

DENSIDADE DO SOLO, ATRIBUTOS QUÍMICOS E SISTEMA RADICULAR DO MILHO AFETADOS PELO PASTEJO E MANEJO DO SOLO⁽¹⁾

V. R. SILVA⁽²⁾, D. J. REINERT⁽³⁾ & J. M. REICHERT⁽³⁾

RESUMO

A integração lavoura-pecuária é uma alternativa de renda dos produtores no sul do Brasil. Entretanto, o pisoteio animal e, ou, o preparo de solo podem compactá-lo, prejudicando o crescimento radicular e a produtividade das plantas. Estudaram-se os efeitos do pisoteio animal em regime de pastejo contínuo durante o inverno/primavera e do impacto do plantio direto e do preparo convencional de solo no estado de compactação, atributos químicos e distribuição radicular. Em Podzólico Vermelho-Amarelo de textura superficial franca, foi implantada uma pastagem de estação fria composta por aveia (*Avena strigosa* Schreb) e azevém (*Lolium multiflorum* L.). A carga animal variou conforme o crescimento da pastagem. Em dezembro de 1996, foi implantada a cultura do milho (*Zea mays* L.) para a produção de silagem, usando os seguintes tratamentos: plantio direto na área não pastejada, plantio direto após o pastejo, preparo convencional de solo na área não pastejada e preparo convencional de solo após pastejo. As avaliações apresentadas neste estudo são referentes ao terceiro ano de cultivo, no qual houve um período de pastejo de 107 dias. Aos 45 dias da emergência do milho, foram abertas trincheiras (100 x 40 cm) para visualizar a distribuição do sistema radicular e coletar amostras de solo, a cada 5 cm, para caracterização química e determinação da densidade do solo e de raízes. Ao longo do perfil (0-40 cm), o desenho da distribuição de raízes indicou maior quantidade de raízes no preparo convencional de solo, concordando com os resultados de densidade de raízes. O pisoteio animal não teve efeito sobre as características físicas, possivelmente pelo fato de o resíduo da pastagem permanecer próximo a 1,0 Mg ha⁻¹ de matéria seca. A densidade do solo no plantio direto, na camada de 5-10 cm, foi de 1,41 Mg m⁻³, tanto na área pastejada como na não pastejada. No preparo convencional de solo, esses valores foram de 1,15 Mg m⁻³, na área pastejada e de 1,12 Mg m⁻³, na área não pastejada. A produtividade de grãos de milho (4,55 Mg ha⁻¹) e de silagem (34,66 Mg ha⁻¹) não foi afetada pelo pastejo ou pelo preparo do solo. O sistema de manejo do solo teve maior influência na densidade do solo do que o pisoteio animal, considerando o controle da carga animal ajustado ao crescimento da pastagem.

Termos de indexação: plantio direto, preparo convencional, pisoteio animal, raízes.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em junho de 1999 e aprovado em novembro de 1999.

⁽²⁾ Doutorando em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: a9760360@alunop.ufsm.br

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

SUMMARY: *SOIL BULK DENSITY, CHEMICAL ATTRIBUTES AND CORN ROOT DISTRIBUTION AS AFFECTED BY GRAZING AND SOIL MANAGEMENT*

*Farming and cattle-raising integrated system is an alternative to increase farmers' yield in southern Brazil (29° 45' south and 53° 42' west Greenwich). However, grazing and, or, soil tillage may cause soil compaction at levels that can affect root growth and crop yield. The effect of animal trampling in continuous grazing during winter/spring (cold season) and soil management system effects on soil compaction, chemical attributes and root distribution were studied. The soil used was a Red-Yellow Podzolic (Hapludalf), with a loam surface texture. A cold season pasture composed of oats (*Avena strigosa* Schreb) and italian ryegrass (*Lolium multiflorum* L) was seeded, and an animal load adjusted to pasture growth was maintained. In December 1996, corn (*Zea mays* L) was planted for silage production, using the following treatments: no tillage after grazing, no tillage without previous grazing, conventional system after grazing, and conventional system without previous grazing. The evaluations shown in this study were related to the third-year data of the experiment, with a grazing period of 107 days. Forty-five days after corn emergence, trenches were dug (100 x 40 cm) for drawing the root distribution and collecting soil samples, in 5 cm increments, for soil chemical analyses, bulk density and root density determinations. Root distribution drawings showed more root bulk in the conventional system compared to no tillage, similarly to the results with Newman's counting method (root density). Animal trampling had no effect on soil physical properties, because pasture biomass was kept around 1.0 Mg ha⁻¹ of dry matter. Soil bulk density, for the 5-10 cm depth, was 1.41 Mg m⁻³, for no tillage with and without previous grazing. For the conventional system, soil bulk density was of 1.15 Mg m⁻³, for previous grazing, and of 1.12 Mg m⁻³, for non-grazed area. Grain (4.55 Mg ha⁻¹) and silage (34.66 Mg ha⁻¹) yields were not affected by grazing or soil tillage. Soil tillage system had a greater influence on soil compaction than animal trampling, under controlled animal load adjusted to pasture growth.*

Index terms: no tillage, conventional tillage, animal trampling, root.

