

# COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO RADICULAR E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO<sup>(1)</sup>

Onã da Silva Freddi<sup>(2)</sup>, José Frederico Centurion<sup>(3)</sup>, Amauri Nelson Beutler<sup>(4)</sup>,  
Ricardo Garcia Aratani<sup>(2)</sup> & Cristian Luarte Leonel<sup>(5)</sup>

## RESUMO

As modificações estruturais causadas no solo pelos diferentes sistemas de manejo podem resultar em maior ou menor compactação, que poderá interferir na resistência mecânica à penetração, densidade e porosidade do solo, influenciando o crescimento radicular e, por fim, a produtividade das culturas. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da compactação sobre determinadas características de um Latossolo Vermelho textura média e associá-las ao crescimento radicular e à produtividade da cultura do milho. Os tratamentos principais foram constituídos por seis níveis de compactação, proporcionados pelo tráfego controlado de tratores, e duas camadas, como subtratamentos, com quatro repetições. Foram coletadas amostras indeformadas do solo nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m, para determinação da resistência do solo à penetração, densidade e porosidade do solo. Para determinação de densidade, superfície, diâmetro e massa seca das raízes, foram retiradas amostras do solo nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m, em cada parcela. O tráfego de tratores sobre o solo provocou maiores níveis de compactação na camada superficial, proporcionando maior densidade e superfície radicular. O diâmetro radicular e a massa seca das raízes aumentaram linearmente com o aumento da resistência à penetração do solo. Verificou-se que valores de resistência à penetração variando entre 1,03 e 5,69 MPa provocaram alterações na morfologia do sistema radicular do milho, reduzindo a produtividade da cultura em 2,581 Mg ha<sup>-1</sup>, mas não foram impeditivos ao enraizamento.

**Termos de indexação:** resistência à penetração, conteúdo de água, Latossolo, *Zea mays*.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Recebido para publicação em agosto de 2005 e aprovado em abril de 2007.

<sup>(2)</sup> Doutorando da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista – UNESP. Departamento de Solos e Adubos. Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/nº, CEP 14884-900 Jaboticabal (SP). Bolsista FAPESP. E-mails: onafreddi@fcav.unesp.br; aratani@fcav.unesp.br

<sup>(3)</sup> Professor Adjunto, Departamento de Solos e Adubos. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP. Bolsista CNPq. E-mail: jfcentur@fcav.unesp.br

<sup>(4)</sup> Pós-Doutorando do Departamento de Solos e Adubos. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP. Bolsista FAPESP. E-mail: amaurib@yahoo.com.br

<sup>(5)</sup> Mestrando da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP. E-mail: crleonel@yahoo.com.br

**SUMMARY: EFFECT SOIL COMPACTION ON ROOT GROWTH AND MAIZE YIELD**

*The structural soil modifications caused by different tillage systems can result in more or less intense compaction, which interferes with soil penetration resistance, bulk density and porosity, influencing root growth and crop yields. The objective of this work was to evaluate the effect of compaction on particular characteristics of a Red Latosol and associate them with root growth and maize yield. The main treatments consisted of six compaction levels, induced by controlled tractor traffic and the secondary treatments of two layers with four replications. Undisturbed soil samples were collected in the layers 0–0.10 and 0.10–0.20 m for determination of soil penetration resistance, bulk density and soil porosity. To determine the root density, surface, diameter and dry matter soil samples were collected in the layers 0–0.10; 0.10–0.20 m, in each plot. Tractor traffic on the soil caused higher compaction levels in the surface layer which resulted in higher bulk density and greater root surface. Root dry matter and diameter increased linearly with the increase of the soil penetration resistance. It was verified that values of soil penetration resistance between 1.03 and 5.69 MPa affected the root system morphology, reducing the crop yield by 2.581 Mg ha<sup>-1</sup>, while not impeding root growth.*

*Index terms: penetration resistance, water content, Oxisol, Zea mays.*

**INTRODUÇÃO**

Com a modernização da agricultura, o peso de máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado, resultando em significativas alterações nas suas propriedades físicas (Streck et al., 2004). Essas alterações referem-se ao decréscimo da porosidade e da permeabilidade e ao aumento da compactação em relação às condições originais do solo (Novak et al., 1992; Tavares Filho et al., 2001), causando restrições ao crescimento radicular das culturas (Rosolem, 1995).

Nos últimos anos, métodos de preparo do solo, como o reduzido e a semeadura direta, vêm sendo adotados em substituição aos preparos convencionais (Mello Ivo & Mielniczuk, 1999). Segundo Maria et al. (1999), Beutler et al. (2001) e Tavares Filho et al. (2001), o sistema plantio direto provoca compactação superficial do solo, que está associada ao tráfego de máquinas agrícolas e ao não-revolvimento do solo. Em consequência da compactação, há aumento da resistência mecânica do solo e redução da porosidade, da continuidade de poros, da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água, reduzindo o crescimento e o desenvolvimento radicular das culturas (Tavares Filho et al., 2001; Streck et al., 2004).

Segundo Flowers & Lal (1998), a principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita. Horn & Lebert (1994) acrescentam que não somente a pressão estática causa compactação, mas também forças dinâmicas provocadas pela vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento.

