.000, CEP 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: reichert@smail.ufsm.br, douglasrodrigokaiser@gmail.com, dalvan@smail.ufsm.br, federicobarreto1975@yahoo.com

Resumo – Os objetivos deste trabalho foram determinar a variação temporal da porosidade, da densidade e da resistência à penetração do solo, em quatro sistemas de manejo, e estudar seus efeitos sobre o crescimento radicular do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*). O experimento foi conduzido em Argissolo, em delineamento experimental de blocos ao acaso, com três repetições. Os tratamentos foram: plantio direto há 10 anos, preparo convencional, plantio em solo escarificado recentemente (Esc. recente) e plantio direto sobre área escarificada há 1 ano (Esc. 1 ano). A escarificação reduziu a densidade média do solo e aumentou a porosidade total durante o ciclo do feijoeiro. A maior densidade ocorreu na camada de 0,10–0,15 m dos sistemas plantio direto e Esc. 1 ano. A resistência à penetração foi a propriedade que melhor caracterizou e diferenciou os sistemas de manejo, as camadas com impedimento e o efeito do tempo de amostragem, porém não afetou o crescimento radicular do feijoeiro. Os efeitos da escarificação sobre a densidade e a resistência à penetração desapareceram um ano após a escarificação, o que indica a reconsolidação do solo.

Termos para indexação: *Phaseolus vulgaris*, compactação do solo, crescimento radicular, escarificação, plantio direto.

Temporal variation of soil physical properties and root growth of black beans in four management systems

Abstract – The objectives of this work were to determine the temporal variation in soil porosity, bulk density and penetration resistance, in four soil management systems, and study their effects on the root growth of black beans (*Phaseolus vulgaris*). The experiment was conducted in a Hapludalf using three replicates. The treatments consisted of: long-term (10 years) no-tillage, conventional tillage, chiseling of the long-term no-tillage (Chi. recent), and no-tillage in area after one year since chiseling (Chi. 1 year) of the long-term no-tillage area. Chiseling reduced soil bulk density and increased total porosity during the bean growing cycle. The greatest bulk densities were observed at 0.10 to 0.15 m in the no-tillage and in Chi. 1 year. Soil resistance was the best property to differentiate the effects of the soil management systems, the restricted layers, and time of sampling. However, soil resistance did not affect the root growth of black beans. The effects of the soil chiseling on bulk density and soil resistance disappeared after one year, which indicated soil consolidation.

Index terms: *Phaseolus vulgaris*, soil compaction, root growth, chiseling, no-tillage.

Introdução

As operações agrícolas que envolvem mobilização e tráfego de máquinas alteram a estrutura do solo e modificam as condições que determinam o ambiente de crescimento radicular. Em solo sob plantio direto, há modificações das condições do solo em taxas e direções diferentes das observadas em sistemas de manejo do solo que incluem intensa mobilização. O grau com que o sistema de plantio direto altera as propriedades físicas é muito variável e ainda pouco conhecido, geralmente pela grande variação de solos e

clima, além da grande variação de operações, tamanho de equipamentos e tipos de culturas (Reichert et al., 2007). Sob determinado manejo, as condições físicas do solo tenderão a um estado estável, que é dependente das condições edafoclimáticas. Assim, diferentes sistemas de manejo resultarão em diferentes condições físicas do solo, que poderão ser desfavoráveis à conservação do solo e à produtividade das culturas (Silva & Mielniczuk, 1998).

Os fenômenos climáticos ocorridos nos últimos anos têm contribuído para a degradação física do solo. No Rio Grande do Sul, em anos de El Niño, as

precipitações são acima do normal (Fontana & Almeida, 2002), e o solo permanece com alta umidade em grande parte do ciclo das culturas, o que reduz sua capacidade de suporte de carga e aumenta a suscetibilidade à compactação pelo tráfego de máquinas (Silva et al., 2002) e pisoteio animal. Em anos de La Niña, as precipitações são escassas (Fontana & Almeida, 2002), e o solo permanece com menor teor de água, o que reduz a disponibilidade às plantas e aumenta a resistência do solo ao crescimento de raízes. Esses efeitos são mais pronunciados nas áreas compactadas (Silva, 2003; Collares et al., 2006).

A escarificação esporádica do solo tem se mostrado eficiente em reduzir os efeitos imediatos da compactação. Cassel (1983) verificou aumento na densidade e na resistência do solo e redução da macroporosidade com o tempo, em área inicialmente revolvida, cujos maiores efeitos ocorreram nas linhas de tráfego das máquinas agrícolas. A escarificação de solos compactados proporciona aumento na taxa de infiltração e na condutividade hidráulica saturada, o que melhora a conservação da água no solo (Camara & Klein, 2005) e proporciona melhores condições físicas ao crescimento das plantas, mas não apresenta resultados positivos em áreas sob plantio direto bem manejado (Araújo et al., 2004). Os efeitos do preparo do solo também são dependentes das condições climáticas predominantes e da intensidade de tráfego aplicado ao solo posteriormente. Assim, aqueles efeitos podem ter duração diferenciada.

O solo revolvido tem maior porosidade e menor densidade, o que reduz a sua resistência à aplicação de cargas (Silva et al., 2002) e facilita a reconsolidação natural pelos ciclos de umedecimento e secagem e pelo tráfego de máquinas. No plantio direto, a maior atividade biológica (Mendes et al., 2003) e a ciclagem de raízes podem formar uma rede estável e contínua de poros no solo, mesmo que a sua densidade seja maior que a dos solos em outros sistemas de manejo. Essa maior continuidade dos poros pode facilitar a infiltração e redistribuição da água, pela criação de poros ou escarificação biológica apontada por Abreu et al. (2004), e permitir o crescimento das raízes das plantas.

