

# QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO SUBMETIDO À DESCOMPACTAÇÃO MECÂNICA E BIOLÓGICA<sup>(1)</sup>

Sérgio Damaso da Silveira Junior<sup>(2)</sup>, Alvaro Pires da Silva<sup>(3)</sup>, Getulio Coutinho Figueiredo<sup>(4)</sup>, Cássio Antonio Tormena<sup>(5)</sup> & Neyde Fabíola Balarezo Giarola<sup>(6)</sup>

## RESUMO

A escarificação e o uso de plantas de cobertura de inverno têm sido adotados para promover a melhoria dos atributos físicos do solo relacionados à aeração. O objetivo deste trabalho foi verificar o efeito das plantas de cobertura de inverno e escarificação nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa, após 16 anos em sistema plantio direto. Os tratamentos foram realizados em maio de 2009 e consistiram de: plantio direto (PD), plantio direto com escarificação mecânica a 0,25 m (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica por meio da cultura do nabo forrageiro (PD-B). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com quatro repetições, totalizando 12 unidades experimentais. Dezoito meses após a aplicação dos tratamentos, foram coletadas amostras indeformadas de solo em cada unidade experimental, em cinco camadas: 0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,4; e 0,4-0,5 m. Foram avaliados os atributos físicos do solo: porosidade, densidade do solo ( $D_s$ ), permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) e índices de continuidade de poros. A  $K_a$  foi medida por meio de um permeâmetro de carga constante de ar em nove potenciais mátricos ( $\psi_m$ ): -0,5; -1; -2; -3; -5; -7; -10; -50; e -100 kPa. Os resultados indicam que os atributos físicos do solo avaliados não foram alterados pelo uso de plantas de cobertura e escarificação. Por outro lado, houve diferenças entre camadas de solo, principalmente entre 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m. Na

<sup>(1)</sup> Trabalho de mestrado apresentado pelo primeiro autor no Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas - ESALQ/USP. Recebido para publicação em 16 de fevereiro de 2012 e aprovado em 03 de outubro de 2012.

<sup>(2)</sup> Engenheiro Agrônomo. Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP. Caixa Postal 9, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: sergio.agro@outlook.com

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. Bolsista do CNPq. E-mail: apisilva@usp.br

<sup>(4)</sup> Pós-doutor pelo Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. E-mail: figueiredo.gc@gmail.com

<sup>(5)</sup> Professor do Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá - UEM. Av. Colombo, 5790. CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

<sup>(6)</sup> Professor do Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG. Av. Gal. Carlos Cavalcanti, 4748. CEP 84030-900 Ponta Grossa (PR). E-mail: neydef@uepg.br

camada de 0,1-0,2 m, a  $D_s$  foi maior e a porosidade total e  $K_a$  ( $\psi_m = -5$  kPa) foram menores do que na camada de 0,0-0,1 m. No PD-E, verificou-se que a macroporosidade foi maior na camada de 0,0-0,1 m em comparação com os outros tratamentos. Os resultados sugerem que o solo estudado submetido aos tratamentos de descompactação, após 18 meses, retornou a valores semelhantes aos da testemunha.

**Termos de indexação:** aeração do solo, permeabilidade ao ar, continuidade de poros, qualidade do solo.

**SUMMARY: PHYSICAL QUALITY OF UNTILLED OXISOL SUBJECTED TO MECHANICAL AND BIOLOGICAL DECOMPACTION**

*Chiseling and winter cover crops have been adopted to improve the soil physical properties related to aeration. This study aimed to evaluate the effects of winter cover crops and chiseling on physical properties of a Typic Hapludox, clayey texture, after 16 years under no-tillage. The treatments were applied in May 2009, as follows: no-tillage (PD), no-tillage mechanically chiseled to a depth of 0.25 m (PD-E), and biologically aerated soil with no-tillage radish (PD-B). The experiment was arranged in a randomized block design, with four replicates, totaling 12 experimental units. Eighteen months after treatment application, undisturbed soil samples were collected from five layers of each experimental unit: 0.0-0.1; 0.1-0.2; 0.2-0.3; 0.3-0.4; and 0.4-0.5 m. The following soil physical properties were assessed: porosity, bulk density (Bd),  $K_a$  and pore continuity indices.  $K_a$  was measured using a constant head air permeameter at nine soil matric potentials ( $\psi_m$ : -0.5, -1, -2, -3, -5, -7, -10, -50, and -100 kPa). The results indicated that the soil physical properties measured were unaltered by cover plants and chiseling. In contrast, there were differences between soil layers, especially between 0.0-0.1 and 0.1-0.2 m. In the layer 0.1-0.2 m, Bd was higher, whereas total porosity and  $K_a$  ( $\psi_m = -5$  kPa) were lower than in 0.0-0.1 m. In the treatment PD-E, macroporosity was higher in the 0-0.1 m layer than in the other treatments. The results suggested that the studied soil returned to values similar to the control 18 months after the decompression treatments.*

