



Acta Scientiarum. Agronomy

ISSN: 1679-9275

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá

Brasil

Beutler, Amauri Nelson; Centurion, José Frederico; Mengatto, Leonardo Henrique; Mengatto, Leandro Henrique; Barbosa Alves, Jader; Cardoso Wagner, Gustavo Prestes

Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo

Acta Scientiarum. Agronomy, vol. 31, núm. 2, abril-junio, 2009, pp. 359-364

Universidade Estadual de Maringá

Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303026587025>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe , Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo

Amauri Nelson Beutler^{1*}, José Frederico Centurion², Leonardo Henrique Mengatto³, Leandro Henrique Mengatto³, Jader Barbosa Alves³ e Gustavo Prestes Cardoso Wagner³

¹Universidade Federal do Pampa, Rua Luiz Joaquim de Sá Brito, s/n, 97650-000, Itaqui, Rio Grande do Sul, Brasil.

²Departamento de Solos e Adubos, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, São Paulo, Brasil. ³Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, Garça, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência: E-mail: amaurib@yahoo.com.br

RESUMO. Este estudo teve o objetivo de avaliar o impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com seis tratamentos e oito repetições representadas por parcelas de 14 m². Os tratamentos foram: T₀) sem tráfego; T₁) uma passada de trator de 3,0 t, uma ao lado da outra; T₁) uma passada; T₂) duas passadas; T₄) quatro passadas; T₈) oito passadas de um trator de 8,0 t. Utilizou-se o milho (*Zea mays* L.) híbrido master, que foi avaliado quanto à produtividade de grãos. No solo, foram avaliados a porosidade, a densidade do solo, a resistência à penetração, o intervalo hídrico ótimo e a densidade do solo relativa. O tráfego de máquinas compactou o solo até 0,25 m de profundidade e reduziu a produtividade de milho em até 22%. O intervalo hídrico ótimo diminuiu com o aumento do tráfego de máquinas indicando decréscimo da qualidade física do solo para o milho. A densidade do solo relativa limitante à produtividade de milho é de 0,89.

Palavras-chave: intervalo hídrico ótimo, densidade do solo relativa, *Zea mays*.

ABSTRACT. Impact of machine traffic on soil physical quality and corn yield in a Kandiustalf. Machinery traffic on soil generates compaction, modifying its physical quality and often resulting in yield decrease. This study evaluates the effect of machine traffic on soil physical quality and corn yield in a Kandiustalf. The experiment was a completely randomized design with 6 treatments and 8 replications, with 14 m² plots. The treatments were: T₀) without traffic; T₁) one pass of 3.0 t tractor, side by side; T₁) one pass; T₂) two passes; T₄) four passes; T₈) eight passes of a 8.0 t tractor. Master hybrid corn (*Zea mays* L.) was used, and its yield was evaluated. Porosity, soil bulk density, resistance to penetration, least limiting water range and relative soil bulk density were evaluated. Machine traffic compacted the soil up to 0.25 m deep and reduced corn yield up to 22%. The least limiting water range is an adequate indicator of soil physical quality for corn development. The relative soil density limiting to corn yield is 0.89.

Key words: least limiting water range, relative soil bulk density, *Zea mays*.

Introdução

Os Argissolos ocupam, depois dos Latossolos, a maior extensão de área do território brasileiro (OLIVEIRA, 2005). No entanto, os Argissolos são frequentemente utilizados para fins agrícolas e também se tornam compactados, o que culmina em decréscimo de produtividade (COLLARES et al., 2006), sendo o monitoramento da qualidade física do solo necessário para identificar o melhor manejo e manter a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

A qualidade do solo é definida como "a capacidade do solo para permitir o pleno desenvolvimento das plantas", entre outros. Esta, geralmente, é inferida ou estimada a partir de

atributos indicadores físicos, químicos ou biológicos do solo. Porém, poucos avanços têm sido obtidos no sentido de estabelecer relações de atributos físicos indicadores, como a agregação, densidade do solo, porosidade, resistência à penetração e infiltração de água, entre outros, com o desenvolvimento das plantas, apesar de inúmeros esforços. Isto porque os atributos físicos do solo atuam como um sistema dinâmico e complexo, interagindo entre si, e não atuam isoladamente no crescimento das plantas (REICHERT et al., 2003).

