

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL

AVALIAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM  
LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM MILHO

**Onã da Silva Freddi**

Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Fevereiro de 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL

AVALIAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM  
LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM MILHO

**Onã da Silva Freddi**

**Orientador: Prof. Dr. José Frederico Centurion**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Fevereiro de 2007

Freddi, Onã da Silva

F852a Avaliação do intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho  
cultivado com milho / Onã da Silva Freddi. – – Jaboticabal, 2007  
xvi, 105 f. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2007

Orientador: José Frederico Centurion

Banca examinadora: Morel de Passos e Carvalho, Itamar Andrioli,  
Marlene Cristina Alves, Aildson Pereira Duarte

Bibliografia

1. Compactação do solo. 2. Sistema radicular. 3. Água no solo. I.  
Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.43:633.15

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da  
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de  
Jaboticabal.

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**ONÃ DA SILVA FREDDI**, nascido em 10 de setembro de 1978, em Ilha Solteira - SP, cursou o ensino médio no Colégio “Pré-Universitário de Ilha Solteira”, Ilha Solteira - SP. Em 1997 Ingressou no curso de Agronomia na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia (UNESP/FE), Ilha Solteira - SP, obtendo o título de Engenheiro Agrônomo em 2001. Em fevereiro de 2002 ingressou no curso de Mestrado (Sistemas de Produção) na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia (UNESP/FE), Ilha Solteira - SP e, em fevereiro de 2004 ingressou no curso de Doutorado na Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV), Jaboticabal – SP, obtendo o título de Doutor em 23 de fevereiro de 2007 (Produção Vegetal).

## OFEREÇO

*A Deus, que me deu saúde e paz para poder chegar até aqui;*

*Aos meus pais,*

*Danildo Freddi e Zenaide Tiago da Silva Freddi, que sempre me apoiaram e me incentivaram em todas as etapas da vida; e*

*Aos meus irmãos,*

*Tito da Silva Freddi e Tiago da Silva Freddi, pelo convívio familiar.*

## DEDICO

*À Fernanda Salles Cunha Peres,*

*minha namorada e melhor amiga, pelo estímulo e sobretudo pela paciência e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao Prof. Dr. José Frederico Centurion, pela orientação e acima de tudo pela amizade, confiança e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e crescimento pessoal;
- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro concedido;
- À direção da FCAV/UNESP e aos coordenadores do Curso de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela possibilidade proporcionada a mim;
- Aos Professores do curso de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias: José Frederico Centurion, Itamar Andrioli, Carlos Eduardo Angeli Furlani, Teresa Cristina Tarlé Pissarra, José Renato Zanini, Célia Regina Paes Bueno, William Natale, Markus Liedgens e Leandro Borges Lemos, pelos ensinamentos e convívio durante o curso;
- Aos colegas de Pós-Graduação, pelo companheirismo e pelos bons momentos que me proporcionaram, fundamentais ao êxito do curso;
- Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, Orivaldo G. S. Rosa, Célia R. F. Muniz, Orivaldo S. Gomes, Luis M. P. Souza, Hoster A. Pereira, Célia R. F. Muniz, Maria I. Bueno, Martha G. Pato, Cláudia C. D. M. Cirilo, Dejair L. Silva e Ademir F. Silva pela paciência e presteza na realização dos trabalhos referentes ao curso e pela amizade;
- Aos funcionários da Fazenda de Ensino e Pesquisa da FCAV/UNESP, companheiros nos trabalhos de campo, por tudo o que contribuíram para a realização desta pesquisa;

- Ao Professor Álvaro Pires da Silva, pelo empréstimo do penetrômetro eletrônico, e à Professora Durvalina Maria Mathias dos Santos, pelo empréstimo do scanner para avaliação de raízes, e

- A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram para esse acontecimento.

A Deus pela vida e contínuo amparo.

***Muito obrigado...***

## SUMÁRIO

	página
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xv
CAPÍTULO 1 Considerações Gerais.....	01
CAPÍTULO 2 Compactação do Latossolo Vermelho de textura média nas propriedades físicas do solo, IHO e características agronômicas do milho.....	13
CAPÍTULO 3 Compactação do Latossolo Vermelho de textura média no sistema radicular e produtividade do milho.....	30
CAPÍTULO 4 Compactação do Latossolo Vermelho de textura argilosa nas propriedades físicas do solo, IHO e características agronômicas do milho.....	46
CAPÍTULO 5 Compactação do Latossolo Vermelho de textura argilosa no sistema radicular e produtividade do milho.....	66
REFERÊNCIAS .....	92



## LISTA DE TABELAS

Tabela		página
01	Valores médios e erros padrões da macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração e densidade do solo nas diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura média.....	21
02	Resumo da análise de variância para a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, número de espigas por planta, massa de 1000 grãos, massa seca das plantas e produtividade, envolvendo intensidades de compactação do Latossolo Vermelho de textura média.....	22
03	Valores de F calculados pela análise de variância para a densidade do comprimento radicular, superfície radicular, diâmetro médio radicular e massa seca das raízes nas diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura média.....	36
04	Valores médios e erros padrões da macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração e densidade do solo nas diferentes intensidades de compactação e camadas no Latossolo Vermelho de textura média.....	38
05	Médias e erros padrões da densidade radicular, superfície radicular, diâmetro radicular e massa seca das raízes do milho em função das diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura média.....	40
06	Caracterização química do Latossolo Vermelho de textura argilosa cultivado com milho pertencente à Fazenda Experimental da FCAV, realizada após adubação na entrelinha da cultura.....	51
07	Valores médios e erros padrões da porosidade total nas diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa.....	56

08	Propriedades físicas do Latossolo Vermelho de textura argilosa, na camada de 0-0,25 m, submetido a diferentes intensidades de compactação.....	57
09	Matriz de correlação entre as propriedades físicas do Latossolo Vermelho de textura argilosa e as características agronômicas da cultura do milho.....	61
10	Valores médios e erros padrões da macroporosidade, microporosidade e resistência mecânica do solo à penetração nas diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa.....	71
11	Equações exponenciais entre a resistência mecânica à penetração (RP) do Latossolo Vermelho de textura argilosa e a umidade gravimétrica do solo (UG) em diferentes intensidades de compactação e camadas.....	74
12	Análises químicas de rotina para fins de fertilidade do Latossolo Vermelho cultivado com milho pertencente à Fazenda de Ensino e Pesquisa da FCAV, realizada após adubação na entrelinha da cultura.....	75
13	Valores médios e erros padrões da densidade radicular ( $\text{cm cm}^{-3}$ ), superfície radicular ( $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$ ), diâmetro radicular (mm) e massa seca da raiz ( $\text{mg cm}^{-3}$ ) de milho em função das diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa.....	82
14	Matriz de correlação entre a superfície, densidade e diâmetro radicular, massa seca das raízes e a produtividade de milho cultivado em Latossolo Vermelho de textura argilosa submetido a diferentes intensidades de compactação.....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura	página
01 Regressão entre a resistência do Latossolo Vermelho de textura média à penetração e a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, massa de 1000 grãos, massa seca e produtividade do milho. As barras referem-se aos erros padrões das médias.....	24
02 Variação do conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), resistência do solo à penetração de 1,65 MPa ( $\theta_{RP}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) no Latossolo Vermelho de textura média.....	26
03 Regressão entre a densidade média da camada de 0-0,20 m do Latossolo Vermelho de textura média e a produtividade de milho.....	28
04 Precipitação diária no período de 18 de novembro a 10 de abril de 2005 (a), e variação do conteúdo de água, na camada de 0-0,20 m, do Latossolo Vermelho de textura média no período de 7 dezembro a 24 de março de 2005 (b).....	33
05 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 Latossolo Vermelho de textura média.....	39
06 Regressão entre a resistência mecânica à penetração do Latossolo Vermelho de textura média e a massa seca das raízes e o diâmetro radicular da cultura do milho.....	42
07 Regressão entre a resistência mecânica à penetração do Latossolo Vermelho de textura média e a produtividade de grãos do milho. As barras referem-se aos erros padrões das médias.....	44
08 Precipitação diária no período de 23 de novembro de 2005 a 17 de abril de 2006.....	49
09 Variação do conteúdo de água em diferentes camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa.....	49

10	Regressão entre a resistência mecânica do Latossolo Vermelho de textura argilosa à penetração e a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo e massa seca das plantas.....	58
11	Produtividade de grãos da cultura do milho em função da resistência à penetração do Latossolo Vermelho de textura argilosa, na camada de 0-0,25 m. As barras referem-se aos erros padrões das médias.....	60
12	Variação do conteúdo de água volumétrico ( $\theta$ ) com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), resistência do solo à penetração de 1,16 MPa ( $\theta_{RP}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) no Latossolo Vermelho de textura argilosa.....	62
13	Densidade de referência determinada com o aparelho de Proctor no Latossolo Vermelho de textura argilosa (a). Produtividade relativa em função da densidade relativa do solo (b).....	64
14	Precipitação diária no período de 23 de novembro de 2005 a 17 de abril de 2006.....	69
15	Variação do conteúdo de água em diferentes camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa.....	73
16	Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração e a superfície radicular do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d).....	76
17	Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração e a densidade radicular do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d).....	77
18	Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração e o diâmetro radicular do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d).....	79
19	Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração e a massa seca das raízes do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d).....	80

20	Regressão entre a resistência mecânica do Latossolo Vermelho de textura argilosa à penetração e a produtividade de milho.....	86
21	Variação da resistência mecânica à penetração do Latossolo Vermelho de textura argilosa em função do conteúdo de água do solo, em diferentes camadas e intensidades de compactação, durante o ciclo da cultura do milho.....	88
22	Variação da resistência mecânica à penetração do Latossolo Vermelho de textura argilosa em função do conteúdo de água do solo, em diferentes camadas do tratamento com quatro passadas do trator de 11 Mg, durante o ciclo da cultura do milho.....	89

## AVALIAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM MILHO

**RESUMO** – Os solos submetidos aos sistemas de produção sem preparo estão condicionados a compactação do solo, provocado pelo tráfego de máquinas, tornando necessário o acompanhamento das alterações do ambiente físico, que quando desfavorável, restringe o crescimento radicular, podendo reduzir a produtividade das culturas. O objetivo geral foi avaliar, em condições de campo, a resposta do milho, cultivado em um Latossolo Vermelho distrófico de textura média (LVd) e um Latossolo Vermelho eutroférico de textura argilosa (LVef) submetidos a diferentes intensidades de compactação, quanto as características agronômicas da cultura, e caracterizar adequadamente a compactação do solo a partir do intervalo hídrico ótimo (IHO). Os tratamentos foram constituídos por seis intensidades de compactação no LVd e cinco para o LVef, proporcionados pelo tráfego de tratores em um delineamento inteiramente casualizado. Foram coletadas amostras indeformadas do solo nas camadas de 0,02–0,05, 0,08–0,11, 0,15–0,18 e 0,22–0,25 m para determinação da resistência mecânica do solo à penetração, porosidade e densidade do solo e IHO. As características avaliadas da cultura foram: altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, número de espigas por planta, massa seca das plantas, massa de 1000 grãos e produtividade do milho. Para determinação da densidade, superfície e diâmetro radicular e massa seca das raízes, foram retiradas amostras do solo nas camadas de 0–0,05; 0,05–0,10; 0,10–0,15 e 0,15–0,20 m, em cada parcela. A compactação do solo restringiu todas as características avaliadas da cultura com exceção apenas do número de espigas, em ambos os solos, e a massa de 1000 grãos no LVef. Para os Latossolos estudados o IHO foi limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo não ocorrendo limitações de aeração, entretanto, foi reduzido na parte inferior pela resistência do solo à penetração, mesmo no tratamento não trafegado, com densidade do solo média de  $1,16 \text{ Mg m}^{-3}$  para o LVd e  $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$  para o LVef. A densidade crítica do solo para o crescimento radicular,

determinada no IHO, foi de  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$  para o LVd e  $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$  para o LVef. Valores de resistência à penetração variando entre 1,03 e 5,69 MPa no LVd, na camada de 0-0,20 m, provocaram alterações na morfologia do sistema radicular, reduzindo a produtividade da cultura em 38%. Para o LVef, valores de resistência mecânica entre 0,32 a 1,83 MPa, na camada de 0-0,20 m, alteraram a morfologia e crescimento do sistema radicular em todas as camadas, com exceção apenas para a densidade radicular e massa seca das raízes na camada de 0,10-0,20 m, restringindo também o crescimento radicular em profundidade e a produtividade em 27%. Ainda que com o aumento da resistência mecânica à penetração das raízes tenha havido queda da produtividade de milho, houve um substancial crescimento radicular, sobretudo quando a macroporosidade atingiu o mínimo valor de  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , resultante das intensidades da compactação. Portanto, tais intensidades não anularam o crescimento radicular do milho, havendo, por conseguinte, a produtividade mínima de aproximadamente  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$  para o LVd e  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  para o LVef. O monitoramento da compactação do solo se mostrou necessário para prevenir perdas na produtividade do milho.

**Palavras-Chave:** resistência à penetração, água no solo, Latossolos, *Zea mays*, sistema radicular, aeração do solo

## EVALUATION OF THE LEAST LIMITING WATER RANGE IN OXISOL CULTIVATED WITH CORN

**SUMMARY** – Agricultural soils under no tillage systems are conditioned to soil compaction due to machinery traffic, which can restrict root growth and reduce crops yield. Thus, the aim of this work was to determine the Least Limiting Water Range (LLWR) and to evaluate the corn response, by agronomical traits, to different compaction levels in an Oxisol, medium texture (LVd) and a clayey Oxisol (LVef). The treatments were formed by six levels of compaction in the LVd and five levels in the LVef, proportioned by the tractor's traffic, in a completely randomized design, with four repetitions. Undeformed soil samples were collected in layers of 0.02–0.05, 0.08–0.11, 0.15–0.18 e 0.22-0.25 m to determinate mechanical soil resistance to penetration, porosity and bulk density and LLWR. Crop parameters evaluated were: plants height, ear height, stem diameter, ear number per plant, plants dry matter, mass of 1,000 grains and yield of grains. For the determinations of bulk, surface, root diameter and roots dry matter there were collected soil samples in the layers of 0-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.15, 0.15-0.20 m, in each plot. The soil compaction restricted all of the crop parameters evaluated, with exception only of the ear number per plant, in both soils, and the mass of 1000 grains in the LVef. The LLWR was limited by the water content on field capacity and reduced by the soil resistance to penetration even in the no tractor traffic treatment, with medium density of  $1.16 \text{ Mg m}^{-3}$  for LVd and  $1.12 \text{ Mg m}^{-3}$  for LVef. The critical soil density for root growth, determined in LLWR, was of  $1.46 \text{ Mg m}^{-3}$  for LVd and  $1.37 \text{ Mg m}^{-3}$  for LVef. Values of penetration resistance between 1.03 and 5.69 MPa, in the 0-0.20 m layer, promoted modifications in the root system morphology reducing the crop yield to 38%. For LVef, values of mechanical resistance between 0.32 and 1.83 MPa in the 0-0.20 m layer, modified the growing and root system morphology in all layers, with exception only of root density and root dry matter in the layer of 0.10-0.20 m, also restraining root deep growing and yield in 27%. Even the increase of mechanical resistance to penetration has reduced corn yield, there was a substantial root growth,



especially when the macroporosity range the minimum value of  $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , resulted by the compaction levels. Thus, the compaction levels had no restriction to corn root growth enabling a minimum grain yield of  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$  for LVd and  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  for LVef. The compaction soil supervising showed itself necessary to prevent decrease in corn yield corn.

**Keywords:** resistance to penetration, soil water content, Oxisols, *Zea mays*, root system, soil aeration

## **CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Dentre os cereais cultivados no Brasil, o milho é o mais expressivo, com 35,0 milhões de toneladas de grãos produzidas em uma área aproximadamente de 12,0 milhões de hectares na safra 2004/2005 (FNP Consultoria & Comércio, 2006). Desse total produzido a 1ª safra foi responsável por 27,3 milhões de toneladas de grãos, em uma área de 9,0 milhões de hectares, e a 2ª safra por 7,7 milhões de toneladas, em uma área de 3,0 milhões de hectares. Nos últimos anos, a produção brasileira de milho cresceu a uma taxa superior a 4% ao ano, sendo que o principal componente desse crescimento foi a elevação da produtividade média (COUTO et al., 2003). Os híbridos simples e triplos representam, hoje, cerca de 65% das opções para os produtores, mostrando uma tendência na agricultura brasileira e uma maior necessidade de se aprimorar os sistemas de produção utilizados, para melhor explorar o potencial genético dessas sementes (CRUZ & PEREIRA FILHO, 2006). Segundo COUTO et al. (2003), em algumas regiões do Sul, do Triângulo Mineiro, de São Paulo e, de maneira geral, no Centro-Oeste, são observados os maiores rendimentos da cultura do milho no Brasil, sendo que esses rendimentos estão geralmente associados a lavouras de maior área, de orientação comercial, onde normalmente é conduzido um sistema de rotação milho-soja e é mais freqüente o uso do sistema plantio direto.

Nos últimos anos tem aumentado substancialmente o uso do sistema plantio direto, sendo que atualmente, mais de 12 milhões de hectares, já são cultivados com este sistema e, cerca de 3 milhões de hectares ocupados com a cultura do milho; e nas regiões onde se cultiva a soja e o milho, o sistema plantio direto se beneficia desta rotação que é benéfica para ambas as culturas, o mesmo ocorrendo para o plantio do milho “safrinha” plantado após a soja precoce (COELHO et al., 2004).

O plantio direto é um sistema no qual a semente é depositada diretamente no solo não preparado, onde os resíduos da cultura anterior permanecem na superfície e as plantas daninhas são controladas quimicamente. Uma vez que o sistema plantio direto altera as condições químicas, físicas e biológicas do solo, também ocorrerão alterações no desenvolvimento das plantas e na produtividade. Neste sentido,

pesquisadores intensificaram os estudos em relação a defensivos agrícolas e a fertilidade do solo no sistema plantio direto, o que permitiu a expansão do sistema que já ocupa expressivas áreas agrícolas e continua crescendo acentuadamente devido aos benefícios técnicos, econômicos e ambientais, entretanto, em relação a compactação do solo, causada pelo tráfego de tratores e o não revolvimento do solo, apesar de esforços de vários cientistas para minimizar seus efeitos, ainda permanece uma grande lacuna, que é a utilização de uma propriedade indicadora e precisa da compactação e a definição de níveis a partir dos quais são necessários adotar medidas biológicas e/ou mecânicas para descompactar o solo e evitar prejuízos à produção, observados a partir da excessiva compactação.

### **Compactação do solo**

A modernização da agricultura, por meio da mecanização, trouxe facilidades ao homem, possibilitando um trabalho mais rápido e eficiente. Com o passar dos tempos, a tecnologia das máquinas melhorou e foram surgindo máquinas cada vez maiores e mais pesadas, otimizando o trabalho no campo, mas trazendo à tona um grande problema, a compactação do solo.

Sabe-se que um solo pode ser quimicamente bom, mas se a compactação ocorre, as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes fica prejudicado, e é nelas que ocorre a maior taxa de absorção. Além disso, com a compactação, ocorre a diminuição dos espaços livres do solo, e, conseqüentemente, a quantidade de oxigênio disponível na rizosfera, podendo ser limitante para o desempenho dos processos metabólicos da planta (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000).

A compactação do solo pode ser entendida como a diminuição do volume do solo, ocasionada por compressão, causando um rearranjo das partículas do solo que vem sempre acompanhado de uma redução da porosidade (CARVALHO FILHO et al., 2004). Para se ter uma agricultura sustentável é necessário conhecer as intensidades

de compactação suportados pelo solo, bem como o momento das operações agrícolas (DIAS JUNIOR, 2000). Dentre os efeitos prejudiciais da compactação do solo, pode-se destacar: a redução da infiltração de água no solo, resultando em aumento da erosão, poluição e assoreamento dos mananciais de água; redução do movimento de ar, da água e a disponibilidade de nutrientes no solo; a redução da penetração e da ramificação das raízes por excessiva resistência mecânica e aeração deficiente, podendo afetar o desenvolvimento vegetativo da parte aérea das plantas (HAKANSSON & VOORHEES, 1998), afetando direta e indiretamente a produção das plantas (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

Pesquisas demonstraram que a compactação reduz o volume de poros do solo (KLEIN & LIBARDI, 2002; STONE et al., 2002), e que nesse processo os macroporos são os primeiros a desaparecerem, responsáveis pela sua aeração (PRIMAVESI, 1987). Assim, o desenvolvimento das raízes é afetado negativamente pela redução dos macroporos (SÉGUY et al., 1999), pelo aumento da resistência à penetração das raízes (STONE et al., 2002), pela diminuição da concentração de oxigênio, pela menor taxa de mineralização da matéria orgânica no solo, e difusão lenta de nutrientes e de oxigênio para as raízes (RIBEIRO, 1999), diminuindo então a disponibilidade e a absorção de água e de nutrientes (MEDEIROS et al., 2005). Entretanto, segundo DEXTER (1991) a habilidade das raízes das plantas em penetrar camadas compactadas parece ser uma característica desejável para cultivos destinados às áreas afetadas pela compactação.

O crescimento e desenvolvimento das raízes dependem das condições físicas e químicas do solo; normalmente as raízes possuem um crescimento vertical, mas quando encontram uma camada compactada, podem modificar sua direção e forma de crescimento (VARSA et al., 1997). BENGHOUGH & MULLINS (1990) afirmaram que o menor crescimento radicular em solos compactados ocorre por causa da menor taxa de alongação celular em razão da diminuição na taxa de divisão celular do meristema. Entre as modificações morfológicas nas raízes, provocadas pela restrição ao crescimento, estão o aumento do diâmetro e a diminuição do comprimento, tornando-as tortuosas (SILVA & ROSOLEM, 2002). Essas modificações, geralmente, são

decorrentes do crescimento das raízes nos pontos de menor resistência oferecidos pelo solo (BORGES et al., 1988), como canais deixados por raízes decompostas e fendas naturalmente encontradas no solo.

De acordo com MATERECHERA et al. (1992), a compactação do solo pode promover o engrossamento do sistema radicular, em razão das mudanças morfológicas e fisiológicas, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptar. Segundo BENNIE (1996), o sistema radicular provoca desarranjos no solo ao penetrar camadas com alta resistência mecânica e, ao sofrer decomposição, deixa canais “bioporos” que contribuem para a infiltração de água e difusão de gases, melhorando a qualidade física do solo para as culturas subseqüentes. Contudo, os benefícios dos bioporos no crescimento de raízes dependem do nível de compactação (SILVA & ROSOLEM, 2002).

Segundo COELHO et al. (2000), as relações entre a resistência mecânica à penetração, densidade e o conteúdo de água variam entre os solos. Embora, as relações entre a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração com o crescimento radicular já tenham sido extensivamente estudadas, valores de resistência relacionados diretamente com restrições impostas ao crescimento radicular não têm sido conclusivos para uma série extensiva de solos. Em geral, a resposta das plantas à compactação oscila entre solos (MORAES et al., 1991; SILVA et al., 2006); condições de umidade (SILVA et al., 2006); entre culturas (MORAES et al., 1991; ALVARENGA et al., 1996; SILVA & ROSOLEM, 2001); e entre cultivares (BORGES et al., 1988; QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000; GUIMARÃES et al., 2001; SILVA et al., 2006).

Pelo fato da compactação ser um sério problema para os solos agrícolas, seu estudo é intenso, bem como a busca por parâmetros que permitam sua mensuração e comparação entre os diferentes solos. Um fator de suma importância a considerar é o impacto do teor de água sobre as medidas de resistência mecânica do solo à penetração. O reconhecimento da ocorrência destas interações, e de que as culturas estão sujeitas as suas interferências, demonstra a necessidade de quantificá-las na avaliação da influência das práticas de manejo sobre as condições físicas do solo (TORMENA et al., 1998a). Logo, o efeito das práticas de cultivo sobre a qualidade do

solo deve ser monitorado ao longo do tempo, principalmente aqueles relacionados com a erosão hídrica, estrutura, distribuição do tamanho dos poros e propriedades hídricas do solo, como os fluxos e a disponibilidade de água às plantas. Para isto, indicadores de qualidade do solo têm sido empregados, como, por exemplo, o intervalo hídrico ótimo e a densidade relativa.

### **Influência da mineralogia nas propriedades físicas do solo**

A suscetibilidade do solo à compactação depende primeiramente de suas propriedades físico-mecânicas, as quais dependem do tipo de solo e do conteúdo de água, juntamente com sua condição precedente (ETANA et al., 1997). Os óxidos de ferro e de alumínio são importantes na agregação do solo, uma vez que, sendo considerados agentes desorganizadores em nível microscópico, com um aumento dos seus teores, as partículas tendem a um arranjo mais casualizado e a estrutura tende a granular (RESENDE, 1985), influenciando as propriedades físicas do solo (PEDROTTI et al. 2003). Segundo FERREIRA et al. (1999a), os Latossolos caulíníticos, em razão do ajuste face a face das placas de caulinita, desenvolvem um plasma denso, que lhes confere valores mais elevados de densidade do solo. Assim sendo, aos maiores teores de caulinita corresponderão aos Latossolos com os maiores valores de densidade. Os autores ainda afirmaram que a macroporosidade está correlacionada positivamente com o teor de  $Al_2O_3$  do ataque sulfúrico e com o teor de argila, sendo que PEDROTTI et al. (2003) demonstraram haver correlação negativa da macroporosidade com o aumento da caulinita na fração argila dos solos e correlação positiva com o aumento da gibbsita. Para FERREIRA et al. (1999b), a distribuição dos grãos de quartzo em relação ao plasma é porfirogrânica, isto é, os grãos estão envoltos num plasma denso, contínuo, com pouca tendência ao desenvolvimento de microestrutura, razão do ajuste face a face das placas de caulinita, sendo que o modelo caulínítico implica no desenvolvimento de macroestrutura do tipo em blocos, devendo originar Latossolos com maior densidade do solo, maior proporção de poros pequenos e menor

permeabilidade. Segundo BEUTLER et al. (2002), a maior retenção de água em baixas tensões para o Latossolo Vermelho eutroférico oxidico, em relação ao Latossolo Vermelho distrófico caulinitico, deveu-se, entre outros fatores, à mineralogia oxidica da fração argila, que promove a formação de micropeds (microagregados) arredondados com menos de 1 mm, promovendo maior proporção de poros grandes e menor densidade do solo.

CHAGAS et al. (1997) também relataram que solos com elevado conteúdo de caulinita na fração argila apresentaram alta densidade, menor porosidade total e macroporosidade quando comparados com outros solos oxidicos. CENTURION et al. (2004), avaliando propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico caulinitico e de um Latossolo Vermelho eutroférico oxidico sob diferentes sistemas de uso, obtiveram que o Latossolo caulinitico apresentou maior densidade e microporosidade do solo e menor porosidade total e macroporosidade.

### **Resistência mecânica à penetração do solo relacionada com a cultura do milho**

A penetrometria consiste num método apropriado para avaliar a resistência mecânica à penetração das raízes no solo (BENGHOUGH & MULLINS, 1990). Tal resistência, medida normalmente com o penetrômetro, é a relação entre a força exercida para a penetração no solo, de uma haste provida de um cone metálico numa extremidade, do qual sua área basal é constante e conhecida (BRADFORD, 1980). A resistência mecânica à penetração possui boa correlação com o crescimento radicular, uma vez que a elongação das raízes varia de forma inversamente proporcional à sua grandeza. As limitações apresentadas pelo crescimento radicular variam com o tipo de penetrômetro utilizado, tipo de solo e também com a espécie da planta. Outro fator importante é que com a redução do teor de água no solo ocorre aumento da sua resistência mecânica à penetração (RP), decorrente da maior coesão entre as partículas sólidas (GERARD et al., 1972). Entretanto, tal resistência apresenta valores

de 2 a 8 vezes superiores a máxima pressão axial que a raiz pode exercer (MISRA et al., 1986), sendo acentuadamente influenciada pelo conteúdo de água, textura e pela condição estrutural do solo (TARDIEU, 1994), fatores que dificultam a obtenção de valores críticos ao desenvolvimento das culturas.