Trabalhos referentes ao efeito dos diferentes preparos nas propriedades físicas do solo são desenvolvidos com maior frequência, sendo mais escassas as informações relacionadas com os efeitos dessas propriedades sobre o sistema radicular das culturas (Mello Ivo & Mielniczuk, 1999), relacionando-as à produtividade.

Portanto, um diagnóstico qualitativo e quantitativo (grau de compactação do solo) ganha importância, não só para auxiliar a verificação da qualidade do manejo utilizado, como também para auxiliar o estabelecimento de limites de compactação que não afetem o crescimento radicular das plantas nos diferentes sistemas de manejo (Tavares Filho et al., 2001).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da compactação provocada pelo tráfego de tratores sobre determinadas características do solo e associá-las ao crescimento radicular e à produtividade da cultura do milho.

**MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado na fazenda de ensino e pesquisa da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal (SP), com coordenadas geográficas aproximadas de 21° 15' 29" de latitude sul e 48° 16' 47" de longitude oeste de Greenwich, em altitude média de 614 m. O clima é do tipo Cwa, segundo o sistema de classificação de Köppen, com verão quente e inverno seco, precipitação pluviométrica média anual de 1.428 mm (Figura 1) e temperatura média de 21 °C.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média A moderado caulinitico hipoférrico (LVd). A composição granulométrica do solo foi determinada em amostras deformadas, nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m, por meio da dispersão com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e agitação lenta durante 16 h, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986). O solo apresentou, na camada de 0–0,20 m, valores médios de 323 g kg<sup>-1</sup> de argila, 45 g kg<sup>-1</sup> de silte e 632 g kg<sup>-1</sup> de areia. A densidade de partícula, determinada pelo método do picnômetro (Blake, 1965), em ambas as camadas foi de 2,86 Mg m<sup>-3</sup>.

O delineamento experimental foi em parcelas subdivididas com seis níveis de compactação, constituindo os tratamentos principais, e duas camadas, como subtratamentos, com quatro repetições. Todas as parcelas experimentais apresentaram cinco linhas de milho com 3 m de comprimento, considerando-se área útil as três linhas centrais, desprezando-se meio metro de cada extremidade.

O solo foi analisado quimicamente, segundo Raij et al. (1987), e no mês de setembro de 2004 recebeu aplicação de calcário, para elevação da saturação por bases a 60 %, e uma gradagem aradora, para sua incorporação. Antes da instalação do experimento, toda a área foi escarificada a 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem niveladora.

Os tratamentos foram: T<sub>0</sub> = não trafegado, T<sub>1\*</sub> = uma passada de um trator de 4 Mg, T<sub>1</sub> = uma passada, T<sub>2</sub> = duas passadas, T<sub>4</sub> = quatro passadas e T<sub>6</sub> = seis passadas de um trator de 11 Mg, uma ao lado da outra, no sentido do declive da área, perfazendo toda a superfície. O conteúdo de água no solo durante a compactação esteve próximo ao da capacidade de campo (-100 hPa).

No dia 22 de novembro de 2004 foi semeado, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto, o híbrido triplo de milho Máster, de ciclo precoce, no espaçamento de 0,9 m nas entrelinhas e 8 a 10 sementes por metro, adubado com 0,3 Mg ha<sup>-1</sup> da fórmula 10–20–20, para obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 Mg ha<sup>-1</sup>, segundo Raij et al. (1997). Decorridos 15 dias da emergência das plântulas, foi feito o desbaste para cinco plantas por metro. A adubação de cobertura foi realizada 28 dias após a emergência das plântulas, utilizando-se 0,3 Mg ha<sup>-1</sup> de sulfato de amônio, quando as plantas estavam com sete a oito folhas.

Após a semeadura do milho, na área útil da parcela, foram coletadas amostras indeformadas do solo, na entrelinha do milho, com cilindros de 53,16 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m, para determinação dos atributos físicos do solo. A microporosidade foi determinada por secagem (tensão de 100 hPa), em