A resistência mecânica à penetração das raízes, a aeração, o conteúdo de água e a temperatura são os atributos físicos que atuam diretamente no

crescimento das plantas. Baseado neste fato foi desenvolvido o intervalo hídrico ótimo (IHO), que define o conteúdo de água não-limitante às plantas em função de valores limitantes ao crescimento das plantas de porosidade de aeração (PA), de resistência à penetração (RP), de conteúdo de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) (SILVA et al., 1994). O IHO tem como limite superior o menor valor entre o conteúdo de água na PA de 10% (ENGELAAR et al., 2000) e o conteúdo de água retida na CC, tensão de 0,01 MPa; e o limite inferior é o maior valor entre o conteúdo de água retida no PMP, na tensão de 1,50 MPa e, o conteúdo de água quando a RP atinge valores críticos ao crescimento radicular de 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966).

O IHO tem sido proposto e utilizado como indicador de qualidade física do solo. No entanto, os indicadores de qualidade do solo devem satisfazer alguns critérios, entre eles, ser sensível às variações no manejo e ser acessível e aplicável no campo. Neste quesito, o IHO tem sido interpretado de três formas: a) o decréscimo do IHO indica redução da qualidade física do solo, porém sem realizar avaliação do desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999; LEÃO et al., 2006); b) estabelecimento de relações do número de dias que o conteúdo de água permanece fora do IHO com o desenvolvimento das plantas (BENJAMIN et al., 2003; LAPEN et al., 2004); c) estabelecimento de relações da densidade do solo crítica, quando o IHO = 0, com a densidade do solo limitante à produtividade das plantas no campo (REICHERT et al., 2003; BEUTLER et al., 2005a; 2006a; COLLARES et al., 2006). Esta última forma de utilização do IHO tem sido proposta, visto que estudos indicam pouca correlação do $IHO > 0$ com a produtividade de milho e trigo (BENJAMIN et al., 2003).

Além do IHO, a densidade do solo relativa ou grau de compactação (Dsr) também tem sido utilizada para estabelecer relações com o desenvolvimento das plantas. A Dsr consiste no estabelecimento da relação entre Ds atual no campo e uma Ds referência (Ds máxima) (CARTER, 1990) e visa estabelecer valor limitante de compactação à produtividade das culturas que seja similar para

todos solos.

Este estudo teve o objetivo de avaliar o impacto do tráfego de máquinas sobre a qualidade física do solo e a produtividade de milho em Argissolo.

Material e métodos

O experimento foi realizado em Garça, Estado de São Paulo, em Argissolo Vermelho-Amarelo arenoso, cuja composição granulométrica foi determinada por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (Tabela 1).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com seis tratamentos e oito repetições constituídas por parcelas de 14 m^2 (4,0 linhas de 3,5 m). Em novembro de 2005, o solo foi arado até 0,30 m de profundidade e foram aplicados os seguintes níveis de tráfego: T_0 sem tráfego de máquinas; T_{1*} uma passada de trator de 3,0 t, uma ao lado da outra, quatro dias após a chuva; T_1 uma passada; T_2 duas passadas; T_4 quatro passadas; T_8 oito passadas de um trator de 8,0 t, no mesmo local, com dois eixos e quatro pneus de mesma largura e pressão interna, perfazendo toda a superfície do solo, no sentido do declive da área, um dia após uma chuva que saturou o solo com água.

No dia 21 de novembro, o milho (*Zea mays* L. híbrido master) foi semeado, em profundidade de 0,06 m e espaçamento de 1,0 m entre linhas, no sentido transversal ao declive da área. Após dez dias, realizou-se o desbaste deixando cinco plantas por metro. A adubação na semeadura foi de 450 kg ha^{-1} na fórmula 4-14-8 ($\text{N-P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$); aos 15 dias após a semeadura, de 100 kg ha^{-1} na fórmula 20-0-20; aos 25 dias, de 200 kg ha^{-1} na fórmula 45-0-0, em cobertura. Na colheita foi avaliada a produtividade de milho em área de 5 m^2 por parcela.

Em abril de 2006, foram coletados três grupos de seis amostras indeformadas, por tratamento, com cilindros de 0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro ($53,16 \times 10^{-6} \text{ m}^3$), nas camadas de 0,08 - 0,11 e 0,22 - 0,25 m. Em seguida, uma amostra de cada grupo e camada foi saturada durante 24h e submetida a uma das tensões de 0,006; 0,010; 0,033; 0,060; 0,100; e 0,300 MPa em câmaras de pressão de Richards.