Resultados contraditórios quanto ao desenvolvimento de plantas em solos compactados são demonstrados na literatura. Sabe-se que um solo com valores de resistência mecânica à penetração variando entre 1,0 e 3,5 MPa (MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999), ou de 2,0 a 4,0 MPa, segundo ARSHAD et al. (1996), poderá restringir ou mesmo impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes. MILLER (1987) afirmou que a penetração das raízes pode ser reduzida se a resistência do solo atingir valores da ordem de 3,0 MPa, o que pode resultar em decréscimo no suprimento de água e nutrientes para as plantas.

PAULETTO et al. (1989) constataram que somente seriam consideradas camadas compactadas aquelas nas quais os valores de resistência mecânica à penetração fossem superiores a 1,72 MPa, alertando também para o fato de que o limite superior de 2,32 MPa impediria o desenvolvimento do sistema radicular das plantas de milho. SILVA JÚNIOR (2001), estudando a variabilidade espacial do índice de cone sob um Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com milho, verificou uma tendência de decréscimo da produtividade com o aumento do índice de cone em todas as profundidades estudadas, sendo que tal índice variou, predominantemente na área, entre 1,5 a 2,5 MPa. ROSOLEM et al. (1994a) também observaram que o aumento da densidade do solo de 1,03 para 1,72 Mg m<sup>-3</sup> aumentou a resistência à penetração de 0,05 para 2,0 MPa, causando total impedimento ao crescimento de raízes de milho. Neste contexto, VEEN & BOONE (1990) relataram que as raízes de milho cessaram o crescimento quando a resistência à penetração alcançou 4,7 MPa. Contudo, TAVARES FILHO et al. (2001) afirmaram que a resistência à penetração de um Latossolo Roxo argiloso de 3,5 MPa não restringiu o desenvolvimento radicular do milho, porém influenciou a sua morfologia. Assim como, ALBUQUERQUE & REINERT (2001), em um Argissolo Vermelho distrófico arênico, afirmaram que o crescimento radicular da cultura do milho no horizonte B textural foi restringido pela pequena quantidade de macroporos,



presença de concreções e elevada saturação por alumínio. Porém, a elevada densidade do solo (1,29 a 1,71 Mg m<sup>-3</sup>) e a resistência à penetração (0,25 a 0,49 MPa) não afetaram o sistema radicular do milho.

### **Intervalo hídrico ótimo (IHO)**

Várias propriedades físicas do solo são utilizadas para avaliar o seu estado de compactação do solo, dentre eles a densidade, a porosidade do solo e a resistência mecânica à penetração. Entretanto, o reconhecimento das interações entre as várias propriedades físicas do solo que atuam sobre o crescimento radicular exige que as avaliações das condições físicas sejam feitas por meio de parâmetros que integrem estas variações, permitindo quantificar, de forma apropriada, o ambiente físico na zona radicular do solo (TORMENA, 1998). Portanto, novas abordagens metodológicas têm sido propostas para avaliar a qualidade física do solo, destacando-se o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), quantificado por SILVA et al. (1994), sendo definido como um indicador da qualidade física e estrutural do solo para o crescimento das plantas, que descreve uma faixa de conteúdos de água no solo na qual as limitações ao crescimento das plantas, associadas com a aeração, resistência à penetração e disponibilidade de água, são mínimas. Tais particularidades tornam o intervalo hídrico ótimo um indicador útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade sustentável do solo, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas (TORMENA et al., 1998a). O IHO é negativamente correlacionado com a densidade e com o teor de argila dos solos, ou seja, a compactação em solos argilosos aumenta a probabilidade de as culturas serem expostas às limitações por excessiva resistência à penetração ou reduzida difusão de oxigênio no solo (TORMENA, 1998).

A maior dificuldade à definição de valores críticos é estabelecer se um dado processo (ex.: crescimento de raízes), ou resultado (ex.: produção de grãos), é afetado em determinado grau ou é totalmente paralisado. Vários trabalhos têm sido conduzidos

para avaliar e melhorar o conceito do IHO, principalmente considerando-se os limites restritivos de porosidade de aeração (10%), capacidade de campo (100 hPa), resistência à penetração (2 MPa) e umidade no ponto de murcha permanente (15000 hPa), sendo esses valores clássicos ou se podem ser diferentes destes, e sua relação com o crescimento das plantas. KLEIN (1998) e TORMENA et al. (1999) obtiveram o IHO para avaliar os efeitos do sistema de manejo do solo, concluindo que este índice contribui para elucidar a eficiência e ganhos do uso dessa estratégia, porém ainda necessita-se evoluir na técnica e estratégia de medição dos limites no campo e durante o ciclo das culturas. Segundo BEUTLER et al. (2004a), o valor de 2 MPa tem sido questionado como limitante ao crescimento das raízes e da parte aérea para as diferentes culturas, sistemas de manejo e solos, sugerindo a necessidade de mais estudos que relacionassem o IHO com a produção das culturas. O mesmo autor verificou que os valores de resistência mecânica à penetração restritivos a produtividade do arroz foram menores aos encontrados para a cultura da soja em dois solos e duas tensões de água (100 e 500 hPa), e que a densidade crítica obtida quando o intervalo hídrico ótimo é igual a zero foi alterada com a inserção dos valores de resistência crítica determinados para cada cultura, tornando o intervalo hídrico ótimo menor, e que segundo KAY (1990), quanto menor a amplitude do IHO maior a probabilidade de ocorrência de limitações físicas ao crescimento das raízes e desenvolvimento das plantas. Observou também que a amplitude do IHO para o Latossolo Vermelho de textura média foi menor que a amplitude observada para o Latossolo Vermelho de textura argilosa. Segundo BENJAMIN et al. (2003), o IHO pode ser utilizado para mensurar o efeito do manejo do solo sobre o potencial produtivo das culturas, e que manejos do solo que aumentem a amplitude do IHO podem levar a um aumento do potencial produtivo das culturas.

Os conceitos de IHO, e cálculos de déficit hídrico baseado no IHO, podem ser utilizados por agricultores e técnicos em sistemas de produção irrigados para recomendar que a umidade seja mantida em níveis que não limitem a disponibilidade de água, a resistência à penetração e a aeração do solo. Podem ser usados também para recomendar operações de preparo quando necessárias para aliviar problemas de

compactação (BENJAMIN et al., 2003). Para isto é necessário estabelecer quais são os limites críticos para as culturas.

### **Densidade Relativa**

Pelo fato da compactação ser caracterizada por mudanças no volume, parece ser mais apropriado o uso de métodos baseados nas relações volumétricas, tais como a densidade e a porosidade do solo. Contudo, esses parâmetros variam entre os solos e têm valores limitados quando diferentes solos são comparados, por exemplo, uma densidade que indique um estado extremamente compactado em um solo pode indicar estado pouco compactado em outro (HAKANSSON, 1990; LIPIEC & HAKANSSON, 2000). A expressão da relação entre densidade atual do solo, em relação a algum estado padrão ou de compactação máxima, tem se mostrado útil na caracterização da compactação e resposta das culturas em diferentes tipos de solo (HAKANSSON, 1990; SILVA et al., 1997; BEUTLER et al., 2005).

O estudo do “grau de compactação” ou “compactação relativa” surgiu da necessidade de se encontrar um indicador para caracterizar o estado de compactação que fosse simples o suficiente para ser usado em extensivas experimentações de campo e capaz de formar ligação entre estudos de resposta do solo ao tráfego de máquinas e estudos de resposta das culturas à compactação. O objetivo de HAKANSSON (1990) foi obter máxima produtividade das culturas a um mesmo valor de “densidade relativa”, independente do tipo de solo. O mesmo autor, empregando o grau de compactação para 102 experimentos com ampla faixa de solos, com conteúdo de argila variando de 20 a 600 g kg<sup>-1</sup>, com a cultura de cevada como teste, observou que o grau de compactação ótimo foi próximo de 87%, independentemente da textura. LIPIEC & HANKANSSON (2000), em uma revisão da utilidade do grau de compactação em estudos da estrutura do solo e compactação, afirmaram que, embora a densidade e porosidade ótimas para o crescimento das culturas variem entre os solos, o grau de compactação ótimo para solos revolvidos anualmente é independente da textura e

matéria orgânica. A principal razão é que limites críticos de resistência à penetração e porosidade de aeração se relacionam com o grau de compactação e tensão da água do solo de maneira similar na maioria dos solos. Sendo assim, o grau de compactação é um indicador mais útil que a densidade do solo ou a porosidade, em estudos de efeitos biológicos da compactação, além de ser útil em estudo dos efeitos no tráfego de máquinas nas condições físicas do solo.

## **JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS**

Esta pesquisa justifica-se pelo fato da cultura do milho ser uma das principais culturas de grãos do Brasil, sendo utilizada em sucessão com a soja, no sistema plantio direto. Além do que, poucos estudos demonstraram intensidades de compactação a partir dos quais a produtividade da cultura é reduzida, assim como suas relações com o intervalo hídrico ótimo e a densidade relativa. Portanto, a determinação de valores de resistência do solo à penetração, a partir dos quais a produtividade é reduzida para diferentes Latossolos no Brasil, é imprescindível para evitar perdas da produtividade agrícola.

A premissa básica deste trabalho baseou-se na hipótese de que a granulometria e mineralogia dos solos utilizados causem modificações na amplitude do IHO e das propriedades físicas dos solos, proporcionando diferentes limites de compactação para a produtividade de milho. Assim, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar, em condições de campo, a resposta do milho, cultivado em dois Latossolos Vermelho submetidos a diferentes intensidades de compactação, quanto ao desempenho agrônômico da cultura, e caracterizar adequadamente a compactação do solo a partir do intervalo hídrico ótimo e densidade relativa. Os objetivos específicos foram: (I) quantificar o impacto do tráfego de tratores nas propriedades físicas dos Latossolos, com ênfase no IHO; (II) obter valores, dos indicadores de qualidade física, mais

adequados para o desenvolvimento e produtividade de grãos de milho; (III) avaliar o efeito da compactação dos solos sobre o sistema radicular do milho.

A tese é disposta em capítulos, compondo, além das considerações gerais apresentadas no capítulo 1, os capítulos 2, 3, 4 e 5. Desta forma, o objetivo (I) e (II) são atendidos pelos capítulos 2 e 4; e o objetivo (III), nos capítulos 3 e 5. Sendo assim, algumas sobreposições ocorrem entre os capítulos 2, 3, 4 e 5 para responder ao objetivo geral.

## CAPÍTULO 2 – COMPACTAÇÃO DO LATOSSOLO VERMELHO DE TEXTURA MÉDIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO, IHO E CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DO MILHO

**RESUMO** - As modificações estruturais causadas no solo pelos 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 o efeito da compactação de um Latossolo Vermelho de textura média, localizado em Jaboticabal (SP), proporcionada pelo tráfego de tratores, sobre algumas propriedades físicas do solo, o intervalo hídrico ótimo (IHO), e o desempenho agronômico do milho. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com seis intensidades de compactação e quatro repetições. Foram coletadas amostras indeformadas do solo nas camadas de 0,02–0,05, 0,08–0,11 e 0,15–0,18 m para determinação da resistência mecânica do solo à penetração (RP), da porosidade, da densidade do solo (Ds) e do IHO, na camada de 0-0,20 m. As características da cultura avaliadas foram: altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, número de espigas por planta, massa seca das plantas, massa de 1000 grãos e a produtividade. Os dados foram submetidos a análise da variância e quando significativa foram estabelecidas regressões entre a RP e Ds e as características da cultura. A faixa do conteúdo de água estabelecida pelo IHO na qual não haveria restrições para o desenvolvimento da cultura diminuiu com o aumento da compactação até o limite de Ds de  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ . A compactação do solo restringiu todas as características avaliadas da planta, com exceção apenas do número de espigas por planta.

**Palavras-chave:** *Zea mays*, qualidade física do solo, densidade do solo, resistência à penetração

## INTRODUÇÃO

A habilidade das plantas em absorver água e nutrientes depende da distribuição de raízes no perfil do solo, a qual é função de reduzidas limitações físicas e químicas, as quais são passíveis de alterações pelas práticas de manejo do solo (ALVARENGA & CRUZ, 2003).

A compactação do solo é uma alteração estrutural onde ocorre uma reorganização das partículas e de seus agregados, resultando no aumento da densidade do solo e redução da porosidade total e da macroporosidade do solo (STONE et al., 2002). A compactação pode limitar a absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição de água no solo, trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea (GHOHMANN & QUEIROZ NETO, 1996), resultando num decréscimo da produção, aumento da erosão e da energia necessárias para o preparo do solo (SOANE & OUWERKERK, 1994). Segundo ROSOLEM et al. (1994b), em um Latossolo Vermelho-Escuro de textura média, o crescimento radicular do milho foi 50% prejudicado quando a RP foi igual a 1,42 MPa, mas a RP de 2,00 MPa não foi suficiente para inibir completamente o crescimento radicular e o crescimento aéreo das plantas de milho. FOLONI et al. (2003), em um Latossolo Vermelho de textura média, observaram redução de 20% da massa seca da parte aérea do milho, com valores de resistência à penetração de 1,40 MPa, mas não observaram efeito da resistência à penetração sobre a massa seca total das raízes. SILVA & ROSOLEM (2001) verificaram que o crescimento aéreo do sorgo granífero foi reduzido em mais de 40% ao final de 38 dias de cultivo, com uma resistência mecânica do solo de 1,22 MPa. Para a cultura do arroz, valores superiores a 3,00 MPa foram restritivos a altura e massa seca das plantas em Latossolo Vermelho de textura média (BEUTLER & CENTURION, 2004).

Várias propriedades físicas do solo são utilizadas para avaliar o estado de compactação do solo, dentre elas, a densidade, a porosidade do solo, a resistência mecânica à penetração, condutividade hidráulica e o tamanho de agregados. Entretanto, na maioria dos estudos não tem sido possível estabelecer relações

funcionais destas propriedades com o crescimento e produção das culturas (BEUTLER et al., 2004a). O crescimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas são influenciados por várias propriedades físicas do solo, com complexas interações que envolvem o potencial da água no solo, o teor de oxigênio e a resistência do solo à penetração das raízes (TORMENA et al., 1998a), fatores que dificultam a obtenção de valores críticos destas propriedades ao desenvolvimento e produtividade das culturas (BEUTLER et al., 2004a). Segundo SILVA et al. (2006), a densidade da camada compactada capaz de limitar o crescimento das plantas varia ainda com a espécie e ou mesmo o cultivar plantado.

Novas metodologias têm sido propostas para avaliar a qualidade física do solo, destacando-se o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), definido como um indicador da qualidade física e estrutural do solo para o crescimento das plantas em função da disponibilidade de água, aeração e resistência mecânica do solo à penetração (SILVA et al. 1994; TORMENA et al. 1998a). Segundo BEUTLER et al. (2004a), o valor de 2 MPa tem sido questionado como limitante ao crescimento das raízes e da parte aérea para as diferentes culturas, sistemas de manejo e solos, sugerindo a necessidade de mais estudos que relacionem o IHO com a produção das culturas em solos tropicais do Brasil.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho de textura média, submetido a diferentes intensidades de compactação, utilizando propriedades físicas do solo tradicionais como a densidade, porosidade e a resistência mecânica do solo à penetração e o IHO, assim como as relações destes com o desempenho agrônômico 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), situado nas coordenadas geográficas de 21° 15' 29" de latitude Sul e 48° 16' 47" de longitude Oeste, e 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 média anual de 1428 mm e temperatura média de 21°C. A área utilizada para o experimento vinha sendo utilizada no sistema de preparo convencional com a sucessão anual de milho e soja.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico, hipoférrico (LVd). A composição granulométrica do solo foi determinada em amostras deformadas, na camada de 0-0,20 m, por meio de dispersão com NaOH (0,1 mol L<sup>-1</sup>) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). O Latossolo Vermelho 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, obtido pelo método do picnômetro (BLAKE, 1965), foi de 2,86 Mg m<sup>-3</sup>.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado constituído por seis intensidades de compactação e quatro repetições. Toda parcela experimental apresentou cinco linhas de milho com seis metros de comprimento, considerando-se área útil as três linhas centrais desprezando-se um metro e meio de cada extremidade.

A análise química de rotina para fins de fertilidade seguiu metodologia proposta por RAIJ et al. (1987). No mês de setembro de 2004 foi aplicado calcário para elevação da saturação por bases a 60%, incorporando-o com gradagem niveladora até 0,12 m de profundidade. Antes da instalação do experimento toda a área foi escarificada a 0,30 m de profundidade seguida de uma gradagem aradora.

Os tratamentos foram: T<sub>0</sub>= solo não trafegado; T<sub>1</sub>\*= 1 passada de um trator de 4 Mg; T<sub>1</sub>= 1 passada de um trator de 11 Mg; T<sub>2</sub>= 2 passadas de um trator de 11 Mg, T<sub>4</sub>= 4 passadas de um trator de 11 Mg e T<sub>6</sub>= 6 passadas de um trator de 11 Mg. Os tratores trafegaram por toda parcela, no sentido do declive da área, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram

variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego era sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes. O conteúdo de água no solo durante a compactação esteve próximo à 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 Master, 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). Após 15 dias da emergência das plântulas, foi feito o desbaste para 5 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, aplicados sem incorporação, quando as plantas estavam com 7 a 8 folhas.

Após a semeadura foram coletados dois conjuntos de seis amostras indeformadas de solo na entrelinha da cultura, por tratamento, com cilindros de 54,29 x 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), nas camadas de 0,02-0,05; 0,08-0,11 e 0,15-0,18m, para determinações das propriedades físicas. Para determinar a curva de retenção de água e de resistência mecânica do solo, utilizadas na construção do IHO, foi adotado o procedimento descrito por SILVA et al. (1994). As amostras foram divididas em seis grupos de 36 cilindros, sendo duas amostras por tratamento e camada do solo, em cada tensão. As amostras foram saturadas e submetidas às tensões de 60; 100; 330; 600; 1000 e 3000 hPa, em câmaras de Richards (KLUTE, 1986), e ao atingir o equilíbrio foram pesadas, determinando-se a resistência à penetração (RP) por meio de um penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de 0,01 m min<sup>-1</sup>, cone com ângulo de 60° e com área da base de 2,96 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a obtenção dos dados, conforme descrito por TORMENA et al. (1998a), realizando-se duas repetições por amostra, perfazendo 180 leituras por repetição. A RP média foi obtida desprezando-se meio centímetro de cada extremidade da amostra. Na seqüência, as amostras foram secadas em estufa a ± 105 °C durante 24 horas para determinação do conteúdo de água em cada tensão (GARDNER, 1986) e

da densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986). A microporosidade foi determinada por secagem, na tensão de 100 hPa, em câmaras 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.

Para a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), na camada de 0-0,20 m, a curva de retenção de água no solo foi ajustada pelo modelo empregado por SILVA et al. (1994), na forma log-transformada, descrito a seguir:

$$\ln\theta = \ln a + b \ln D_s + c \ln \psi \quad (1)$$

em que  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $D_s$  é a densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ),  $\psi$  é a tensão de água no solo (hPa) e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  são coeficientes obtidos por meio do ajuste do modelo.

A partir dos coeficientes estimados pela equação 1, aplicou-se o antilogaritmo e foram obtidos os valores estimados das propriedades físicas. Assim, assumindo-se o conteúdo de água na capacidade de campo (cc) equivalente a tensão de 100 hPa e o ponto de murcha permanente (pmp) de 15000 hPa, o  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram estimados pelas equações (2) e (3), respectivamente, obtidas da equação (1), a seguir:

$$\theta_{CC} = \exp^a D_s^b 100^c \quad (2)$$

$$\theta_{PMP} = \exp^a D_s^b 15000^c \quad (3)$$

A curva de resistência do solo à penetração foi ajustada utilizando o modelo proposto por BUSSCHER (1990), na forma log-transformada, a seguir:

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln D_s \quad (4)$$

em que  $d$ ,  $e$ ,  $f$  são coeficientes obtidos por meio do ajuste do modelo.

O conteúdo de água, a partir do qual a RP é limitante, foi obtido pela equação (5), derivada da equação (4):

$$\theta_{RP} = (RP_{(crít.)} / (\exp^d (D_s^e)))^{1/f} \quad (5)$$

A  $RP_{(crit.)}$  foi obtida por meio da regressão entre a produtividade de grãos do milho e as diferentes intensidades de compactação do solo, obtendo-se o valor de 1,65 MPa no campo como o crítico. Segundo SILVA et al. (1994) e BEUTLER (2003) a determinação da RP limitante para cada cultura e sua inserção no IHO aumentam a sua precisão para o monitoramento da qualidade física do solo.

O conteúdo de água cuja porosidade de aeração é igual a 10% foi calculado pela equação (6) a seguir:

$$\theta_{PA} = (1-(D_s/D_p)) - 0,1 \quad (6)$$

Utilizaram-se para construção do IHO os dados das propriedades físicas determinadas nas amostras indeformadas nas três camadas do solo.

A densidade de referência do solo foi determinada em amostras deformadas coletadas na camada de 0-0,2 m e passadas em peneira de 0,004 m. Para tal, foi utilizado o teste de Proctor normal com reutilização do material (NOGUEIRA, 1998). A densidade relativa do solo ( $D_{sr}$ ) foi obtida pela divisão da densidade do solo pela densidade de referência multiplicado por cem, sendo o resultado em porcentagem.

No estágio de pendramento do milho foi medida a altura das plantas, a altura de inserção da primeira espiga e o diâmetro do segundo internódio do colmo, em cinco plantas por parcela na área útil. A altura das plantas foi determinada entre solo e a inserção da base do pendão, e o diâmetro do colmo foi determinado utilizando a média de duas leituras do segundo internódio do colmo por meio de paquímetro digital. Também, determinou-se a massa seca mediante a coleta de quatro plantas por repetição cortadas junto ao solo. Foram separados caules, folhas, pendões e espigas, e levados à estufa ventilada, a 65°C até peso constante. 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 componentes da produtividade avaliados foram número de espigas por planta e massa de 1000 grãos. Obteve-se o número de espigas por planta pela razão entre o número de espigas colhidas e o número de plantas existentes na área útil da parcela. A massa de 1000 grãos foi avaliada pela contagem manual de 100 grãos por parcela, pesagem e correção da

umidade para 13%, e por regra de três simples, extrapolado para 1000 grãos, sendo realizado quatro repetições por parcela.

Os dados coletados foram submetidos aos testes de normalidade e homocedasticidade a 5%, por meio das rotinas PROC UNIVARIATE e PROC GLM/hovtest (SAS, 1999), respectivamente. Após constatação da normalidade e da homocedasticidade, os dados foram submetidos à análise da variância e quando significativas efetuaram-se regressões entre a média das propriedades físicas determinadas nas três camadas do solo e as características da cultura avaliadas; sendo 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 parâmetros da equação, de acordo com o procedimento PROC REG (SAS, 1999).

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Com o solo não trafegado, a maior compactação ocorreu na camada 0,10-0,20 m devido à utilização da grade aradora após a escarificação (Tabela 01), mostrando que o sistema de preparo convencional destaca-se como um sistema que, além de pulverizar a superfície dos solos, propicia a formação de impedimentos físicos logo abaixo das camadas movimentadas pelos equipamentos (TAVARES FILHO et al., 2001). Com uma passagem do trator de 4 Mg a maior compactação ocorreu na camada de 0,08-0,11 m. Entretanto, a utilização do trator de 11 Mg proporcionou maior compactação superficial do solo, independentemente do número de passadas, decrescendo em profundidade (Tabela 01). Dessa forma, na semeadura direta, o tráfego de máquinas provoca compactação superficial do solo (BEUTLER et al., 2001; TAVARES FILHO et al., 1999). O tráfego de tratores sobre o solo proporcionou, na média das três camadas avaliadas, redução de 71% da macroporosidade e aumento de 66; 25 e 10% na resistência

mecânica à penetração, na densidade do solo e na microporosidade, respectivamente, concordando com KLEIN & LIBARDI (2002).

Tabela 01. Valores médios e erros padrões da macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração e densidade do solo nas diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura média.

Camada (m)	Intensidade de compactação					
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> *	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>6</sub>
	Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )*					
0,02-0,05	0,26±0,00	0,09±0,01	0,07±0,01	0,05±0,01	0,04±0,01	0,04±0,01
0,08-0,11	0,23±0,00	0,08±0,01	0,07±0,01	0,06±0,00	0,05±0,01	0,06±0,00
0,15-0,18	0,17±0,06	0,10±0,01	0,08±0,01	0,09±0,01	0,07±0,00	0,06±0,01
Média	0,21±0,02	0,09±0,00	0,07±0,00	0,07±0,01	0,06±0,01	0,06±0,01
	Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )*					
0,02-0,05	0,26±0,00	0,30±0,00	0,30±0,01	0,29±0,01	0,28±0,01	0,29±0,00
0,08-0,11	0,27±0,00	0,30±0,01	0,30±0,01	0,29±0,01	0,30±0,01	0,30±0,01
0,15-0,18	0,28±0,02	0,29±0,01	0,30±0,01	0,29±0,01	0,29±0,00	0,29±0,00
Média	0,27±0,01	0,29±0,00	0,30±0,00	0,29±0,00	0,29±0,00	0,30±0,00
	Resistência à penetração (MPa)*					
0,02-0,05	0,83±0,13	2,07±0,02	2,71±0,09	3,57±0,32	5,03±0,01	6,75±1,52
0,08-0,11	1,23±0,44	2,38±0,03	2,15±0,04	2,75±0,23	3,99±0,28	4,62±0,10
0,15-0,18	2,90±2,00	2,17±0,14	2,23±0,02	3,79±1,10	3,02±0,49	3,06±0,49
Média	1,65±0,67	2,21±0,07	2,36±0,11	3,37±0,36	4,01±0,39	4,81±0,83
	Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )					
0,02-0,05	1,24±0,02	1,58±0,01	1,67±0,01	1,75±0,02	1,79±0,01	1,81±0,01
0,08-0,11	1,32±0,02	1,66±0,01	1,66±0,01	1,71±0,01	1,74±0,01	1,75±0,01
0,15-0,18	1,41±0,02	1,62±0,01	1,64±0,01	1,67±0,01	1,68±0,01	1,69±0,01
Média	1,32±0,02	1,62±0,01	1,66±0,01	1,71±0,01	1,74±0,01	1,75±0,01

\* Determinação realizada no conteúdo de água retida na capacidade de campo (100 hPa).

O aumento da resistência mecânica do solo à penetração, causada pelo rodado do trator, restringiu todas as características avaliadas da cultura, com exceção apenas do número de espigas por planta (Tabela 02). Houve efeito quadrático das intensidades

de compactação sobre a massa de 1000 grãos e a produtividade, que decresceram a partir de valores de resistência de 1,80 e 1,65 MPa, respectivamente (Figura 01).

Nos tratamentos com solo não trafegado ( $T_0$ ), uma passada com o trator de 4 Mg ( $T_{1^*}$ ) e uma passada com o trator de 11 Mg ( $T_1$ ) a produtividade do milho foi superior a  $6,000 \text{ Mg ha}^{-1}$ , condizente com a adubação utilizada, sendo a máxima produtividade alcançada de  $6,718 \text{ Mg ha}^{-1}$  no tratamento com solo não trafegado (Figura 01). Com o aumento da RP houve reduções na produtividade de 9, 5, 11, 21 e 38%, respectivamente para os tratamentos  $T_{1^*}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_4$  e  $T_6$ , em relação ao  $T_0$ . AI-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 grãos de milho, respectivamente. Para ALBUQUERQUE & REINERT (2001), uma das principais propriedades físicas que reduz a produtividade das culturas é a densidade do solo e sua relação com a resistência à penetração. Estes autores observaram que a restrição ao crescimento radicular reduziu a produtividade de grãos de milho em  $1,169 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Tabela 02. Resumo da análise de variância para a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, número de espigas por planta, massa de 1000 grãos, massa seca das plantas e produtividade, envolvendo intensidades de compactação do Latossolo Vermelho de textura média.

Características da planta	Média geral	CV (%)	Quadrado médio do resíduo	Fc	Pr > Fc
Altura das plantas (cm)	233,45	2,45	32,875	13,54	< 0,0001
Alt. inserção 1ª espiga (cm)	142,12	4,07	33,514	9,69	0,0001
Diâmetro do colmo (cm)	1,78	4,67	0,007	5,40	0,0033
Nº espiga por planta	1,01	3,08	0,001	1,80	0,1637
Massa de 1000 grãos (g)	257,29	4,48	133,125	14,02	< 0,0001
Massa seca das plantas ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	6,78	11,86	0,647	5,44	0,0032
Produtividade ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	5,78	7,26	0,176	19,58	< 0,0001

Fc: valor do F calculado; Pr: probabilidade de se obter um valor de  $F \geq Fc$ .