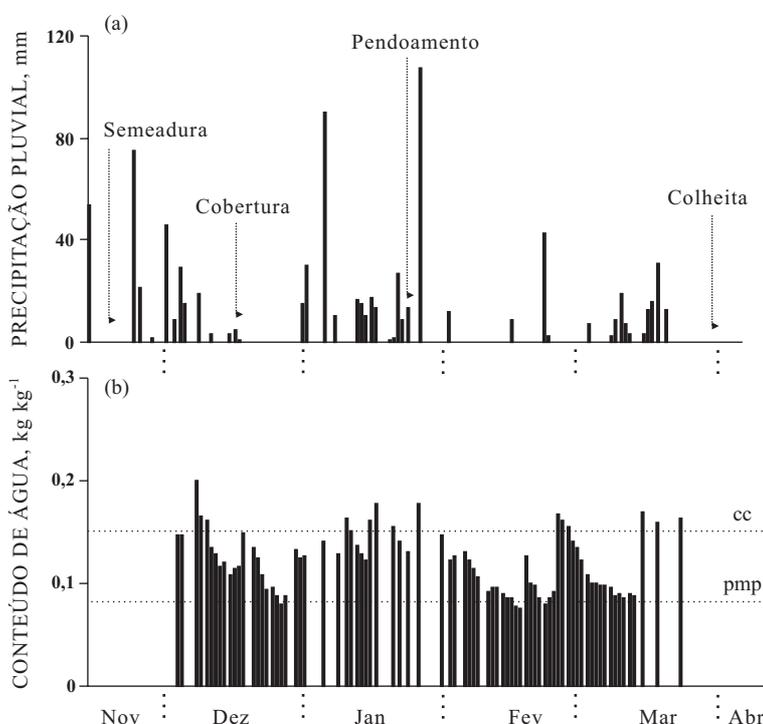


Figura 1. Precipitação pluvial diária no período de 18 de novembro a 10 de abril de 2005 (a) e variação no conteúdo de água na camada de 0–0,20 m do Latossolo Vermelho no período de 7 de dezembro a 24 de março de 2005 (b). As linhas tracejadas indicam os limites no conteúdo de água no ponto de murcha permanente (pmp) e na capacidade de campo (cc).

câmara de pressão de Richards com placa porosa (Klute, 1986); a porosidade total, segundo Danielson & Sutherland (1986); e a macroporosidade, obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade. Na tensão de 100 hPa, foi determinada a resistência mecânica do solo à penetração (RP), nas amostras indeformadas, por meio de um penetrômetro eletrônico estático de laboratório, com velocidade constante de penetração de  $0,01 \text{ m min}^{-1}$ , cone com ângulo de  $60^\circ$  e com área da base de  $2,96 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ , equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para aquisição dos dados de RP, realizando uma leitura de RP por segundo (Tormena et al., 1998). Foram realizadas duas repetições por amostra, perfazendo 360 leituras de RP. A RP média de cada amostra foi obtida desprezando-se meio centímetro de cada extremidade; em seguida, elas foram secas em estufa a  $\pm 105^\circ \text{C}$  durante 24 h, para determinação da densidade do solo (Blake & Hartge, 1986).

No estágio do pendoamento da cultura do milho, período no qual o sistema radicular do milho alcança a máxima extensão (Mengel & Barber, 1974), retiraram-se duas amostras por parcela, utilizando-se um cubo metálico, cujas dimensões consistiram de 0,01 m de lado, totalizando  $0,001 \text{ m}^3$  de volume de solo, juntamente ao eixo principal da planta de milho, nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m. Em seguida, as raízes foram separadas do solo por lavagem em água corrente, utilizando peneira de abertura de malha de 0,005 m. As imagens das raízes foram digitalizadas em um *scanner* de leitura ótica, na resolução de 400 dpi, e analisadas quanto a densidade, superfície e diâmetro radicular pelo software Delta-T Scan, empregando o método de Harris & Campbell (1989). Na seqüência, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a  $\pm 65^\circ \text{C}$  até peso constante, para determinação da matéria seca das raízes.

A produtividade de grãos de milho foi obtida extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela para um hectare, considerando-se a umidade-padrão de 13 %.

Os dados de densidade, superfície e diâmetro radicular foram transformados em  $\sqrt{x} + 0,5$  por não

atenderem às hipóteses estatísticas iniciais de normalidade e homocedasticidade a 5 %, por meio das rotinas PROC UNIVARIATE e PROC GLM/hovtest (SAS, 1999), respectivamente. Em seguida, foi realizada análise de variância (teste F), por meio da rotina PROC GLM (SAS, 1999). A diferença entre as médias das duas camadas avaliadas foi constatada pela significância do teste F. Como variáveis da resistência mecânica à penetração do solo, efetuou-se regressão com características do sistema radicular e produtividade da cultura do milho; com o teste F da variância da regressão significativo a 5 %, selecionaram-se modelos, adotando-se como critérios o maior  $R^2$  e a significância de 5 % dos coeficientes da equação, de acordo com o procedimento PROC REG (SAS, 1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A compactação do solo e a profundidade influenciaram todas as variáveis do sistema radicular avaliadas (Quadro 1). O efeito da compactação do solo na densidade e superfície radicular foi diferenciado nas camadas de solo, enquanto o diâmetro médio radicular e a matéria seca das raízes apresentaram a mesma resposta à compactação em ambas as camadas. Mello Ivo & Mielniczuk (1999), apesar do comportamento diferenciado de características morfológicas, afirmaram que a distribuição final de matéria seca das raízes por profundidade não foi significativamente diferente entre o preparo convencional (aração e gradagens), o preparo reduzido (escarificação) e o plantio direto.

Os valores médios e erros-padrão da macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração e densidade do solo nos diferentes níveis de compactação e camadas do solo são apresentados no quadro 2.