A manutenção da umidade do solo reduz a sua resistência à penetração, mas ao mesmo tempo pode aumentar a suscetibilidade à compactação, pela redução na capacidade de suporte de carga (Silva et al.,

2002). O aumento da matéria orgânica e a presença de resíduos culturais proporcionam “elasticidade” ao solo (Braida et al., 2008), o que reduz a suscetibilidade à compactação.

O estudo de propriedades físicas do solo ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e duração das alterações provocadas por diferentes sistemas de manejo. Por serem parâmetros sensíveis, essas propriedades são importantes para estabelecer se houve degradação ou melhoria da qualidade do solo, em relação a um sistema de manejo determinado.

O objetivo deste trabalho foi determinar como os sistemas de manejo do solo influenciam a porosidade, a densidade e a resistência à penetração e os efeitos sobre o desenvolvimento radicular do feijoeiro em solo arenoso.

Material e Métodos

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, na região fisiográfica da Depressão Central do Estado, a 29°41'S, 53°48'W à altitude de 95 m. O clima da região enquadra-se na classificação Cfa de Köppen, ou seja, clima subtropical úmido, sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e a temperatura do mês mais frio entre -3 e 18°C (Moreno, 1961). O solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (Santos et al., 2006) e Typic Hapludalf (Soil Taxonomy). Esse Argissolo não apresenta horizonte E, e o horizonte Bt inicia a 0,80 m de profundidade. Os horizontes superficiais (Ap e A) são homogêneos e apresentam, em média, 610 g kg⁻¹ de areia, 300 g kg⁻¹ de silte e 120 g kg⁻¹ de argila. O horizonte Bt possui 360 g kg⁻¹ de argila, 210 g kg⁻¹ de silte e 430 g kg⁻¹ de areia.

A área utilizada para o experimento vinha sendo cultivada há 10 anos no sistema de plantio direto, com sucessão cultural aveia-preta (*Avena strigosa* Schieb)/soja (*Glycine max* L.). No ano de 2001, parte da área recebeu escarificação e preparo convencional e, em 2002, os manejos do ano anterior se repetiram e introduziu-se um novo manejo, constituído por uma escarificação. Os tratamentos estudados foram: sistema plantio direto por 10 anos (SPD), preparo convencional de área mantida por 9 anos sob plantio direto (PC), plantio sobre área escarificada em 2002

(Esc. recente) e plantio sobre área escarificada em 2001 (Esc. 1 ano). A área que recebeu a escarificação em 2001 estava há 9 anos sob semeadura direta. A área que foi escarificada em 2002 estava há 10 anos sob plantio direto. Assim, o tratamento Esc. 1 ano reflete o efeito residual da escarificação um ano depois do preparo, enquanto o Esc. recente reflete o efeito imediato da escarificação sobre as propriedades do solo.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com três repetições. As parcelas tinham dimensões de 5x15 m. O preparo convencional caracterizou-se por uma aração e uma gradagem. O trator utilizado foi um MF 275, com um arado de discos com três discos lisos. A profundidade máxima de operação foi de 0,3 m. A gradagem foi feita com uma grade de discos, à profundidade de 0,1 m. A escarificação foi realizada com um escarificador Jumbo de três hastes inclinadas, espaçadas de 0,4 m, à profundidade de 0,4 m. As operações foram realizadas no dia 14/12/2002, exceto a Esc. 1 ano, que foi feita em dezembro de 2001. O plantio direto foi realizado sob cobertura de aveia-preta, a qual foi dessecada duas semanas antes da semeadura.

Na safra 2002/2003, foi cultivado feijão-preto, cultivar FT BIO NOBRE tipo III, semeado em 16/12/2002, com espaçamento entre linhas de 0,45 m e 11 sementes por metro linear. Foram aplicados 400 kg ha⁻¹ da fórmula 5-20-20. A semeadura foi realizada à profundidade de 5 cm, com uma semeadora-adubadora, marca Sfill-Stara, que possui discos de corte e sulcadores do tipo facão. A aplicação de nitrogênio em cobertura foi realizada no dia 8/1/2002, na dose de 200 kg ha⁻¹ de ureia. Realizaram-se aplicações de herbicidas, para o controle de gramíneas e de folhas largas, e de fungicidas e inseticidas, de acordo com as necessidades da cultura.

A granulometria e a densidade de partículas foram determinadas nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, antes da instalação do experimento em 2002. Para a determinação granulométrica, seguiu-se metodologia da pipeta. Como dispersante, foi usado o NaOH e não se realizou a destruição da matéria orgânica. A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico.

Aos 18 e 69 dias após a emergência (DAE), foram coletadas amostras com estrutura preservada em anéis metálicos com 0,054 m de diâmetro e com

0,03 m de altura, em duas camadas (0,00-0,05 e de 0,10-0,15 m), para a determinação da densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo, conforme Oliveira (1968).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada com um penetrômetro digital manual (Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer), com ponta cônica com ângulo de penetração de 30° e base de 12,83 mm de diâmetro, com armazenamento eletrônico dos dados. As leituras foram realizadas a cada 0,015 m até os 0,30 m de profundidade, em 18 datas: 12, 22, 26, 29, 32, 35, 39, 42, 46, 50, 53, 57, 60, 63, 67, 71, 74 e 78 dias após a emergência (DAE). Aos 42 e 46 DAE, a RP não pôde ser avaliada, pois foi maior que a capacidade de medição do aparelho (5 MPa). Nos mesmos dias, determinou-se a umidade volumétrica do solo com refletômetro de domínio de tempo, em três camadas (0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m). Utilizaram-se hastes fixas de 0,2 m de comprimento, inseridas no solo com ângulo de acordo com a espessura da camada avaliada, que permaneceram no solo durante todo o desenvolvimento da cultura do feijoeiro. Um modelo não linear (Busscher, 1990) foi obtido entre a resistência do solo à penetração, densidade do solo e umidade volumétrica, para as camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,15 m, pelo método PROC NLIN (SAS Institute, 1991).