INTRODUÇÃO

O preparo do solo e o pisoteio animal influenciam as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, podendo afetar o sistema radicular e a produção das culturas. No sul do Brasil, em áreas de integração lavoura-pecuária, o período destinado ao pastejo ocorre geralmente no período de inverno-primavera e coincide com a época do ano em que o solo permanece com elevada umidade, o que pode favorecer o processo de compactação (Bassani, 1996). A compactação do solo é um processo de densificação, no qual há um aumento da resistência à penetração no solo e redução da porosidade total, da macroporosidade, da permeabilidade e da infiltração de água, resultantes de cargas aplicadas na superfície do solo (Soane & Ouwerkerk, 1994).

A compactação é comumente causada pelo tráfego de máquinas por ocasião da semeadura, tratos culturais, colheita e transporte (Hakansson et al., 1988) e pelo pisoteio de animais em áreas de pastejo (Trein et al., 1991; Soane & Ouwerkerk, 1994). Segundo Tanner & Mamaril (1959), Train et al. (1991) e Gaggero (1998), o tráfego intenso de animais,

especialmente em solos argilosos úmidos, causa compactação, com redução severa da macroporosidade, aumento da densidade do solo e redução da infiltração de água.

Após pastejo intensivo, Tanner & Mamaril (1959) encontraram redução de 20% na produção de pastagens, enquanto Train et al. (1991) encontraram aumento de produtividade de milho com o uso de preparo convencional de solo após o pisoteio de animais durante o inverno, quando comparado com o plantio direto de milho. Em Podzólico Vermelho-Amarelo, Bassani (1996) não encontrou diferenças de produtividade de milho após o pastejo de inverno entre o plantio direto e o preparo convencional, quando a carga animal foi ajustada ao crescimento da pastagem. Gaggero (1998) também não encontrou diferenças entre esses dois sistemas de manejo de solo, embora tenha encontrado redução de 38% na macroporosidade e aumento de 15% na densidade do solo na área pastejada pelo gado durante o inverno, em Podzólico Vermelho-Escuro.

O sistema radicular das culturas apresenta diferentes graus de tolerância à compactação, porém, de maneira generalizada, as plantas respondem a

valores críticos, a partir dos quais se iniciam restrições ao seu crescimento. Em Podzólico Vermelho-Escuro, Mello Ivo & Mielniczuk (1999) observaram que, na camada superficial (0-5 cm), a densidade de comprimento radicular (cm de raiz por cm³ de solo) sob plantio direto foi significativamente maior que sob preparo convencional de solo, sendo essa situação invertida na camada de 10-15 cm de profundidade e similar na de 15-20 cm.

A relação entre o crescimento de raízes e o de plantas em camadas compactadas artificialmente, em vasos, tem sido relatada para diferentes solos (Cintra & Mielniczuk, 1983; Alvarenga et al., 1996; Nadian et al., 1996). Nadian et al. (1996), em solo com 224 g kg⁻¹ de argila e 525 g kg⁻¹ de silte, encontraram que densidades do solo acima de 1,20 Mg m⁻³ fizeram com que a massa de matéria seca de plântulas e o comprimento radicular de trevo subterrâneo (*Trifolium subterraneum*) decrescessem em todos os níveis de aplicação de fósforo. Alvarenga et al. (1996) determinaram que, em Latossolo Vermelho-Escuro muito argiloso, a densidade crítica do solo ao desenvolvimento radicular de diversas leguminosas ficou em torno de 1,25 Mg m⁻³, para a crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), o feijão de porco (*Canavalia ensiformes*) e o feijão-bravo-do-Ceará (*Canavalia brasiliensis*), e acima de 1,35 Mg m⁻³, para o guandu (*Cajanus cajan*). Em todas as espécies, verificou-se maior crescimento de raízes na superfície. Da mesma forma, Cintra & Mielniczuk (1983) encontraram que a densidade do solo de 1,30 Mg m⁻³ e a resistência do solo à penetração de 1.100 kPa reduziram 50% do sistema radicular de várias culturas em um Latossolo Roxo muito argiloso. Em condições de campo, Carvalho Jr. et al. (1998) verificaram que densidade do solo acima de 1,60 Mg m⁻³ provocou restrições ao crescimento de raízes e diminuição da infiltração de água no solo em Latossolo Vermelho-Escuro com 200 g kg⁻¹ de argila.

Em solo arenoso, Pabin et al. (1998) determinaram que a redução de 40% do comprimento de raízes é crítica à produtividade das plantas, sendo essa densidade crítica dependente da umidade do solo. Além do aumento da resistência à penetração no solo com o aumento da densidade, a diminuição do volume dos macroporos tem grande influência no crescimento radicular (Hoffmann & Jungk, 1995).