No tratamento não trafegado ( $T_0$ ), constata-se que os maiores valores de densidade do solo e de resistência à penetração e os menores valores de macroporosidade ocorreram na camada de 0,10–0,20 m, sugerindo que a utilização prévia da grade niveladora após a

**Quadro 1. Valores de F calculados pela análise de variância para densidade do comprimento radicular, superfície radicular, diâmetro médio radicular e matéria seca das raízes nos diferentes níveis de compactação e camadas do Latossolo Vermelho**

Causas de variação	Densidade radicular	Superfície radicular	Diâmetro radicular	Matéria seca
Compactação do solo	9,63**	15,59**	3,03*	2,96*
Camada do solo	102,71**	86,77**	10,33**	114,49**
Compactação x camada	4,85**	7,33**	0,98 <sup>ns</sup>	0,43 <sup>ns</sup>

\*, \*\* e <sup>ns</sup>: Significativos a 5 e 1 %, respectivamente, e não-significativo.

**Quadro 2. Valores médios e erros-padrão da macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração e densidade do solo nos diferentes níveis de compactação e camadas no Latossolo Vermelho**

Camada	Tratamentos (compactação)					
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> <sup>*</sup>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>6</sub>
m	Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>(1)</sup>					
0-0,10	0,25 ± 0,00	0,09 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,05 ± 0,01
0,10-0,20	0,17 ± 0,06	0,10 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,07 ± 0,00	0,07 ± 0,01
	Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )					
0-0,10	0,27 ± 0,00	0,30 ± 0,01	0,30 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,30 ± 0,01
0,10-0,20	0,28 ± 0,02	0,29 ± 0,01	0,30 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,29 ± 0,00	0,29 ± 0,00
	Resistência à penetração (MPa) <sup>(1)</sup>					
0-0,10	1,03 ± 0,30	2,23 ± 0,03	2,43 ± 0,07	3,16 ± 0,28	4,51 ± 0,15	5,69 ± 0,81
0,10-0,20	2,93 ± 2,00	2,17 ± 0,14	2,23 ± 0,02	3,79 ± 1,10	3,02 ± 0,49	3,06 ± 0,49
	Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )					
0-0,10	1,28 ± 0,02	1,62 ± 0,01	1,67 ± 0,01	1,73 ± 0,02	1,77 ± 0,01	1,78 ± 0,01
0,10-0,20	1,41 ± 0,02	1,62 ± 0,01	1,64 ± 0,01	1,67 ± 0,01	1,68 ± 0,01	1,69 ± 0,01

<sup>(1)</sup> Determinação realizada no conteúdo de água retida na capacidade de campo (-100 hPa).

T<sub>0</sub>: não trafegado, T<sub>1</sub><sup>\*</sup>: uma passada do trator de 4 Mg, T<sub>1</sub>: uma passada do trator de 11 Mg, T<sub>2</sub>: duas passadas do trator de 11 Mg, T<sub>4</sub>: quatro passadas do trator de 11 Mg e T<sub>6</sub>: seis passadas do trator de 11 Mg.

escarificação e a aração do solo tenham favorecido a formação de impedimentos físicos logo abaixo das camadas de solo movimentadas pelos implementos, como verificado por Tavares Filho et al. (2001). Esta camada continuou a sofrer compactação com o aumento do tráfego de tratores, o que pode ser constatado pelo aumento da densidade do solo de 1,41 para 1,69 Mg m<sup>-3</sup> e redução concomitante da macroporosidade de 0,17 para apenas 0,07 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente nos tratamentos T<sub>0</sub> e T<sub>6</sub> (Quadro 2).

Nos tratamentos trafegados pelos tratores, a camada que mostrou maior grau de compactação foi a de 0-0,10 m, sendo neste caso os atributos físicos do solo afetados principalmente pelo peso do maquinário e pelo número de passadas do trator, todos favorecidos pela condição favorável de umidade do solo – próxima da capacidade de campo. Nesses tratamentos, observa-se aumento expressivo dos valores de densidade do solo e de resistência à penetração em relação ao solo não trafegado (Quadro 2), os quais se refletiram na macroporosidade, cujos valores foram reduzidos de 0,25 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> no solo não trafegado para apenas 0,05 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> no tratamento com maior número de passadas do trator. Dessa forma, na semeadura direta, o tráfego de máquinas e implementos provoca compactação superficial (Woorhees & Lindstorm, 1983), enquanto nos preparos convencionais a compactação ocorre abaixo da camada arável (Rosolem et al., 1994). Segundo Taylor & Brar (1991), o arranjo estrutural do solo, a porosidade total, o número e

tamanho dos poros e a difusão de gases são afetados pela compactação, que, por consequência, afeta o crescimento radicular.

Apesar do aumento da densidade do solo e da resistência à penetração, e da forte restrição no volume de macroporos ocasionados pelo tráfego de tratores, houve aumento no crescimento radicular na camada de 0-0,10 m, o que é indicado pelo aumento da densidade e da superfície radicular com o incremento da resistência do solo à penetração (Figura 2). Esse comportamento, aparentemente contraditório, também foi observado por Rosolem et al. (1994), os quais constataram incrementos no crescimento radicular com o aumento da densidade do solo de 1,03 para 1,20 Mg m<sup>-3</sup>.

O comportamento da densidade e da superfície radicular como variáveis do aumento da resistência mecânica do solo foi linear na camada de 0-0,10 m (Figura 2), concordando com Foloni et al. (2003) e também com Rosolem et al. (1994) com relação à superfície radicular. Entretanto, na camada de 0,10-0,20 m a compactação não influenciou essas características (Figura 2).