Quando a cultura se encontrava na fase de florescimento (38 DAE), avaliaram-se o desenvolvimento e a distribuição radicular, por meio do método do perfil (Böhm, 1979). O perfil foi feito perpendicularmente à linha de semeadura, com a parede vertical distante 0,03 m da planta. Foram utilizadas varetas de metal, para retirar uma camada de aproximadamente 0,015 m do perfil e expor cuidadosamente as raízes. Após a exposição, foi colocado um retângulo de 0,5x0,30 m, subdividido com fios de náilon, em malha de 0,05x0,05 m, para desenhar a distribuição do sistema radicular.

A análise estatística constou de análise de variância, comparações de médias pelo teste DMS a 5% de probabilidade e análise de regressão linear e não linear, usando o SAS (SAS Institute, 1991). Para análise dos dados de densidade e porosidade do solo, consideraram-se o sistema de manejo como fator principal e a camada como fator secundário, tendo-se constituído um modelo de análise com parcela subdividida.

Resultados e Discussão

Não houve interação entre camadas e sistemas de manejo para a densidade do solo (Ds) (Tabela 1). Na comparação de sistemas de manejo, as médias de Ds dos tratamentos SPD e Esc. 1 ano não diferiram entre si, respectivamente com 1,66 e 1,71 Mg m⁻³, mas foram maiores do que no PC e Esc. recente, respectivamente com 1,55 e 1,57 Mg m⁻³. A menor Ds está associada à mobilização do solo, à semelhança do observado por Stone & Silveira (1999), Abreu et al. (2004) e Collares et al. (2006). A maior densidade do solo no Esc. 1 ano, em relação ao Esc. recente, indica que, com o passar do tempo, os efeitos da escarificação tendem a desaparecer rapidamente (menos de 1 ano) nesse solo, que atingiu estado de compactação semelhante ao PD conduzido por 10 anos. Esse comportamento é explicado pelo fato de que com a escarificação ocorre a desestruturação do solo e os agregados são menos resistentes às cargas (Silva et al., 2002).

Na camada de 0,00–0,05 m a Ds foi inferior à da camada de 0,10–0,15 m, nas duas datas avaliadas, em todos os sistemas de manejo. Essa camada com alta densidade em SPD foi denominada por Reichert et al. (2009) de pé-de-plantio direto, em analogia à formação de camadas compactadas em profundidades maiores no preparo convencional por aração e gradagem. A camada mais superficial (0,00–0,05 m) é menos densa em razão da mobilização pelos discos das semeadoras, da atividade biológica e da atividade radicular, conforme Genro Junior et al. (2004), e também pelos ciclos de umedecimento e secamento. Em relação à primeira, na segunda data os valores de Ds foram numericamente superiores nos quatro sistemas de manejo e duas profundidades. Possivelmente, esse aumento da densidade ocorreu em consequência do processo de consolidação do solo e rearranjo interno da estrutura pelos ciclos de umedecimento e secagem.

No presente estudo, o processo de compactação diferenciado entre tratamentos pode ser considerado independente da densidade de partículas e da textura do solo, pois essas não variaram entre os sistemas de manejo. A densidade de partículas média foi de 2,57 Mg m⁻³, o teor de areia fina foi de 420 g kg⁻¹, o de areia grossa foi de 270 g kg⁻¹, o de silte foi de 230 g kg⁻¹ e o de argila foi de 80 g kg⁻¹. A granulometria do solo influencia o processo de compactação, pois modifica a distribuição de tamanho dos poros, retenção de água, densidade do solo e resistência do solo à penetração (Albuquerque et al., 2001).

Com base na Ds de 1,75 Mg m⁻³, considerada restritiva para o desenvolvimento das plantas nesse Argissolo arenoso (Collares et al., 2006), a Ds restritiva foi atingida no Esc. 1 ano na camada de 0,10–0,15 m aos 18 DAE, e no Esc. recente na camada 0,10–0,15 m e no Esc. 1 ano nas duas camadas avaliadas aos

Tabela 1. Densidade, microporosidade, macroporosidade e porosidade total do solo submetido a diferentes manejos, às profundidades de 0,00–0,05 e 0,10–0,15 m, aos 18 e 69 dias após a emergência (DAE)⁽¹⁾.

Tratamento	Profundidade (m)		Média
	0,00–0,05	0,10–0,15	
18 DAE			
Densidade do solo (Mg m ⁻³)			
SPD	1,58	1,74	1,66a
PC	1,49	1,61	1,55b
Esc. recente	1,45	1,70	1,57b
Esc. 1 ano	1,64	1,79	1,71a
Média	1,54b	1,71a	
Microporosidade (m ³ m ⁻³)			
SPD	0,26	0,23	0,24b
PC	0,27	0,26	0,27a
Esc. recente	0,28	0,25	0,27a
Esc. 1 ano	0,26	0,24	0,25ab
Média	0,27a	0,25b	
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)			
SPD	0,15	0,10	0,13a
PC	0,13	0,11	0,12a
Esc. recente	0,21	0,09	0,15a
Esc. 1 ano	0,10	0,08	0,09a
Média	0,15a	0,09b	
Porosidade total (m ³ m ⁻³)			
SPD	0,41	0,33	0,37ab
PC	0,39	0,37	0,38ab
Esc. recente	0,49	0,34	0,42a
Esc. 1 ano	0,36	0,32	0,34b
Média	0,42a	0,34b	
69 DAE			
Densidade do solo (Mg m ⁻³)			
SPD	1,71	1,80	1,75a
PC	1,63	1,74	1,68b
Esc. recente	1,62	1,75	1,68b
Esc. 1 ano	1,75	1,80	1,77a
Média	1,67b	1,77a	
Microporosidade (m ³ m ⁻³)			
SPD	0,28	0,25	0,26ab
PC	0,28	0,28	0,28a
Esc. recente	0,27	0,27	0,27ab
Esc. 1 ano	0,26	0,25	0,26b
Média	0,27a	0,26b	
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)			
SPD	0,08	0,08	0,08a
PC	0,12	0,10	0,11a
Esc. recente	0,12	0,08	0,10a
Esc. 1 ano	0,08	0,08	0,08a
Média	0,10a	0,08a	
Porosidade total (m ³ m ⁻³)			
SPD	0,36	0,33	0,35b
PC	0,39	0,37	0,38a
Esc. recente	0,39	0,35	0,37a
Esc. 1 ano	0,34	0,33	0,34b
Média	0,37a	0,34b	

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais nas linhas ou nas colunas, para cada época de amostragem, não diferem entre si pelo teste DMS (p<5%).