Tabela 1. Caracterização granulométrica do Argissolo.

Camada (m)	Argila	Silte	Areia	Classes de tamanho da areia (mm)				
				0,05- 0,105	0,105-0,25	0,250-0,50	0,50-1,00	1,00-2,00
0,0-0,70	70	70	860	330	370	140	20	0
0,70-0,90	280	90	630	-	-	-	-	-

- Não determinado.

Ao atingir o equilíbrio, foram pesadas e foi determinada a resistência do solo à penetração (RP), com duas subdeterminações, na camada intermediária do cilindro, com um penetrômetro eletrônico, com semi-ângulo de cone de 30°, velocidade constante de penetração de 0,01 m min.⁻¹ e cone com área da base de 4,79 x 10⁻⁶ m², acoplado a um microcomputador.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa para determinação do conteúdo de água em cada tensão e da densidade do solo (Ds). A microporosidade corresponde ao conteúdo de água retida na tensão de 0,006 MPa (poros < 50 µm), e a macroporosidade (poros > 50 µm) foi calculada pela diferença entre a porosidade total determinada e a microporosidade.

Para a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), a curva de retenção de água no solo foi ajustada segundo o modelo de van Genuchten e foi estimado o conteúdo de água na tensão de 1,5 MPa (ponto de murcha permanente). A curva do conteúdo de água retida na capacidade de campo (0,01 MPa) foi ajustada segundo o modelo não-linear empregado por Silva et al. (1994), e a curva de RP foi ajustada utilizando o modelo não-linear, na forma log-transformada:

$$\ln\theta = a + bDs + c\ln\Psi \quad (1)$$

$$\ln RP = lnd + e\ln\theta + f\ln Ds \quad (2)$$

em que:

θ é o conteúdo volumétrico de água (m³ m⁻³);

Ds é a densidade do solo (t m⁻³);

Ψ é a tensão de água no solo (centímetros de coluna de água);

RP é a resistência do solo à penetração (MPa);

a, b, c, d, e e f são os parâmetros dos ajustes dos modelos.

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

$$\theta_{PA} = \left[\left(1 - \frac{Ds}{Dp} \right) - 0,10 \right] \quad (3)$$

em que:

Dp é a densidade de partículas (2,65 t m⁻³);

Tabela 2. Atributos físicos do Argissolo em diferentes camadas e níveis de tráfego.

Atributo físico	Camada (m)	Níveis de tráfego				
		T ₀	T _{1*}	T ₁	T ₂	T ₄
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,08-0,11	0,13 aA	0,12 aA	0,09 aA	0,08 bA	0,06 bA
	0,22-0,25	0,14 aA	0,15 aA	0,10 aA	0,07 bA	0,07 bA
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,08-0,11	0,28 aA	0,27 aA	0,29 aA	0,27 aA	0,28 aA
	0,22-0,25	0,23 aA	0,23 aA	0,24 aA	0,28 aA	0,26 aA
Densidade do solo (t m ⁻³)	0,08-0,11	1,55 cA	1,61 bcA	1,63 abcA	1,66 abA	1,74 aA
	0,22-0,25	1,58 cA	1,62 bcA	1,65 abcA	1,70 abA	1,69 aA
Resistência à penetração (MPa)	0,08-0,11	0,56 bA	0,56 bA	0,91 abA	1,07 abA	1,44 abA
	0,22-0,25	0,62 bA	0,68 bA	0,91 abA	1,30 abA	1,23 abA

T₀= sem tráfego de máquinas; T_{1*}= uma passada de trator de 3,0 t, uma ao lado da outra, quatro dias após a chuva; T₁= uma passada, T₂=duas passadas, T₄=quatro passadas e T₈=oito passadas de um trator de 8,0 t, no mesmo local, com dois eixos e quatro pneus de mesma largura e pressão interna, um dia após uma chuva que saturou o solo com água. Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na linha e maiúsculas nas colunas, para o mesmo atributo, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

θ_{PA} , θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{RP} foram plotadas em função da Ds, formando, entre o limite superior e inferior, o IHO representativo das amostras coletadas nas duas camadas.