Os efeitos da compactação do solo sobre o crescimento radicular foram analisados em função da resistência à penetração, por ser o atributo físico do solo atualmente mais usado como indicativo da compactação do solo. No tratamento com o solo revolvido e com uma passada do trator de 4 Mg,

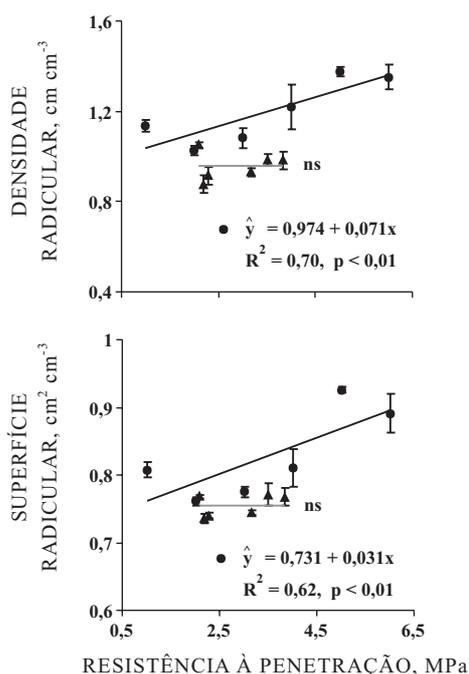


Figura 2. Densidade do comprimento radicular e superfície radicular das plantas de milho nas camadas de 0–0,10 m (●) e 0,10–0,20 m (▲) em função da resistência mecânica do solo. <sup>ns</sup> não-significativo. Dados transformados em  $\sqrt{x+0,5}$ .

verificou-se que não houve diferença na densidade radicular em profundidade, mas isso foi observado nos tratamentos com o trator de 11 Mg, onde, a partir da resistência à penetração de 2,43 MPa, na camada superficial do solo, houve aumento da densidade radicular em relação à camada de 0,10–0,20 m (Quadro 3). O mesmo comportamento foi observado para a superfície radicular a partir da RP de 3,16 Mpa, atingida no tratamento com duas passadas do trator de 11 Mg (Quadro 3). Em contraposição, Foloni et al. (2003) constataram que o valor de 1,4 MPa já foi restritivo ao crescimento radicular em vasos preenchidos com Latossolo Vermelho distroférico, provavelmente devido à textura mais argilosa desse solo e à maior quantidade de óxido de Fe, o que leva à formação de micropeds (microagregados) arredondados com menos de 1 mm, resultando em maior proporção de poros grandes e menor densidade do solo (Beutler et al., 2002). Por sua vez, Dexter (1987) demonstrou que o crescimento de raízes pode ser inibido com valores de resistência à penetração inferiores a 1 MPa em solos secos; contudo, com umidade suficiente, pode haver crescimento com resistência à penetração variando entre 4,0 e 5,0 MPa.

O diâmetro radicular e a matéria seca das raízes foram superiores na camada de 0–0,10 m, independentemente da compactação do solo (Quadro 3). Observa-se que, desde o solo não trafegado com RP de 1,03 MPa em superfície e 2,93 MPa em

Quadro 3. Médias e erros-padrão de densidade radicular, superfície radicular, diâmetro radicular e matéria seca das raízes de milho em função dos diferentes níveis de compactação e camadas do Latossolo Vermelho

Camada	Tratamento (compactação)					
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> <sup>*</sup>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>6</sub>
m	Densidade radicular (cm cm <sup>-3</sup> )					
0–0,10	1,14 ± 0,03 a	1,03 ± 0,02 a	1,08 ± 0,04 a	1,22 ± 0,10 a	1,37 ± 0,02 a	1,35 ± 0,05 a
0,10–0,20	1,05 ± 0,01 a	0,91 ± 0,04 a	0,88 ± 0,04 b	0,93 ± 0,02 b	0,98 ± 0,03 b	0,98 ± 0,04 b
	Superfície radicular (cm <sup>2</sup> cm <sup>-3</sup> )					
0–0,10	0,81 ± 0,01 a	0,76 ± 0,01 a	0,78 ± 0,01 a	0,81 ± 0,03 a	0,93 ± 0,00 a	0,89 ± 0,03 a
0,10–0,20	0,77 ± 0,00 a	0,74 ± 0,00 a	0,74 ± 0,01 a	0,74 ± 0,00 b	0,77 ± 0,02 b	0,77 ± 0,01 b
	Diâmetro radicular (mm)					
0–0,10	1,06 ± 0,03 a	0,98 ± 0,01 a	1,00 ± 0,04 a	1,04 ± 0,06 a	1,13 ± 0,01 a	1,08 ± 0,03 a
0,10–0,20	0,99 ± 0,01 b	0,98 ± 0,02 b	0,98 ± 0,02 b	0,98 ± 0,01 b	1,04 ± 0,04 b	1,03 ± 0,02 b
	Matéria seca (mg cm <sup>-3</sup> )					
0–0,10	0,33 ± 0,02 a	0,22 ± 0,04 a	0,23 ± 0,02 a	0,27 ± 0,07 a	0,31 ± 0,03 a	0,33 ± 0,04 a
0,10–0,20	0,15 ± 0,01 b	0,08 ± 0,01 b	0,07 ± 0,01 b	0,08 ± 0,01 b	0,11 ± 0,02 b	0,11 ± 0,02 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste F a 5%.