69 DAE. Reinert et al. (2008) verificaram deformações morfológicas das raízes de plantas de cobertura nesse solo, quando a densidade estava acima de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$. Esse valor de densidade também está dentro da faixa de $1,7$ a $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$, considerada restritiva por Reichert et al. (2007) ao crescimento normal das raízes de culturas agrícolas em solo arenoso. Assim, a densidade pode ser usada como base na avaliação do efeito dos sistemas de manejo sobre a estrutura do solo (Reichert et al., 2007).

Em relação à porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo, não houve interação entre sistemas de manejo e camadas (Tabela 1), mas houve diferença entre as camadas e também entre os sistemas de manejo. A camada de $0,00-0,05 \text{ m}$ teve maior porosidade total do que a de $0,10-0,15 \text{ m}$, coerente com a menor densidade do solo. A degradação da estrutura do solo, que teve como consequência a redução de porosidade total, foi mais evidenciada pela redução da macroporosidade. A porosidade foi menor nos sistemas sem revolvimento (SPD e Esc. 1 ano) comparados aos com revolvimento (PC e Esc. recente), nas duas datas de amostragem, o que está de acordo com os dados de densidade do solo discutidos anteriormente. A macroporosidade aos 18 DAE foi similar entre os tratamentos, mas superior na camada de $0,00-0,05 \text{ m}$, em relação à da camada $0,10-0,15 \text{ m}$. Aos 69 DAE, não houve diferença entre tratamentos nem entre profundidades. A microporosidade aos 18 DAE foi maior na camada de $0,00-0,05 \text{ m}$, comparada à de $0,10-0,15 \text{ m}$, e entre os sistemas foi menor no SPD. Aos 69 DAE, foi menor no SPD e no Esc. 1 ano. Os macroporos são a classe de poros mais influenciada pelos sistemas de manejo e de plantas de cobertura e pela compactação do solo, o que se reflete na condutividade hidráulica do solo (Abreu et al., 2004).

A RP não pôde ser avaliada aos 42 e 46 DAE, pois foi maior do que a capacidade de medição do aparelho (5 MPa), em todos os sistemas de manejo, em razão da baixa umidade do solo. Em condição de alta umidade, houve pequena diferença entre a RP dos sistemas com ou sem mobilização. Contudo, à medida que o solo foi secando no SPD e Esc. 1, a RP aumentou em profundidade e com o transcorrer do tempo (Figuras 1 e 2). Os sistemas SPD e Esc. 1 ano apresentaram maior incremento na RP, com menor variação na umidade do solo (Figura 2), pois tiveram maior densidade (Tabela 1). Isso demonstra a importância de se avaliar a RP em distintas umidades

do solo (Genro Junior et al., 2004), ao invés de se fazer essa medição apenas na capacidade do campo, como sugerido por Lowery & Morrison (2002). Além disso,

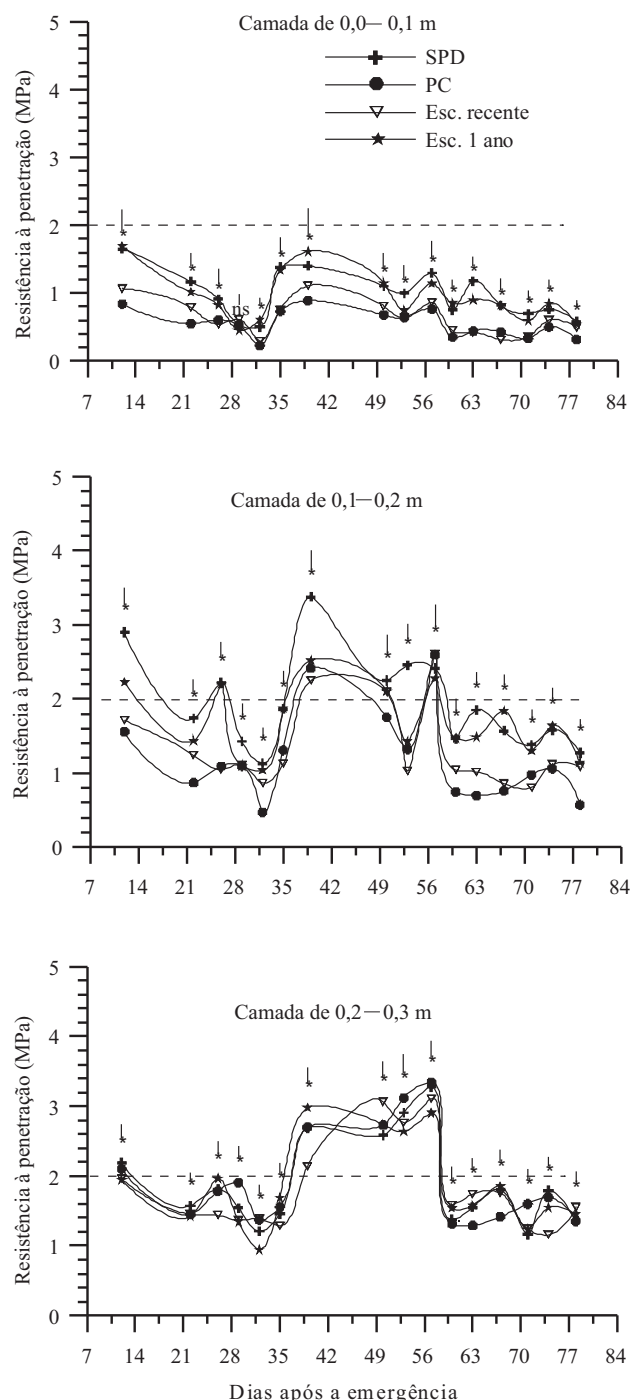


Figura 1. Variação da resistência à penetração em diferentes épocas de amostragem, nos diferentes tratamentos. Barras verticais comparam os valores de RP, pelo teste DMS ($p < 5\%$). A linha horizontal pontilhada representa o limite de 2 MPa .