São poucos os trabalhos que quantificam o desenvolvimento e a densidade de raízes com a produtividade das culturas, principalmente quando comparado com o conhecimento alcançado no estudo da parte aérea (Köpke, 1981). Os métodos usuais para avaliação do sistema radicular são normalmente trabalhosos e destrutivos (Russel, 1977) e de baixa precisão e repetibilidade (Köpke, 1981). Entretanto, esses estudos são fundamentais pois as raízes estão diretamente relacionadas com a absorção de água e nutrientes para as plantas e,

portanto, com a produção das culturas, sendo reflexo da qualidade do solo (Letey, 1985).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do pisoteio animal em regime de pastejo contínuo durante o inverno/primavera e do impacto do plantio direto e do preparo convencional de solo no estado de compactação do solo, na fertilidade do solo e na distribuição radicular e produtividade de milho.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no Campus da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria (RS), em área pertencente ao Departamento de Zootecnia, em Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) com textura superficial franca (Brasil, 1973). O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada parcela apresentava 25 m de comprimento por 10 m de largura. O experimento vinha sendo realizado desde abril de 1994 sob plantio direto de pastagem, envolvendo aveia (*Avena strigosa* Schreb) + azevém (*Lolium multiflorum* L.). Durante todo o experimento, manteve-se uma área de 2.500 m² (50 x 50 m) cercada para impedir a entrada de animais. Nessa área, a pastagem de aveia + azevém não sofria cortes e o seu crescimento dava-se até próximo ao preparo do solo ou à aplicação de herbicida dessecante. O pastejo foi realizado nos meses de inverno e primavera (junho a setembro), tendo-se o cuidado de manter o resíduo da pastagem em torno de 1,0 Mg ha⁻¹ de massa de matéria seca, monitorando-se o crescimento da pastagem e a produção de matéria seca a cada 28 dias.

Em toda a área do experimento, nos três anos, foi semeado milho (*Zea mays* L.), estabelecendo-se os seguintes tratamentos: plantio direto na área não pastejada, plantio direto após o pastejo de inverno, preparo convencional de solo na área não pastejada e preparo convencional de solo após pastejo de inverno.

As avaliações apresentadas neste estudo são referentes ao terceiro ano de cultivo. O período de pastejo foi de 107 dias (entrada dos animais no dia 11/6/1996 e saída no dia 26/9/1996). Antes do preparo do solo, para as parcelas que recebiam preparo convencional de solo, e da aplicação de herbicida dessecante, realizou-se a correção do solo em superfície na dose de 3,0 Mg ha⁻¹ de calcário. No dia 23/11/1996, realizou-se o preparo do solo nas parcelas destinadas ao sistema convencional de preparo de solo, com uma aração e duas gradagens. A semeadura do milho (cv. AG 5011) foi realizada no dia 11/12/1996, juntamente com a adubação de base (420 kg ha⁻¹ da fórmula 10-18-20). A adubação de cobertura consistiu de 300 kg ha⁻¹ de uréia, aplicada cerca de 30 dias após a semeadura. O espaçamento entrelinhas do milho foi 0,90 m e o estande da lavoura foi de 55.000 plantas ha⁻¹.

As determinações do sistema radicular foram realizadas 45 dias após a emergência, quando o milho estava no estágio fenológico "5" (pendoamento). Selecionou-se uma linha de plantio do milho, onde, perpendicularmente a ela, cavou-se uma trincheira com 100 cm de largura por 40 cm de profundidade. A parede vertical da trincheira ficou a 5 cm da planta de milho. Após expor as raízes com hastes pontiagudas de metal, colocou-se na trincheira um quadro, com as mesmas dimensões, com fios de nylon formando uma malha quadriculada de 5 x 5 cm, possibilitando desenhar, em escala, a distribuição de raízes no perfil.

Em todos os perfis, foram coletadas duas amostras de solo e uma de raízes, a cada 5 cm de profundidade, nos dois lados da planta, para determinar a densidade de raízes, densidade do solo, atributos químicos e granulometria. Para avaliar a densidade do solo, as amostras foram coletadas com um cilindro extrator de amostras indeformadas com 40 cm de comprimento e 5,36 cm de diâmetro, forçado verticalmente no solo com macaco hidráulico, onde a estratificação foi feita diretamente no monolito extraído. A densidade do solo foi determinada, dividindo a massa de solo seco a 105°C pelo volume da amostra (24,18 cm³).

As determinações químicas foram: carbono orgânico, por combustão úmida (Nelson & Sommers, 1986); pH em água (1:1) e acidez potencial (pH SMP), em peagâmetro; fósforo disponível, por fotocolorimetria; potássio disponível, extraído com HCl 0,05M + H₂SO₄ 0,0125M, por fotometria de chama; cálcio trocável, por espectrofotometria de absorção atômica; e alumínio trocável, por titulometria (Tedesco et al., 1995). A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986).

Para determinar a densidade de raízes, foram coletadas amostras de solo com raízes a cada 5 cm de profundidade, usando-se um cilindro extrator de 40 cm de comprimento e 9,20 cm de diâmetro, introduzido verticalmente no solo. A separação das raízes da massa de solo consistiu em dispersar o solo com raízes em uma solução que continha uma parte de hidróxido de sódio a 6% e duas partes de água, durante 15 min. Na separação das raízes, foi utilizado um jogo de três peneiras com malha de 2,00, 1,00 e 0,05 mm, onde o solo foi separado das raízes com jatos de água. Imediatamente após a separação, procedeu-se à contagem de raízes, utilizando o método da interseção de Newman modificado por Tennant (1975). O método de Newman consiste em distribuir as raízes obtidas de cada volume de solo em um retângulo de vidro de 25 x 35 cm. Esse foi colocado sobre um papel com linhas horizontais e verticais, formando um quadriculado de 2 x 2 cm. Cada raiz que intercepta uma linha é computada por contador manual. O total acumulado é convertido para densidade de raiz (dr), usando a fórmula: $dr = 1,5714n/v$, em que dr é a densidade de raízes, n é o número de interseções, v é o volume do cilindro amostrador e 1,5714 é o fator de conversão para expressar a contagem em comprimento radicular.