*Index terms: soil aeration, air permeability, pore continuity, soil quality.*

## INTRODUÇÃO

O manejo do solo influi nos atributos físicos do solo, alterando a dinâmica do ar e da água. A ausência de revolvimento do solo no sistema de plantio direto (PD), associada à modernização da agricultura nas últimas décadas, visando à otimização de práticas agrícolas, tem levado ao uso intensivo de máquinas agrícolas de grande porte e, consequentemente, maior intensidade do uso das terras (Chamen et al., 2003), de forma que, eventualmente, as operações são executadas em condições de umidade inadequadas. Nesse sistema, é comum a ocorrência de compactação da superfície do solo, o que, dependendo do seu grau, poderá prejudicar as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera e, consequentemente, o desenvolvimento das plantas. A renovação do ar do solo e o aumento da concentração de oxigênio são necessários para que o processo de respiração radicular e o metabolismo microbiano aeróbico sejam mantidos em níveis adequados (Scanlon et al., 2002).

Para que o processo de aeração ocorra de forma eficiente, é necessário que existam poros ocupados por ar, conectados entre si e com a superfície do solo (Hillel, 1980; Scanlon et al., 2002). Dessa forma, a aeração do

solo mostra-se dependente da quantidade, tamanho e continuidade dos poros e do conteúdo volumétrico de água, ou seja, dependente do manejo do solo. Quando este é praticado de forma inadequada, promove a compactação, que ocasiona alterações físicas no solo, como a redução da continuidade de poros, devido à obstrução e fragmentação destes, comprometendo a funcionalidade do sistema poroso do solo (Landefeld et al., 2004). Um dos principais efeitos da compactação é a redução do volume de macroporos (Stone et al., 2002), que consequentemente restringe o crescimento das plantas, a qual ocorre quando a taxa de difusão de gases no solo é drasticamente reduzida, porosidade de aeração ( $\epsilon_a$ ) < 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (Grable & Siemer, 1968; Drewry et al., 2008). Vários autores evidenciaram a importância da aeração como fator limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, crescimento e produção das culturas em solos compactados (Letey et al., 1962, 1985; Gerik et al., 1987; Carter et al., 1994).

Diante disso, verifica-se a importância do desenvolvimento e aperfeiçoamento de práticas que visem combater a degradação do solo e, que ao mesmo tempo, busquem a manutenção dos benefícios gerados pela adoção do PD. A escarificação pode ser descrita

como a ação de uma ferramenta estreita que rompe camadas adensadas e compactadas, com o objetivo de diminuir sua resistência à penetração de raízes e aumentar a aeração e a drenagem interna do solo, de modo a diminuir o escoamento superficial e o tempo de encharcamento (Taylor & Beltrame, 1980). Além da escarificação mecânica, a descompactação biológica inclui o cultivo de plantas que tenham sistema radicular pivotante, capaz de crescer em camadas de solo compactado (Abreu et al., 2004; Magalhães et al., 2009), como o nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), de formar bioporos estáveis e melhorar os atributos físicos do solo (Cubilla et al., 2002). Contudo, dependendo do manejo realizado após a escarificação, como a escolha das culturas no esquema de rotação e o tráfego, seus efeitos sobre as propriedades físicas do solo podem ter duração de seis meses a três anos (Franchini & Debiasi, 2009).

Os impactos na qualidade física do solo, em consequência do seu manejo, podem ser quantificados utilizando-se diferentes atributos físicos relacionados com a estabilidade estrutural do solo, como porosidade total, tamanho e continuidade de poros (Beutler et al., 2001). Por sua vez, a permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) representa a resistência imposta pelo solo à passagem do ar e é influenciada pela quantidade, forma, tamanho e continuidade do sistema de poros (Roseberg & McCoy, 1990). Portanto, a  $K_a$  pode ser usada na avaliação das alterações na estrutura do solo causadas pelo seu manejo. A  $K_a$  e a  $\varepsilon_a$  têm sido relacionadas na tentativa de avaliar possíveis diferenças na geometria e continuidade dos poros resultantes das práticas de manejo adotadas (Blackwell et al., 1990). Ball (1981a,b) e Shtykov & Daishev (1986) encontraram correlação linear positiva, sendo satisfatória nas análises de regressão dos dados de  $K_a$  e de  $\varepsilon_a$ . Dessa forma, os índices de continuidade de poros podem ser indicadores da movimentação tridimensional da água e do ar no solo, pois estimam a quantidade de poros que são efetivamente utilizados para esses fluxos.