Os dados de densidade, superfície e diâmetro radicular foram transformados em  $\sqrt{x+0,5}$ .

T0: não trafegado, T1\*: uma passada do trator de 4 Mg, T1: uma passada do trator de 11 Mg, T2: duas passadas do trator de 11 Mg, T4: quatro passadas do trator de 11 Mg e T6: seis passadas do trator de 11 Mg.

subsuperfície até o tratamento T<sub>6</sub> com RP de 5,69 MPa em superfície e 3,06 MPa na camada de 0,10–0,20 m, o diâmetro radicular e a matéria seca das raízes de milho foram maiores na camada superficial do solo. Provavelmente, esse comportamento seja devido à morfologia do sistema radicular fasciculado da cultura do milho, que favorece maior concentração de raízes na camada de 0–0,10 m (Silva et al., 2000).

A matéria seca total das raízes apresentou comportamento quadrático com o aumento da RP (Figura 3), discordando dos resultados de Foloni et al. (2003), em que a matéria seca não foi alterada com o aumento da RP, não sendo uma variável adequada para aferir a sensibilidade das plantas de milho à compactação. A partir da RP de 1,66 MPa até a RP de 3,09 MPa houve diminuição da matéria seca das raízes, sendo que a partir da RP à 3,09 MPa houve incremento da matéria seca. Possivelmente, o aumento inicial da compactação tenha restringido a matéria seca total radicular onde a partir de 3,09 MPa o sistema radicular tenha respondido à restrição imposta pelo solo com o aumento do diâmetro radicular (Figura 3). De acordo com Materechera et al. (1992), a resistência mecânica do solo causa aumento do diâmetro das raízes na camada compactada, por provocar modificações morfológicas e fisiológicas, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem. Rosolem et al. (1994) e Foloni et al. (2003) também verificaram que o diâmetro médio radicular das plantas de milho aumentou na camada de solo compactado com o incremento da resistência mecânica à penetração. Mello Ivo & Mielniczuk (1999) verificaram maior raio médio das raízes de milho no plantio direto, que apresentou maior resistência mecânica à penetração em relação ao preparo convencional, uma vez que meios rígidos com resistências elevadas levam as raízes a sofrer deformações morfológicas, exteriorizadas pelo aumento do raio, o que, segundo Bengough & Mullins (1990), resulta principalmente de aumento na espessura do córtex, sendo isso conseqüência do aumento do número de células por unidade de comprimento de raiz. O aumento no diâmetro das raízes torna-se mais problemático, pois, de modo geral, a compactação também diminui o tamanho dos poros (Albuquerque & Reinert, 2001), o que pode ser observado no presente estudo pela diminuição da macroporosidade com o aumento da compactação (Quadro 2).

Embora um aumento de 0,4 Mg m<sup>-3</sup> na densidade do solo pudesse inibir completamente o crescimento radicular (Jones et al., 1991), isso não foi observado no presente trabalho, notando-se esse crescimento mesmo em resistência à penetração da ordem de 5,69 MPa e densidade do solo de 1,78 Mg m<sup>-3</sup>. Observa-se também que a quantidade de macroporos abaixo de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (Quadro 2), aparentemente limitante, permitiu o crescimento radicular, como observado por Mello Ivo & Mielniczuk (1999), os quais afirmaram que o crescimento pode ter ocorrido pelo fato de tais valores terem sido obtidos com seus limi-

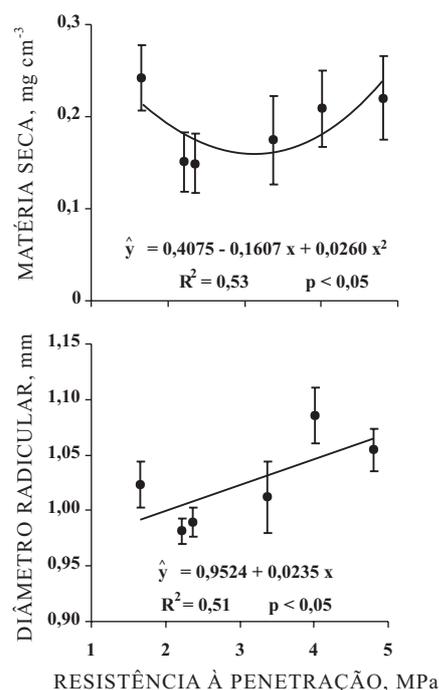


Figura 3. Regressão entre a matéria seca das raízes e o diâmetro radicular da cultura do milho e resistência mecânica à penetração. As barras referem-se ao erro-padrão da média, e a não-sobreposição delas indica diferença significativa entre os tratamentos. Os dados de diâmetro radicular foram transformados em  $\sqrt{x + 0,5}$ .

tes entre a macro e microporosidade determinados na tensão de 60 hPa, podendo existir, após a drenagem do solo, “mesoporos” que se esvaziam, garantindo certo fluxo de ar, criando assim condições para o crescimento e desenvolvimento das raízes mesmo com valores de macroporosidade tão baixos. Tavares Filho et al. (2001) verificaram que os valores de resistência mecânica do solo à penetração apresentados na literatura como restritivos ao crescimento radicular (1,0 a 3,5 MPa) não foram impeditivos para o enraizamento, pois as raízes estavam presentes por todo o perfil do solo; entretanto, essas raízes apresentavam deformações morfológicas, exteriorizadas por aumento do diâmetro, tortuosidade e poucos pêlos radiculares próximo às extremidades. Para Davies & Zangh (1991), as raízes parecem dispor de mecanismos que detectam como estão as condições físicas do solo, procurando se adaptar a elas, para garantir, da melhor maneira possível, o crescimento e desenvolvimento da planta.