A produtividade de grãos e de silagem foi avaliada quando o milho estava na maturação fisiológica, cerca de 102 dias após a emergência, amostrando-se plantas inteiras em cada parcela para a determinação da massa de matéria verde e da massa de matéria seca em estufa a 65°C. A coleta de espigas foi realizada numa área útil de 10 m² por parcela. Após a secagem, foram efetuadas a debulha e a pesagem dos grãos. A umidade dos grãos foi corrigida para 13%, sendo os resultados expressos em Mg ha⁻¹.

A análise estatística dos resultados foi realizada pelo programa estatístico SAS (1985), constituindo-se de análise de variância e comparação de médias, para as variáveis rendimento de grãos e produção de silagem; comparação de médias, para densidade de raízes e atributos físicos e químicos do solo, e análises de correlação e regressão linear simples e múltipla pelo método "stepwise".

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenho da distribuição das raízes no perfil indicou, visualmente, maior quantidade de raízes nos tratamentos que receberam preparo convencional de solo, tanto na área pastejada como na área não pastejada, do que no plantio direto. No plantio direto não pastejado (Figura 1), houve maior concentração de raízes na camada de 0-5 cm, quando comparada à do tratamento preparo convencional de solo não pastejado (Figura 2).

A análise quantitativa dos perfis de densidade de raízes e a densidade do solo demonstram que o plantio direto e o preparo convencional de solo tiveram efeito mais pronunciado do que o manejo de animais durante o inverno/primavera (Figura 3a,b). O pisoteio animal teve pequeno efeito sobre as características físicas, o que pode ser atribuído à manutenção de resíduo vegetal na superfície do solo, em torno de 1,0 Mg ha⁻¹ de massa de matéria seca, que proporcionou razoável cobertura do solo, rápido rebrote e crescimento da pastagem. Em virtude disso, o impacto da pata do animal não se dava diretamente sobre o solo, mas sobre o resíduo vegetal.

Na profundidade de 0-5 cm, o pisoteio tendeu a aumentar a densidade do solo na área sob plantio direto, mas não sob preparo convencional de solo. Entretanto, a diferença entre os valores de densidade do solo do plantio direto e o preparo convencional, independentemente do pastejo, foi significativa nas profundidades de 5-10 e 10-15 cm, demonstrando que o efeito produzido pela aração persistia até o momento da avaliação realizada em torno de 45 dias após a semeadura.

Ao contrário dos resultados apresentados por Mello Ivo & Mielniczuk (1999), a densidade radicular não diferiu entre os tratamentos, apesar de terem sido observados maiores valores de densidade do solo

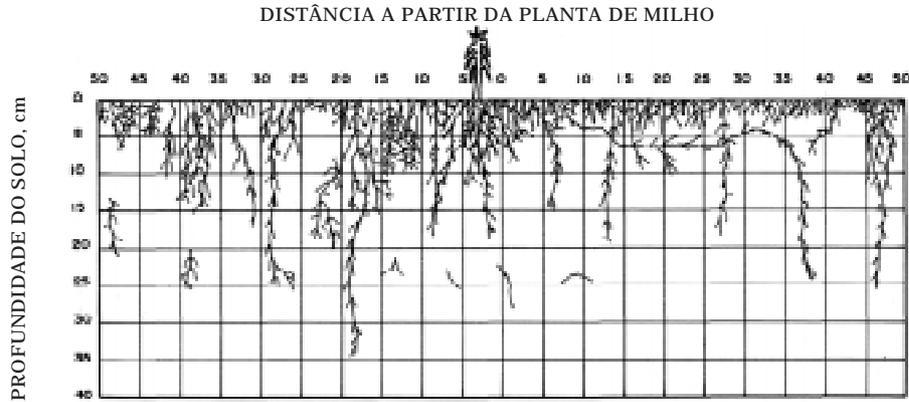


Figura 1. Distribuição radicular do milho em solo sob plantio direto não pastejado.

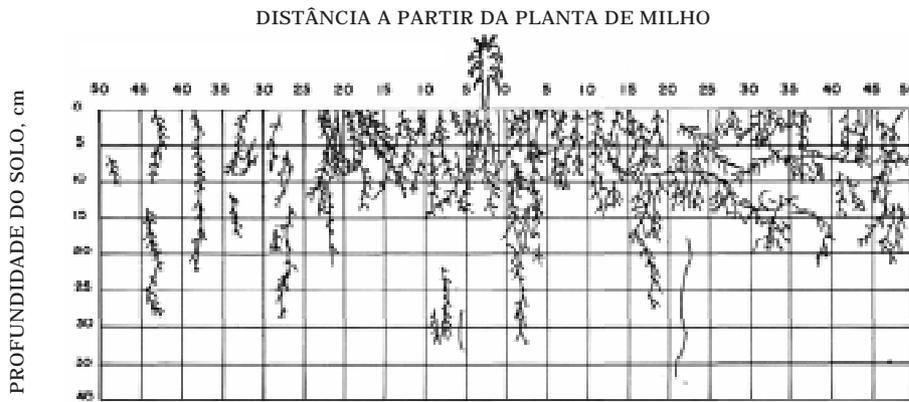


Figura 2. Distribuição radicular do milho em solo sob preparo convencional não pastejado.