No Brasil há carência de informação sobre  $K_a$ , particularmente por razões metodológicas, tanto associadas aos métodos de medida quanto à disponibilidade de equipamentos (Silva et al., 2009). Recentemente, o avanço da tecnologia dos componentes utilizados na construção de permeômetros permitiu que a  $K_a$  fosse mais amplamente difundida como ferramenta para avaliação da qualidade física do solo (Figueiredo, 2010).

Há mais de 16 anos a área estudada é cultivada no sistema plantio direto. No entanto, o uso do solo sob esse sistema muitas vezes está associado ao intenso tráfego de máquinas, as quais contribuem para o aumento da compactação (Collares et al., 2006). Assim, este trabalho teve como objetivo verificar os efeitos de práticas de descompactação mecânica e biológica, aos 18 meses após sua implantação, na qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa sob sistema plantio direto.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Estado do Paraná, localizada a 25° 05' 52" de latitude sul e 50° 02' 43" de longitude oeste, com altitude média de 1.080 m. A região apresenta clima mesotérmico, subtropical úmido do tipo Cfb, com precipitação pluvial média anual de 1.545 mm e temperatura média anual de 18,7 °C (IAPAR, 2000). Segundo Bhering et al. (2008), o solo da área em estudo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, pertencente à classe textural argilosa (Quadro 1). A textura foi determinada pelo método do densímetro (Gee & Bauder, 1986), e a densidade de partículas obtida com a utilização do equipamento ACCUPYC 1330, da Micromeritics Instrument Corporation®.

A área do estudo foi conduzida por mais de 16 anos em sistema de plantio direto, com a seguinte rotação de culturas: milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.), no período primavera/verão; e trigo (*Triticum aestivum* L.) e consórcio aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) + ervilhaca (*Vicia sativa* L.), no outono/inverno.

Na área sob plantio direto, a sementeira foi realizada com disco duplo a 0,03 m de profundidade para as culturas de inverno e com haste sulcadora a 0,04 m de profundidade (para deposição da semente) e a 0,10 m (para deposição do adubo) para as culturas de verão. Os tratamentos aplicados foram: plantio direto com escarificação mecânica (PD-E), plantio direto com descompactação biológica (PD-B) e testemunha (PD). O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições. As dimensões das parcelas foram de 9 x 50 m, totalizando 450 m<sup>2</sup>. A escarificação foi realizada em maio de 2009, utilizando um escarificador Jumbo Matic acoplado ao sistema de acionamento hidráulico do trator, ajustado à profundidade média de 0,25 m, dois dias antes da sementeira da cultura de inverno. No momento da escarificação a umidade média das parcelas era de 29,49 %, correspondendo a uma umidade abaixo da capacidade de campo. O escarificador dispõe de cinco hastes (três na barra dianteira e duas na traseira) de formato parabólico e ponteira em cinzel, com espaçamento entre hastes de 200 mm e ângulo de ataque de 22°. O nabo forrageiro

**Quadro 1. Distribuição do tamanho de partículas e densidade de partícula (Dp) de um Latossolo Vermelho distrófico, nas camadas avaliadas**

Camada	Argila	Silte	Areia	Dp
m	g kg <sup>-1</sup>			g cm <sup>-3</sup>
0,0-0,1	506,2	52,4	441,4	2,54
0,1-0,2	518,4	53,3	428,3	2,58
0,2-0,3	512,3	54,3	433,4	2,59
0,3-0,4	520,5	54,4	425,1	2,60
0,4-0,5	526,2	58,3	415,5	2,60

(*Raphanus sativus*) foi semeado no outono/inverno em substituição à aveia + ervilhaca, com intuito de verificar o efeito das raízes na descompactação do solo. Foi utilizada uma semeadora/adubadora ajustada para uma densidade de aproximadamente 22 sementes por metro linear e espaçamento de 0,17 m para a semeadura do nabo forrageiro. O trator 4x2 com TDA, utilizado para preparo do solo e semeadura, possuía motor com 75,7 kW de potência nominal.