Determinou-se, ainda, a densidade máxima do solo (Ds referência) pelo teste de Proctor normal com reuso de material, com as modificações, em que a altura de queda do embolo passou para 0,305 m e o número de golpes para 26 (PINTO, 2002). A partir da Ds máxima, determinou-se a densidade do solo relativa (Dsr), que consiste na divisão da Ds atual pela Ds máxima (CARTER, 1990).

Os resultados de produtividade de milho foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando o teste F ($p < 0,05$) e foi estabelecida a regressão polinomial entre a Ds e Dsr com a produtividade.

Resultados e discussão

O tráfego de máquinas compactou o solo na camada de 0-0,25 m, verificado pela redução da macroporosidade e aumento da densidade do solo e da resistência à penetração do T₀-T₈, nas camadas de 0,08-0,11 e 0,22-0,25 m (Tabela 2), corroborando Collares et al. (2006). Em Latossolo Vermelho de textura média, com intensidade de tráfego similar, Beutler et al. (2006b) verificaram que a compactação atingiu apenas a profundidade de 0,18 m. Isto se deve à maior quantidade de argila no Latossolo, a qual é a principal responsável pelas forças de coesão entre as partículas e, dessa forma, aumenta o suporte de pressão pela matriz do solo, evitando sua dissipação em maiores profundidades, comparado ao Argissolo.

A compactação do solo pelo tráfego de máquinas reduziu em até 22% a produtividade de milho (T₈) (Figura 1), corroborando os estudos de Santos e Dias Junior (2005), que verificaram menor produção de massa seca de milho com o aumento da compactação em Neossolo Quartzarênico, e Collares et al. (2006), que obtiveram decréscimo da produtividade de feijão em Argissolo arênico. Tal fato possivelmente ocorra por fatores relacionados ao crescimento radicular e absorção de água e nutrientes.

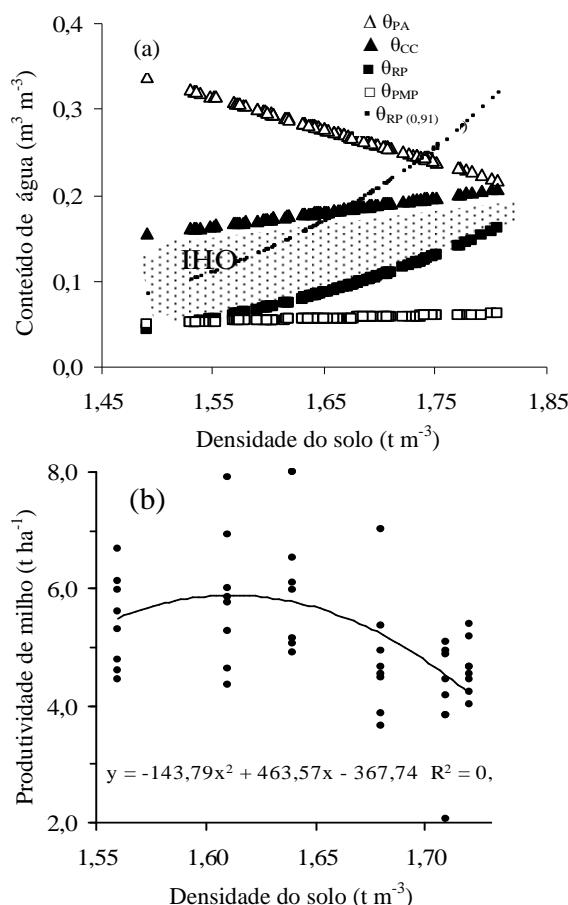


Figura 1. Intervalo hídrico ótimo (a) e produtividade de milho em função da densidade do solo (b). *Teste F significativo a 5%.

Shierlaw e Alston (1984) verificaram decréscimo no crescimento radicular de milho em camada de solo compactada, reduzindo o comprimento das raízes e a área superficial de absorção, tornando-as menos hábeis em absorver nutrientes, como o P, que se move no solo por difusão e a pequenas distâncias e tem a sua absorção mais prejudicada pela compactação.