A altura das plantas, o diâmetro do colmo, a massa seca e a altura de inserção da primeira espiga apresentaram comportamento linear decrescente a partir da resistência de 1,65 MPa (Figura 01), concordando com SILVA (1998), que a taxa de crescimento da parte aérea de plantas de milho variou negativamente com a RP. HANKANSSON & VOORHEES (1998) verificaram que o menor desenvolvimento da parte aérea em solos compactados ocorre por causa da redução da penetração e da ramificação das raízes, em consequência do aumento da resistência mecânica do solo, e em decorrência da menor infiltração e movimento da água e disponibilidade de nutrientes no solo. Para LETEY (1985), o aumento da resistência à penetração do solo causa o desenvolvimento reduzido do sistema radicular que, através de sinais hormonais enviados pelas raízes, a parte aérea da planta reduz seu desenvolvimento.

Resultados contraditórios quanto ao desenvolvimento de plantas de milho em solos compactados na literatura já foram apresentados por FONOLI et al. (2003), onde, segundo o autor, o estágio de desenvolvimento das plantas, por ocasião da avaliação, e a condição de cultivo influenciaram a resposta do crescimento vegetativo aéreo, reforçando relatos sobre a dificuldade de se generalizar conclusões quanto ao desenvolvimento das plantas em solos compactados. A resistência mecânica do solo à penetração apresenta valores 2 a 8 vezes superiores a máxima pressão axial que a raiz pode exercer (MISRA et al., 1986), sendo acentuadamente influenciada pelo conteúdo de água, textura e pela condição estrutural do solo (BEUTLER et al., 2004b), fatores que dificultam a obtenção de valores críticos ao desenvolvimento das culturas. BOONE et al. (1987) demonstraram que em solo compactado, com alta resistência ou reduzida difusão de oxigênio, 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 desenvolvimento de raízes num solo compactado.



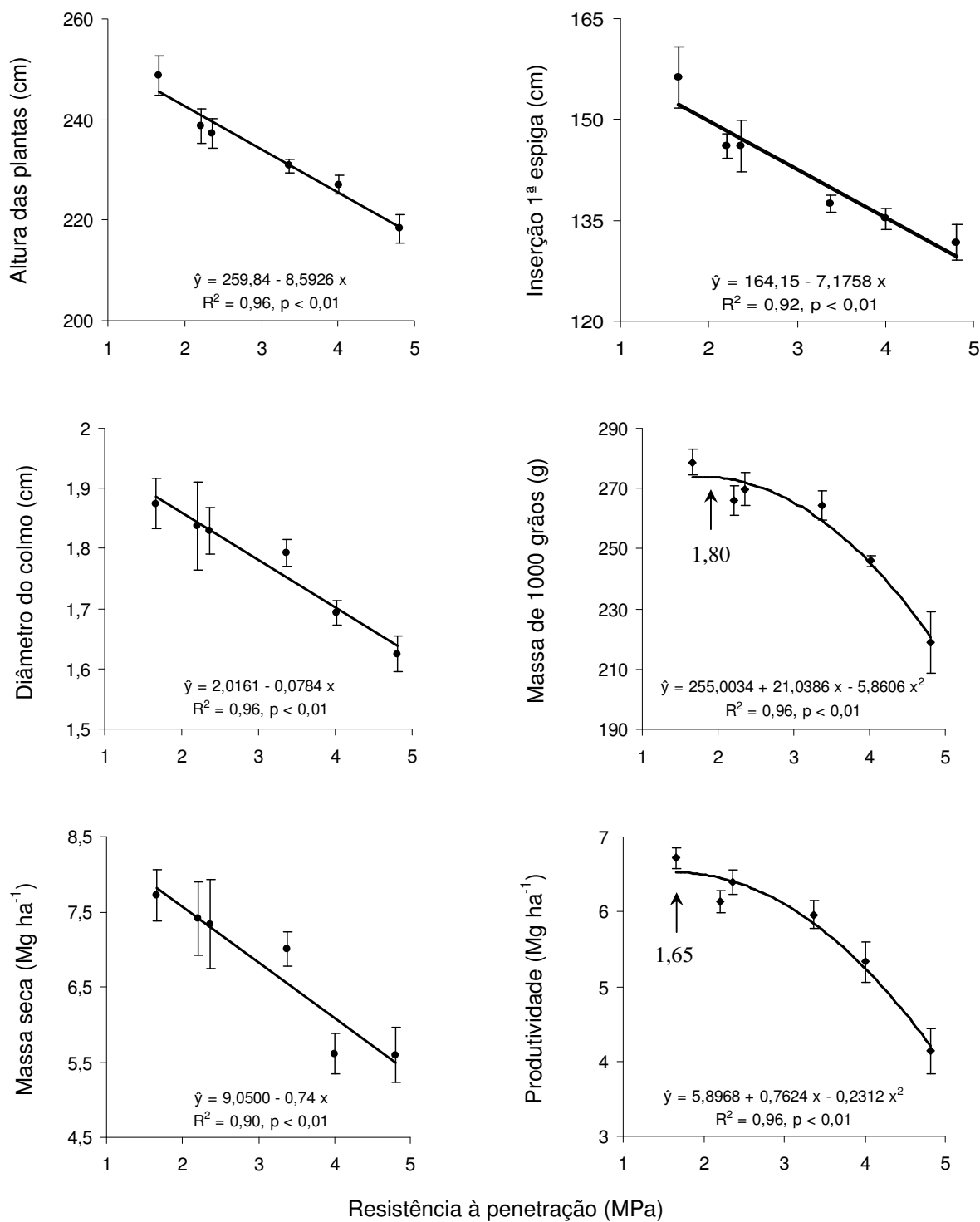


Figura 01. Regressão entre a resistência do Latossolo Vermelho de textura média à penetração e a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, massa de 1000 grãos, massa seca e produtividade do milho. As barras referem-se aos erros padrões das médias.

Segundo BEUTLER et al. (2004a), os diferentes valores críticos de RP para as culturas podem ser explicados, em parte, pelos diversos penetrômetros utilizados nas determinações, sendo que essas diferenças aumentariam com a compactação e o teor de argila, evidenciando a necessidade de padronização de penetrômetros. Segundo AL-ADAWI & REEDER (1996), deve-se tomar cuidado ao interpretar a resistência à penetração do solo por existir fatores que podem influenciar significativamente os resultados, como o tipo de solo, sua dureza, o conteúdo de água, e o tipo de cone utilizado no penetrômetro e sua forma. Assim, HERRICK & JONES (2002) recomendaram a utilização de penetrômetros estáticos com velocidade constante de penetração, tanto por sua maior precisão como também para padronizar as determinações, como o utilizado no presente trabalho, além da padronização da umidade das amostras indeformadas em câmaras de Richards antes da leitura da resistência à penetração, eliminando também a interferência imposta pela variabilidade da umidade nas leituras. Neste sentido, o conteúdo de água na capacidade de campo seria considerado o ideal para determinação da resistência mecânica à penetração (SMITH et al., 1997), a fim de que seja possível fazer inferência com dados da literatura.

O conteúdo de água no solo na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ), equivalente a resistência à penetração de 1,65 MPa ( $\theta_{RP}$ ) e equivalente à porosidade de aeração igual a 10% ( $\theta_{PA}$ ), utilizadas para definição do IHO, são apresentados na Figura 02. Pelo IHO pôde-se verificar que o aumento da  $D_s$  influenciou positivamente a variação do conteúdo de água disponível do solo ( $\theta_{cc} - \theta_{pmp}$ ), concordando com TORMENA et al. (1998a) que o aumento da retenção de água ao longo dos valores de  $D_s$  é justificado pela redução da macroporosidade e a redistribuição dos tamanhos dos poros (Figura 02). KLEIN & LIBARDI (2002) estudando a densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob os sistemas de uso e manejo (mata secundária, área de sequeiro com dois cultivos anuais em plantio direto e uma terceira aérea irrigada por pivô central em sistema plantio direto), verificaram que o sistema de manejo de sequeiro em relação à mata, apresentou uma redução na porosidade total até 0,5 m de profundidade e, na

macroporosidade, até 0,4 m com conseqüente aumento da microporosidade. Na profundidade de 0,10 m, observaram a redução da porosidade total em torno de 12%, enquanto os macroporos reduziram em 24%, comprovando que, no processo de compactação, ocorre a transformação de macro em microporos.

A variação da  $D_s$  teve grande impacto sobre o  $\theta_{RP}$ . O  $\theta_{RP}$  substituiu o  $\theta_{pmp}$  no valor de  $D_s \geq 1,16 \text{ Mg m}^{-3}$ , já na parte superior do IHO, mesmo com a diminuição do  $\theta_{PA}$  pelo aumento da  $D_s$ , este não alcançou valores restritivos ao IHO, ou seja, o  $\theta_{PA}$  não substituiu o  $\theta_{cc}$  como fator limitante no solo. Tais resultados são similares aos obtidos por TORMENA et al. (1998a), TORMENA et al. (1999), BEUTLER (2003), BEUTLER et al. (2004a,b) e LEÃO et al. (2004), que em solos tropicais o IHO é limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo e na parte inferior, pela resistência do solo à penetração (Figura 2).

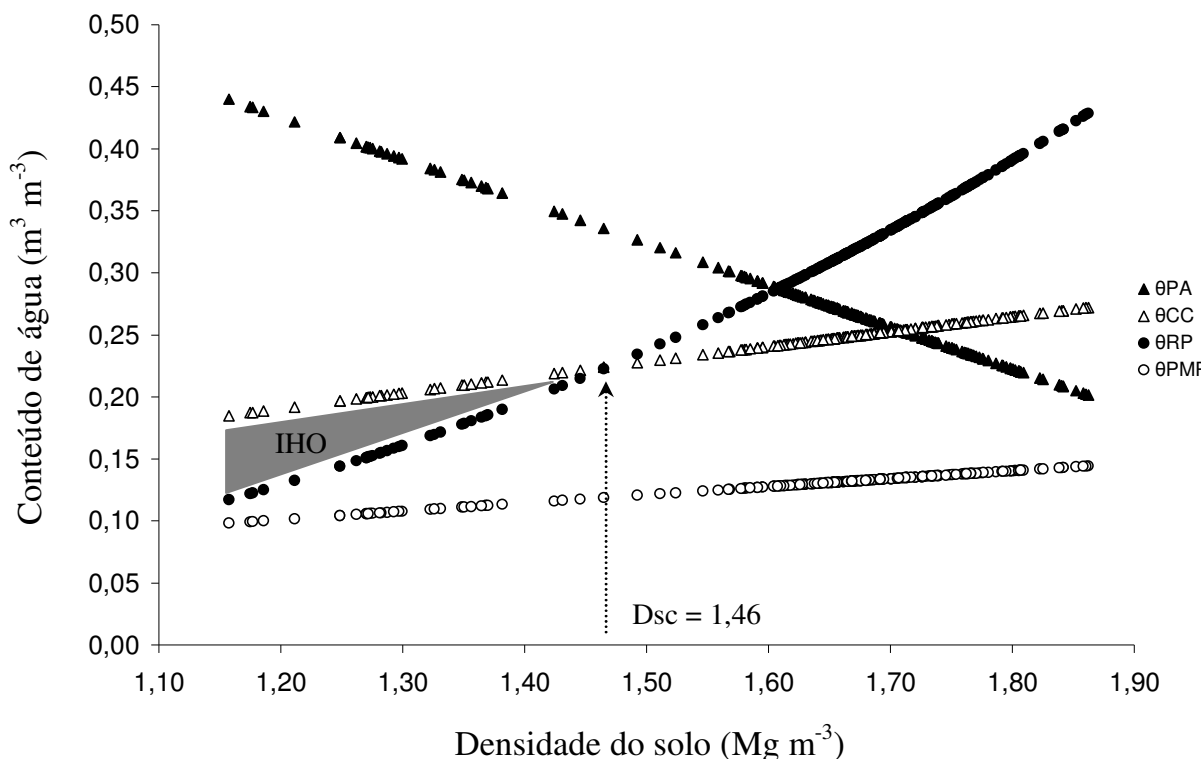


Figura 02. Variação do conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), resistência do solo à penetração de 1,65 MPa ( $\theta_{RP}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) no Latossolo Vermelho de textura média. IHO = intervalo hídrico ótimo.  $D_{sc}$  = densidade crítica do solo.

A incorporação da aeração do solo e da resistência do solo à penetração na definição do IHO para o crescimento de plantas tornou esse num indicador mais sensível às alterações da estrutura do solo do que ao conteúdo de água disponível, como já verificado por SILVA et al. (2002). O IHO variou de 0 a  $0,066 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , enquanto a água disponível variou de  $0,087$  a  $0,128 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 02).

A densidade crítica do solo ( $D_{sc}$ ) foi definida segundo SILVA & KAY (1997), como aquela onde o IHO é igual a zero, ou seja, aquela na qual o limite inferior cruza com o limite superior do intervalo, a partir da qual ocorreriam limitações severas ao desenvolvimento das plantas. Neste solo, a  $D_{sc}$  foi de  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$  e a partir da  $D_s$  de  $1,16 \text{ Mg m}^{-3}$  a RP já seria restritiva para o crescimento de plantas se o conteúdo de água do solo permanecesse abaixo do  $\theta_{RP}$  (Figura 02). Valores de  $D_{sc}$  entre  $1,55$  e  $1,63 \text{ Mg m}^{-3}$  foram observadas por BEUTLER et al. (2004a) para a cultura do arroz cultivado em vasos preenchidos com Latossolo Vermelho de textura média mantidos nas tensões de água de  $0,05$  e  $0,01 \text{ MPa}$ , respectivamente. Já em condições de campo, BEUTLER et al. (2004b) verificaram a  $D_{sc}$  de  $1,63 \text{ Mg m}^{-3}$  para a cultura do arroz de sequeiro utilizando o mesmo solo.

Segundo BEUTLER et al. (2004b), a produtividade das culturas deveria ser reduzida em valores inferiores ou próximos a  $D_{sc}$ . Portanto, realizou-se a regressão entre a  $D_s$ , obtida nas três camadas do solo (Tabela 01), e a produtividade do milho (Figura 03). A  $D_{sc}$  foi igual ao valor de  $D_s$  restritiva à produtividade do milho. Assim, para esse solo, os resultados permitiram inferir que a  $D_{sc}$  foi um indicador adequado para o monitoramento da compactação do solo para a cultura do milho. MORAES & BENEZ (1996), estudando diferentes preparos do solo para a cultura do milho sob Terra Roxa Estruturada argilosa, verificaram que o aumento da  $D_s$  de  $1,25$  a  $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ , na camada de  $0-0,20 \text{ m}$ , não influenciou a produtividade de grãos da cultura concordando com os dados encontrados neste trabalho.

SILVA & KAY (1997) concluíram que o crescimento das plantas é menos restrito dentro dos limites do IHO. SILVA (1998), corroborando este resultado, observou que o crescimento da parte aérea das plantas de milho foi negativamente correlacionado com

a freqüência com que a umidade do solo ocorreu fora do IHO. Assim, a magnitude do IHO pode ser utilizada como um diagnóstico da freqüência em que a estrutura do solo determina condições de umidade limitantes ao crescimento das plantas. Nesse contexto, apenas o tratamento  $T_0$  apresentou  $D_s$  ( $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ ) abaixo da  $D_{sc}$  proposto pelo IHO (Tabela 01), significando não haver restrições físicas ao crescimento das plantas, podendo o conteúdo de água do solo variar entre  $0,128$  e  $0,156 \text{ kg kg}^{-1}$ , conforme comprovado pelas características da cultura avaliadas neste tratamento (Figura 01). Para os demais tratamentos, mesmo que o conteúdo de água ficasse sempre na capacidade de campo, haveria restrições pelas RP observadas. O conteúdo de água do solo encontra-se muitas vezes abaixo da capacidade de campo durante o ciclo das culturas, onde a  $\theta_{RP}$ , em solos compactados, torna-se o fator limitante ao crescimento das plantas até a  $D_{sc}$ , destacando a importância da utilização de valores de RP limitantes para cada cultura (BEUTLER et al., 2004a).

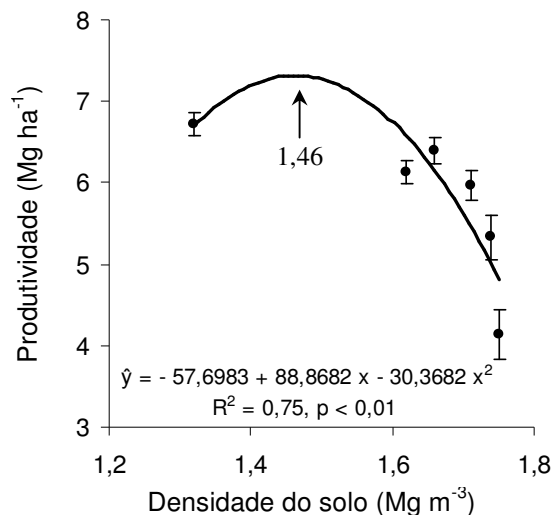


Figura 03. Regressão entre a densidade média da camada de 0-0,20 m do Latossolo Vermelho de textura média e a produtividade de milho. As barras referem-se aos erros padrões das médias.

Utilizando-se o teste de proctor determinou-se que a densidade de referência ou máxima compactação para o LVd foi de  $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$ . Logo a  $D_{sc}$  de  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$

determinada no IHO representou uma densidade relativa de 78% como restritiva para a produtividade de milho.

## **CONCLUSÕES**

O aumento da resistência mecânica do solo à penetração acima de 1,65 MPa restringiu as características agronômicas e a produtividade do milho.

O Intervalo hídrico ótimo do solo estudado foi limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo (100 hPa) e na parte inferior pela resistência mecânica do solo à penetração, com densidade do solo crítica de  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ .

Apenas uma passada com trator de 4 Mg sobre um Latossolo Vermelho de textura média preparado, no conteúdo de água equivalente a capacidade de campo (0,01MPa), foi suficiente para elevar a densidade do solo acima de  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ , limitante a produtividade de grãos da cultura do milho.

### **CAPÍTULO 3 – COMPACTAÇÃO DO LATOSSOLO VERMELHO DE TEXTURA MÉDIA NO SISTEMA RADICULAR E PRODUTIVIDADE DO MILHO**

**RESUMO** - A compactação do solo interfere na penetração e ramificação das raízes no solo, podendo resultar em reduções da produtividade agrícola. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da compactação sobre determinadas propriedades de um Latossolo Vermelho de textura média e associá-las ao crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com seis intensidades de compactação. Foram coletadas amostras indeformadas nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m para determinação da resistência mecânica do solo à penetração, densidade e porosidade do solo. Para determinação da densidade radicular, superfície radicular, diâmetro radicular e massa seca das raízes, foram coletadas amostras de 0,002 m<sup>3</sup> de solo nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 m, em cada parcela. O tráfego de tratores compactou intensamente a camada superficial do solo, 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>, não sendo, contudo, impeditivos ao seu enraizamento.

**Palavras-chave:** resistência à penetração, água no solo, *Zea mays*

## INTRODUÇÃO

Com a modernização da agricultura, a massa das máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo (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., 1999), causando restrições ao desenvolvimento 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 certa compactação superficial do solo, que esta associada ao tráfego de máquinas agrícolas e ao não revolvimento do solo. Em consequência da compactação, tem-se um 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, semeadura, tratos culturais e colheita. HORN & LEBERT (1994) acrescentaram que não somente a pressão estática causa compactação, mas também forças dinâmicas causadas pela vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento.

Trabalhos referentes ao efeito do preparo do solo em suas propriedades físicas 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, mas também para auxiliar o estabelecimento de limites de compactação que não afetem o desenvolvimento radicular das plantas nos sistemas de manejo (TAVARES FILHO et al., 2001).

Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da compactação, provocada pelo tráfego de tratores, sobre determinadas características do solo e associá-las ao crescimento radicular e 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), situado nas coordenadas geográficas de 21° 15' 29" de latitude Sul e 48° 16' 47" de longitude Oeste de Greenwich, 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 média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21°C. As precipitações diárias foram obtidas na Estação Meteorológica Automatizada do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP e a variação do conteúdo de água no solo, durante o ciclo da cultura do milho, foi determinado por meio de uma sonda Profile Probe type PR2 acoplada a um Moisture Meter HH2 (Figura 04).

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico, hipoférrico (LVd). A composição granulométrica do solo foi determinada em amostras deformadas, nas camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, através da dispersão com NaOH (0,1 mol L<sup>-1</sup>) e agitação lenta durante 16 horas, 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  $323 \text{ g kg}^{-1}$  de argila,  $45 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $632 \text{ g kg}^{-1}$  de areia.

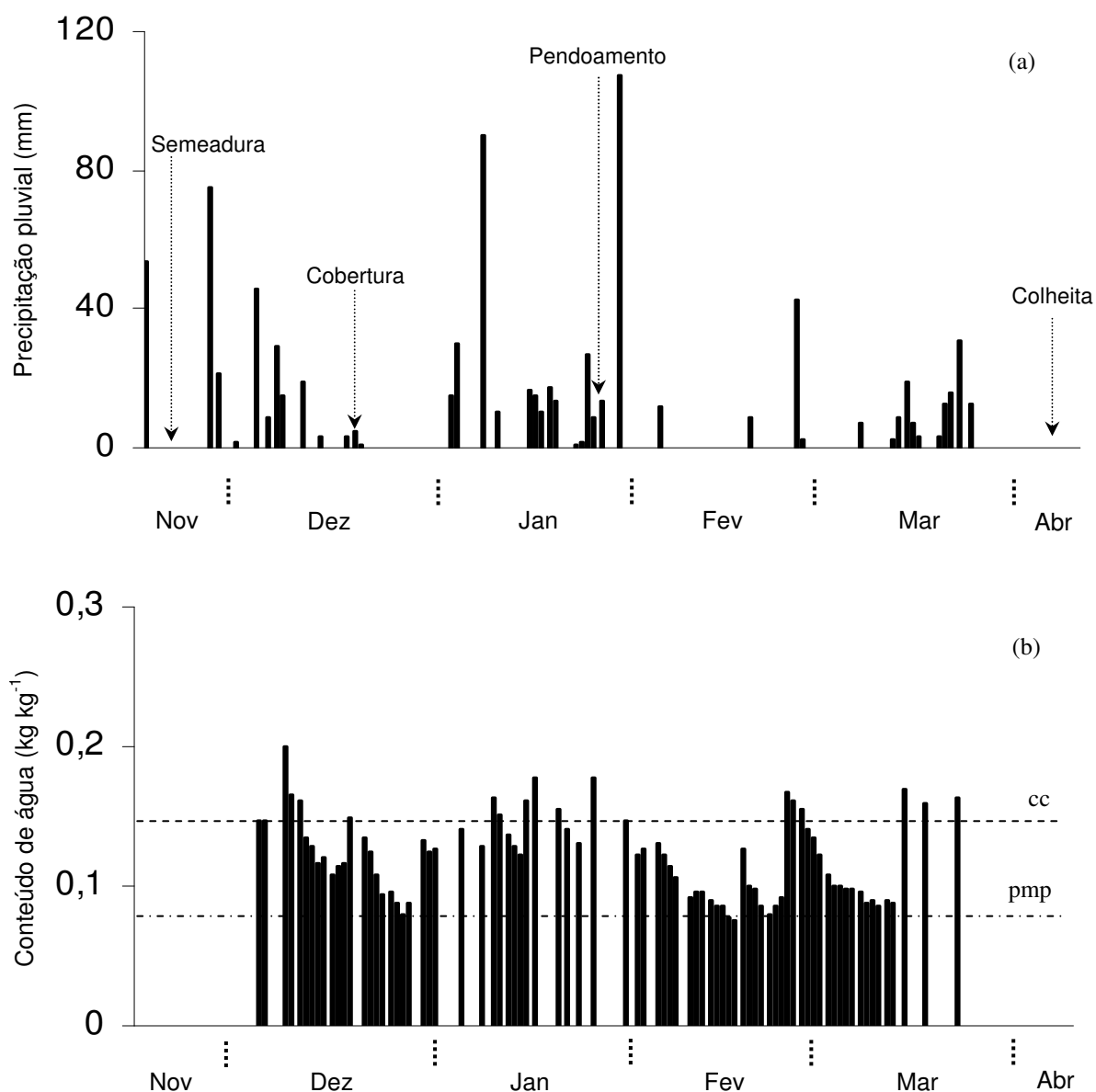


Figura 04. Precipitação diária no período de 18 de novembro a 10 de abril de 2005 (a), e variação do conteúdo de água, na camada de 0-0,20 m, do Latossolo Vermelho de textura média no período de 7 de dezembro a 24 de março de 2005 (b). As linhas tracejadas indicam os limites no conteúdo de água no ponto de murcha permanente (pmp) e na capacidade de campo (cc).

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com seis intensidades de compactação. Toda parcela experimental apresentou cinco linhas de milho com seis metros de comprimento, considerando-se área útil as três linhas centrais desprezando-se um metro e meio de cada extremidade.

A análise química de rotina para fins de fertilidade seguiu metodologia proposta por RAIJ et al. (1987). No mês de setembro de 2004 foi aplicado calcário para elevação da saturação por bases a 60%, incorporando-o com gradagem niveladora até 0,12 m de profundidade. Antes da instalação do experimento toda a área foi escarificada a 0,30 m de profundidade seguida de uma gradagem aradora.

Os tratamentos foram:  $T_0$ = solo não trafegado;  $T_1^*$ = 1 passada de um trator de 4 Mg;  $T_1$ = 1 passada de um trator de 11 Mg;  $T_2$ = 2 passadas de um trator de 11 Mg,  $T_4$ = 4 passadas de um trator de 11 Mg e  $T_6$ = 6 passadas de um trator de 11 Mg. Os tratores trafegaram por toda parcela, no sentido do declive da área, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego era sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes. O conteúdo de água no solo durante a compactação esteve próximo à 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  $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  da fórmula 10-20-20 para obtenção da produtividade esperada de 6 a  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$ , segundo RAIJ et al. (1997). Após 15 dias da emergência das plântulas, foi feito o desbaste para 5 plantas por metro. A adubação de cobertura foi realizada 28 dias após a emergência das plântulas utilizando-se  $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  de sulfato de amônio sem incorporação, quando as plantas estavam com 7 a 8 folhas.

Após a semeadura foram coletadas amostras indeformadas de solo com cilindros de  $54,29 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, para determinações das propriedades físicas do solo. A microporosidade

foi determinada por secagem (tensão de 100 hPa), em câmaras 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 determinou-se a resistência à penetração (RP) por meio de um penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de  $0,01 \text{ m min}^{-1}$ , cone com ângulo de  $60^\circ$  e com área da base de  $2,96 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ , equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a obtenção dos dados, conforme descrito por TORMENA et al. (1998a), realizando-se duas repetições por amostra perfazendo 180 leituras por repetição. A RP média foi obtida desprezando-se meio centímetro de cada extremidade da amostra. Na seqüência, as amostras foram secadas em estufa a  $\pm 105 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 horas para determinação da densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986).

No estágio do pendoamento da cultura do milho, período no qual, segundo MENGEL & BARBER (1974), o sistema radicular do milho alcança a máxima extensão, foram retiradas quatro amostras de 0,20 m no sentido da linha x 0,10 m no sentido da entrelinha, junto ao eixo principal das plantas de milho, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, em cada tratamento. 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 à densidade, superfície e diâmetro radicular pelo software “Delta-T Scan”, utilizando o método de HARRIS & CAMPBELL (1989). Na seqüência as amostras foram secadas em estufa a  $\pm 65 \text{ }^\circ\text{C}$  até massa constante, para determinação da massa seca.