A amostragem do solo foi realizada em outubro de 2010, 18 meses após a descompactação (mecânica e biológica) e no estágio final da cultura do trigo. A aplicação dos tratamentos não alterou o manejo da área experimental, e o tráfego de máquinas continuou ocorrendo em virtude das operações de semeadura, adubação, pulverização e colheita referentes a cada cultura da rotação. Foram selecionados, aleatoriamente, na entrelinha da cultura, 12 pontos de amostragem para cada tratamento. Em cada ponto de amostragem, foram retiradas cinco amostras, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,4; e 0,4-0,5 m. Ao todo, foram coletadas 180 amostras indeformadas, em anéis volumétricos de aço inox (0,05 m de diâmetro e altura), utilizando um dispositivo eletromecânico que elimina a aplicação de percussão durante a amostragem do solo (Figueiredo, 2010). Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em filmes de PVC e mantidas em temperatura de 5 °C até serem processadas.

Após a saturação por capilaridade em água, as amostras foram submetidas, em mesa de tensão e extratores de Richards, aos seguintes potenciais mátricos: -0,5; -1,0; -2,0; -3,0; -5,0; -7,0; -10,0; -50,0 e -100,0 kPa. Após o equilíbrio hidráulico, as amostras de solo foram pesadas e, imediatamente, foi estabelecido um fluxo de ar, para quantificar a  $K_a$ , utilizando o permeâmetro proposto por Figueiredo (2010). A partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) [L/T] pode ser descrita pela equação (1):

$$q = \frac{K_a}{\eta} \left( \frac{dP}{dz} + \rho g \right) \tag{1}$$

em que  $K_a$  [L<sup>2</sup>] é a permeabilidade ao ar; P, a pressão de ar [M/LT<sup>2</sup>]; z, a distância [L] na direção do movimento de ar no sistema poroso;  $\eta$ , a viscosidade do ar [M/LT];  $\rho$ , a densidade do ar [M/L<sup>3</sup>]; e g, a aceleração da gravidade [L/T<sup>2</sup>].

A densidade de fluxo corresponde à vazão de ar (Q) [L<sup>3</sup>/T] por área perpendicular ao movimento do fluido ( $A_s$ ) [L<sup>2</sup>]; considerando como desprezível a influência da densidade do ar (Springer et al., 1998), a equação 2 foi utilizada para as estimativas da  $K_a$ :

$$K_a = \frac{Q\eta}{A_s} \left( \frac{dz}{dP} \right) \tag{2}$$

As amostras foram colocadas em estufa a 105 °C durante período de 24 h, para obtenção de sua massa seca, utilizada no cálculo da densidade do solo (Blake & Hartge, 1986).

A microporosidade foi obtida a partir do volume de água retida nas amostras indeformadas de solo submetidas à tensão de -5 kPa. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

A porosidade total e a porosidade de aeração foram obtidas pelas equações 3 e 4, respectivamente:

$$PT = 1 - \frac{D_s}{D_p} \tag{3}$$

$$\epsilon_a = PT - \theta \tag{4}$$

em que PT é a porosidade total do solo [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>];  $D_p$ , a densidade de partícula do solo; e  $\epsilon_a$ , a porosidade de aeração do solo [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>], estimada considerando a densidade da água igual a 1,0 Mg m<sup>-3</sup>.  $\theta$  é o teor de água [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>] em cada um dos potenciais mátricos aplicados às amostras

A estimativa dos índices de continuidade de poros do solo foi avaliada pela relação entre as propriedades físicas  $K_a$  e  $\epsilon_a$ , sendo utilizada a equação de Kozeny-Carman, conforme Ball et al. (1988):

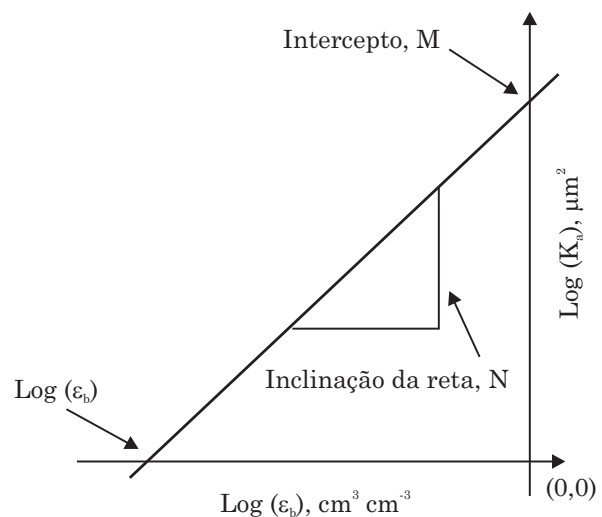
$$K_a = M(\epsilon_a)^N \tag{5}$$

sendo M e N os coeficientes de ajuste do modelo.