o efeito restritivo da alta resistência do solo, sobre o crescimento radicular das plantas, é dependente do tempo em que o solo permanece com alta resistência (Bengough et al., 2006), o que não é possível verificar com medições pontuais e com grandes intervalos de tempo.

A RP foi diferente entre os sistemas nas três camadas analisadas, exceto aos 29 DAE na camada mais superficial do solo (Figura 1). Para os 12 DAE, a RP foi menor no preparo convencional (PC) em comparação com os outros manejos de solo, nas camadas de 0,0–0,1 e 0,1–0,2 m, atribuído à maior mobilização do solo no preparo convencional. Aos 39 DAE, nas camadas de 0,1–0,2 e 0,2–0,3 m, em todos os tratamentos, a RP foi restritiva ao crescimento de raízes (acima de 2 MPa) em consequência da não ocorrência de chuva e, portanto, da baixa umidade do solo. Na análise dessas camadas, observou-se ampla variação da RP entre sistemas, camadas e ao longo do tempo.

Em condições de baixa umidade do solo ($0,08$ e $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), verificaram-se baixos valores de RP (1 a $1,3 \text{ MPa}$) nos sistemas de manejo PC e Esc. recente, ao contrário do observado no SPD, que teve RP próxima a 3 MPa na camada de 0,1–0,2 m, aos 12 DAE (Figura 1). A RP no SPD e Esc. 1 ano foram maiores do que 2 MPa , considerados limitantes para a maioria das culturas (Taylor et al., 1966). Todos os sistemas de manejo tiveram baixa RP aos 32 DAE (menor que $1,5 \text{ MPa}$), em consequência da alta umidade do solo resultante da ocorrência de chuva nesse dia (85 mm). Até os 0,2 m de profundidade, os tratamentos PC e Esc. recente tiveram menor RP, comparados com os sistemas SPD e Esc. 1 ano, tendo ocorrido um comportamento inverso a partir da camada de 0,2–0,3 m, o que pode ser atribuído ao “pé-de-arado” formado pelo preparo convencional adotado nessa área no passado. A RP aos 50 DAE mostra que até os 0,09 m nenhum tratamento atingiu o valor crítico, enquanto no sistema SPD teve maior RP até os 0,2 m (Figuras 1 e 3).

Portanto, ao longo do ciclo do feijão, a RP (Figura 1) variou conforme a flutuação da umidade do solo, para cada manejo de solo (Figura 2). Essa variação teve amplitudes diferentes para sistemas de manejo e profundidades diferentes, à semelhança do observado por Stone & Silveira (1999), Stone et al. (2002), Genro Junior et al. (2004) e Collares et al. (2006).

Os resultados de RP, em todos os sistemas nos diferentes DAE, foram consequência, principalmente, da umidade do solo (Figura 2) e da profundidade. Nas camadas 0,00–0,05 e 0,10–0,15 m houve