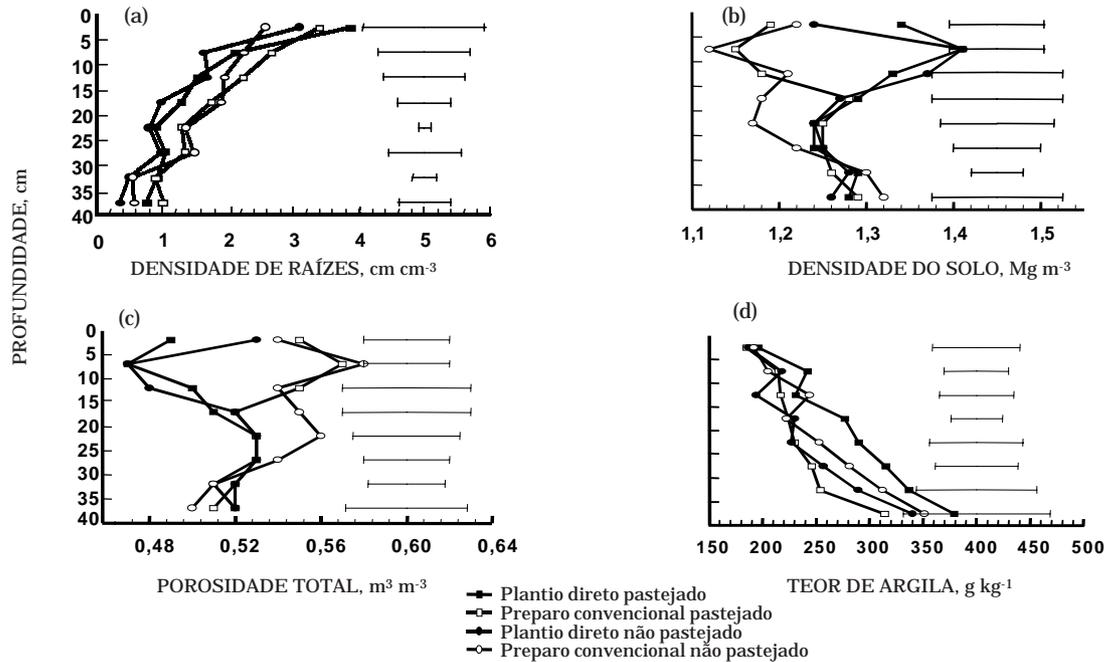


Figura 3. Densidade de raízes (a), densidade do solo (b), porosidade total (c) e teor de argila (d), ao longo da profundidade, em solo sob plantio direto e preparo convencional, ambos anteriormente com e sem pastejo. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% (DMS) e comparam médias dos tratamentos em cada profundidade.