O IHO, que define o conteúdo de água não-limitante às plantas em função dos limites críticos de aeração, água e resistência à penetração, diminuiu em 61% na condição de tráfego excessivo do solo (T_s), comparado à condição sem tráfego (T_0), porém não foi atingida a Dsc (IHO = 0) (Figura 1). Tal fato indica degradação e perda de qualidade física do solo para o desenvolvimento das plantas, corroborando Silva et al. (1994), Benjamin et al. (2003) e Leão et al. (2006). O decréscimo do IHO ocorreu apenas em função da RP crítica ao crescimento radicular (θ_{RP}), e não foi observada deficiência de aeração no IHO > 0, conforme também verificado por Beutler et al. (2006a), Collares et al. (2006) e Leão et al. (2006). Tal fato

acontece porque, em solos tropicais, o aumento da compactação do solo ocorre a expensas da redução da macroporosidade, aumentando a Ds e, consequentemente, a RP (LEÃO et al., 2006).

Estes resultados estão de acordo com a literatura que tem referenciado o IHO como indicador de qualidade física do solo e que considera que o decréscimo do IHO resulta em maior possibilidade de as plantas ficarem expostas a condições adversas ao crescimento e menor à qualidade do solo. Porém, a relação direta do IHO com a produtividade das plantas para que seja possível sua aplicação como indicador de qualidade tem sido pouco definido, ou seja, a partir de que valor de Ds, obtida no IHO, ocorre decréscimo de produtividade. Leão et al. (2006) verificaram que, no sistema de pastejo rotacionado, comparado ao cerrado nativo, ocorreu menor IHO, indicando menor qualidade do solo para o crescimento da pastagem. Benjamin et al. (2003) verificaram pouca correlação da produtividade de trigo e milho com o IHO, quando o IHO foi maior que $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Reichert et al. (2003) estabeleceram preliminarmente relações da Dsc (IHO = 0) com a produtividade das plantas, visto que o desenvolvimento das plantas é pouco prejudicado quando o IHO > 0. Tal fato porque, por exemplo, o valor crítico ao crescimento radicular de culturas anuais de RP de 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966), aceito universalmente, não é para o desenvolvimento da parte aérea, conforme verificado no trabalho de Silva et al. (2004), em que o milho teve seu desenvolvimento muito reduzido na RP de 1,0 MPa. Ainda, Mahl et al. (2008) não verificaram redução da produtividade de milho em valores de RP próximos a 3,0 MPa, no campo.

Neste estudo, o IHO variou de $0,11$ a $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $T_0 - T_s$, e a produtividade de milho começou a decrescer a partir da redução de 10% do IHO. Por outro lado, se for inserido o valor de RP de 0,91 MPa (T_1), a partir do qual a produtividade de milho decresceu no campo, a Dsc (IHO = 0) é de $1,66 \text{ t m}^{-3}$, equivalente ao valor de Ds a partir do qual a produtividade de milho decresceu no campo (Tabela 2, Figura 1). Este fato demonstra, conforme observado nos estudos de Beutler et al. (2005^a; 2006a) e Collares et al. (2006), que a utilização da Dsc como indicativo de que ocorre decréscimo de produtividade em valores de Ds superiores está relacionada ao valor RP a partir do qual ocorre decréscimo de produtividade. Esses resultados, ainda, permitem concluir que a utilização da Dsc obtida no IHO, quando foi adotado o valor crítico de RP 2,0 MPa, foi superior e não correspondeu ao valor de Ds a partir do qual a produtividade

decreceu, conforme sugerido preliminarmente por Reichert et al. (2003).

Além do IHO, a densidade do solo relativa ou grau de compactação (Dsr) também tem sido sugerido como atributo relacionado ao crescimento das plantas, cujos valores variam pouco entre os tipos de solos de clima temperado (CARTER, 1990). Em clima tropical, estudos permitem verificar que o valor de densidade do solo relativa a partir do qual a produtividade de plantas decresce varia entre solos (BEUTLER et al., 2005b). Neste estudo, a produtividade de milho começou a decrescer a partir da Dsr de 0,89 (Figura 2), valor superior ao ideal encontrado em clima temperado de 0,80 a 0,86 (Lindstron e Voorhees, 1994) e de 0,81 para cereais, em solo arenoso (CARTER, 1990).