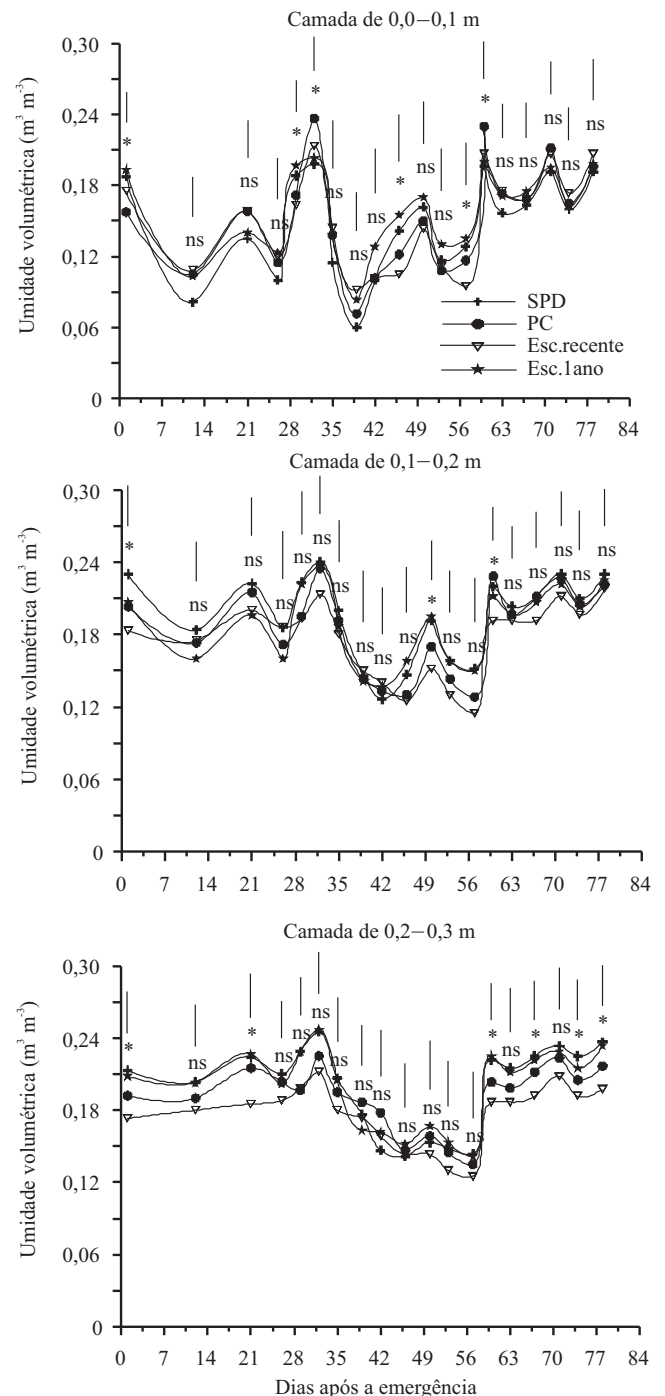


Figura 2. Variação da umidade volumétrica (U_v) em diferentes épocas de amostragem, nos diferentes tratamentos. Barras verticais comparam os valores de U_v , pelo teste DMS ($p < 5\%$).

decréscimo linear da RP com o aumento da umidade. Assim, a RP varia inversamente com a umidade do solo

e diretamente com a densidade do solo (Genro Junior et al., 2004; Collares et al., 2006). Esse decréscimo foi

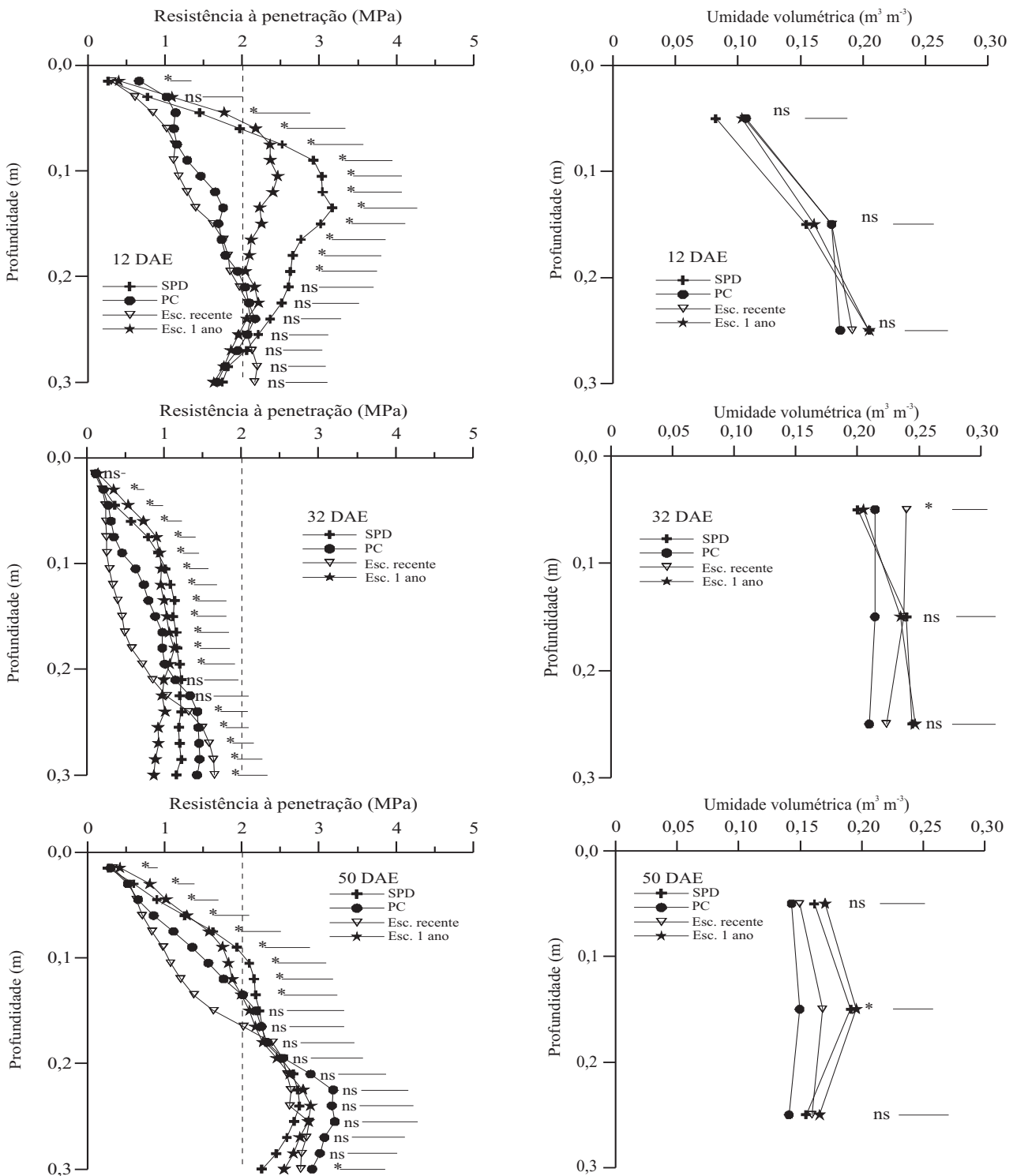


Figura 3. Resistência à penetração e umidade volumétrica aos 12, 32 e 50 dias após emergência (DAE), nos diferentes tratamentos. Barras horizontais comparam os valores de RP, pelo teste DMS ($p < 5\%$). A linha vertical pontilhada representa o limite de 2 MPa.

mais acentuado na camada de 0,10–0,15 m, em relação à de 0,00–0,05 m.