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  $\sqrt{x+0,5}$ , para satisfazer as hipóteses estatísticas de normalidade e homocedasticidade, por meio das rotinas PROC UNIVARIATE e PROC GLM/hovtest (SAS, 1999),

respectivamente. Para produtividade do milho, a análise de variância seguiu delineamento inteiramente casualizado, e para as variáveis do sistema radicular, o delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas, sendo o fator secundário constituído pelas camadas do solo. Em função da resistência à penetração do solo, foram realizadas análises de regressão polinomial por meio da rotina PROC REG (SAS, 1999), adotando-se, como critérios de seleção dos modelos, o maior  $R^2$  e a significância de 5% dos parâmetros das equações. E em função das camadas do solo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando-se a rotina PROC GLM (SAS, 1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo estatístico das características do sistema radicular encontram-se na Tabela 03. A compactação do solo e a profundidade influenciaram todas as variáveis avaliadas do sistema radicular. O efeito da compactação do solo, na densidade e na superfície radicular, foi diferenciado nas camadas de solo estudado. Já o diâmetro médio radicular e a massa seca das raízes apresentaram a mesma resposta a compactação em ambas as camadas. MELLO IVO & MIELNICZUK (1999), apesar do

Tabela 03. Valores de F calculados pela análise de variância para a densidade do comprimento radicular, superfície radicular, diâmetro médio radicular e massa seca das raízes nas diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura média.

Causas de variação	Densidade radicular	Superfície radicular	Diâmetro radicular	Massa 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 \*\* significativo respectivamente a 5% e a 1% de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo.

comportamento diferenciado das características morfológicas, afirmaram que a distribuição final de massa de raízes por profundidade não foi significativamente diferente entre os preparos do solo.

Os valores médios e erros padrões da macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração e densidade do solo, nas diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho, são apresentados na Tabela 04. No tratamento não trafegado ( $T_0$ ), constata-se que os maiores valores de densidade do solo e de resistência a 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 escarificação e a aração do solo tenham favorecido a formação de impedimentos físicos logo abaixo das camadas de solo movimentadas pelos implementos, tal como verificado por TAVARES FILHO et al. (2001). Esta camada continuou a sofrer compactação com o aumento do tráfego de tratores sobre o solo, o que pôde ser constatado pelo aumento da densidade do solo de 1,41 para 1,69  $Mg\ m^{-3}$  e redução concomitante da macroporosidade de 0,17 para apenas 0,07  $m^3\ m^{-3}$  respectivamente nos tratamentos  $T_0$  até  $T_6$  (Tabela 04).

Nos tratamentos trafegados pelos tratores, a camada que sofreu maior grau de compactação foi a de 0-0,10 m, sendo neste caso as propriedades físicas do solo afetadas principalmente pela massa do maquinário e o número de passadas do trator, todos favorecidos pela condição favorável de umidade do solo, próximo 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 (Tabela 04), os quais se refletiram na macroporosidade, cujos valores foram reduzidos de 0,25  $m^3\ m^{-3}$  no solo não trafegado, para apenas 0,05  $m^3\ m^{-3}$  no tratamento com maior número de passadas do trator. Dessa forma, na semeadura direta, o tráfego de máquinas e implementos provoca compactação superficial (VOORHEES & LINDSTROM, 1983), enquanto nos preparos convencionais a compactação ocorre abaixo da camada arável (ROSOLEM et al., 1994b). 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 conseqüência, afetam o crescimento radicular.

Tabela 04. Valores médios e erros padrões da macroporosidade, microporosidade, resistência à penetração e densidade do solo nas diferentes intensidades de compactação e camadas no Latossolo Vermelho de textura média.

Camada (m)	Intensidade de compactação					
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> *	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>6</sub>
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</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)*						
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

\* Determinação realizada no conteúdo de água retida na capacidade de campo (100 hPa).

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 aumento da resistência do solo à penetração (Figura 05). Esse comportamento, aparentemente contraditório, também foi observado por ROSOLEM et al. (1994b), os quais verificaram 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 em função do aumento da resistência mecânica do solo foi linear na camada de 0-0,10 m (Figura 05),

concordando com FOLONI et al. (2003) e também com ROSOLEM et al. (1994b) com relação a superfície radicular. Entretanto, na camada de 0,10-0,20 m a compactação não influenciou essas características (Figura 05).

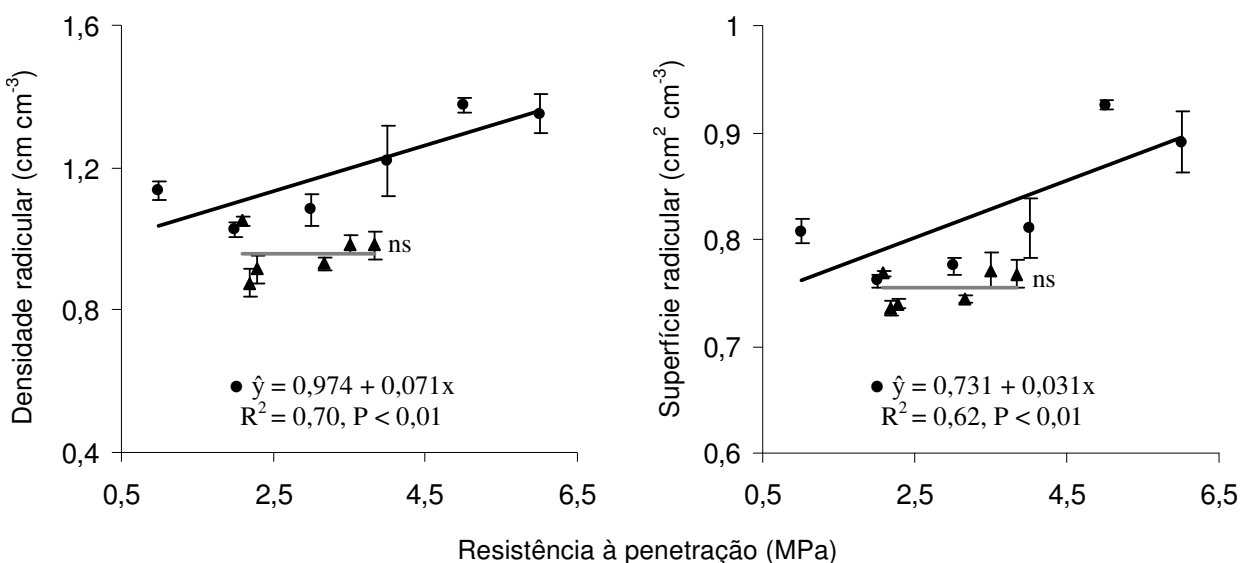


Figura 05. Densidade do comprimento radicular e superfície radicular das plantas de milho nas camadas de 0-0,10 m (●) e 0,10-0,20 m (▲) em função da resistência mecânica do Latossolo Vermelho de textura média. <sup>ns</sup> não significativo.

Os efeitos da compactação do solo sobre o desenvolvimento radicular foram analisados em função da resistência à penetração, por ser a propriedade física do solo atualmente mais utilizada como indicativo da compactação do solo. No tratamento com o solo revolvido e com uma passada do trator de 4 Mg verificou-se que não houve diferença na densidade radicular em profundidade, mas isto 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 a camada de 0,10-0,20 m (Tabela 05). O mesmo comportamento foi observado para a superfície radicular a partir da RP de 3,16 MPa atingida no tratamento com 2 passadas do trator de 11 Mg (Tabela 05). Em contraposição, FOLONI et al. (2003) constataram que o valor de 1,4 MPa foi restritivo ao crescimento radicular em vasos preenchidos



com Latossolo Vermelho Distroférico, provavelmente, devido a textura mais argilosa desse solo.

Tabela 05. Médias e erros padrões da densidade radicular, superfície radicular, diâmetro radicular e massa seca das raízes do milho em função das diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura média.

Camada (m)	Tratamento					
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> *	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>6</sub>
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
Massa seca das raízes (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 de Tukey a 5% de probabilidade.

O diâmetro radicular e a massa seca foram superiores na camada de 0-0,10 m independentemente da compactação do solo (Tabela 05). Observa-se que desde o solo solto e não trafegado, com RP de 1,03 MPa em superfície e 2,93 MPa em 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 massa seca das raízes de milho foram maiores na camada superficial do solo. Provavelmente, tal comportamento seja devido à morfologia

do sistema radicular fasciculado da cultura do milho, que favorece uma maior concentração de raízes na camada de 0-0,10 m, concordando com SILVA et al. (2000).

A massa seca total das raízes apresentou comportamento quadrático com o aumento da RP (Figura 06), discordando de FOLONI et al. (2003), em que a massa seca total das raízes 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 massa seca das raízes, onde a partir de tal RP houve seu. Possivelmente, o aumento inicial da compactação tenha restringido a massa seca radicular total onde a partir de 3,09 MPa o sistema radicular tenha respondido à restrição imposta pelo solo com o aumento do diâmetro radicular observado na Figura 06. 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. (1994b) e FOLONI et al. (2003) também verificaram que o diâmetro médio radicular das plantas de milho aumentou na camada de solo compactado com o aumento 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 em meios rígidos com resistências elevadas levam as raízes a sofrerem deformações morfológicas exteriorizadas pelo aumento do raio, o qual segundo BENGOUGH & MULLINS (1990), resulta principalmente num aumento da espessura do córtex, sendo isso consequência tanto do aumento do número de células por unidade de comprimento de raiz. O aumento no diâmetro das raízes torna-se mais problemático, pois, no geral a compactação também diminui o tamanho dos poros (ALBUQUERQUE & REINERT, 2001), o que pôde ser observado no presente estudo pela diminuição da macroporosidade com o aumento da compactação (Tabela 05).

Embora um aumento de  $0,4 \text{ Mg m}^{-3}$  na densidade do solo pudesse inibir completamente o crescimento radicular (JONES et al, 1991), isso não foi observado no presente trabalho, notando-se crescimento radicular mesmo em valores de 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> (Tabela 05), aparentemente limitante, permitiu o desenvolvimento radicular tal como observado por MELLO IVO & MIELNICZUK (1999). Os autores afirmaram que o desenvolvimento pode ter ocorrido pelo fato de tais valores terem sido obtidos com seus limites entre a macro e microporosidade determinados na tensão de 60 hPa, porque, depois da drenagem e redistribuição da água no solo, a porcentagem de poros livres de água e ocupados pelo ar provavelmente torna-se maior. TAVARES FILHO et al. (2001) verificaram que os valores de resistência mecânica do solo à penetração, apresentados na literatura como restritivos ao desenvolvimento radicular (1,0 a 3,5 MPa), não foram impeditivos para o enraizamento, pois elas estavam presentes por todo o perfil do solo, apresentando, entretanto, deformações morfológicas exteriorizadas pelo aumento do diâmetro, tortuosidade e poucos pêlos radiculares próximos as 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 desenvolvimento da planta.

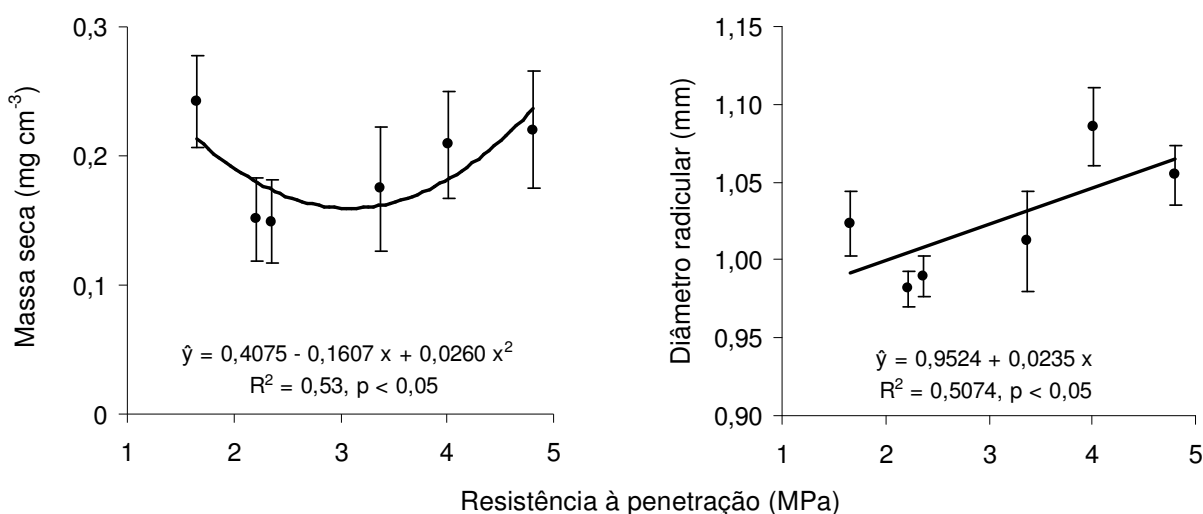


Figura 06. Regressão entre a resistência mecânica à penetração do Latossolo Vermelho de textura média e a massa seca das raízes e o diâmetro radicular da cultura do milho. As barras referem-se aos erros padrões das médias.

Com base nas precipitações pluviárias diárias e na variação do conteúdo de água durante o ciclo do milho (Figura 04), observou-se que no período correspondente ao crescimento vegetativo, semeadura até o pendoamento da cultura, no qual o sistema radicular do milho alcança a máxima extensão, houve apenas um período de estiagem, de 13 dias, no final de dezembro, no qual o conteúdo de água do solo chegou próximo do ponto de murcha permanente na camada de 0-0,20 m, indicando que mesmo em condições de elevado conteúdo de água a compactação do solo, com valores de RP chegando a 5,69 MPa, proporcionou alterações no crescimento e morfologia do sistema radicular das plantas de milho, entretanto, não impediu seu enraizamento. BOONE et al. (1987) demonstraram que em solo compactado, com alta resistência ou reduzida difusão de oxigênio, 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 desenvolvimento de raízes num solo compactado.

A produtividade de grãos de milho foi restringida a partir da RP crítica de 1,65 MPa (Figura 07), concordando com ALBUQUERQUE & REINERT (2001), de que a restrição ao crescimento radicular reduziu a produtividade de grãos de milho. Uma hipótese, neste 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 a menor disponibilidade hídrica no mês de fevereiro, durante o período de enchimento de grãos (Figura 04) tenham restringido a absorção de nutrientes limitando a produtividade de grãos da cultura do milho. Segundo ROSOLEM et al. (1994b), 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 Ds proporcionados pelos diferentes preparos de solo utilizados pelos autores não foram suficientes para restringir a produtividade da cultura, corroborando com SILVA et al. (2000), que 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 a silagem de milho.

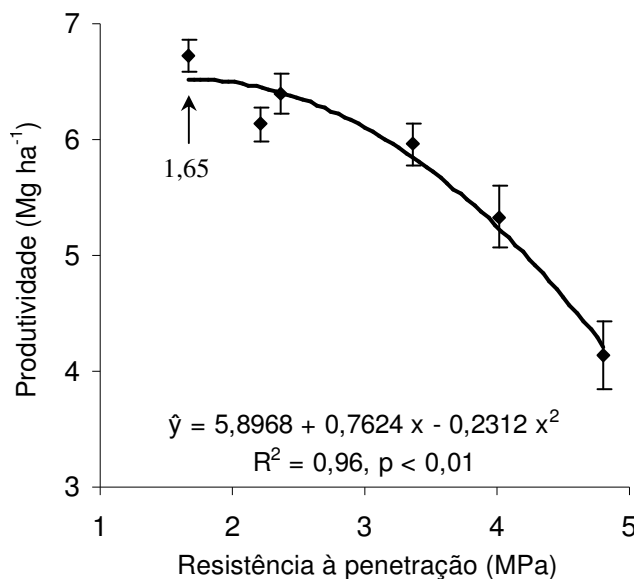


Figura 07. Regressão entre a resistência mecânica à penetração do Latossolo Vermelho de textura média e a produtividade de grãos do milho. As barras referem-se aos erros padrões das médias.

## CONCLUSÕES

O tráfego de tratores sobre o Latossolo Vermelho textura média causou maior compactação do solo na camada de 0-0,10 m.

A massa seca das raízes e o diâmetro radicular foram indicadores mais sensíveis à compactação do solo do que a densidade e superfície radicular.

Houve crescimento radicular mesmo quando a macroporosidade atingiu valores de  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

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 em  $2,581 \text{ Mg ha}^{-1}$ , mas não foram impeditivos ao enraizamento.

## **CAPÍTULO 4 – COMPACTAÇÃO DO LATOSSOLO VERMELHO DE TEXTURA ARGILOSA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO, IHO E CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DO MILHO**

**RESUMO** – Com a intensa utilização de tecnologias voltadas à motomecanização das operações agrícolas, o processo de compactação tornou-se um obstáculo para obtenção de elevadas produtividades. O objetivo do trabalho foi avaliar a compactação do solo proporcionada pelo tráfego de tratores sobre o intervalo hídrico ótimo (IHO) e o crescimento e produtividade do milho em um Latossolo Vermelho de textura argilosa. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com cinco intensidades de compactação e quatro repetições. Foram coletadas amostras indeformadas de solo nas camadas de 0,02–0,05, 0,08–0,11, 0,15–0,18 e 0,22–0,25 m para determinação de algumas propriedades físicas do solo e o IHO. As características da cultura avaliadas foram altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, número de espigas por planta, massa seca das plantas, massa de 1000 grãos e a produtividade. A compactação do solo restringiu todas as características da cultura avaliadas, com exceção apenas do número de espigas e da massa seca de 1000 grãos. O IHO foi reduzido pela resistência do solo à penetração, mesmo no tratamento com solo não trafegado com densidade média de  $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$ . A densidade do solo crítica a produtividade no IHO foi de  $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$ , próxima a densidade de  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  obtida com duas passadas sobre o solo com o trator de 11 Mg, onde a produtividade foi significativamente menor.

**Palavras-chave:** *Zea mays*, resistência do solo à penetração, densidade do solo

## INTRODUÇÃO

O crescimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas são influenciados por várias propriedades físicas do solo, com complexas interações que envolvem o potencial da água no solo, o teor de oxigênio e a resistência do solo à penetração das raízes (TORMENA et al., 1998), fatores que dificultam a obtenção de valores críticos ao desenvolvimento e à produtividade das culturas (BEUTLER et al., 2004a). Segundo SILVA et al. (2006), a densidade da camada compactada capaz de limitar o crescimento das plantas varia conforme a classe de solo, condições de umidade, espécie e ou mesmo do cultivar plantado.

Segundo COELHO et al. (2000), a relação entre a resistência, densidade e o conteúdo de água varia entre os solos. Contudo, a relação entre a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração com o crescimento radicular já tenham sido extensivamente estudado, valores de resistência relacionados diretamente com restrições impostas ao crescimento radicular e à produtividade das culturas não têm sido conclusivos para uma série extensiva de solos. Verificam-se na literatura valores de resistência mecânica à penetração variando entre 1,10 a 4,7 MPa como restritivo ao crescimento radicular da cultura do milho (CINTRA & MIELNICZUK, 1983; VEEN & BOONE 1990; ROSOLEM et al., 1994b; ROSOLEM et al., 1999; TAVARES FILHO et al., 2001; FOLONI et al., 2003).

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador da qualidade física do solo que incorpora os efeitos do seu conteúdo de água sobre as variações do potencial mátrico, aeração e resistência mecânica à penetração. Tais particularidades tornam o intervalo hídrico ótimo uma variável útil para avaliar a qualidade estrutural e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade sustentável, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas (TORMENA et al., 1998a).

Segundo PEREIRA FILHO & CRUZ (2003), o nível médio nacional de produtividade do milho é muito baixo, cerca de 3,390 Mg ha<sup>-1</sup>, já que a cultura tem alto potencial produtivo, tal como a média nacional de 8,500 Mg ha<sup>-1</sup> atingida pelos Estados



Unidos (COELHO et al., 2004). PEREIRA FILHO & CRUZ (2003) ainda afirmaram que o potencial produtivo do milho seja o somatório da melhoria genética (48%) e da melhoria ambiental (52%), que é a utilização de técnicas de manejo cultural mais adequada a cada ambiente e às plantas. Portanto, a compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade física são fundamentais ao desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (DEXTER & YOUNGS, 1992). Neste contexto, o objetivo deste estudo foi determinar o efeito da compactação de um Latossolo Vermelho de textura argilosa, proporcionada pelo tráfego de tratores, em algumas propriedades físicas do solo, intervalo hídrico ótimo (IHO), assim como estabelecer as relações destes com o desenvolvimento aéreo e a produtividade de milho.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado na Fazenda de Ensino e Pesquisa da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal (SP), situado nas coordenadas geográficas de 21° 15' 29" de latitude Sul e 48° 16' 47" de longitude Oeste de Greenwich, e 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 média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21°C. As precipitações diárias durante o ciclo da cultura (novembro de 2005 a abril de 2006), obtidas na Estação Meteorológica Automatizada do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, e a variação do conteúdo de água, determinado por meio de uma sonda Profile Probe type PR2 acoplada a um Moisture Meter HH2, são apresentadas respectivamente nas Figuras 08 e 09.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Eutroférico, típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef). Sua composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas, nas camadas de 0-0,20 m, por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L<sup>-1</sup>) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo

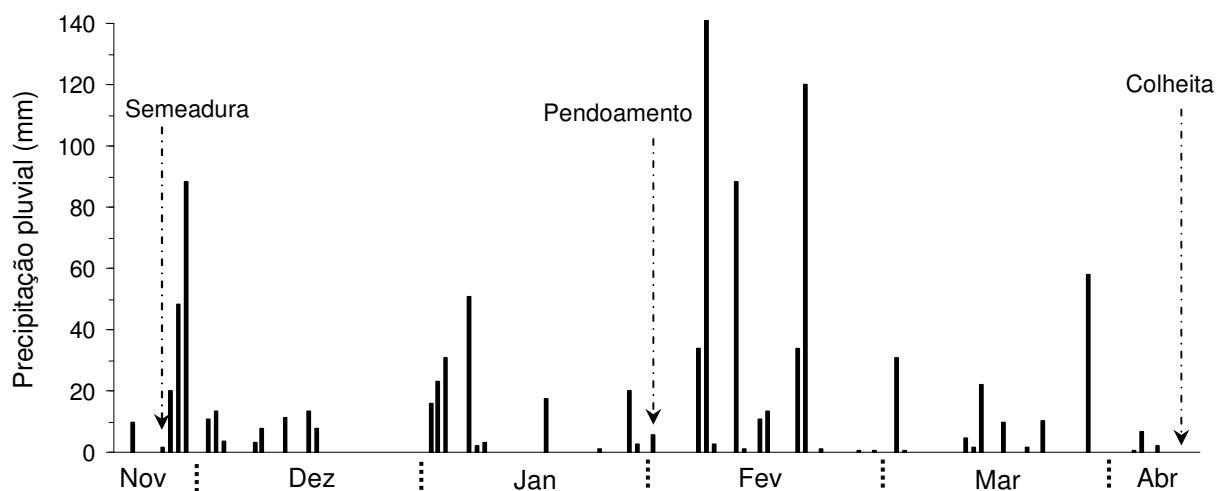


Figura 08. Precipitação diária no período de 23 de novembro de 2005 a 17 de abril de 2006.

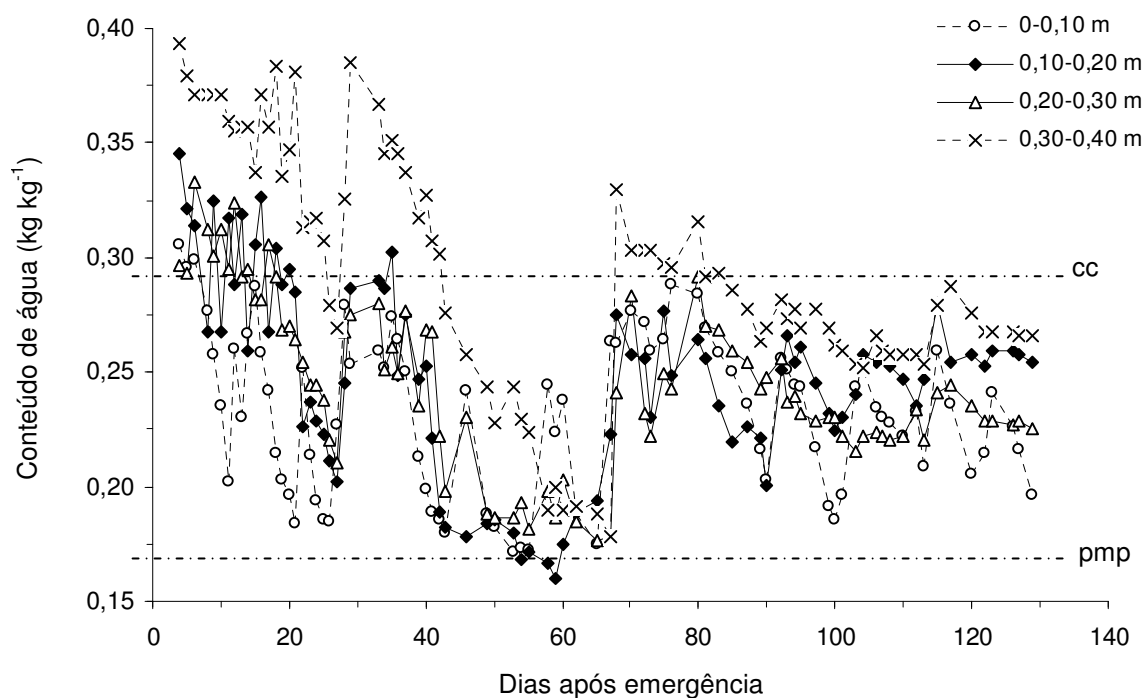


Figura 09. Variação do conteúdo de água em diferentes camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa. O pmp representou o conteúdo de água no ponto de murcha permanente e cc na capacidade de campo.

de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). O L<sub>Vef</sub> apresentou 572 g kg<sup>-1</sup> de argila, 253 g kg<sup>-1</sup> de silte e 116 g kg<sup>-1</sup> de areia fina e 59 g kg<sup>-1</sup> de areia grossa.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado constituído por cinco intensidades de compactação e quatro repetições. Toda parcela experimental apresentou cinco linhas de milho com seis metros de comprimento, considerando-se área útil as três linhas centrais desprezando-se um metro e meio de cada extremidade.

A análise química de rotina para fins de fertilidade seguiu metodologia proposta por RAIJ et al. (1987). No mês de setembro de 2005 aplicou-se calcário para elevação da saturação por bases a 70%, incorporando-o com uma gradagem pesada. Antes da instalação do experimento realizou-se escarificação do solo até 0,30 m de profundidade. Os tratamentos foram: T<sub>0</sub>= solo não trafegado; T<sub>1</sub>\*= 1 passada de um trator de 4 Mg; T<sub>1</sub>= 1 passada de um trator de 11 Mg; T<sub>2</sub>= 2 passadas de um trator de 11 Mg e T<sub>4</sub>= 4 passadas de um trator de 11 Mg. Os tratores trafegaram por toda parcela, no sentido do declive da área, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego era sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes. O conteúdo de água no solo durante a compactação do tratamento T<sub>1</sub>\* foi de 0,17 Kg Kg<sup>-1</sup> e dos demais tratamentos foi de 0,22 kg kg<sup>-1</sup>.

No dia 29 de novembro de 2005, foi semeado o milho, cultivar Master, um híbrido triplo de ciclo precoce, no espaçamento de 0,9 m nas entrelinhas e 12 sementes por metro, utilizando-se para isso uma semeadora-adubadora de plantio direto, e adubado com 0,300 Mg ha<sup>-1</sup> da fórmula 8-20-20 para obtenção da produtividade esperada de milho de 6 a 8 Mg ha<sup>-1</sup>, segundo RAIJ et al. (1997). Após 15 dias, foi feito o desbaste para 5 plantas por metro. A adubação de cobertura foi realizada quando as plantas estavam com 6 folhas utilizando-se 0,450 Mg ha<sup>-1</sup> da fórmula 20-00-15, aplicado em superfície ao lado da linha de plantio.

A caracterização química do solo, na camada de 0-0,20 m, após adubação foi obtida com a amostragem de 5 pontos por parcela, retiradas na entrelinha da cultura, para formar uma única amostra composta (Tabela 06).

Após a semeadura foram coletados dois conjuntos de 6 amostras indeformadas de solo, por tratamento, com cilindros de  $54,29 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), nas camadas de 0,02-0,05; 0,08-0,11; 0,15-0,18 e 0,22-0,25 m totalizando 48 amostras por tratamento, e 240 cilindros para determinações das propriedades físicas e do Intervalo hídrico ótimo.

Tabela 06. Caracterização química do Latossolo Vermelho de textura argilosa cultivado com milho pertencente à Fazenda Experimental da FCAV, realizada após adubação na entrelinha da cultura.