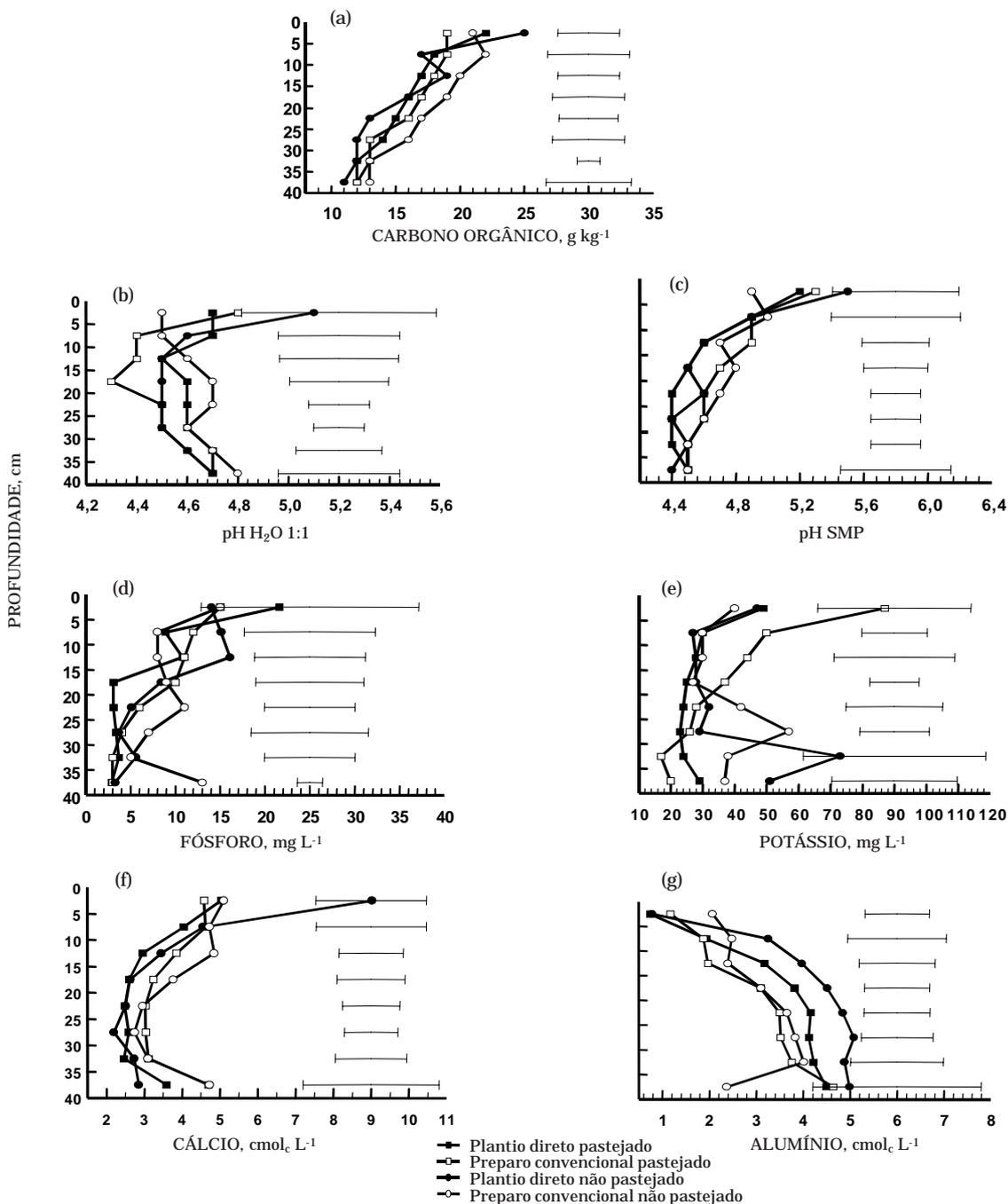


Figura 4. Carbono orgânico do solo (a), pH H₂O (b), pH SMP (c), fósforo disponível (d), potássio disponível (e), cálcio trocável (f) e alumínio trocável (g), ao longo da profundidade, em solo sob plantio direto e preparo convencional, ambos anteriormente com e sem pastejo. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% (DMS) e comparam médias dos tratamentos em cada profundidade.

no plantio direto, indicando que esses valores não ocasionaram significativa restrição ao crescimento radicular. Tanto nas áreas pastejadas como nas não pastejadas, a densidade média de raízes foi cerca de 1,6 vez maior do que a encontrada por Ball-Coelho et al. (1998), para o plantio direto, e cerca de 3,9

vezes maior para o preparo convencional de solo, nos 10 cm superficiais. Barber (1971) e Mello Ivo & Mielniczuk (1999) também verificaram maior quantidade de raízes na camada superficial no plantio direto do que no preparo convencional de solo.

A densidade de raízes, na camada de 10-25 cm, correlacionou-se inversamente com a densidade do solo, sempre havendo maiores valores de densidade do solo no plantio direto (Figura 3a,b). A densidade média de raízes no perfil (0-40 cm) foi maior no preparo convencional de solo (1,83 cm cm⁻³, na área pastejada, e 1,58 cm cm⁻³, na área não pastejada) comparada com a do plantio direto (1,56 cm cm⁻³, na área pastejada, e 1,25 cm cm⁻³, na área não pastejada), concordando com o observado por Merten & Mielniczuk (1991), em Latossolo Roxo.

A maior parte das raízes concentrou-se na camada de 0-20 cm. Essa camada também apresentou maior pH, maior concentração de nutrientes e carbono orgânico e menor concentração de Al trocável (Figura 4).

A densidade de raízes (Quadro 1) foi significativamente ($P < 0,10$) correlacionada, de forma positiva, com os atributos químicos P disponível (0-5 cm), K disponível (25-30 cm), Ca trocável (5-10, 10-15 e 35-40 cm), pH em água (5-10 cm) e pH SMP (10-15 cm). Concordando com o observado por Anghinoni & Barber (1980), Zhang & Barber (1992) e Klepker & Anghinoni (1995), as raízes de milho podem apresentar crescimento diferenciado na direção da concentração de nutrientes no solo, principalmente de fósforo. A densidade de raízes correlacionou-se positivamente com o atributo físico porosidade total, nas profundidades de 10-15 e 30-35 cm.

De forma negativa, a densidade de raízes correlacionou-se com a quantidade de Al trocável (5-10, 10-15 e 20-25 cm), densidade do solo (10-15 e 30-35 cm) e silte (0-5 e 35-40 cm). Analisando a totalidade dos dados (profundidade de 0 a 40 cm), confirma-se a relação anterior. Verifica-se que o aumento da densidade do solo acarreta a redução

da macroporosidade e aumento da microporosidade do solo com poros de 15 µm de diâmetro. Nessa situação, as raízes têm dificuldade em crescerem, nesses poros pequenos, pois o raio médio das raízes de milho é superior àquele valor, podendo variar de 0,18 a 0,24 mm, dependendo do cultivar e suprimento de P (Schenk & Barber, 1979).