A maior parte dos valores de RP (Figura 3), na camada de 0,00–0,05 m, foi inferior ao limite de 2 MPa, considerado crítico por Taylor et al. (1966) para solos de textura arenosa à média. Os maiores valores de RP foram verificados quando o solo se encontrava mais seco (40 a 57 DAE), na faixa de umidade inferior a $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Na camada de 0,10–0,15 m, os valores maiores que 2 MPa foram observados quando a umidade do solo se encontrava entre $0,15$ e $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, tendo ultrapassado os 3 MPa em algumas situações. As equações lineares ajustadas da RP em função da umidade volumétrica (U_v) explicaram menos de um quarto da variação da RP (Figura 4). Em trabalho semelhante (Genro Junior et al., 2004), também com análises feitas diretamente no campo, em Latossolo Vermelho, a U_v explicou entre 45 e 61% da variação da RP. O baixo valor do coeficiente de determinação pode ser atribuído à variabilidade dessas propriedades em campo, mas esse tipo de relação mostra diferença da RP em cada camada, em razão do aumento na densidade do solo.

Um modelo não linear foi obtido pelo procedimento PROC NLIN (SAS Institute, 1991) com os dados de RP, D_s e U_v , nas camadas de 0,00–0,05 e 0,10–0,15 m. O modelo obtido foi:

$$RP = 0,01841 \times U_v^{-0,8465} \times D_s^{4,9567}, R^2 = 0,234 (p < 0,0001).$$

Essa equação não linear explica apenas 23% da variação da RP em função da variação da U_v e D_s .

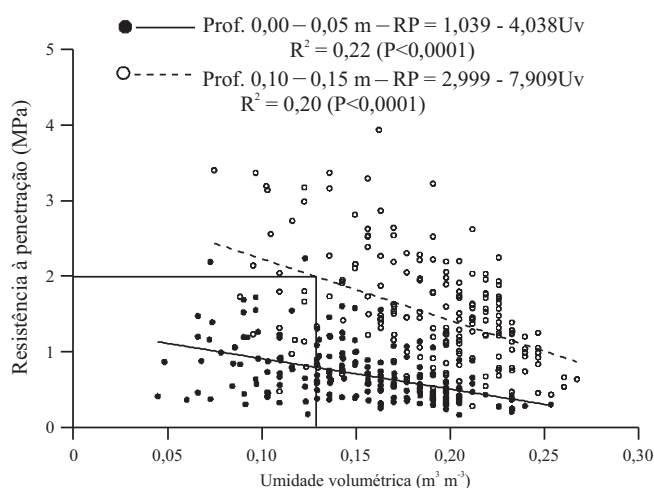


Figura 4. Valores de resistência à penetração, em função da umidade do solo, para duas profundidades. A linha contínua que parte de 2 MPa indica o valor mínimo de umidade, para que a resistência não seja limitante ao feijoeiro.

Resultados encontrados por Silva (2003), para o mesmo solo, mas com RP medida em laboratório, em amostras com estrutura preservada, indicaram $R^2 = 0,71$, enquanto Genro Junior et al. (2004) encontraram em Latossolo Vermelho, um $R^2 = 0,49$, com RP medida diretamente no campo. O modelo ajustado indica que a RP passa a se tornar crítica (acima de 2 MPa) na camada de 0,10–0,15 m, onde a densidade do solo é maior (Tabela 1), quando a umidade do solo fica abaixo de $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figuras 1, 2 e 3). A camada superficial (0,00–0,05 m) não atingiu a RP crítica (Figuras 1, 2 e 3), pois nessa camada a densidade foi menor em todos os sistemas de manejo (Tabela 1). No entanto, existe a necessidade de se ampliar o banco de dados e os estudos entre essas três variáveis, para uma melhor modelagem da compactação do solo, e o estabelecimento de limites críticos de propriedades físicas do solo para o crescimento e desenvolvimento das culturas.

Apesar de a resistência à penetração ter superado 2 MPa, o crescimento do sistema radicular, em profundidade, foi pouco afetado pelos sistemas de manejo, pois, em todos os sistemas, as raízes atingiram a profundidade de 0,30 m (Figura 5). No entanto, observou-se maior quantidade de raízes secundárias no Esc. 1 ano e no PC. Apesar dessas variações na quantidade e distribuição das raízes, principalmente das raízes secundárias, não houve diferença de produtividade de feijão entre os sistemas de manejo, pois não ocorreu deficiência hídrica nas camadas exploradas pelas raízes (Figura 2).

Isso pode ter ocorrido pelo fato de a resistência ter se mantido abaixo de 2 MPa até os 35 DAE, e esse foi o período de maior crescimento vegetativo das plantas. Além disso, a macroporosidade não variou significativamente entre os manejos, e os macroporos são os caminhos preferenciais para o crescimento das raízes (Rasse & Smucker, 1998). No entanto, em trabalhos desenvolvidos por Collares et al. (2006), ocorreu restrição ao crescimento radicular do feijão quando a resistência do solo ficou acima de 2 MPa nas fases iniciais do ciclo da cultura. Assim, o efeito restritivo da resistência do solo à penetração depende da fase de desenvolvimento da cultura e do número de dias em que o solo permanece com alta resistência (Benghough et al., 2006). Por essa razão, o monitoramento contínuo da resistência do solo é fundamental para a interpretação dos efeitos sobre o crescimento radicular da cultura.