Tratamento	pH	MO	P	Complexo sortivo				V%
				K	Ca	Mg	H+Al	
	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	.....mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> .....				
T <sub>0</sub>	5,3±0,1	20,8±0,5	33,3±0,9	2,6±0,3	19,9±6,6	12,0±1,6	28,8±1,9	57,8±4,4
T <sub>1</sub> *	5,4±0,1	20,5±0,5	38,8±3,3	2,7±0,2	21,4±7,1	12,5±1,7	28,0±1,7	59,5±4,4
T <sub>1</sub>	5,45±0,1	21,0±0,7	35,0±2,4	2,95±0,3	31,5±1,3	14,5±0,7	25,8±0,8	65,5±1,4
T <sub>2</sub>	5,5±0,0	21,0±0,6	33,3±4,7	2,9±0,5	27,8±3,0	12,8±1,6	26,5±0,9	61,5±3,5
T <sub>4</sub>	5,4±0,1	21,8±0,5	33,3±2,4	3,67±0,3	27,0±4,2	11,5±1,5	28,0±1,7	60,0±4,7

Para determinar a curva de retenção foi adotado o procedimento descrito em SILVA et al. (1994). As amostras foram divididas em seis grupos de 40 cilindros, sendo 2 amostras por tratamento e camada de amostragem em cada tensão. Após devidamente preparadas, as amostras com estrutura não deformada foram saturadas por meio de elevação gradual de uma lâmina de água em uma bandeja e então submetidas às tensões de 60; 100; 330; 600; 1000 e 3000 hPa, em câmaras de Richards (KLUTE, 1986). Ao atingir o equilíbrio foram pesadas determinando-se a resistência à penetração (RP) por meio de um penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de  $0,01 \text{ m min}^{-1}$ , cone com ângulo de  $60^\circ$  e com área da base de  $2,96 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ , equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg

acoplada a um microcomputador para a obtenção dos dados, conforme descrito por TORMENA et al. (1998a), realizando-se duas repetições por amostra perfazendo 180 leituras por repetição. A RP média foi obtida desprezando-se meio centímetro de cada extremidade da amostra. Na seqüência, as amostras foram secadas em estufa a  $\pm 105$  °C durante 24 horas para determinação do conteúdo de água em cada tensão (GARDNER, 1986) e da densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986). A microporosidade foi determinada por secagem, na tensão de 100 hPa, em câmaras 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. Como foram determinados apenas duas amostras na tensão 100 hPa por tratamento e camada na construção do IHO, coletaram-se mais duas amostras indeformadas por tratamento e camada para determinação da macro, micro, porosidade total e densidade do solo, formando assim quatro repetições.

Para a determinação do intervalo hídrico ótimo, na camada de 0-0,25 m, a curva de retenção de água no solo foi ajustada utilizando o modelo não linear empregado por SILVA et al. (1994), na forma log-transformada, descrito a seguir:

$$\ln\theta = \ln a + b \ln D_s + c \ln \psi \quad (1)$$

em que  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $D_s$  é a densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ),  $\psi$  é a tensão de água no solo (hPa) e a, b, c são coeficientes obtidos por meio do ajuste do modelo.

A partir dos coeficientes estimados pela equação 1 aplicou-se o antilogaritmo e foram obtidos os valores estimados das propriedades físicas. Assim, assumindo-se o conteúdo de água na capacidade de campo (cc) equivalente a tensão de 100 hPa e o ponto de murcha permanente (pmp) de 15.000 hPa, o  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram estimadas pelas equações (2) e (3), respectivamente, obtidas da equação (1) a seguir:

$$\theta_{CC} = \exp^a D_s^b 100^c \quad (2)$$

$$\theta_{PMP} = \exp^a D_s^b 15000^c \quad (3)$$

A curva de resistência do solo à penetração foi ajustada utilizando o modelo não linear proposto por BUSSCHER (1990), na forma log-transformada, a seguir:

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln Ds \quad (4)$$

em que  $d$ ,  $e$ ,  $f$  são coeficientes obtidos por meio do ajuste do modelo.

O conteúdo de água a partir do qual a RP é limitante foi obtido pela equação (5), obtida da equação (4):

$$\theta_{RP} = (RP_{(crit.)} / (\exp^d * (Ds^e)))^{1/f} \quad (5)$$

A resistência mecânica à penetração crítica ( $RP_{(crit.)}$ ) foi obtida por meio da regressão entre a produtividade de grãos do milho e as diferentes intensidades de compactação do solo, contudo, na tentativa de determinar um nível crítico de RP para a produtividade, devido ao comportamento linear, adotou-se o critério de GRAVETTER & WALLNAU (1995) para diferenciar estatisticamente os tratamentos, o que ocorre quando não há sobreposição dos limites superior e inferior dos erros padrões na comparação das médias dos tratamentos. Logo, verificou-se por meio dos erros padrões que apenas a produtividade do tratamento  $T_2$  foi significativamente menor, utilizando-se o valor 1,16 MPa no IHO.

O conteúdo de água em que a porosidade de aeração é igual a 10% ( $\theta_{PA}$ ) foi calculado pela equação (6) descrita a seguir:

$$\theta_{PA} = PT - 0,1 \quad (6)$$

em que PT representou a porosidade total determinadas nas amostras indeformadas do solo, em  $m^3 m^{-3}$ .

Os modelos do IHO ajustados para cada camada convergiram para o mesmo resultado. Assim, foi ajustado um modelo com todos os dados das quatro camadas. Desta forma, os dados de produção de milho foram discutidos com valores das propriedades físicas obtidas na média das quatro camadas.

A densidade de referência do solo foi determinada em amostras deformadas coletadas na camada de 0-0,2 m e passadas em peneira de 0,004 m. Para tal, foi

utilizado o teste de Proctor normal com reutilização do material (NOGUEIRA, 1998). A densidade relativa do solo ( $D_{sr}$ ) foi obtida pela divisão da densidade do solo pela densidade de referência do solo multiplicado por cem, sendo o valor obtido em porcentagem.

No estágio de pendoamento do milho foi determinada a altura das plantas, a altura de inserção da primeira espiga e o diâmetro do segundo internódio do colmo, em 10 plantas por parcela. A altura das plantas foi determinada entre solo e a inserção da base do pendão, e o diâmetro do colmo foi determinado utilizando a média de duas leituras do segundo internódio do colmo por meio de paquímetro digital. Também, determinou-se a massa seca mediante a coleta de 20 plantas por parcela cortadas junto ao solo. Foram separados caules, folhas, pendões e espigas, e levados à estufa ventilada, a 65°C até massa constante. 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 componentes avaliados da produtividade foram: número de espigas por planta e massa de 1000 grãos. Obteve-se o número de espigas por planta pela razão entre o número de espigas colhidas e o número de plantas existentes na área útil da parcela. A massa de 1000 grãos foi avaliada pela contagem manual de 4 amostras de 100 grãos, pesagem e correção da umidade para 13%, e por regra de três simples, extrapolado para 1000 grãos.

Os dados coletados foram submetidos aos testes de normalidade e homocedasticidade a 5%, respectivamente, por meio das rotinas PROC UNIVARIATE e PROC GLM/hovtest (SAS, 1999). Todos os dados apresentaram homocedasticidade e distribuição normal, não sendo necessária aplicação de transformação. Para produtividade do milho, a análise de variância seguiu delineamento inteiramente casualizado, e para as propriedades físicas do solo, o delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas, sendo o fator secundário constituído pelas camadas do solo. Em função da resistência à penetração do solo, foram realizadas análises de regressão polinomial por meio da rotina PROC REG (SAS, 1999), adotando-se, como critérios de seleção dos modelos, o maior  $R^2$  e a significância de 5%

dos parâmetros das equações. E em função das camadas do solo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando-se a rotina PROC GLM (SAS, 1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância demonstrou que apenas a porosidade total apresentou interação entre a compactação e as camadas do solo. As demais propriedades físicas do solo avaliadas não apresentaram diferença entre as camadas do solo, sendo observado diferença apenas entre as diferentes intensidades de compactação. Logo, o  $L_{Vef}$ , na camada de 0-0,25 m, apresentou condições homogêneas de macroporosidade, microporosidade, resistência mecânica à penetração e densidade do solo, tanto para o solo não trafegado como o trafegado por tratores.

Observa-se que a passagem do trator de 4 Mg ( $T_1^*$ ) proporcionou maior porosidade total na camada de 0,08-0,11 m em relação as camadas de 0,15-0,18 e 0,22-0,25 m, não diferindo estatisticamente da camada 0,02-0,05 m (Tabela 07). Contudo, nos demais tratamentos não observou-se diferença na porosidade total entre as camadas. Possivelmente, este comportamento seja devido a menor força de compressão do solo promovida pelo trator de 4 Mg e a menor umidade do solo quando trafegado neste tratamento, não conseguindo compactar as camadas mais profundas do solo. A compactação adquire intensidade máxima somente quando o solo está na capacidade de campo, podendo ser moldado ou deformado permanentemente pela aplicação de pressão (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Quando o solo foi trafegado com o trator de 11 Mg houve diminuição da porosidade total nas duas primeiras camadas do solo, quando comparado aos tratamentos  $T_0$  e  $T_1^*$ . Para a camada de 0,15-0,18 m também não se verificou diferença na porosidade total quando o solo foi trafegado com o trator de 4 Mg para o solo não trafegado, entretanto, a utilização do trator de 11 Mg alterou a porosidade total somente no tratamento  $T_4$  em relação aos tratamentos  $T_0$  e  $T_1^*$ . Na camada de 0,22-0,25 m foi observado o menor efeito do tráfego de máquinas



sobre o solo na porosidade total, notou-se menor porosidade nos tratamentos  $T_1$  e  $T_4$  em relação ao  $T_0$ , que não apresentou diferença para os tratamentos  $T_1^*$  e  $T_2$ .

Tabela 07. Valores médios e erros padrões da porosidade total nas diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa.

Camada (m)	Intensidade de compactação <sup>1</sup>				
	$T_0$	$T_1^*$	$T_1$	$T_2$	$T_4$
	Porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ )				
0,02-0,05	0,58±0,01 aA	0,57±0,01 abA	0,50±0,00 aB	0,51±0,01 aB	0,48±0,00 aB
0,08-0,11	0,57±0,00 aA	0,58±0,00 aA	0,51±0,01 aB	0,50±0,01 aB	0,48±0,00 aB
0,15-0,18	0,57±0,01 aA	0,54±0,02 bAB	0,51±0,02 aBC	0,50±0,00 aBC	0,49±0,01 aC
0,22-0,25	0,57±0,01 aA	0,54±0,01 bAB	0,51±0,01 aB	0,53±0,01 aAB	0,50±0,00 aB

<sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas, na linha, referem-se à comparação das médias na mesma camada entre os diferentes tratamentos; e letras minúsculas, na coluna, comparam as médias de um tratamento dentro das diferentes camadas.

O tratamento não trafegado ( $T_0$ ) apresentou a maior macroporosidade, seguido do tratamento com uma passada do trator de 4 Mg ( $T_1^*$ ) que diferiu estatisticamente dos demais tratamentos, os quais não apresentaram diferença entre si (Tabela 08). A macroporosidade ficou abaixo de 10% quanto se trafegou uma vez o solo com o trator de 11 Mg, representando uma redução de 57% dos macroporos em relação ao  $T_0$ ; e a partir deste tratamento o aumento de passadas não conseguiu diminuir significativamente a macroporosidade. A microporosidade não apresentou diferença entre os tratamentos com o solo não trafegado ( $T_0$ ) e com uma passada do trator de 4 Mg ( $T_1^*$ ), que foram menores do que a microporosidade encontrada nos demais tratamentos. Sobre a microporosidade o efeito da compactação foi o mesmo observado para macroporosidade quando utilizou-se o trator de 11 Mg. A RP, como a microporosidade, não apresentou diferenças nos dois primeiros tratamentos, entretanto, foi sensível ao número de passadas do trator de 11 Mg. Os tratamentos  $T_1$  e  $T_2$  não apresentaram diferenças na RP, mas foram inferiores ao tratamento  $T_4$  o qual apresentou a maior RP. Assumindo-se a RP do tratamento  $T_6$  como 100% observou-se a redução de 38, 36, 72, 81%, respectivamente para os tratamentos  $T_2$ ,  $T_1$ ,  $T_1^*$ ,  $T_0$ .

A densidade do solo do tratamento  $T_0$  foi inferior a do  $T_1^*$ , sendo que este último tratamento apresentou menor densidade do solo em relação aos tratamentos  $T_1$  e  $T_2$  (Tabela 08). Os tratamentos com uma e duas passadas do trator de 11 Mg não apresentaram diferença em suas densidades, entretanto foram superiores à densidade obtida no tratamento com 4 passadas do trator de 11 Mg ( $T_4$ ). Houve redução de 20% na densidade do solo, do tratamento  $T_4$  para o  $T_0$ . Os resultados ficaram de acordo com os obtidos por KLEIN & LIBARDI (2002), que estudando a densidade e a distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob os diferentes sistemas de uso e manejo, verificaram que o sistema plantio direto sem irrigação, em relação à mata, apresentou redução, na porosidade total até 0,5 m de profundidade e, na macroporosidade, até 0,4 m com o conseqüente aumento da microporosidade. Na profundidade de 0,10 m ocorreu a redução da porosidade total em torno de 12%, enquanto que os macroporos reduziram em 24%, comprovando que, no processo de compactação, ocorre a transformação de macro em microporos. Observaram ainda que para o Latossolo Vermelho Ácrico, de textura argilosa, a densidade do solo de  $1,256 \text{ Mg m}^{-3}$ , atingida no tratamento com plantio direto irrigado, redução da macroporosidade a valores restritivos a aeração das raízes para a maioria das culturas de  $0,045 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Tabela 08. Propriedades físicas do Latossolo Vermelho de textura argilosa, na camada de 0-0,25 m, submetido a diferentes intensidades de compactação.

Compactação	Propriedades físicas do solo <sup>1</sup>			
	Macro	Micro	RP	Ds
	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$		MPa	$\text{Mg m}^{-3}$
$T_0$	0,21±0,02 a	0,36± 0,02 b	0,34±0,11 c	1,12±0,06 d
$T_1^*$	0,17±0,04 b	0,38±0,02 b	0,49±0,22 c	1,21±0,06 c
$T_1$	0,09±0,02 c	0,42±0,02 a	1,12±0,23 b	1,34±0,05 b
$T_2$	0,09±0,03 c	0,42±0,01 a	1,10±0,36 b	1,34±0,06 b
$T_4$	0,07±0,01 c	0,43±0,01 a	1,76±0,50 a	1,40±0,05 a

Macro = Macroporosidade; Micro = Microporosidade; RP = Resistência à penetração; Ds = Densidade do solo.

<sup>1</sup>Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5%.

O aumento da RP, causado pelo rodado do trator, restringiu todos as características avaliadas da cultura, que ajustaram-se a regressões lineares decrescentes com o aumento da RP (Figura 10 e 11), com exceção apenas para o número de espigas por planta e a massa de 1000 grãos que não sofreram efeitos da compactação do solo. O aumento da RP resultou em diminuições de 15, 18, 10 e 24%,

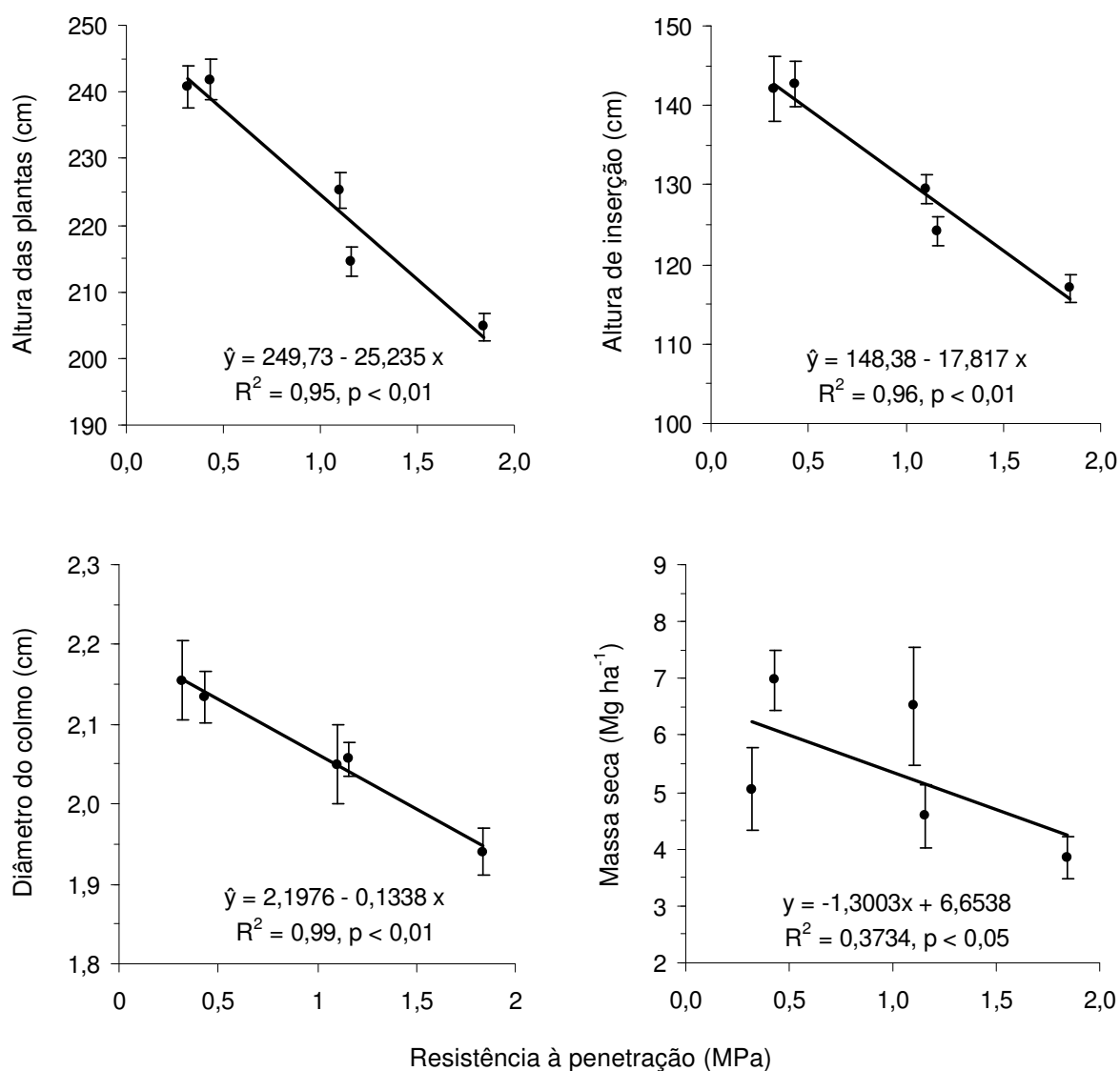


Figura 10. Regressão entre a resistência mecânica do Latossolo Vermelho de textura argilosa à penetração e a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo e massa seca das plantas. As barras referem-se aos erros padrões das médias.

respectivamente, para a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo e massa seca das plantas, comparando-se o tratamento  $T_0$  ao  $T_4$ . Segundo LETEY (1985), o aumento da resistência à penetração do solo causa o desenvolvimento reduzido do sistema radicular, que, por meio de sinais hormonais enviados pelas raízes à parte aérea da planta, reduz seu desenvolvimento, podendo assim comprometer a produtividade. Concordando com FOLONI et al. (2003), que também observaram redução de 20% no crescimento aéreo das plantas de milho após 40 dias de cultivo sob 1,4 MPa de impedância mecânica de um Latossolo Vermelho distroférico em subsuperfície, assim como SILVA & ROSOLEM (2001) também verificaram que o crescimento aéreo do sorgo granífero foi reduzido em mais de 40% ao final de 38 dias de cultivo, com resistência mecânica do solo de 1,22 MPa; e COELHO et al. (2000) que em condições de campo verificaram que as plantas de algodão apresentaram menor altura, biomassa aérea e área foliar com o aumento da compactação do solo.

Nos tratamentos  $T_0$ ,  $T_1^*$ ,  $T_1$  e  $T_2$  a produtividade de milho foi superior a 6,000 Mg  $ha^{-1}$ , condizente com a adubação utilizada, sendo a máxima produtividade alcançada de 8,147 Mg  $ha^{-1}$  no tratamento  $T_0$  (Figura 11). Com o aumento da RP houve reduções da produtividade de 8, 4, 16 e 27%, respectivamente, para os tratamentos  $T_1^*$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ , e  $T_4$ , em relação ao  $T_0$ , representando uma perda de grãos de 2,166 Mg  $ha^{-1}$ . 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% da produtividade de grãos de milho, respectivamente. ALBUQUERQUE & REINNERT (2001) observaram que a restrição ao crescimento radicular reduziu a produtividade de grãos de milho em 1,169 Mg  $ha^{-1}$ .

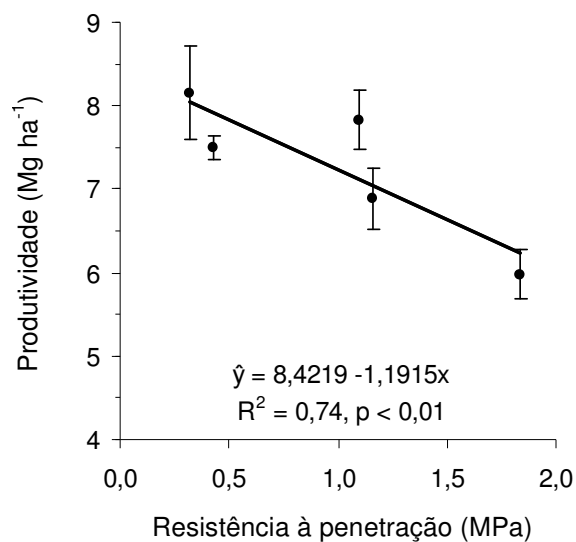


Figura 11. Produtividade de grãos da cultura do milho em função da resistência à penetração do Latossolo Vermelho de textura argilosa, na camada de 0-0,25 m. As barras referem-se aos erros padrões das médias.

Pelos coeficientes de correlação obtidos na Tabela 09, verifica-se que a altura das plantas correlacionou-se positivamente com a altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo, massa seca das plantas, produtividade de grãos; contudo, não foi observada correlação entre o diâmetro do colmo e da massa seca das plantas com a produtividade de milho. Logo, plantas mais altas e com maiores alturas de inserção da primeira espiga, provavelmente, atingirão maiores produtividades, concordando com MAGALHÃES (2003), que a redução da massa vegetativa ocasiona diminuição na capacidade fotossintética, afetando diretamente a produção de grãos. O diâmetro do colmo também não apresentou correlação com a massa seca das plantas. A massa seca das plantas foi a característica que apresentou menor influência das modificações impostas pela compactação do solo, correlacionando-se positivamente apenas com a porosidade total e negativamente com a resistência mecânica à penetração. A densidade do solo, a microporosidade e a resistência à penetração correlacionaram-se negativamente com a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga, diâmetro do colmo e produtividade; e positivamente com a porosidade total e macroporosidade do solo. Verificou-se então que as modificações das

propriedades físicas do solo, proporcionadas pelo tráfego de tratores, modificou o as características agronômicas das plantas de milho, resultando em menores produtividades. Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos entre as propriedades físicas do solo, sendo o menor coeficiente de - 0,80 entre a porosidade total e a microporosidade.

Tabela 09. Matriz de correlação entre as propriedades físicas do Latossolo Vermelho de textura argilosa e as características agronômicas da cultura do milho.

Atributos <sup>(1)</sup>	Coeficientes de correlação								
	AP	IP	DI	MS	PD	DS	PT	MA	MI
IP	0,98**								
DI	0,66**	0,66**							
MS	0,54*	0,53*	0,32 <sup>ns</sup>						
PD	0,56*	0,47*	0,44 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>					
DS	-0,89**	-0,86**	-0,70**	-0,43 <sup>ns</sup>	-0,59**				
PT	0,86**	0,83**	0,70**	0,48*	0,58**	-0,96**			
MA	0,86**	0,82**	0,68**	0,38 <sup>ns</sup>	0,60**	-0,96**	0,97**		
MI	-0,75**	-0,71**	-0,57**	-0,19 <sup>ns</sup>	-0,57**	0,84**	-0,80**	-0,93**	
RP	-0,91**	-0,87**	-0,75**	-0,51*	-0,70**	0,94**	-0,93**	-0,93**	0,81**

<sup>(1)</sup> AP = altura das plantas, IP = inserção da primeira espiga, DI = diâmetro do colmo, MS = massa da matéria seca, PD = produtividade de grãos, DS = densidade do solo, PT = porosidade total, MA = macroporosidade, MI = microporosidade e RP = resistência mecânica à penetração.

Pelo IHO pôde-se verificar que o aumento da Ds influenciou positivamente a variação do conteúdo de água disponível do solo ( $\theta_{cc} - \theta_{pmp}$ ), concordando com TORMENA et al. (1998a), que o aumento da retenção de água ao longo dos valores de Ds é justificado pela redução da macroporosidade e da redistribuição dos tamanhos dos poros (Figura 12).

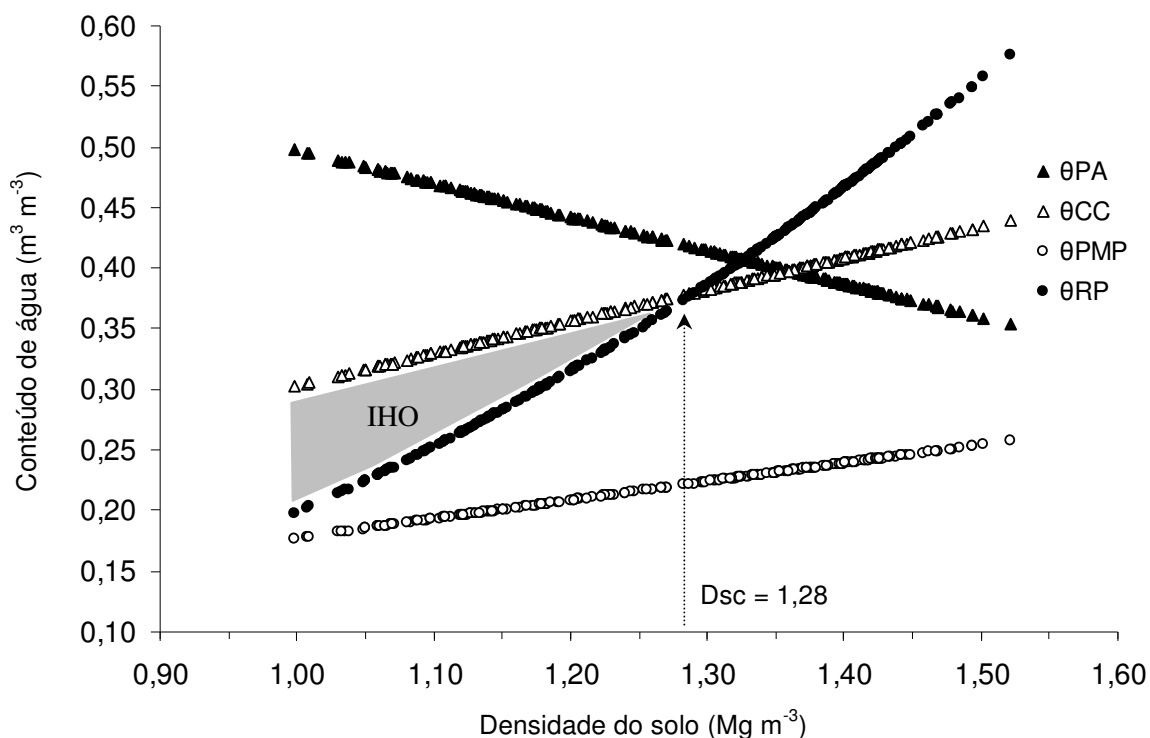


Figura 12. Variação do conteúdo de água volumétrico ( $\theta$ ) com a densidade do solo, para limites críticos da porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), resistência do solo à penetração de 1,16 MPa ( $\theta_{RP}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) no Latossolo Vermelho de textura argilosa. IHO = intervalo hídrico ótimo.  $D_{sc}$  = densidade do solo crítica, na camada de 0-0,25 m.