Abaixo dos 5 cm superficiais, a quantidade de alumínio trocável tendeu a ser superior no plantio direto, tanto na área pastejada como na não pastejada. Possivelmente, essa maior concentração de alumínio colaborou para o menor crescimento do sistema radicular nesse sistema de manejo do solo, já que a presença desse elemento provoca menor crescimento de raízes (Adams, 1981).

Análises de regressão (simples e múltipla) mostraram que as equações (Quadro 2) foram mais consistentes com as correlações individuais para as camadas de 5-10 e 10 a 15 cm. Esses dados indicam que a densidade de raízes foi favorecida pela presença de nutrientes e de carbono orgânico, pH favorável e densidade do solo e textura menos limitantes ao seu crescimento.

O rendimento de grãos e de silagem (Quadro 3) não diferiu significativamente entre os tratamentos, indicando que os diferentes estados de compactação não foram críticos ao crescimento do milho, corroborando os resultados obtidos por Mello Ivo & Mielniczuk (1999). Neste estudo, houve apenas tendência de o plantio direto, tanto em área pastejada como na área não pastejada, apresentar produtividade superior à do preparo convencional de solo. Já Cassel et al. (1992) observaram maior produtividade de grãos de milho no plantio direto, porém a densidade de raízes foi maior nesse sistema do que no preparo convencional de solo.

Quadro 1. Coeficiente de correlação entre densidade de raízes e alguns atributos do solo para diferentes profundidades

Atributo do solo	Profundidade (cm)								
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	0-40
Densidade do solo	0,13	-0,33	-0,52***	-0,11	-0,12	0,17	-0,43**	-0,15	-0,14*
Porosidade total	-0,13	0,33	0,52***	0,11	0,12	-0,17	0,43**	0,15	0,14*
Argila	0,29	0,02	0,10	-0,15	-0,16	-0,13	0,04	0,11	-0,41***
Silte	-0,36*	-0,12	-0,23	-0,13	-0,09	-0,18	0,08	-0,37*	0,09
Areia	0,15	0,14	0,20	0,27	0,25	0,26	-0,13	0,20	0,37***
Carbono orgânico	-0,08	0,16	0,20	-0,12	0,28	0,09	-0,09	0,06	0,53***
pH H ₂ O	0,00	0,38*	0,29	-0,18	0,17	0,07	-0,05	0,11	0,15**
pH SMP	0,09	0,21	0,37*	-0,12	0,24	0,06	-0,18	-0,09	0,52***
P disponível	0,36*	-0,02	-0,02	-0,08	0,18	-0,19	-0,19	-0,29	0,33***
K disponível	0,27	0,34	0,25	0,11	0,22	0,58***	-0,21	0,07	0,45***
Al trocável	-0,07	-0,54***	-0,51**	-0,25	-0,43**	-0,05	0,03	0,01	-0,58***
Ca trocável	-0,35*	0,57***	0,38*	0,17	0,16	-0,02	0,09	0,51**	0,42***

*, **, *** significativos a 10, 5 e 1%, respectivamente.

Quadro 2. Regressões linear simples e múltipla para densidade de raízes (dr) em diferentes profundidades no perfil do solo

Profundidade (cm)	Equação ⁽¹⁾	R ²
0-5	dr = 7,07 - 0,09silte	0,13*
5-10	dr = -1,22 + 3,88Pt - 0,31Ca	0,39**
10-15	dr = 6,08 - 3,32ds	0,27**
15-20	Nenhuma variável foi significativa	-
20-25	dr = 1,84 - 0,18Al	0,18**
25-30	dr = -4,47 - 2,11C - 0,08P + 3,58ds + 0,10areia + 0,043K	0,77**
30-35	dr = 2,85 - 1,67ds	0,19**
35-40	dr = 0,63 - 0,04silte + 0,12Al + 0,23Ca	0,56**
0-40	dr = 0,34 + 0,77C + 0,18K - 0,20Al	0,46**

⁽¹⁾ Al = alumínio trocável (cmol_c L⁻¹); K = potássio disponível (mg L⁻¹); P = fósforo disponível (mg L⁻¹); ds = densidade do solo (Mg m⁻³); Ca = cálcio trocável (cmol_c L⁻¹); C = carbono orgânico (%); Pt = porosidade total (m³ m⁻³).

*, **, *** = significativos a 10, 5 e 1%, respectivamente.

Quadro 3. Produtividade de grãos e silagem em solo sob plantio direto (SPD) e convencional (PC) com e sem pastejo

Produtividade	Com pastejo		Sem pastejo	
	SPD	PC	SPD	PC
	—————Mg ha ⁻¹ —————			
Grãos ⁽¹⁾	4,67	4,49	4,82	4,22
Silagem ⁽²⁾	34,4	34,4	35,5	34,4

⁽¹⁾ Produtividade de grãos, com 13% de umidade. ⁽²⁾ Massa de matéria verde.