Com base nas precipitações pluviárias diárias e na variação do conteúdo de água durante o ciclo do milho (Figura 1), observa-se que no período correspondente ao crescimento vegetativo – semeadura até o pendoamento da cultura, na qual o sistema radicular do milho alcança a máxima extensão – houve apenas um período de estiagem, de 13 dias, no final de dezembro;

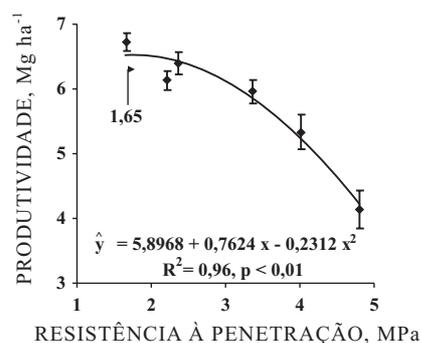
nesse período, o conteúdo de água do solo chegou próximo ao ponto de murcha permanente, na camada de 0–0,20 m, indicando que mesmo em condições de umidade e compactação do solo, com valores de RP chegando a 5,69 MPa, houve alterações no crescimento e na morfologia do sistema radicular das plantas, mas isso não impediu seu enraizamento.

Boone et al. (1987) demonstraram que em solo compactado, com alta resistência ou reduzida difusão de  $O_2$ , a restrição ao crescimento das plantas dependeu da distribuição pluviométrica, ou seja, das condições de umidade do solo. A variação do conteúdo de água no solo também foi utilizada por Phebe & Beale (1976) para demonstrar ser possível obter condições de abundante crescimento de raízes num solo compactado.

A produtividade ajustou-se a um modelo quadrático com o aumento da resistência mecânica à penetração do solo, com valor de RP crítico de 1,65 MPa (Figura 4), a partir do qual a produtividade decresceu de 6,718 para 4,137  $Mg\ ha^{-1}$ , reduzindo a produtividade em 38 %. Entretanto, observa-se, nos tratamentos  $T_0$ ,  $T_{1*}$  e  $T_1$ , que a produtividade foi superior a 6,000  $Mg\ ha^{-1}$  (Figura 4), com redução de 9 e 5 %, respectivamente, para os tratamentos  $T_{1*}$  e  $T_1$  em relação ao  $T_0$ , evidenciando que uma variação na RP de 1,65 a 2,36 MPa, para o Latossolo Vermelho textura média, permitiu produtividade acima de 90 % (Figura 4). Al-Adawi & Reeder (1996), estudando os efeitos da compactação, proporcionada por uma carreta de transporte de grãos com 9 e 11  $Mg$  por eixo, verificaram reduções de 24 e 43 % na produtividade de milho, respectivamente, assim como Silva Júnior (2001), que, estudando a variabilidade espacial da resistência à penetração em um Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com milho, constatou tendência de decréscimo da produtividade com o aumento da resistência à penetração em todas as camadas estudadas, a qual variou, predominantemente na área, entre 1,5 e 2,5 MPa. Para Albuquerque & Reinert (2001), a produtividade de milho foi reduzida em 23 % nos perfis com horizonte A raso de um Argissolo Vermelho, quando comparado aos perfis com horizonte A profundo, provavelmente por causa da restrição imposta ao crescimento radicular no horizonte B.

Uma hipótese, nesse caso, é que o aumento da densidade e superfície radicular, na camada superficial do solo, e o aumento do diâmetro radicular devido à compactação do solo, associados à menor disponibilidade hídrica no mês de fevereiro, durante o período de enchimento de grãos (Figura 1) tenham restringido a absorção de nutrientes, limitando a produtividade de grãos de milho. Fiorin et al. (1997), em um Argissolo, verificaram que a maioria das raízes de milho ficou confinada no horizonte A, devido à maior macroporosidade e aeração desse horizonte durante todo o ciclo da cultura; com a diminuição desse horizonte, ocorreram reduções na produtividade de 29 a 14 %, em razão da menor disponibilidade hídrica

para as plantas. Segundo Rosolem et al. (1994), o aumento da compactação do solo prejudicou a absorção de todos os nutrientes por unidade de área da raiz. Mello Ivo & Mielniczuk (1999) observaram diferenças morfológicas nas raízes de milho provocadas pela compactação do solo, mas não limitantes à produtividade da cultura. Possivelmente, os menores valores de RP e densidade do solo proporcionados pelos diferentes preparos de solo utilizados por esses autores não foram suficientes para restringir a produtividade da cultura, confirmando os resultados de Silva et al. (2000), para os quais, apesar da menor densidade de raízes no plantio direto, o estado de compactação observado foi inferior ao nível crítico para afetar a produção de grãos e silagem de milho. Segundo Letey (1985), o aumento da resistência à penetração do solo causa o crescimento reduzido do sistema radicular, o qual, por meio de sinais hormonais enviados pelas raízes à parte aérea da planta, reduz seu crescimento, podendo assim comprometer a produtividade.