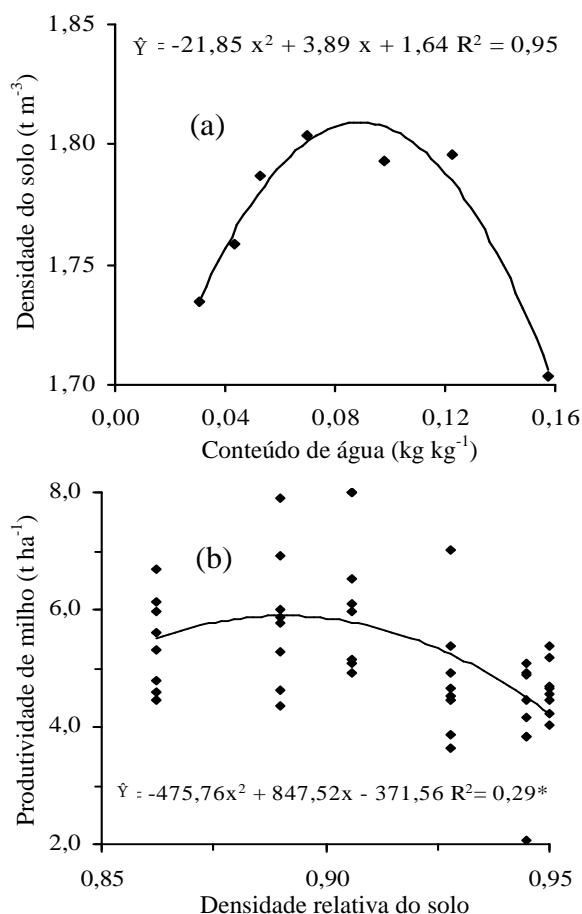


Figura 2. Densidade do solo máxima em função da umidade (teste de Proctor) (a) e produtividade de milho em função da densidade do solo relativa (b). Teste F significativo em 5% de probabilidade de erro.

Em solo tropical, Beutler et al. (2005b) verificaram que a produtividade de soja decresceu a partir da Dsr de 0,80, em Latossolo de textura média. O maior valor de Dsr limitante à produtividade de

milho, no Argissolo, possivelmente esteja relacionado à maior quantidade de macroporos que permite melhor aeração desse solo e à baixa RP, comparado ao Latossolo. Assim, verifica-se que, em solos tropicais, os valores de Dsr limitantes variam e valores superiores são observados em solos arenosos.

Conclusão

O tráfego de máquinas compactou o solo até 0,25 m e reduziu a produtividade de grãos de milho em até 22%. O intervalo hídrico ótimo diminuiu com o aumento do tráfego de máquinas indicando decréscimo da qualidade física do solo para o milho. A densidade do solo relativa limitante ao crescimento de milho foi de 0,89, em Argissolo de textura arenosa.

Referências

- BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, v. 116, n. 1-2, p. 137-148, 2003.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 48, n. 6, p. 863-871, 2005a.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima para a produtividade de soja em Latossolos Vermelhos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 6, p. 843-49, 2005b.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; BARBOSA, J. C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 3, p. 639-645, 2006a.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; SILVA, A. P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 3, p. 787-794, 2006b.
- CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 70, n. 3, p. 425-33, 1990.
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006.
- ENGELAAR, W. M. H. G.; MATSUMARU, T.; YONEYAMA, T. Combined effects of soil waterlogging and compaction on rice (*Oryza sativa* L.) growth, soil aeration, soil N transformations and 15N discrimination. *Biology and Fertility of Soils*, v. 32, n. 6, p. 484-493, 2000.
- LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil and Tillage Research*, v. 78, n. 2, p. 151-170, 2004.

- LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, v. 88, n. 1-2, p. 279-285, 2006.
- MAHL, D.; SILVA, R. B.; GAMERO, P. R. A.; SILVA, P. R. A. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto e escarificado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 5, p. 741-747, 2008.
- OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 2. ed. Piracicaba: Fealq, 2005.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica de solos**. São Paulo: Oficina de textos, 2002.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.
- SANTOS, F. A.; DIAS JUNIOR, M. S. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando o crescimento de plantas de milho (*Zea mays L.*) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 4, p. 740-752, 2005.
- SHIERLAW, J.; ALSTON, A. M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and Soil**, v. 77, n. 1, p. 15-26, 1984.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 2, p. 1775-1781, 1994.
- SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; KAY, B. D. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 4, p. 451-456, 2004.
- TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. R. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, v. 52, n. 3-4, p. 223-232, 1999.

Received on September 6, 2007.

Accepted on April 28, 2008.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.