No período de crescimento do milho, não foram verificados períodos de déficit hídrico, o que pode ter contribuído para diminuir o efeito da maior densidade do solo verificado no plantio direto. Maiores produtividades das culturas no plantio direto podem ser atribuídas a melhorias das características físicas, químicas e biológicas que o sistema proporciona (Hakansson & Voorhees, 1997).

CONCLUSÕES

1. Em solo com textura superficial franca e sob condições de controle da carga animal ajustado ao crescimento da pastagem de forrageiras anuais, o sistema de manejo do solo apresenta maior influência no estado de compactação do solo do que o pisoteio animal.

2. Apesar da menor densidade de raízes no plantio direto, o estado de compactação observado é

inferior ao nível crítico para afetar a produção de grãos e silagem de milho, para o regime hídrico local observado e o presente nível de fertilidade do solo.

3. Para solo franco, a densidade de raízes de milho é maior nas camadas superiores do solo (0 a 10 cm) e correlaciona-se positivamente com o P disponível, Ca trocável, pH e porosidade total e negativamente com o Al trocável e densidade do solo.

AGRADECIMENTOS

Aos Engenheiros-Agrônomos Carlos A. Scapini, Madalena Boeni e Demétrius F. Borges e ao laboratorista Flávio Fontinelli, pelos trabalhos de campo e de laboratório. Ao Departamento de Zootecnia-UFSM, pelo empréstimo da área experimental.

LITERATURA CITADA

- ADAMS, F. Alleviating chemical toxicities: liming acid soils. In: ARKIN, G.F. & TAYLOR, H.M., eds. Modifying the root environment to reduce crop stress. St Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1981. p.269-301.
- ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W. & REGAZZI, A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. R. Bras. Ci. Solo, 20:319-326, 1996.
- ANGHINONI, I. & BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. Soil Sci. Soc. Am. J., 72:1041-1044, 1980.
- BALL-COELHO, B.R.; ROY, R.C. & SWANTON, C.J. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. Soil Till. Res., 45:237-249, 1998.

- BARBER, S.A. Effect of tillage practice on corn (*Zea mays* L.) root distribution and morphology. *Agron. J.*, 63:724-726, 1971.
- BASSANI, H.J. Propriedades físicas induzidas pelo plantio direto e convencional em área pastejada e não pastejada. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1996. 90p. (Tese de Mestrado)
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul. Recife, 1973. 413 p. (Boletim, 30)
- CASSEL, D.K.; RACZKOWSKI, C.W. & DENTON, H.P. Tillage effects on corn production and soil physical conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:1436-1443, 1992.
- CARVALHO Jr., I.A.; FONTES, L.E.F. & COSTA, L.M. Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, na região do cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:505-514, 1998.
- CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:197-201, 1983.
- GAGGERO, M.R. Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 125p. (Tese de Mestrado)
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., eds. *Methods of soil analysis*. 2ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.383-411.
- HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. & RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Till. Res.*, 11:239-282, 1988.
- HAKANSSON, I. & VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. & STEWART, B.A., eds. *Methods for assessment of soil degradation*. Boca Raton, Lewis Publishers, 1997. p.167-179.
- HOFFMAN, C. & JUNGK, A. Growth and phosphorus supply of sugar beet as affected by soil compaction and water tension. *Plant Soil*, 176:16-25, 1995.
- KLEPKER, D. & ANGHINONI, I. Crescimento radicular e aéreo do milho em vasos em função do nível de fósforo no solo e da localização do adubo fosfatado. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:403-408, 1995.
- KÖPKE, U. Methods for studying root growth. In: RUSSEL, R.S.; IGUE, K. & MEHTA, Y.R., eds. *The soil /root system in relation to Brazilian agriculture*. Londrina, Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p.303-318.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- MELLO IVO, W.M.P. & MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. *R. Bras.Ci. Solo*, 23:135-143, 1999.
- MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:369-374, 1991.
- NADIAN, H.; SMITH, S.E.; ALSTON, A.M. & MURRAY, R.S. The effect of soil compaction on growth and P uptake by *Trifolium subterraneum*: interactions with mycorrhizal colonization. *Plant Soil*, 182:39-49, 1996.
- NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. *Methods of soil analysis - Chemical and microbiological properties*. Part 2. Madison, American Society of America, 1986. p.539-579.
- PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A. & KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil Till. Res.*, 46:203-208, 1998.
- RUSSEL, R.S. *Plant root systems - Their function and interaction with soil*. New York, MacGraw Hill, 1977. 297p.
- SAS Institute. *SAS User's guide: statistics*. 5.ed. Cary, N. C., 1985. 956p.
- SCHENK, M.K. & BARBER, S.A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. *Agron. J.*, 71:921-924, 1979.
- SOANE, B.D. & OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D. & OUWERKERK, C. van., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.1-21.
- TANNER, C.B. & MAMARIL, C.P. Pasture soil compaction by animal traffic. *Agron. J.*, 51:329-331, 1959.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- TENNANT, D. A test modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.*, 63:995-1001, 1975.
- TREIN, C.R.; COGO, N.P. & LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia+trevo/milho, após pastejo intensivo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:105-111, 1991.
- ZHANG, J. & BARBER, S.A. Maize root distribution between phosphorus-fertilized and unfertilized soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:819-822, 1992.