A variação da  $D_s$  teve grande impacto sobre a  $\theta_{RP}$  (Figura 12). A partir da  $D_s \geq 1,00 \text{ Mg m}^{-3}$  o  $\theta_{RP}$  foi superior que o  $\theta_{PMP}$ . Na parte superior do IHO, com a diminuição do  $\theta_{PA}$  proporcionada pelo aumento da  $D_s$ , foram alcançados valores restritivos ao IHO apenas na  $D_s \geq 1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ , valor superior ao valor da densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ) de  $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$ , que segundo SILVA & KAY (1997) é definida como a  $D_s$  onde o IHO é igual a zero, ou seja, a  $D_s$  na qual o limite inferior cruza com o limite superior do intervalo, a partir da qual ocorreriam limitações severas ao desenvolvimento das plantas, associadas à qualidade física do solo, e que o valor de  $D_s$  em que IHO é menor do que a água disponível pode ser identificado como a densidade máxima aceitável para que as plantas se desenvolvam sem problemas de restrição física do solo, podendo o conteúdo de água variar entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Tais resultados ficaram de acordo com os obtidos por TORMENA et al.

(1998a), TORMENA et al. (1999), BEUTLER (2003) e BEUTLER et al. (2004a,b), que em solos tropicais o IHO é limitado, na sua parte superior, pelo conteúdo de água na capacidade de campo e na parte inferior, pela resistência do solo à penetração. Logo, para a cultura do milho, cultivado em um Latossolo Vermelho eutroférico de textura argilosa, a Dsc foi de  $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$  e a partir da Ds de  $1,00 \text{ Mg m}^{-3}$  a RP já seria fator restritivo para o crescimento de plantas se o conteúdo de água do solo permanecesse abaixo do  $\theta_{RP}$ .

Segundo SILVA et al. (1994), o crescimento das plantas é menos restringido dentro dos limites do IHO, enquanto as limitações aumentam fora desses. SILVA (1998) observou que o crescimento da parte aérea das plantas de milho foi negativamente correlacionado com a frequência com que a umidade do solo ocorreu fora do IHO. Assim, a magnitude do IHO pode ser utilizada como um diagnóstico da frequência com que a estrutura do solo determina as condições de umidade que impõem limites ao crescimento das plantas. Dentro deste contexto, os tratamentos  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_4$  apresentaram Ds acima da Dsc proposta pelo IHO, ou seja, mesmo que o conteúdo de água ficasse sempre na capacidade de campo durante o ciclo da cultura, o que não ocorreu (Figura 09), haveria severas restrições ao crescimento radicular pela elevada RP (Figura 12). Contudo, os demais tratamentos apresentaram uma faixa de variação do conteúdo de água onde não existiria impedimento ao crescimento radicular pela RP, mas em nenhum dos tratamentos o conteúdo de água poderia atingir o ponto de murcha permanente, já que a Ds observada para o tratamento  $T_0$  foi de  $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$  sendo o limite inferior do IHO nesta Ds limitado pela RP (Figura 12). Pelo IHO pôde-se estabelecer que o menor conteúdo de água onde não ocorreriam restrições pela RP foi de  $0,24$  e  $0,26 \text{ kg kg}^{-1}$  para os tratamentos  $T_0$ ,  $T_1^*$ , respectivamente, e quanto menor a faixa do IHO maiores foram as restrições impostas pela RP ao crescimento da parte aérea das plantas e da produtividade.

Utilizando-se o teste de Proctor determinou-se que o conteúdo de água de  $0,27 \text{ kg kg}^{-1}$  do LVef proporcionou sua máxima compactação de  $1,61 \text{ Mg m}^{-3}$ , sendo que o conteúdo de água no qual ocorreu a máxima compactação ficou muito próxima do conteúdo de água na capacidade de campo de  $0,29 \text{ kg kg}^{-1}$  (Figura 13a). Já com menor



conteúdo de água no solo ocorreu menor compactação, por causa das partículas que se agregam por forças de coesão, formando microagregados mais resistentes, que impedem o deslocamento das partículas e seu rearranjo e conseqüente compactação (NOGUEIRA, 1998).

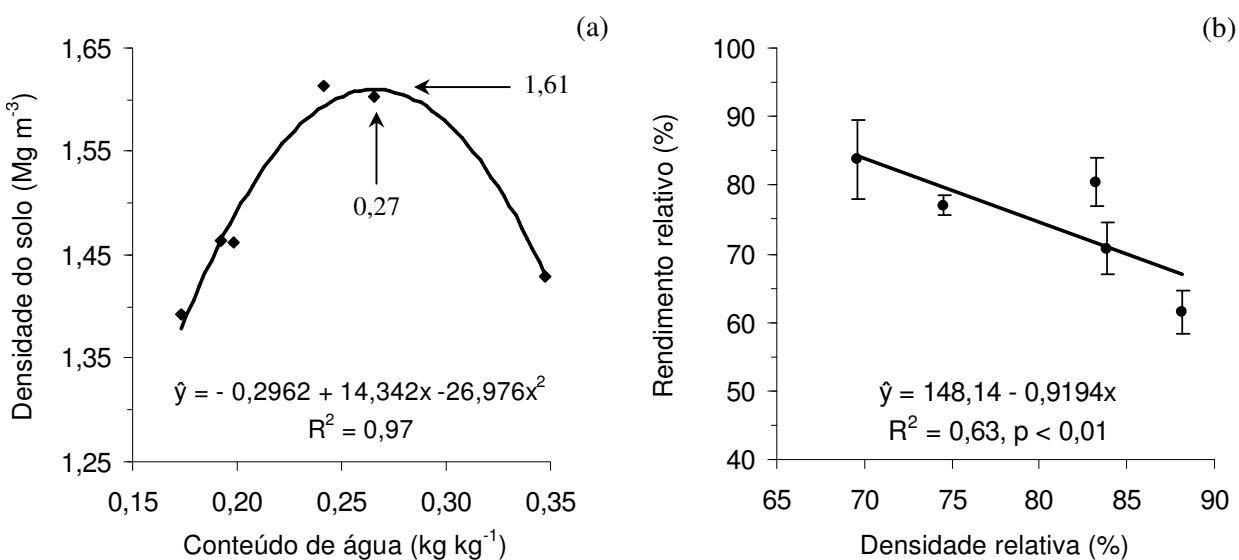


Figura 13. Densidade de referência determinada com o aparelho de Proctor no Latossolo Vermelho de textura argilosa (a). Produtividade relativa em função da densidade relativa do solo (b).

O rendimento relativo ajustou-se a um modelo linear com a densidade relativa dos tratamentos que foram de 70; 75; 83, 84 e 88% (Figura 13b). Observou-se que apenas quando a densidade relativa atingiu 83% ocorreram perdas significativas na produtividade, valor acima da densidade relativa encontrada para o valor de Dsc do IHO que foi de 80%. Como a cultura do milho mostrou-se sensível à compactação do solo, torna-se necessário que se faça um diagnóstico prévio das condições físicas do solo de áreas onde se pretende cultivá-lo, pois, muito provavelmente, a restrição física ao desenvolvimento radicular pode proporcionar prejuízos ao desenvolvimento da cultura refletindo em perdas da produtividade.

## CONCLUSÕES

A compactação do solo, proporcionada pelo tráfego de tratores, modificou suas propriedades físicas, ocorrendo aumento da microporosidade, da resistência mecânica à penetração e da densidade do solo assim como diminuição da macroporosidade e porosidade total.

O Intervalo hídrico ótimo foi limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo (100 hPa) e na parte inferior pela resistência mecânica do solo à penetração em todas as intensidades de compactação, com densidade do solo crítica a produtividade de  $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$  correspondente a 80% da máxima compactação do solo.

A produtividade do milho foi significativamente menor quando a resistência mecânica à penetração do solo atingiu o valor de 1,16 MPa, determinada na tensão de 100 hPa.

## **CAPÍTULO 5 – COMPACTAÇÃO DO LATOSSOLO VERMELHO DE TEXTURA ARGILOSA NO SISTEMA RADICULAR E PRODUTIVIDADE DO MILHO**

**RESUMO** – O conhecimento de padrões de crescimento radicular são importantes para tomada de decisões em relação as práticas de manejo solo. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da compactação e variação do conteúdo de água sobre determinadas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho de textura argilosa e associá-las ao crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com cinco intensidades de compactação e quatro repetições. Foram coletadas amostras indeformadas do solo nas camadas de 0,02-0,05; 0,08-0,11, 0,15-0,18 e 0,22-0,25 m para determinação da resistência mecânica do solo à penetração e porosidade do solo. Para determinação da densidade, superfície e diâmetro radicular e massa seca das raízes, foram retiradas amostras do solo nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 m, em cada parcela. O conteúdo de água do solo foi monitorado durante todo o ciclo da cultura. O aumento da resistência mecânica do solo à penetração assim como sua variabilidade temporal em função do conteúdo de água do solo, com um período de estresse hídrico entre o 42<sup>o</sup> ao 65<sup>o</sup> dia após emergência da cultura, alterou a morfologia do sistema radicular em todas as camadas, com exceção apenas para a densidade radicular e massa seca das raízes na camada de 0,10-0,20 m, restringindo também o crescimento radicular em profundidade. Contudo, o diâmetro radicular foi o único parâmetro do sistema radicular que apresentou correlação inversa com a produtividade de milho.

**Palavras-chave:** resistência à penetração, macroporosidade, crescimento radicular, *Zea mays*, água no solo

## INTRODUÇÃO

Pesquisas demonstraram que a compactação reduz o volume de poros do solo (KLEIN & LIBARDI, 2002; STONE et al., 2002), e que nesse processo os macroporos são os primeiros a desaparecerem, responsáveis pela sua aeração (PRIMAVESI, 1987). Assim, o desenvolvimento das raízes é afetado negativamente pela redução dos macroporos (SÉGUY et al., 1999), pelo aumento da resistência à penetração das raízes (STONE et al., 2002), pela diminuição da concentração de oxigênio, pela menor taxa de mineralização da matéria orgânica no solo, e difusão lenta de nutrientes e de oxigênio para as raízes (RIBEIRO, 1999), diminuindo então a disponibilidade e a absorção de água e de nutrientes (MEDEIROS et al., 2005).

O crescimento e o desenvolvimento das raízes dependem das condições físicas e químicas do solo. Normalmente as raízes possuem um crescimento vertical, mas quando encontram uma camada compactada, podem modificar sua direção e forma de crescimento (VARSA et al., 1997). BENGHOUGH & MULLINS (1990) afirmam que o menor crescimento radicular em solos compactados ocorre por causa da menor taxa de alongação celular em razão da diminuição na taxa de divisão celular do meristema. Entre as modificações morfológicas nas raízes, provocadas pela restrição ao crescimento, estão o aumento do diâmetro e a diminuição do comprimento, tornando-as tortuosas (SILVA & ROSOLEM, 2002). Essas modificações, geralmente, são decorrentes do crescimento das raízes nos pontos de menor resistência oferecidos pelo solo (BORGES et al., 1988), como canais deixados por raízes decompostas e fendas naturalmente encontradas no solo.

Segundo MEDEIROS et al. (2005), a influência da compactação do solo sobre a absorção de nutrientes, o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas depende da espécie, da classe de solo e do teor de água no solo. De acordo com MATERECHERA et al. (1992), a compactação do solo pode promover o engrossamento das raízes, em razão de mudanças morfológicas e fisiológicas do sistema radicular, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem.

Um fator de suma importância a considerar é o impacto do teor de água sobre as medidas de resistência mecânica do solo à penetração. Já que à medida que o solo vai secando há o aumento da coesão entre suas partículas, implicando numa maior resistência à penetração das raízes (GERARD et al., 1972). Segundo DEXTER (1987), o crescimento de raízes pode ser inibido com valores de resistência à penetração inferiores a 1 MPa em solos secos, mas, com umidade suficiente, pode haver crescimento com resistência à penetração variando entre 4,0 e 5,0 MPa.

O reconhecimento da ocorrência destas interações e de que as culturas estão sujeitas às suas interferências demonstraram a necessidade de quantificá-las na avaliação da influência das práticas de manejo sobre as condições físicas do solo (TORMENA et al., 1998a). Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da compactação do solo, proporcionada pelo tráfego de tratores, e da variação de seu conteúdo de água sobre determinadas propriedades físicas, e associá-las ao sistema radicular e à produtividade de milho.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado na Fazenda de Ensino e Pesquisa da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal (SP), situado nas coordenadas geográficas de 21° 15' 29" de latitude Sul e 48° 16' 47" de longitude Oeste de Greenwich, 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 média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21°C. As precipitações diárias durante o ciclo da cultura (novembro de 2005 a abril de 2006), obtidas na Estação Meteorológica Automatizada do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, são apresentadas na Figura 14.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Eutroférico, típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef). A composição granulométrica do solo foi determinada em 10 amostras deformadas, na camada de 0-0,20 m, por meio da dispersão com NaOH ( $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e agitação lenta durante 16 horas (30 rotações por minuto), sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). O LVef apresentou  $572 \text{ g kg}^{-1}$  de argila,  $253 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $116 \text{ g kg}^{-1}$  de areia fina e  $59 \text{ g kg}^{-1}$  de areia grossa.

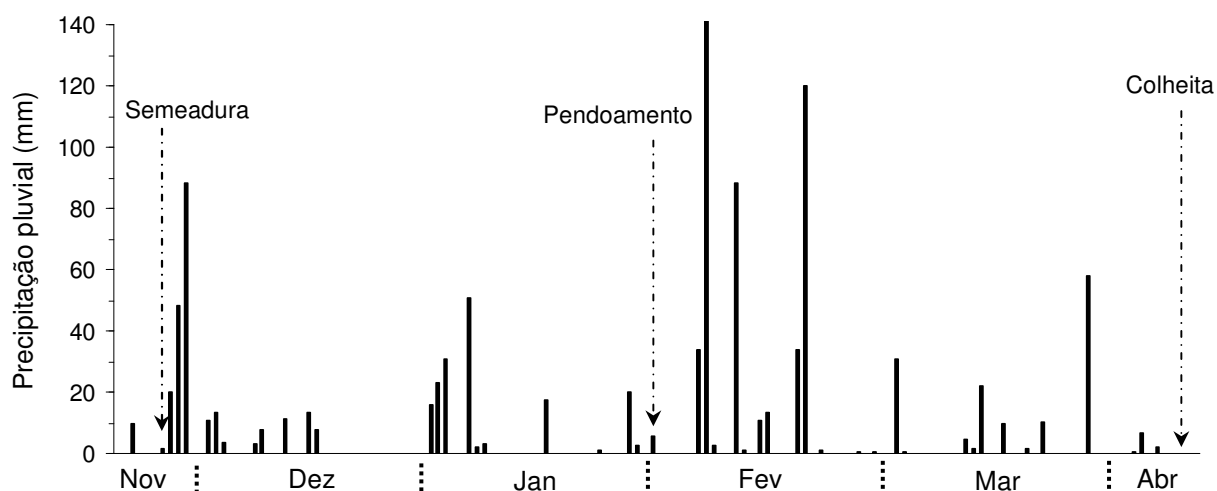


Figura 14. Precipitação diária no período de 23 de novembro de 2005 a 17 de abril de 2006.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com cinco intensidades de compactação. Toda parcela experimental apresentou cinco linhas de milho com seis metros de comprimento, considerando-se área útil as três linhas centrais desprezando-se um metro e meio de cada extremidade.

A análise química de rotina para fins de fertilidade seguiu metodologia proposta por RAIJ et al. (1987). No mês de setembro de 2005 realizou-se a aplicação de calcário, para elevação da saturação por bases a 70%, e uma gradagem pesada para sua incorporação. Antes da instalação do experimento realizou-se uma escarificação do solo até 0,30 m de profundidade.

Os tratamentos foram:  $T_0$ = solo não trafegado;  $T_1^*$ = 1 passada de um trator de 4 Mg;  $T_1$ = 1 passada de um trator de 11 Mg;  $T_2$ = 2 passadas de um trator de 11 Mg e  $T_4$ = 4 passadas de um trator de 11 Mg. Os tratores trafegaram por toda parcela, no sentido do declive da área, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram variou conforme o tratamento, sendo que o tráfego era sobreposto ao anterior de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes. O conteúdo de água no solo durante a compactação do tratamento  $T_1^*$  foi de  $0,17 \text{ kg kg}^{-1}$  e nos demais tratamentos foi de  $0,22 \text{ kg kg}^{-1}$ .

No dia 29 de novembro de 2005, foi semeado o milho, cultivar Master, um híbrido triplo de ciclo precoce, no espaçamento de 0,9 m nas entrelinhas e 12 sementes por metro, utilizando-se para isso uma semeadora-adubadora de plantio direto; e adubado com  $0,300 \text{ Mg ha}^{-1}$  da fórmula 8-20-20 para obtenção da produtividade esperada de milho de 6 a  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$ , segundo RAIJ et al. (1997). Após 15 dias, foi feito o desbaste para obter 5 plantas por metro. A adubação de cobertura foi realizada quando as plantas estavam com 6 folhas utilizando-se  $0,450 \text{ Mg ha}^{-1}$  da fórmula 20-00-15, sem incorporação. Para caracterização química após adubação do solo foram retiradas cinco amostras simples na entrelinha da cultura por parcela, na camada de 0-0,20 m, para composição de uma única amostra composta.

Foram abertas quatro trincheiras por tratamento, uma em cada parcela, para retirada de amostras não deformadas do solo. Em duas delas coletaram-se seis cilindros para cada camada do solo para determinação da resistência mecânica à penetração (RP) em diferentes conteúdos de água em câmaras de pressão de Richards (60; 100; 330; 600; 1000; 3000 hPa), assim como a determinação da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente pelo modelo proposto por GENUCHTEN (1980). Nas outras duas trincheiras coletou-se apenas um cilindro por camada, que foram colocados na tensão de 100 hPa em câmaras de pressão de Richards para determinação das propriedades físicas do solo. As camadas do solo amostradas foram de 0,02-0,05; 0,08-0,11, 0,15-0,18 e 0,22-0,25 m em cada tratamento, utilizando-se cilindros de  $54,29 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro) para determinação

das propriedades físicas do solo. A microporosidade foi determinada por secagem (tensão de 100 hPa), em câmaras 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. Em todos os cilindros determinou-se a resistência à penetração (RP) por meio de um penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de 0,01 m min<sup>-1</sup>, cone com ângulo de 60° e com área da base de 2,96 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados, conforme descrito por TORMENA et al. (1998a), realizando-se

Tabela 10. Valores médios e erros padrões da macroporosidade, microporosidade e resistência mecânica do solo à penetração nas diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa.

Camada (m)	Intensidade de compactação <sup>1</sup>				
	T <sub>0</sub>	T <sub>1*</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>
Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )					
0,02-0,05	0,22±0,01	0,19±0,01	0,08±0,01	0,09±0,02	0,05±0,00
0,08-0,11	0,22±0,00	0,21±0,02	0,09±0,01	0,07±0,01	0,06±0,01
0,15-0,18	0,19±0,01	0,15±0,03	0,10±0,01	0,09±0,01	0,07±0,01
Média	0,21±0,01	0,18±0,01	0,09±0,01	0,09±0,01	0,06±0,00
Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )					
0,02-0,05	0,37±0,00	0,38±0,01	0,42±0,01	0,42±0,01	0,43±0,00
0,08-0,11	0,35±0,00	0,38±0,01	0,42±0,00	0,42±0,01	0,42±0,00
0,15-0,18	0,37±0,01	0,38±0,02	0,41±0,01	0,41±0,01	0,42±0,00
Média	0,36±0,00	0,38±0,01	0,41±0,00	0,42±0,00	0,42±0,00
Resistência à penetração (MPa)					
0,02-0,05	0,31±0,05	0,37±0,05	1,16±0,06	1,14±0,25	2,13±0,20
0,08-0,11	0,35±0,05	0,33±0,04	1,09±0,17	1,20±0,19	1,70±0,15
0,15-0,18	0,31±0,03	0,60±0,12	1,04±0,09	1,13±0,20	1,68±0,32
Média	0,32±0,03	0,44±0,06	1,10±0,06	1,15±0,11	1,83±0,14

<sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos na mesma camada e minúsculas comparam médias de uma camada no mesmo tratamento.



duas repetições por amostra perfazendo 180 leituras por repetição. A RP média foi obtida desprezando-se meio centímetro de cada extremidade da amostra. A caracterização física do solo, na tensão de 100 hPa, encontra-se na Tabela 10.

No estágio do pendoamento da cultura do milho, que ocorreu 59 dias após a germinação (01/02/2006), período no qual, segundo MENGEL & BARBER (1974), o sistema radicular do milho alcança a máxima extensão, foram retiradas amostras do solo de 0,20 m no sentido da linha x 0,10 m no sentido da entrelinha, distanciadas de 0,10 m do eixo principal das plantas de milho, nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 m, em cada parcela, com um volume de solo coletado por camada de 0,001 m<sup>3</sup>. Em seguida, as raízes foram separadas do solo por lavagem em água corrente, utilizando peneiras de abertura de malha de 0,002 m e 0,001 m. As imagens das raízes foram digitalizadas em um “scanner” de leitura ótica, na resolução de 400 dpi, fornecendo o diâmetro médio (mm) e o comprimento das raízes (mm) pelo software “Delta-T Scan”, utilizando o método de HARRIS & CAMPBELL (1989), para determinação da densidade do comprimento radicular e da superfície radicular. Na seqüência as amostras foram secas em estufa a  $\pm 65$  °C até massa constante, para determinação da massa seca das raízes:

$$\text{Massa seca das raízes} = m/v \quad (1)$$

onde: m representou a massa seca das raízes de cada amostra, em mg; e v o volume de solo coletado, em cm<sup>3</sup>.

Para a determinação da densidade do comprimento radicular utilizou-se a seguinte equação:

$$\text{Densidade radicular} = c/v \quad (2)$$

onde: c representou o comprimento radicular, em cm; e v o volume de solo coletado, em cm<sup>3</sup>.

A expressão utilizada para o cálculo da superfície radicular foi:

$$\text{Superfície radicular} = 2 \pi r c/v \quad (3)$$

onde:  $r$  representou o raio médio das raízes, em cm;  $c$  representou o comprimento radicular, em cm; e  $v$  representou o volume de solo coletado, em  $\text{cm}^3$ .

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%.

Como a RP varia inversamente com o conteúdo de água do solo, este foi medido durante o ciclo da cultura utilizando-se uma sonda Profile Probe type PR2 acoplada a um Moisture Meter HH2 até a profundidade de 0,20 m (Figura 15). Com a RP, determinada em diferentes conteúdos de água, foram ajustadas equações exponenciais entre a umidade gravimétrica do solo e a RP (Tabela 11), concordando com ROSOLEM et al. (1994b), o que possibilitou a determinação da variação da RP durante todo o ciclo da cultura nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

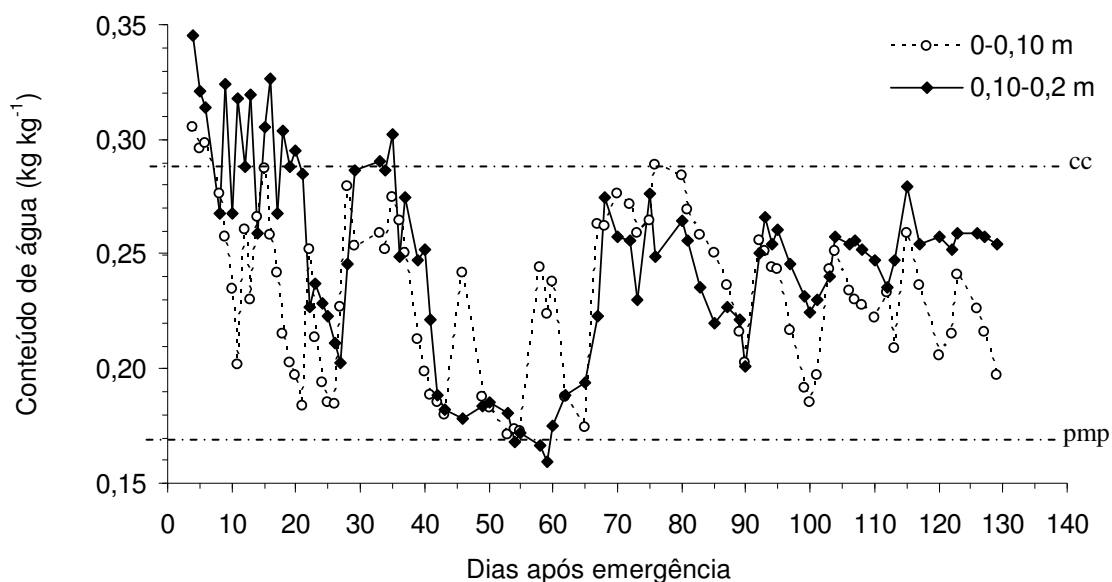


Figura 15. Variação do conteúdo de água em diferentes camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa. O pmp representou o conteúdo de água no ponto de murcha permanente e cc na capacidade de campo.

Os dados coletados foram submetidos aos testes de normalidade e homocedasticidade a 5% por meio das rotinas PROC UNIVARIATE e PROC GLM/hovtest (SAS, 1999). Observou-se que nenhuma das variáveis analisadas do

sistema radicular apresentou variância homogênea e que apenas as variáveis massa seca das raízes e diâmetro radicular apresentaram distribuição normal. Para atender as hipóteses iniciais todas as variáveis do sistema radicular foram transformadas em  $\sqrt{x}$ . Para as propriedades químicas do solo e a produtividade do milho, a análise de variância seguiu delineamento inteiramente casualizado, e para as variáveis do sistema radicular, o delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas, sendo o fator secundário constituído pelas camadas do solo. Em função da resistência à penetração do solo, foram realizadas análises de regressão polinomial por meio da rotina PROC REG (SAS, 1999), adotando-se, como critérios de seleção dos modelos, o maior  $R^2$  e a significância de 5% dos parâmetros das equações. E em função das camadas do solo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando-se a rotina PROC GLM (SAS, 1999). Determinou-se também a matriz de correlação entre as variáveis do sistema radicular avaliados e a produtividade de milho a 5% de probabilidade por meio da rotina PROC CORR (SAS, 1999).

Tabela 11. Equações exponenciais entre a resistência mecânica à penetração (RP) do Latossolo Vermelho de textura argilosa e a umidade gravimétrica do solo (UG) em diferentes intensidades de compactação e camadas.

Tratamentos	Camadas <sup>1</sup>	
	0-0,10 m	0,10-0,20 m
T <sub>0</sub>	RP = 14,735e <sup>-12,264UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,89)	RP = 31,698e <sup>-14,214UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,87)
T <sub>1*</sub>	RP = 27,080e <sup>-13,623UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,86)	RP = 13,799e <sup>-8,9002UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,78)
T <sub>1</sub>	RP = 108,79e <sup>-15,852UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,75)	RP = 373,99e <sup>-19,695UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,84)
T <sub>2</sub>	RP = 240,54e <sup>-17,916UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,83)	RP = 238,61e <sup>-16,811UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,90)
T <sub>4</sub>	RP = 144,59e <sup>-14,310UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,85)	RP = 484,29e <sup>-19,555UG</sup> (R <sup>2</sup> =0,76)

<sup>1</sup> para a camada de 0-0,10 m o número de observações foi de 24 e para camada de 0,10-0,20 m de 12.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela caracterização química da área experimental, apresentada na Tabela 12, verifica-se que não houve diferença estatística entre os teores dos nutrientes do solo nos diferentes tratamentos, sendo a área considerada homogênea em relação a sua

fertilidade, e a não interferência da fertilidade na resposta da cultura à compactação do solo.

Tabela 12. Análises químicas de rotina para fins de fertilidade do Latossolo Vermelho cultivado com milho pertencente à Fazenda de Ensino e Pesquisa da FCAV, realizada após adubação na entrelinha da cultura.

Tratamento	pH	MO	P	K	Complexo sortivo		H+Al	V%
					Ca	Mg		
	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	.....mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> .....				
T <sub>0</sub>	5,3±0,1	20,8±0,5	33,3±0,9	2,6±0,3	19,9±6,6	12,0±1,6	28,8±1,9	57,8±4,4
T <sub>1*</sub>	5,4±0,1	20,5±0,5	38,8±3,3	2,7±0,2	21,4±7,1	12,5±1,7	28,0±1,7	59,5±4,4
T <sub>1</sub>	5,45±0,1	21,0±0,7	35,0±2,4	2,95±0,3	31,5±1,3	14,5±0,7	25,8±0,8	65,5±1,4
T <sub>2</sub>	5,5±0,0	21,0±0,6	33,3±4,7	2,9±0,5	27,8±3,0	12,8±1,6	26,5±0,9	61,5±3,5
T <sub>4</sub>	5,4±0,1	21,8±0,5	33,3±2,4	3,67±0,3	27,0±4,2	11,5±1,5	28,0±1,7	60,0±4,7

Pela análise de variância observou-se que todas as variáveis do sistema radicular do milho apresentaram interação entre as diferentes intensidades de compactação e as camadas do solo estudadas. Logo, o crescimento radicular dentro de cada camada do solo nas diferentes intensidades de compactação apresentou um comportamento, assim como dentro do mesmo tratamento entre as diferentes camadas do solo estudadas.