Os valores do parâmetro N, utilizado como índice de continuidade de poros (Ball et al., 1988; Roseberg & McCoy, 1990), foram estimados mediante a linearização da equação de Kozeny-Carman:

$$\log(K_a) = \log(M) + N \log(\epsilon_a) \tag{6}$$

A interseção da reta, obtida pela equação 6, com o eixo  $\log \epsilon_a$  (Figura 1,  $\log K_a = 0$ ) expressa a quantidade de poros de aeração bloqueados no solo ( $\epsilon_b$ ), os quais



**Figura 1. Principais características da relação log-log entre a permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) e a porosidade de aeração ( $\epsilon_a$ ); inclinação da reta, N; intercepto com o eixo  $\log(K_a)$ , M; e limite do conteúdo de ar,  $\epsilon_b$ .**

não contribuem para o transporte convectivo do ar (Ball et al., 1988; Schjønning et al., 2002). Desse modo,  $\varepsilon_b$  é o valor de  $\varepsilon_a$  abaixo do qual o fluxo de ar através do solo cessa, devido à descontinuidade da rede de poros de aeração, e pode ser obtido pela equação 7 (% v/v):

$$\varepsilon_b = 10^{-\log(M)/N} \times 100 \quad (7)$$

O índice de continuidade de poros  $K_l$ , proposto por Groenevelt et al. (1984), foi calculado com base na relação entre  $K_a$  e  $\varepsilon_a$ :

$$K_l = \frac{K_a}{\varepsilon_a} \quad (8)$$

O intervalo de confiança da média 95 % ( $p < 0,05$ ) foi adotado como critério estatístico para a comparação do efeito dos tratamentos nas médias da  $D_s$ ,  $K_a$  e dos índices de continuidade de poros. Diferenças significativas entre as médias ocorreram quando não houve sobreposição dos limites superior e inferior do intervalo de confiança (Payton et al., 2000).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No quadro 2 são apresentados os resultados da análise estatística descritiva para a densidade do solo

( $D_s$ ), com pequenas diferenças numéricas (máximo  $0,06 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Os maiores valores de  $D_s$  foram observados na profundidade de 0,1-0,2 m, em todos os tratamentos. Os valores de  $D_s$  medidos enquadram-se dentro da faixa comumente observada em solos agrícolas de textura argilosa (Brady & Weil, 2007), especialmente na região estudada (Cavaliere et al., 2009, Figueiredo et al. 2009).

Nos três sistemas de manejo estudados, a  $D_s$  apresentou incremento abrupto entre as camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m, e essa diferença permaneceu até a camada de 0,3-0,4 m (Figura 2). Isso foi menos intenso no plantio direto (PD), que apresentou valor médio de  $D_s$  ligeiramente superior ao dos demais tratamentos na camada mais superficial, embora a diferença não fosse significativa ( $p > 0,05$ ). Outros autores estudaram o efeito do sistema PD sob os atributos físicos do solo e evidenciaram esse aumento da  $D_s$ , devido à compactação causada pelo tráfego de máquinas e ao não revolvimento do solo (Fabrizzi et al., 2005; Cardoso et al., 2006).

De acordo com o trabalho de Suzuki et al. (2006), o valor restritivo de  $D_s$  ( $D_{sr}$ ) ao crescimento de raízes a partir do teor médio de argila ( $516 \text{ g kg}^{-1}$ , Quadro 1), em que  $D_{sr} = 1,79420 - 0,00074 \text{ argila}$ , foi igual a  $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$ . Observa-se que as parcelas experimentais

**Quadro 2. Análise descritiva da densidade do solo ( $D_s$ ) e parâmetros da regressão do modelo  $\log K_a = \log M + M \log \varepsilon_a$ , de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica (PD-B), nas camadas avaliadas**