**Figura 4. Regressão entre a resistência mecânica à penetração e a produtividade de grãos de milho. As barras referem-se ao erro-padrão da média, e a não-sobreposição delas indica diferença significativa entre os tratamentos.**

## CONCLUSÕES

1. O tráfego de tratores sobre o Latossolo Vermelho textura média causou maior compactação do solo na camada de 0–0,10 m.
2. A matéria seca das raízes e o diâmetro radicular foram indicadores mais sensíveis à compactação do solo do que a densidade e superfície radicular.
3. Houve crescimento radicular mesmo quando a macroporosidade atingiu valores de  $0,05\ m^3\ m^{-3}$ .
4. Mesmo com baixa restrição hídrica no período de crescimento vegetativo da cultura, as restrições físicas resultantes da compactação do solo provocaram alterações na morfologia do sistema radicular do milho, reduzindo a produtividade da cultura, mas não foram impeditivos ao enraizamento.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelas bolsas de estudos e pela concessão de auxílio à pesquisa para o desenvolvimento do projeto. Os agradecimentos são extensivos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro concedido e pela bolsa de produtividade em pesquisa ao segundo autor.

## LITERATURA CITADA

- AL-ADAWI, S.S. & REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 39:1641-1649, 1996.
- ALBUQUERQUE, J.A. & REINERT, D.J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:539-549, 2001.
- BENGOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth response. *J. Soil Sci.*, 41:341-358, 1990.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I. & ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:829-834, 2002.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C. & PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:167-177, 2001.
- BLAKE, G.R. Bulk density. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.374-390.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986 Part.1. p.363-375.
- BOONE, F.R.; van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; HAAG, B.A. & BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize of silage. II. Soil conditions and growth. *Nether. J. Agr. Sci.*, 35:113-128, 1987.
- DANIELSON, R.E. & SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part. 1. p.443-460.
- DAVIES, W.J. & ZANGH, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Plant. Physiol. Plant. Molec. Biol.*, 42:55-76, 1991.
- DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. *Plant Soil*, 98:303-312, 1987.
- FIORIN, J.E.; REINERT, D.J. & ALBUQUERQUE, J.A. Armazenamento de água no solo e crescimento e produção de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:249-255, 1997.
- FLOWERS, M.D. & LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a Molic Ochraqualf in Northwest Ohio. *Soil Till. Res.*, 48:21-35, 1998.
- FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. & LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:947-953, 2003.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Part 1 -Physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.383-409.
- HARRIS, G.A. & CAMPBELL, G.S. Automated quantification of roots using a simple image analyzer. *Agron. J.*, 81:935-938, 1989.
- HORN, R. & LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.
- JONES, C.A.; BLAND, W.L.; RITCHIE, J.T. & WILLIAMS, J.R. Simulation of root growth. In: HANKS, J. & RITCHIE, J.T., eds. *Modeling plant and soil systems*. Madison, American Society of Agronomy, 1991. p.91-123.
- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1. p.635-660.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-293, 1985.
- MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. & SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709, 1999.
- MATERECHERA, S.A.; ALSTON, A.M.; KIRBY, J.M. & DEXTER, A.R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant Soil*, 144:297-303, 1992.
- 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.
- MENGEL, D.B. & BARBER, S.A. Development and distribution of the corn root under field conditions. *Agron. J.*, 66:341-344, 1974.
- NOVAK, L.R.; MANTOVANI, E.C.; MARTYN, P.J. & FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro álico, em dois níveis de umidade. *Pesq. Agropec. Bras.*, 27:1587-1595, 1992.
- PHEBE, C.J. & BEALE, O.W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:430-436, 1976.

- RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p.
- RAIJ, B.van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.; LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
- ROSOLEM, C.A. Relações solo-planta na cultura do milho. Jaboticabal, Funep, 1995. 53p.
- ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSE, H.F. & MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. R. Bras. Ci. Solo, 18:491-497, 1994.
- SAS Institute. SAS User's guide: Statistics Cary, 1999. 595p.
- SILVA JÚNIOR, R.L. Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2001. 117p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 24:191-199, 2000.
- STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. Ci. Rural, 34:755-760, 2004.
- TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.; GUIMARÃES, M.F. & FONSECA, I.C.B. Resistência à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. R. Bras. Ci. Solo, 25:725-730, 2001.
- TAYLOR, H.M. & BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. Soil Till. Res., 19:111-119, 1991.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 22:573-581, 1998.
- WOORHEES, W.B. & LINDSTORM, M.J. Soil compaction constraints on conservation tillage in the Northern Corn Belt. J. Soil Water Conserv., 38:307-311, 1983.