As Figuras 16, 17, 18 e 19 demonstram o comportamento da superfície radicular, densidade radicular, diâmetro radicular e massa seca das raízes em função do aumento da compactação em diferentes camadas do solo.

Nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, a superfície, densidade e o diâmetro radicular, assim como a massa seca das raízes apresentaram efeito quadrático em função do aumento da resistência mecânica do solo à penetração. Nota-se que o aumento da compactação proporcionou aumento da superfície radicular até o valor de 1,27 MPa na camada de 0-0,05 m e de 1,33 MPa para a camada de 0,05-0,10 m, sendo que a partir desses valores de resistência a compactação do solo restringiu o crescimento radicular. Para a densidade radicular e massa seca das raízes os valores de RP críticas nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m foram de 1,25 e 1,28 MPa e 1,30 e

1,38 MPa, respectivamente, próximos aos valores encontrados para a superfície radicular (Figuras 16, 17, 18 e 19).

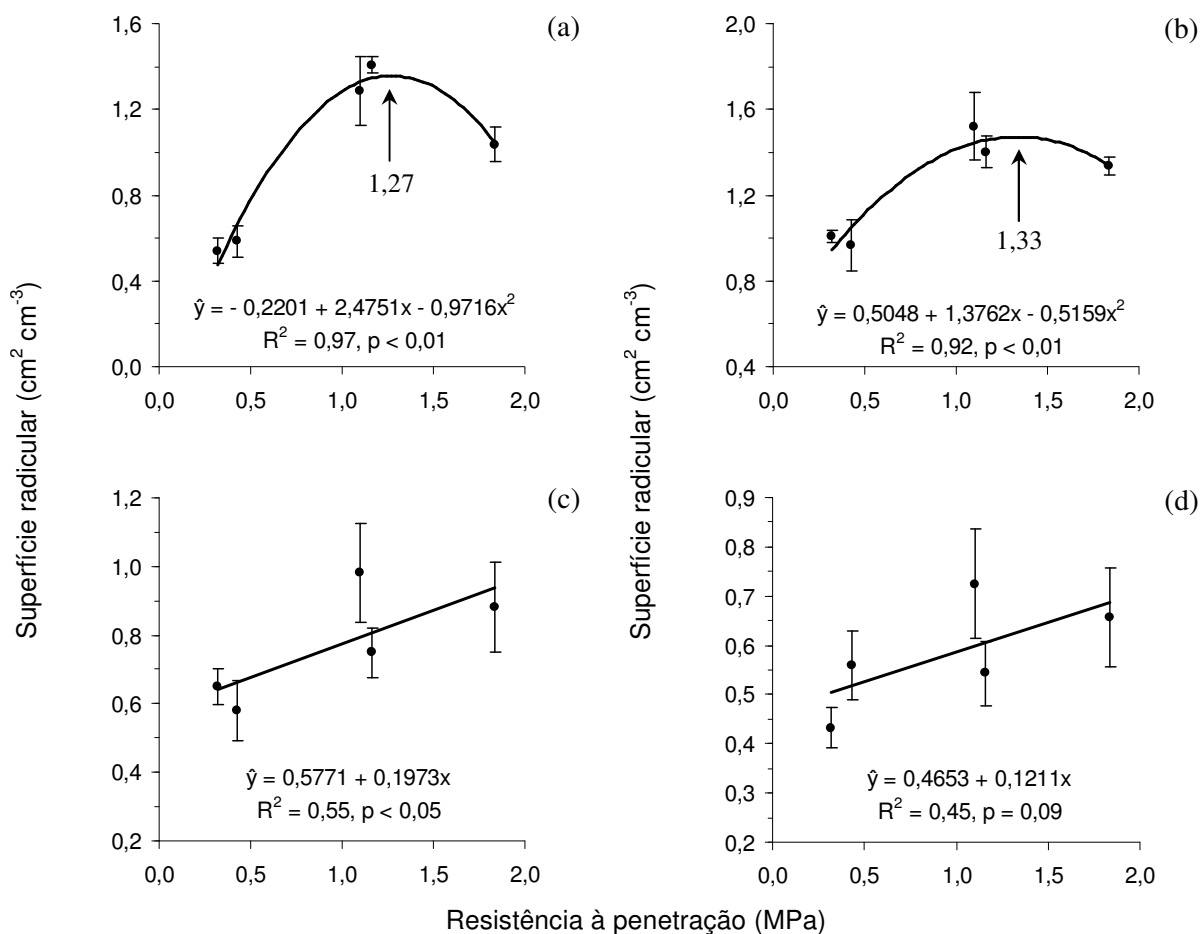


Figura 16. Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração e a superfície radicular do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d). As barras referem-se aos erros padrões das médias. Dados transformados em  $\sqrt{x}$ .

Contudo, observa-se que para o diâmetro radicular até os valores de 1,41 e 1,45 MPa nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, respectivamente, proporcionaram seu aumento, sendo que níveis mais elevados de RP foram necessários para restringi-lo quando comparado a superfície, densidade e massa seca do sistema radicular (Figuras 16, 17, 18 e 19). Observou-se que apenas duas passadas do trator de 11 Mg foram suficientes para atingir valores de RP próximos aos críticos para o crescimento

radicular, e também foram suficientes para proporcionar valores de macroporosidade abaixo de 10% (Tabela 10).

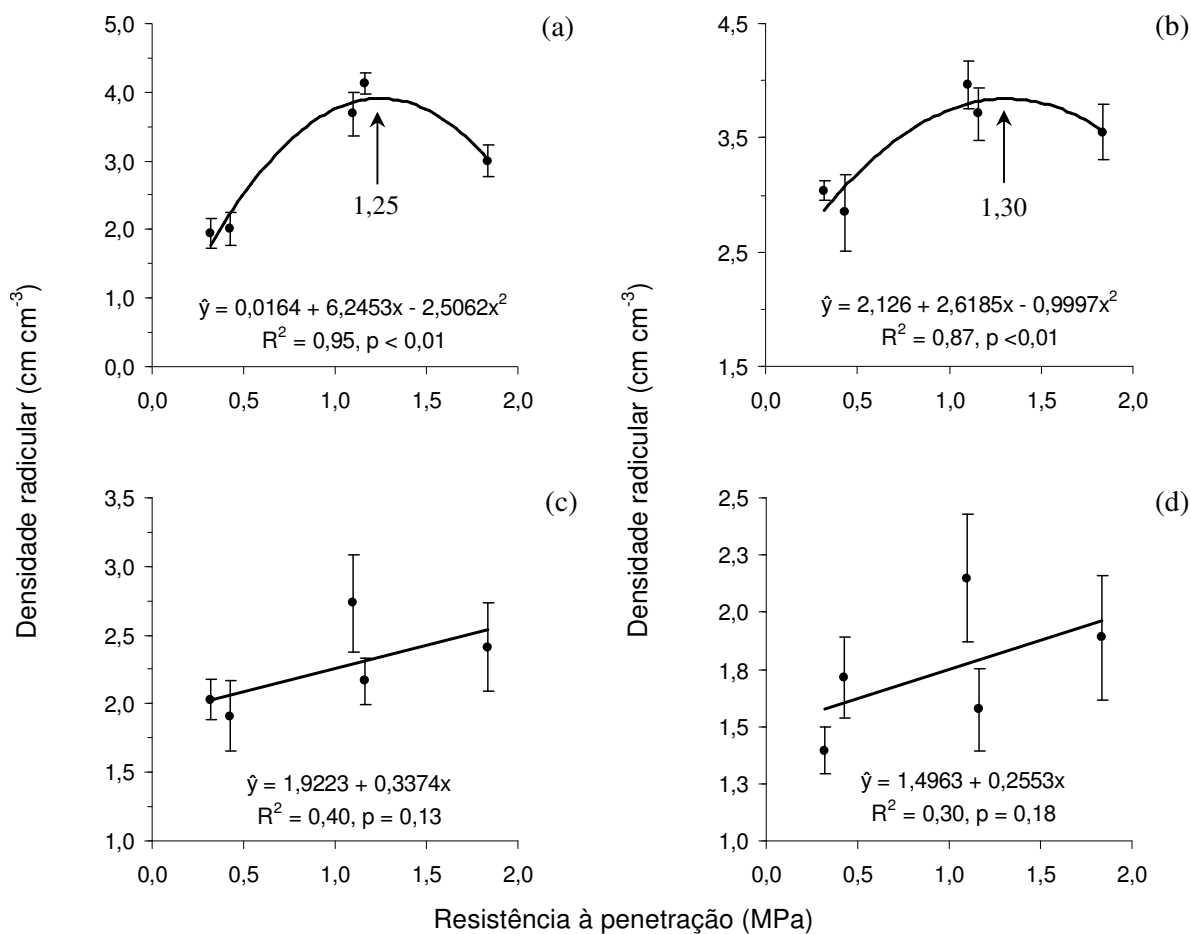


Figura 17. Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração e a densidade radicular do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d). As barras referem-se aos erros padrões das médias. Dados transformados em  $\sqrt{x}$ .

A macroporosidade está diretamente relacionada com a densidade do solo, já que no processo de compactação os primeiros poros a desaparecer são os macroporos, responsáveis pela sua aeração (PRIMAVESI, 1987). Os macroporos constituem a rota principal ao crescimento das raízes, mostrando que solos mal estruturados prejudicam o crescimento radicular (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Segundo THOMASSON (1978) e SECCO et al. (2004), os solos devem possuir

macroporosidade mínima de 10% para o crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas. Neste sentido, TORMENA et al. (1998b), estudando as alterações da porosidade de aeração em sistema plantio direto, observaram que o tráfego de máquinas reduziu seus valores para próximo de zero, restringido a produtividade das culturas. KLEIN & LIBARDI (2002) estudando a densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho Ácrico, de textura argilosa, sob os diferentes sistemas de uso e manejo (mata secundária, área de sequeiro com dois cultivos anuais em plantio direto e uma terceira aérea irrigada por pivô central em sistema plantio direto) observaram que para o Latossolo Vermelho Ácrico, de textura argilosa, a densidade do solo de  $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ , atingida na área irrigada, reduziu a macroporosidade a valores restritivos à aeração das raízes, para a maioria das culturas, de  $0,045 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . SUN (1955) observou diferenças no desenvolvimento de raízes primárias de soja, em diferentes condições de aeração. Segundo este autor, em soluções nutritivas aeradas as raízes apresentavam maior comprimento, menor diâmetro, raízes laterais numerosas e pelos absorventes esparsos, ao passo em que condições não aeradas, possuíam menor comprimento, maior diâmetro e abundância de pêlos absorventes.

Verificou-se que nas camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m a densidade radicular e a massa seca não sofreram alterações devido ao aumento da RP (Figuras 17 e 19). Entretanto, para a superfície e diâmetro radicular, em ambas as camadas, demonstraram aumento linear com a compactação do solo (Figuras 16 e 18). MATERECHERA et al. (1992), estudando o efeito da compactação em oito espécies vegetais, selecionadas para cobrir uma gama de diâmetros radiculares, que foram cultivadas em duas áreas com valores resistência à penetração variando entre 2,5 a 3,0 MPa, abaixo de 0,10 m de profundidade, na área compactada e menores que 2 MPa na área sem compactação, verificaram que o diâmetro radicular das oito espécies aumentou com a compactação do solo, e que houve diferenças significativas na porcentagem de penetração das raízes das diferentes espécies. Segundo o autor espécies com maiores diâmetros radiculares possuem maior capacidade de penetração do que espécies de menores diâmetros, exemplificando o fato de que as dicotiledôneas

por possuírem maiores diâmetros que as monocotiledôneas, apresentaram maior poder de penetração no solo.

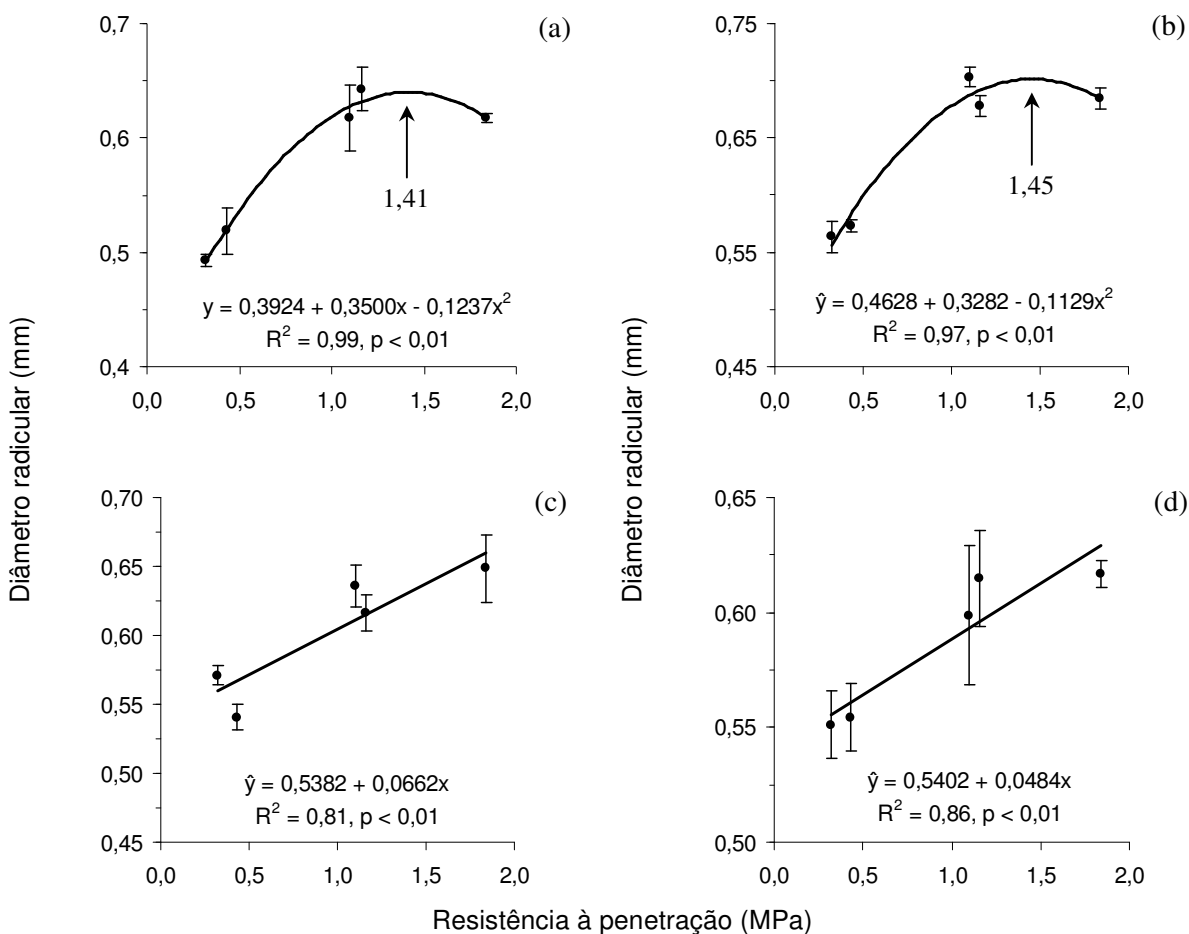


Figura 18. Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração e o diâmetro radicular do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d). As barras referem-se aos erros padrões das médias. Dados transformados em  $\sqrt{x}$ .

MELLO IVO & MIELNICZUK (1999) verificaram que para o plantio direto, na camada superficial (0-0,05 m), a densidade do comprimento radicular foi significativamente maior que no preparo convencional, sendo esta situação invertida na camada de 0,10-0,15 m, e que abaixo da camada trabalhada pelos implementos (0,25-0,35 m), as áreas preparadas apresentaram valores iguais de densidade radicular, quando comparadas às áreas de plantio direto. Os autores verificaram que as raízes



não sofreram deflexão no ângulo normal de crescimento no preparo convencional por ocasião da etapa de ocupação dos primeiros 0,30 m do solo, o que foi observado para o plantio direto devido a maior resistência à penetração. Os autores também verificaram que o raio médio das raízes no sistema plantio direto foi maior, quando comparado ao preparo convencional em todas as camadas, devido a maior resistência à penetração que levaram as raízes a sofrerem deformações morfológicas exteriorizadas pelo aumento de seu raio.

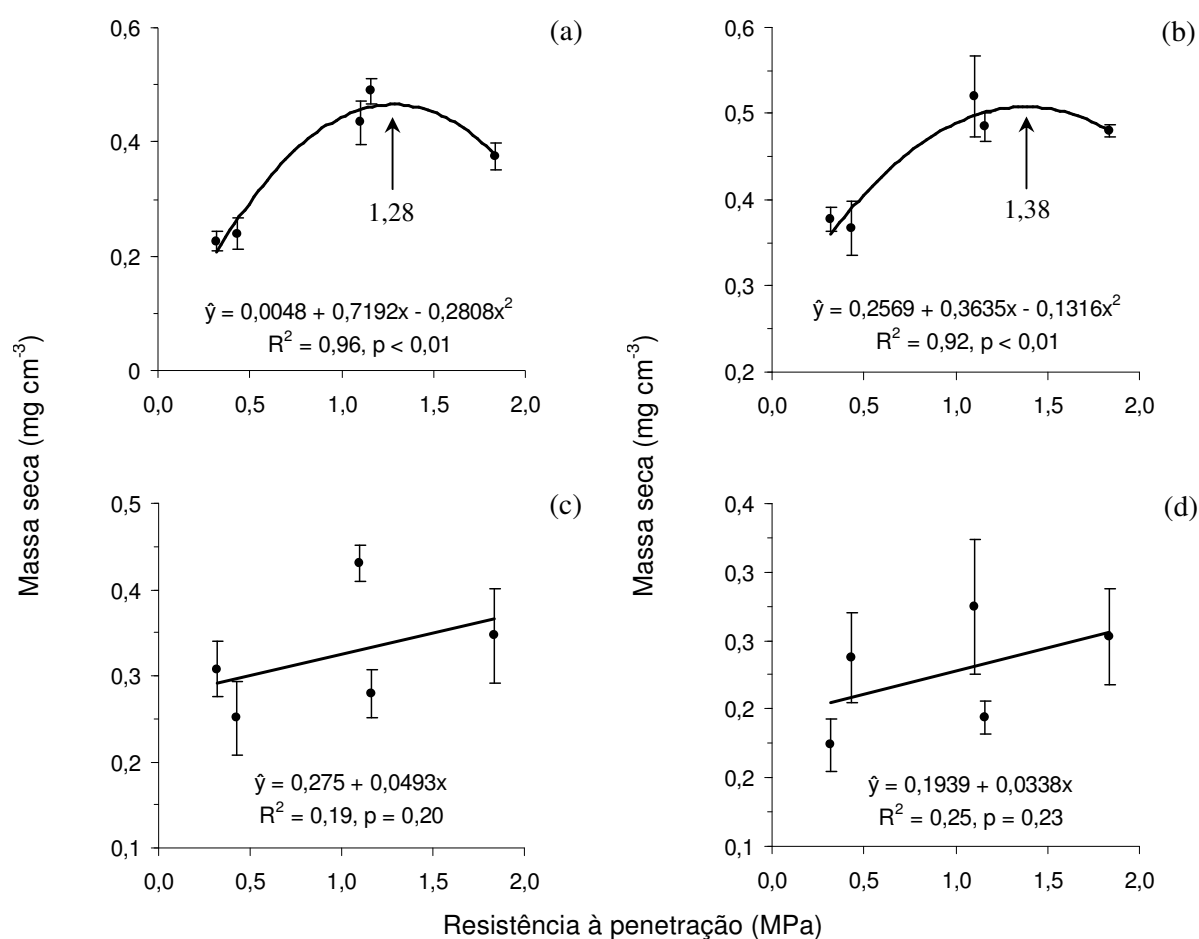


Figura 19. Regressão entre a resistência mecânica do solo à penetração e a massa seca das raízes do milho nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,15 m (c) e 0,15-0,20 m (d). As barras referem-se aos erros padrões das médias. Dados transformados em  $\sqrt{x}$ .

Segundo FOLONI et al. (2003), o diâmetro médio das plantas de milho aumentou significativamente com a compactação do Latossolo Vermelho distroférico ajustando-se a uma função linear. Afirmaram ainda que o engrossamento das raízes das plantas de milho na camada compactada pode ser um indicativo de que esta espécie tem pouco potencial para estabelecer o seu sistema radicular em solos compactados.

Dentro do tratamento preparado e não trafegado ( $T_0$ ) observou-se que a maior densidade e superfície radicular foram obtidas na camada de 0,05-0,10 m do solo (Tabela 13). Entretanto, o menor diâmetro radicular foi encontrado na camada de 0-0,05, sendo que não houve diferença estatística entre as demais camadas. Resultados semelhantes para densidade e superfície radicular foram encontrados nos tratamentos  $T_0$  e  $T_1$  nas diferentes camadas (Tabela 13). Contudo, com uma passada do trator de 4 Mg foi suficiente para modificar a distribuição do diâmetro radicular e da massa seca nas diferentes camadas em relação ao tratamento com solo solto ( $T_0$ ), onde não houve diferença estatística do diâmetro radicular da camada 0-0,05 para as camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m; sendo que a única diferença encontrada foi da camada 0,05-0,10 m para a de 0-0,05 m. Segundo CAMARGO & ALLEONI (1997), a pressão de crescimento das raízes depende da pressão de turgor das células do meristema radicular em processo de alongamento, e da área de contato da raiz sobre um agente rígido externo. Portanto, quanto maior o diâmetro da raiz, maior é a força exercida no processo de alongamento das células do meristema radicular, para penetração em determinada camada de solo. Segundo BARBER (1984), o aumento do diâmetro radicular seria devido a um achatamento das células, de maneira que a área de membranas por unidade de comprimento da raiz aumentasse. A maior massa seca das raízes foi encontrada na camada de 0,05-0,10 m, não havendo diferença entre as demais camadas do solo. Com uma passada do trator de 11 Mg ocorreram modificações na densidade e superfície radicular em relação ao tratamento  $T_0$ , não observadas com uma passada do trator de 4 Mg (Tabela 13). Observou-se maior concentração de raízes na camada de 0-0,10 m quando a resistência mecânica a penetração atingiu o valor médio de 1,10 MPa (Tabela 10).

Tabela 13. Valores médios e erros padrões da densidade radicular ( $\text{cm cm}^{-3}$ ), superfície radicular ( $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$ ), diâmetro radicular (mm) e massa seca da raiz ( $\text{mg cm}^{-3}$ ) de milho em função das diferentes intensidades de compactação e camadas do Latossolo Vermelho de textura argilosa.

Camada (m)	Tratamentos <sup>1</sup>				
	T <sub>0</sub>	T <sub>1*</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>
	Densidade radicular <sup>2</sup>				
0-0,05	1,94±0,22 b	2,01±0,24 b	3,68±0,32 a	4,12±0,15 a	3,00±0,23 ab
0,05-0,10	3,04±0,08 a	2,85±0,33 a	3,96±0,21 a	3,71±0,23 a	3,55±0,24 a
0,10-0,15	2,03±0,15 b	1,91±0,26 b	2,73±0,35 b	2,16±0,17 b	2,41±0,32 bc
0,15-0,20	1,39±0,10 b	1,72±0,18 b	2,15±0,28 b	1,57±0,18 b	1,89±0,27 c
	Superfície radicular <sup>2</sup>				
0-0,05	0,54±0,06 b	0,58±0,07 b	1,29±0,16 a	1,41±0,04 a	1,04±0,08 b
0,05-0,10	0,96±0,03 a	0,92±0,12 a	1,47±0,15 a	1,35±0,08 a	1,28±0,04 a
0,10-0,15	0,65±0,05 b	0,58±0,09 b	0,98±0,14 b	0,75±0,07 b	0,88±0,13 bc
0,15-0,20	0,43±0,04 b	0,56±0,07 b	0,72±0,11 c	0,54±0,07 b	0,66±0,10 c
	Diâmetro radicular <sup>2</sup>				
0-0,05	0,49±0,00 b	0,52±0,02 b	0,62±0,03 b	0,64±0,02 ab	0,62±0,00 b
0,05-0,10	0,56±0,01 a	0,57±0,00 a	0,70±0,01 a	0,68±0,01 a	0,68±0,01 a
0,10-0,15	0,57±0,01 a	0,54±0,01 ab	0,64±0,02 b	0,62±0,01 b	0,65±0,02 ab
0,15-0,20	0,55±0,01 a	0,55±0,01 ab	0,60±0,03 b	0,61±0,02 b	0,62±0,01 b
	Massa seca das raízes <sup>2</sup>				
0-0,05	0,23±0,02 bc	0,24±0,03 b	0,44±0,04 a	0,49±0,02 a	0,37±0,02 b
0,05-0,10	0,38±0,01 a	0,37±0,03 a	0,52±0,05 a	0,48±0,02 a	0,48±0,01 a
0,10-0,15	0,31±0,03 ab	0,25±0,04 b	0,43±0,02 a	0,28±0,03 b	0,35±0,05 bc
0,15-0,20	0,17±0,02 c	0,24±0,03 b	0,27±0,05 b	0,19±0,01 b	0,25±0,03 c

<sup>1</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup> Dados transformados em  $\sqrt{x}$ .

No tratamento T<sub>1</sub> a densidade radicular foi estatisticamente maior na camada de 0-0,10 m em relação a camada de 0,10-0,20 m, assim como a superfície radicular o foi na camada de 0-0,10 m, em relação a camada de 0,10-0,15 m e esta maior que a camada de 0,15-0,20 m (Tabela 13). O diâmetro radicular foi maior na camada de 0,05-0,10 m, em relação as demais camadas, que não apresentaram diferença estatística entre si. Em relação a massa seca das raízes verificou-se que não houve diferença nas três primeiras camadas estudadas do solo e que a menor massa seca foi obtida na camada de 0,15-0,20 m (Tabela 13). Logo, no tratamento (T<sub>1</sub>) foram verificados os

primeiros efeitos da compactação sobre o crescimento radicular, que foram a maior concentração de raízes na superfície e a menor exploração do solo em profundidade, prejudicando a absorção de água, já que raízes mais profundas usualmente podem extrair mais água, e de maneira mais efetiva do que aquelas próximas à superfície do solo, devido ao fato delas serem mais jovens, menos comprimidas e freqüentemente localizadas em solo úmido (BASSOI et al., 1994).

Quando foram efetuadas duas passadas do trator de 11 Mg, atingindo uma média de 1,15 MPa (Tabela 10), não houve alteração da densidade radicular em profundidade em relação ao tratamento com uma única passada do trator 11 Mg. Entretanto, a maior superfície radicular concentrou-se na camada de 0-0,10 m, já o diâmetro radicular na camada de 0-0,05 m não apresentou diferença estatística com a camada de 0,05-0,10 m e a massa seca de raízes também foi maior na camada de 0-0,10 m em relação a camada de 0,10-0,20 m (Tabela 13). Logo, ficou evidente a concentração de raízes mais espessas na superfície e sua dificuldade em alcançar camadas mais profundas do solo, concordando com ROSOLEM et al. (1994a) e MELLO IVO & MIELNICZUK (1999). Em um Hapludalf com problemas de drenagem e elevada densidade nos horizontes subsuperficiais, VARSA et al. (1997) verificaram que o rompimento de camadas adensadas até a profundidade de 0,90 m, promoveu maior penetração das raízes e produção de milho devido a menor resistência mecânica à penetração. Observaram também que nos anos de menor precipitação foram observados os maiores benefícios no aumento da profundidade de subsolagem; e que as raízes que penetraram às maiores profundidades extraíram mais água e nutrientes de um maior volume de solo minimizando as condições desfavoráveis para o desenvolvimento da cultura e resultando em maiores produtividades. Segundo LAL (1989), o rearranjo da estrutura do solo, decorrente da compactação, se reflete no crescimento das raízes, que tendem a concentrar-se na camada superficial do solo, até 0,10 m de profundidade. Segundo CAMARGO & ALLEONI (1997), o aumento da compactação e conseqüente redução do tamanho dos poros, a ponto de impedir a passagem da raiz principal, leva a compensar esse efeito pela expansão de raízes laterais com diâmetros menores, que se proliferam e formam um sistema radicular

muito denso e raso, que no campo dificilmente sobrevive a condições de seca. FOLONI et al. (2003) e ROSOLEM et al. (1994b) também verificaram que a produção total de matéria seca do sistema radicular do milho não foi prejudicada pelo aumento da resistência mecânica do solo em camadas compactadas, localizadas abaixo de 0,10 m de profundidade. Nos trabalhos com plantas de milho, submetidas à compactação do solo, verificou-se que o crescimento radicular foi inibido na camada compactada e abaixo dela, mas a intensificação da impedância mecânica do solo em subsuperfície causou um incremento de raízes na camada superficial, de modo que o nível mais alto de resistência mecânica do solo à penetração não resultou em menor produção total de matéria seca radicular, quando comparado ao tratamento testemunha.