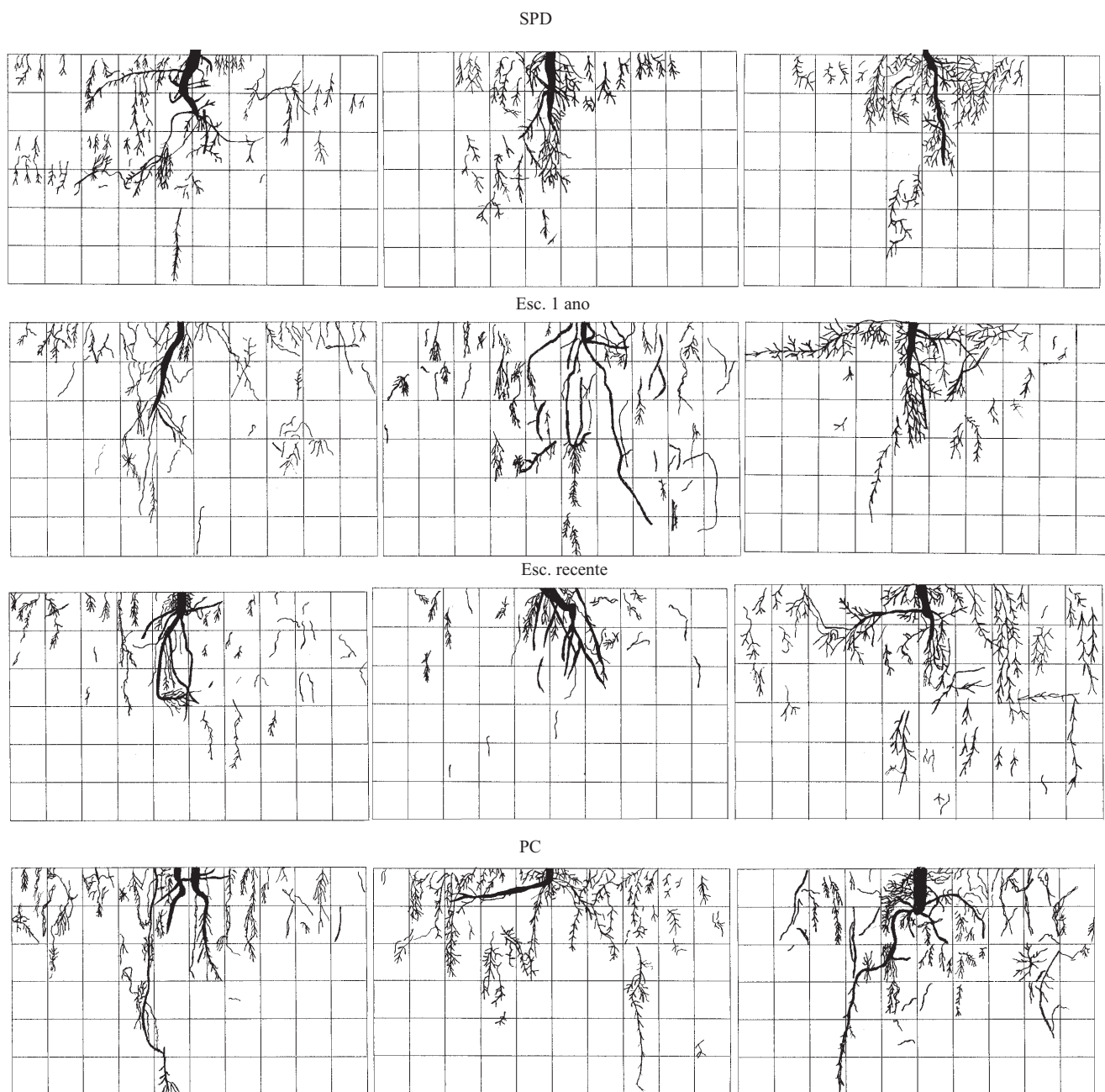


Figura 5. Distribuição do sistema radicular do feijoeiro no perfil (0,5x0,3 m), em diferentes sistemas de manejo do solo. Cada quadricula tem lado de 5 cm.

Conclusões

1. A mobilização do solo pela lavração e pela escarificação reduz a densidade média do solo e aumenta sua porosidade total.

2. A resistência do solo à penetração é a propriedade que melhor caracteriza e diferencia os sistemas de manejo, as camadas com diferentes graus

de impedimento à penetração e o efeito da época de amostragem.

3. Resistência do solo à penetração não afeta significativamente o crescimento radicular do feijoeiro, quando os valores acima de 2 MPa ocorrem depois dos 35 dias após a emergência das plantas.

4. O efeito da escarificação desaparece um ano após a escarificação do solo Argissolo arenoso.

Referências

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.519-531, 2004.
- ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.717-723, 2001.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T.T.; COSTA, A.C.S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico após treze anos de semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.495-504, 2004.
- BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; MCKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*, v.57, p.437-447, 2006.
- BÖHM, W. *Methods of studying root systems*. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 188p.
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.477-485, 2008.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of American Society Agricultural Engineering*, v.33, p.519-524, 1990.
- CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.789-796, 2005.
- CASSEL, D.K. Spatial and temporal variability of soil physical-properties following tillage of Norfolk loamy sand. *Soil Science Society of American Journal*, v.47, p.196-201, 1983.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, p.1663-1674, 2006.
- FONTANA, D.C.; ALMEIDA, T.S. de. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.10, p.135-145, 2002.
- GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.477-484, 2004.
- LOWERY, B.; MORRISON, J.E. Soil penetrometers and penetrability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 4: physical methods*. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p.363-385. (Soil Science Society of America book series, 5).
- MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.435-443, 2003.
- MORENO, J.A. *Clima do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonizações, Seção de Geografia, 1961. 46p.
- OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.3, p.197-200, 1968.
- RASSE, D.P.; SMUCKER, A.J.M. Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations. *Plant and Soil*, v.204, p.203-212, 1998.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERRETA, C.A.; SILVA, L.S. da; REICHERT, J.M. (Ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.5. p.49-134.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Research*, v.102, p.242-254, 2009.
- REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1805-1816, 2008.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- SAS INSTITUTE. *SAS/STAT procedure guide for personal computers*: version 5. Cary: SAS Institute, 1991.
- SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.311-317, 1998.
- SILVA, V.R. *Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação*. 2003. 171p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II - Grau de saturação em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.9-15, 2002.
- STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I - Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, p.207-212, 2002.
- STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, p.83-91, 1999.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JÚNIOR, J.J. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, v.102, p.18-22, 1966.

Recebido em 23 de setembro de 2008 e aprovado em 7 de fevereiro de 2009