No tratamento  $T_4$  verificou-se que a densidade radicular não apresentou diferenças estatísticas nas duas primeiras camadas do solo, mas que na camada de 0,05-0,10 m apresentou maior densidade em relação às camadas inferiores do solo (Tabela 13). Já para superfície radicular, houve diferença entre as duas primeiras camadas do solo sendo que a maior superfície ficou contida na camada de 0,05-0,10 m, e que também foi maior do que as duas últimas camadas. Não houve diferença no diâmetro radicular na camada de 0,05-0,15 m. O diâmetro foi estatisticamente maior apenas na camada de 0,05-0,10 m em relação as camadas de 0-0,05 m e 0,15-0,20 m. A massa seca das raízes ficou concentrada nas duas camadas superficiais do solo, sendo em maior quantidade na camada de 0,05-0,10 m. Esperava-se que no tratamento  $T_4$ , devido a maior resistência mecânica à penetração, as raízes ficassem mais concentradas nas camadas superiores, seguindo a tendência demonstrada do  $T_0$  até no  $T_2$ . Entretanto, MATERECHERA et al. (1992) demonstraram possíveis comportamentos do crescimento radicular, na transição entre o solo solto, encontrando camadas compactadas no subsolo não preparado. Segundo os autores, as raízes podem se inclinar horizontalmente ou penetrar tais camadas. As raízes que se inclinaram podem percorrer horizontalmente a interface entre as camadas até achar possíveis pontos de baixa resistência e entrar para o subsolo por meio destes caminhos, ou apenas secar e parar seu crescimento. As que conseguiram penetrar as camadas compactadas sem inclinação horizontal podem continuar crescendo na mesma direção, mas com redução

na taxa de crescimento ou penetrar pequenas distâncias dentro da camada e quase sempre interromper seu crescimento. A idade das plantas e a presença de caminhos com baixa resistência mecânica (bioporos e fendas) no subsolo são pontos importantes para o estabelecimento do sistema radicular.

Segundo CARDOSO et al. (2006), em um Latossolo Vermelho distroférico de textura muito argilosa, o crescimento radicular da cultura da soja em plantio direto, compactado pelo tráfego de tratores, e plantio direto escarificado a 0,25 m de profundidade, com densidade do solo respectivamente de 1,38 e 1,17 Mg m<sup>-3</sup>, na profundidade de 0,12 m. Por meio da análise morfoestrutural observaram o desenvolvimento de fissuras nos tratamentos sistema plantio direto compactado e escarificado nas camadas de 0–0,25 e 0–0,15 m, respectivamente. As fissuras mostraram-se mais desenvolvidas nas áreas sob sistema plantio direto compactado, principalmente nos primeiros 0,15 m de profundidade que permitiram o desenvolvimento das raízes nas camadas compactadas. Este fator esteve, provavelmente, relacionado com o aumento da densidade do solo, onde à medida que o processo de compactação progrediu, os agregados se compactaram, reduzindo a quantidade de vazios intra-agregados. Assim, as oscilações da temperatura e de umidade do solo, associadas à coesão dos minerais de argila, promoveram o desenvolvimento de fissuras entre as faces dos agregados característicos do Latossolo Vermelho. Este processo mostrou-se mais expressivo nas estruturas formadas por agregados angulares, com baixa ocorrência de vazios intra-agregados, associados aos maiores valores de densidade do solo (1,38 Mg m<sup>-3</sup>), o que pode explicar o comportamento do sistema radicular verificado no tratamento T<sub>4</sub> (Tabela 13).

Segundo BEUTLER & CENTURION (2004), tão importante quanto o desenvolvimento radicular é a determinação do valor crítico de RP ao desenvolvimento radicular e sua relação com a produtividade das culturas. Portanto, foi estabelecida a equação de regressão linear entre a RP e a produtividade de grãos da cultura do milho (Figura 20).

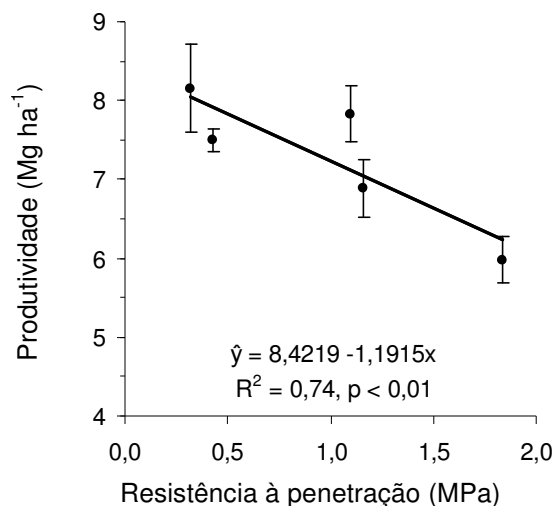


Figura 20. Regressão entre a resistência mecânica do Latossolo Vermelho de textura argilosa à penetração e a produtividade de milho. As barras referem-se aos erros padrões das médias.

Observa-se pelo modelo (Figura 20) que com o aumento da RP, a partir do tratamento com solo solto (0,32 MPa) até o tratamento com quatro passadas do trator de 11 Mg (1,83 MPa), houve uma redução de 27% na produtividade de milho.

O aumento da compactação do solo proporcionou modificações no sistema radicular, resultando em redução da produtividade. Pela matriz de correlação (Tabela 14) observa-se que todas as características do sistema radicular, avaliadas na camada de 0-0,20 m, correlacionaram-se positivamente. A produtividade do milho correlacionou-se negativamente com todas as características do sistema radicular. Entretanto, a única correlação significativa encontrada foi com o diâmetro radicular.

Segundo BENNIE (1996), é difícil generalizar resultados da literatura, visto que a influência da compactação do solo sobre o crescimento radicular decorre de uma série de fatores, que dependem das características genéticas das plantas, das condições ambientais (precipitações) e do estágio de desenvolvimento do vegetal. Segundo TORMENA et al. (1998b), a relação entre a estrutura do solo e a produtividade das culturas ainda é pouco compreendida, considerando as dificuldades em quantificar as várias propriedades físicas do solo ligadas à estrutura, e que a variabilidade espacial e temporal da estrutura do solo ser um dos fatores que dificultam essa quantificação, já que algumas propriedades físicas do solo variam conjuntamente.

Tabela 14. Matriz de correlação entre a superfície, densidade e diâmetro radicular, massa seca das raízes e a produtividade de milho cultivado em Latossolo Vermelho de textura argilosa submetido a diferentes intensidades de compactação.

Características	Coeficientes de correlação <sup>(1)</sup>				
	Superfície	Densidade	Massa	Diâmetro	Produtividade
Superfície	1				
Densidade	0,97**	1			
Massa	0,96**	0,94**	1		
Diâmetro	0,87**	0,78**	0,86**	1	
Produtividade	-0,36 <sup>ns</sup>	-0,26 <sup>ns</sup>	-0,30 <sup>ns</sup>	-0,53*	1

<sup>(1)</sup>\* significativo a 5% de probabilidade, <sup>ns</sup> não significativo

Os valores médios de RP, apresentados na Tabela 10 e utilizados nas regressões entre as características do sistema radicular e produtividade de grãos em função da compactação do solo, foram determinados na capacidade de campo (100 hPa), conteúdo de água utilizado e padronizado para determinação da RP possibilitando comparações com os valores encontrados com a literatura. Entretanto, a resistência à penetração aumentou com a diminuição do conteúdo de água do solo, o qual não permaneceu na capacidade de campo durante todo o ciclo da cultura (Figura 15). Observou-se pelas Figuras 21 e 22, um período (entre o 42<sup>o</sup> ao 65<sup>o</sup> dias após emergência da cultura) no qual a RP atingiu os maiores valores, em que o sistema radicular estava em pleno desenvolvimento, assim como a parte aérea da planta, o que possivelmente resultou numa menor produtividade. Portanto, observou-se que, dependendo do regime hídrico, a RP pode atingir valores extremos mesmo em solos preparados. Assim como, dependendo do estágio em que a cultura se encontra, ocasionar sérios problemas no crescimento radicular, como também na absorção de água e nutrientes, refletindo em menor produtividade.

BOONE et al. (1987) demonstraram que a ocorrência de restrições ao crescimento das plantas, tanto devido a excessiva resistência assim como a reduzida difusão de oxigênio em solos compactados, foi dependente da variabilidade temporal da umidade decorrente da distribuição da precipitação. Logo, o estabelecimento de níveis limitantes das propriedades físicas é bastante complexo, pois envolve a integração de



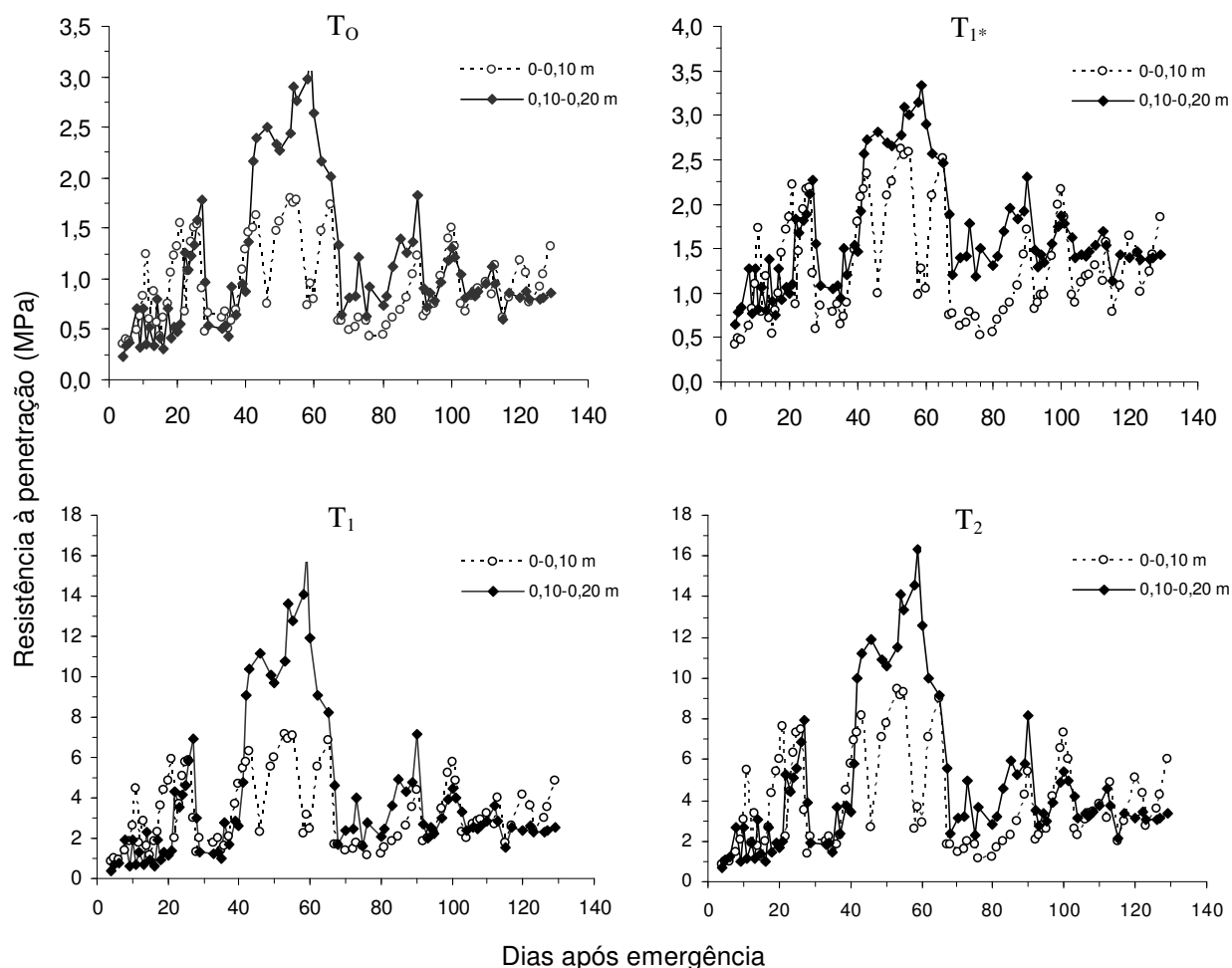


Figura 21. Variação da resistência mecânica à penetração do Latossolo Vermelho de textura argilosa em função do conteúdo de água do solo, em diferentes camadas e intensidades de compactação, durante o ciclo da cultura do milho.

variáveis relacionadas com o solo, clima e planta (TORMENA et al., 1998a); e por isso vários limites de resistência ao crescimento radicular serem mencionados na literatura, concordando com COELHO et al. (2000), os quais exemplificaram vários artigos demonstrando que o sistema radicular do algodão não cresceria em solos com resistência à penetração acima de 3 MPa. Entretanto, verificaram tal crescimento em condições de campo, justificando que a variabilidade espacial, da densidade do solo observada nas parcelas e também a temporal do conteúdo de água do solo e, conseqüentemente, da resistência à penetração, poderiam explicar a discrepância entre seus dados e os da literatura, sendo que a maioria deles foi conduzida em vasos.

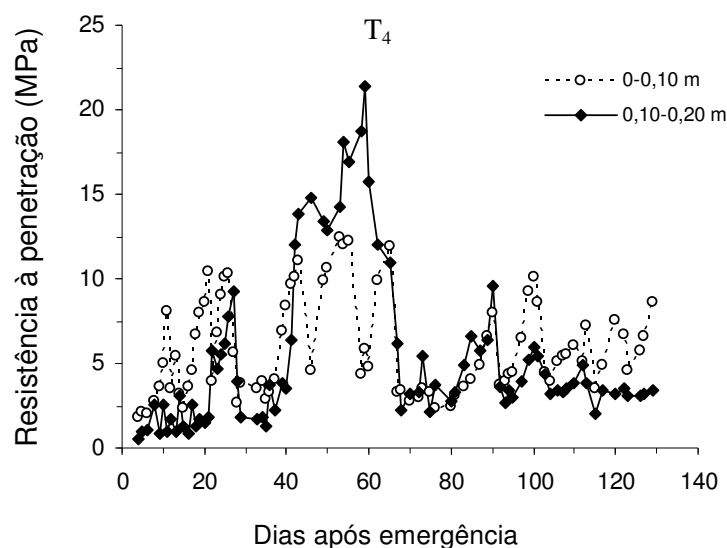


Figura 22. Variação da resistência mecânica à penetração do Latossolo Vermelho de textura argilosa em função do conteúdo de água do solo, em diferentes camadas do tratamento com quatro passadas do trator de 11 Mg, durante o ciclo da cultura do milho.

Assim, em solos compactados, a alteração na distribuição de raízes em profundidade, aumentando a concentração delas na camada superficial, é fator limitante para a obtenção de uma produtividade adequada de milho, principalmente em condições de menor quantidade de água no solo. Segundo TARDIEU (1988), a distribuição espacial das raízes tem efeito na absorção de água, uma vez que a absorção se viabiliza em um raio médio de 0,02 m.

Em relação ao desenvolvimento de raízes em solos compactados, a literatura relata principalmente a redução da profundidade e a redistribuição do sistema radicular, diminuindo o desenvolvimento e a produtividade das plantas (ROSOLEM et al., 2002; BEUTLER & CENTURION, 2004), e não propriamente o decréscimo da quantidade total de raízes. Assim, essas exploram a camada superficial e um menor volume de solo. Conseqüentemente, muitas vezes absorvem quantidades de água e nutrientes insuficientes para manter a demanda da parte aérea e para possibilitar a obtenção de elevada produtividade, concordando com MELLO IVO & MIELNICZUK (1999), que a absorção de nutrientes pode ser mais elevada em razão do maior volume de solo explorado pelo sistema radicular. MEDEIROS et al. (2005) aplicaram diferentes graus

de compactação a um Neossolo Flúvico, que foram: 0, 16, 32, 48, 64 e 80% da sua máxima compactação, e combinados com três manejos de água no solo (solo saturado, 75 a 80% da água disponível e 40 a 50% da água disponível). Observaram que houve redução da absorção de N, P e K pelas plantas de arroz com o aumento da compactação do solo. Entretanto, verificaram que o acúmulo dos teores de P e de K na parte aérea das plantas foi mais influenciado pela disponibilidade de água no solo do que pelas intensidades de compactação, devido a elevação do pH no solo saturado, que favoreceu a disponibilidade dos nutrientes, o incremento do fluxo difusivo do P e do K, aumentos da eficiência fotossintética, das taxas de respiração e transpiração da planta, além da redução da resistência à penetração das raízes, resultando na maior absorção desses e de outros nutrientes.

## CONCLUSÕES

As raízes apresentaram maior superfície, densidade e diâmetro radicular, assim como o aumento da massa seca, com a elevação da resistência mecânica à penetração do solo, restringindo também o crescimento radicular em profundidade.

O aumento da resistência mecânica do solo à penetração das raízes, assim como sua variabilidade temporal em função do conteúdo de água do solo, com um período de estresse hídrico entre o 42<sup>o</sup> ao 65<sup>o</sup> dia após emergência da cultura, reduziu a produtividade de milho em 27%.

Em relação ao sistema radicular, o diâmetro radicular foi o único parâmetro do sistema radicular da cultura do milho que refletiu as condições adversas impostas pela compactação do solo, resultando em menor produtividade da cultura.

Ainda que com o aumento da resistência mecânica à penetração das raízes tenha havido queda da produtividade de milho, houve um substancial crescimento radicular, sobretudo quando a macroporosidade atingiu o mínimo valor de  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , resultante das intensidades da compactação ( $T_0$ ,  $T_1^*$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_4$ ) para o solo estudado.

Portanto, tais intensidades não anularam o crescimento radicular do milho, havendo, por conseguinte, a produtividade mínima de aproximadamente 6 Mg ha<sup>-1</sup>.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3 p.539-549, 2001.

AL-ADAWI, S. S.; REEDER, R. C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 39, n.5, p.1641-1649, 1996.

ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.2, p.319-326, 1996.

ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C. Manejo de solos e agricultura irrigada. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (Ed.). **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2003. p.70-106.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J., (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141.

BASSOI, L. H.; FANTE JÚNIOR, L.; JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estrutura latossólica: II. Compactação entre cultura irrigada e fertirrigada. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.51, n.3, p.541-548, 1994.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability, a mechanistic approach**. New York: John Wiley e Sons, 1984. 398p.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth response. **Journal Soil Science**, Oxford, v. 41, n.3, p.341-358, 1990.

BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, n. 1, 137-148, 2003.

BENNIE, A. T. P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.). **Plant roots**. New York: M. Dekker, 1996. p.453-470.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n.1, p. 167-177, 2001.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.3, p.829-834, 2002.

BEUTLER, A. N. **Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agrônômicas de soja e arroz de sequeiro**. 2003. 126f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.2, p.181-192, 2004a.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.557-580, 2004b.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura das plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.142-149, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p.843-849, 2005.

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 properties. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 377-382.

BOONE, F. R.; WERF, H. M. G.; KROESBERGEN, B.; HAAG, B. A.; BOERS, A. The effect of compactation of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and growth. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.35, n.1, p.113-128, 1987.

BORGES, E. N.; NOVAIS, R. F.; FERNANDEZ, B.; BARROS, N. F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v.35, n.202, p. 553-568, 1988.

BRADFORD, J. M. The penetration resistance in a soil with well-defined structural units. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, p. 601-606, 1980.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 33, n.3, p. 519-524, 1990.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: USP, 1997. 132p.

CARDOSO, E. G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J. L.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GUIMARÃES, M .F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo nos sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.430-501, 2006.

CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P.; FERNANDES, A. L. T. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: Universidade de Uberaba, 2004. 44p.

CHAGAS, C. S.; CURI, N. DUARTE, M. N.; MOTTA, P. E. F.; LIMA, J. M. Orientação das camadas de rochas metapelíticas pobres na gênese de Latossolos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.5, p.539-548, 1997.

CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M. Physical attributes of kaolinitic and oxidic oxisols resulting from different usage systems. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v.47, n.5, p.725-732, 2004.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, n.3, p.323-327, 1983.

COELHO, M. B.; MATEOS, L.; VILLALOBOS, F. J. Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.57, n.3, p.129-142, 2000.

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. **Desafios para obtenção de altas produtividades**. Sete Lagoas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2004. 20p.

COUTO, L.; RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P. Importância do milho irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (Ed.). **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. p.17-30.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. **Milho**: Cultivares para 2005/2006. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/milho/cultivares/index.php>>. Acesso em: 25 de out. 2006.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**: Part 1 -Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 443-460.



DAVIES, W. J.; ZANGH, J. Root signals and the regulation of growth and development of plant's in drying soil. **Plant. Physiology**, Melbourne v.42, n.1, p.55-76, 1991.

DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.20, n.1, p.87-100, 1991.

DEXTER, A. R.; YOUNGS, I. M. Soil physics toward 2000. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.24, n.2, p.101-106, 1992.

DIAS JUNIOR, M. S. D. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. E. R. (Ed.). **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.55-94.

ETANA, A.; COMIA. R. A.; HAKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.44, n.1, p.13-21, 1997.

FNP Consultoria & Comércio. Milho. In: NAKAMAE, I. J. (Ed.). **Agrianual 2006**. São Paulo: Argos, 2006. p.396-397.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n.3, p.515-524, 1999a.

FERREIRA, M. M.; FERNADES, B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n.3, p.507-514, 1999b.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.48, n.1, p.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. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.8, p.947-953, 2003.

GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 1 -Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.493-541.

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.

GERARD, C. J.; MEHTH, H. C.; HINOJOSA, F. Root growth in a clay soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 114, n.1, p. 37-49, 1972.

GENUCHTEN, M.T.A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.5, p.892-897, 1980.

GHOHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J. P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração de raízes de arroz. **Bragantia**, Campinas, v.25, n.39, p. 419-431, 1996.

GRAVETTER, F. J.; WALLNAU, L. B. **Statistics for the behavioral sciences**. St. Paul: West Publishing, 1995. 429p.

HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.1-2, p.105-120, 1990.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B. A. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, 1998. p.167-179.

HARRIS, G. A.; CAMPBELL, G. S. Automated quantification of roots using a simple image analyzer. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.6, p.935-938, 1989.

HERRICK, J.E.; JONES, T.L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, n.4, p.1320-1324, 2002.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compactation 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. (Ed.). **Modeling plant and soil systems**. Madison: American Society of Agronomy, 1991. p.91-123.

KAY, B. D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v.12, n.1, p.1-51, 1990.

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 130f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1998.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.857-867, 2002.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 1 -Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.635-660.

LAL, R. Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments. **Advances in Agronomy**, v.42, n.1, p.85-97, 1989.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.53, n.2, p.87- 94, 2000.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M.C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances In Soil Sciences**, New York, v.1, n.1, p.277-293, 1985.

MAGALHÃES, P. C. Aspectos fisiológicos da cultura do milho irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (Ed.). **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2003. p.43-67.

MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n.3, p.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 and Soil**, Dordrecht, v144, n.2, p.297-303, 1992.

MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: efeitos sobre absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.29, n.5, p.940-947, 2005.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n.1, p.135-143, 1999.

MENGEL, D. B.; BARBER, S. A. Development and distribution of the corn root under field conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v.66, n.2, p.341-344, 1974.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n.2, p. 197-202, 1999.

MILLER, D. E. Effect of subsoiling and irrigation regime no dry bean production in the Pacific Northwest. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p.784-787, 1987.

MISRA, R. K.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Penetration of soil aggregates of finite size. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.94, n.1, p. 59-85, 1986.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos**: Ensaio de Laboratório. São Carlos: EESC-USP, 1998. 248p.

MORAES, M. H.; BENEZ, S. H.; LIBARDI, P. L. Influência de camadas compactadas de subsuperfície no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Científica**, São Paulo, v.19, n.2, p.195-206, 1991.

MORAES, M. H.; BENEZ, S. H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.16, n.2, p.31-41, 1996.

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. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.12, p.1587-1595, 1992.

PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. **Australian Journal of soil Research**, Collingwood, v. 29, n.6, p. 717-729, 1991.

PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; NACHTIGALL, G. R. Produtividade do arroz irrigado em sistemas de cultivo contínuo e em rotação com soja e milho. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 18., 1989. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1989. p.150-160.

PEDROTTI, A.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M.; CARVALHO, R. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.1, p.759-768, 2003.

PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Produção de milho em sistema irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. **A cultura do milho irrigado**. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2003. p.206-244.

PHEBE, C. J.; BEALE, O. W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.40, n.3, p.430-436, 1976.

PRIMAVESI, A. **Manejo Ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 1987. 549p.

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

RAIJ, B.; 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.

RAIJ, B.; 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.

RESENDE, M. Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.11, n.1, p.3-18, 1985.

RIBEIRO, M. A. V. **Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade**. 1999. 71f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n.2, p. 259-266, 1994a.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.3, p.491-497, 1994b.

ROSOLEM, C. A. **Relações solo-planta na cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 1995. 53p.

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

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.65, n.1, p.109-115, 2002.

SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). **SAS user's guide**. Cary, 1999. 595p.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p.797-804, 2004.

SÉGUY, L.; BOUZINAC, S.; MARONEZZI, A. C.; TAFFAREL, V.; TAFFAREL, J. **Plantio direto do arroz de sequeiro de alta tecnologia na zona tropical úmida do centro-norte do Mato Grosso**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. 29p.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.44, n.1-2, p.81-93, 1997.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.877-883, 1997.

SILVA, A. P. **Qualidade física do solo e o desenvolvimento de plantas de milho.** 1998. 80f. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p.191-199, 2000.

SILVA JÚNIOR, R. L. **Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade.** 2001. 117f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2001.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.2, p.253-260, 2001.

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

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Ed.). **Qualidade física do solo: Métodos de estudo – Sistemas de preparo e manejo do solo.** Jaboticabal: Funep, 2002. p.1-18.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas a irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.31-40, 2006.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, n.1-2, p. 93-111, 1997.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production.** Amsterdam: Elsevier, 1994. 660p.



STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro – 1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, 2002.

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. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.755-760, 2004.

SUN, C. N. Growth and development of primary tissues in aerated and non-aerated roots of soybean. **Bulletin of the Torrey Botanical Club**, New York, v.82, n.6, p.491-502, 1955.

TARDIEU, F. Analysis of the spatial variability in maize root density. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.109, n.2, p.257-262, 1988.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, n.2-4, p. 217-243, 1994.

TAVARES FILHO, J.; EIRA, G. C.; LUDWIG FARINHA, L.R. Avaliação da compactação em um solo cultivado no sistema convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v19, n.2, p. 219-225, 1999.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.725-730, 2001.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v19, n.2-3, p.111-119, 1991.

THOMASSON, A. J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.29, n.1, p.38-46, 1978.

TORMENA, C. A. **Caracterização e avaliação do Intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Roxo**. 1998. 106f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.22, n.4, p.573-581, 1998a.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, n.2, p.301-309, 1998b.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.52, n.3-4, p.223-232, 1999.

VARSA, E. C.; CHONG, S. K.; ABOLAJI, J. O.; FARQUHAR, D. A.; OLSEN, F. J. Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, n.3-4, p.219-228, 1997.

VEEN, B. W.; BOONE, F. R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.1-2, p.219-226, 1990.

VOORHEES, W. B.; LINDSTROM, M. J. Soil compaction constraints on conservation tillage in the northern corn belt. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.38, n.3, p.307-311, 1983.