Tratamento	Mínimo	Média	Máximo	DP	CV (%)	log(M)	N	R <sup>2</sup>	$\varepsilon_b$ (% v/v)
0,0-0,1 m									
PD-E	0,96	1,12	1,28	0,101	9,00	2,74	2,59	0,44	8,79
PD-B	0,99	1,11	1,24	0,085	7,64	2,43	2,06	0,64	6,61
PD	1,05	1,17	1,26	0,073	6,23	2,39	2,39	0,52	10,02
0,1-0,2 m									
PD-E	1,14	1,27	1,34	0,057	4,49	1,97	1,66	0,56	6,46
PD-B	1,21	1,27	1,36	0,047	3,68	1,81	1,48	0,56	5,99
PD	1,19	1,27	1,37	0,065	5,12	1,78	1,44	0,42	5,84
0,2-0,3 m									
PD-E	1,09	1,24	1,30	0,056	4,52	2,29	1,72	0,65	4,69
PD-B	1,16	1,28	1,36	0,056	4,38	2,11	1,51	0,53	3,97
PD	1,16	1,26	1,33	0,060	4,79	1,74	1,22	0,55	3,73
0,3-0,4 m									
PD-E	1,09	1,22	1,29	0,061	4,97	2,28	1,85	0,63	5,82
PD-B	1,16	1,24	1,33	0,053	4,29	1,90	1,54	0,64	5,79
PD	1,08	1,23	1,28	0,066	5,40	2,02	1,52	0,39	4,73
0,4-0,5 m									
PD-E	1,12	1,20	1,27	0,052	4,32	2,09	1,52	0,62	4,20
PD-B	1,12	1,20	1,29	0,047	3,89	2,12	1,71	0,66	5,77
PD	1,07	1,18	1,25	0,055	4,61	1,61	1,07	0,58	3,15

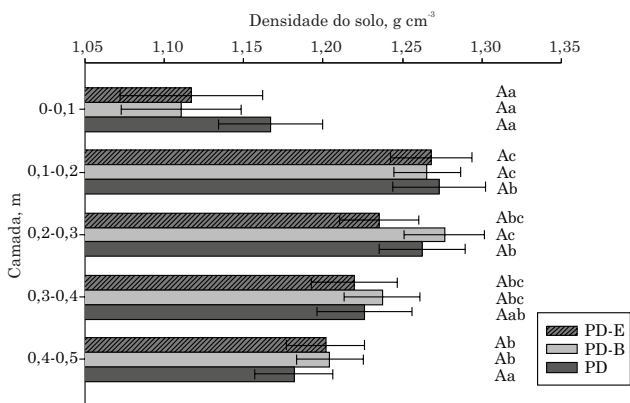
N=12 para análise descritiva; N=60 para parâmetros da regressão; DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; log(M): intercepto com o eixo log ( $K_a$ ); N: inclinação da reta; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação;  $\varepsilon_b \cdot 10^{-\log M/N} \times 100$ , prosidade bloqueada.

avaliadas não apresentaram grau de compactação inicial elevado, indicado pelos valores de  $D_s < D_{sr}$ .

Não houve diferença significativa entre os valores de  $D_s$  medidos numa mesma camada de solo (Figura 2). Também não foi verificada melhoria significativa na  $D_s$  na camada superficial do solo (0,0-0,1 m) após o uso do nabo forrageiro, devido ao grande diâmetro de sua raiz principal, como descrito por Kubota et al. (2005) para um solo de textura franco-argilosa (34 % de argila e 43 % de areia). Portanto, nem a escarificação mecânica ou a descompactação biológica mostraram-se alternativas eficientes para melhorar a qualidade física do solo quando o parâmetro avaliado foi a  $D_s$ . A semelhança do valor da  $D_s$  em solo escarificado (PD-E) em relação ao solo não mobilizado possivelmente está relacionada ao processo de reconsolidação do solo, ocorrido no período de 18 meses entre a implantação do tratamento e a determinação da  $D_s$ . Como a  $D_s$  no plantio direto (PD) não era elevada, a mobilização do solo por meio da escarificação não aumentou significativamente seu espaço poroso.

O volume total de poros ficou acima de  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  em todas as camadas nos três sistemas de manejo avaliados (Figura 3a), considerado ideal para um solo bem estruturado e com condições satisfatórias para o crescimento de plantas (Kiehl, 1979; Brady & Weil, 2007). A análise da porosidade total do solo (PT) pode ser feita a partir da figura 3a, na qual se observa que a camada mais superficial possui quantidade de poros significativamente maior ( $p < 0,05$ ) em relação às demais, assim como Dalmago et al. (2009), que encontraram PT cerca de 17 % mais alta em PD em comparação ao tratamento onde o solo foi mobilizado.

Embora o volume de macroporos seja



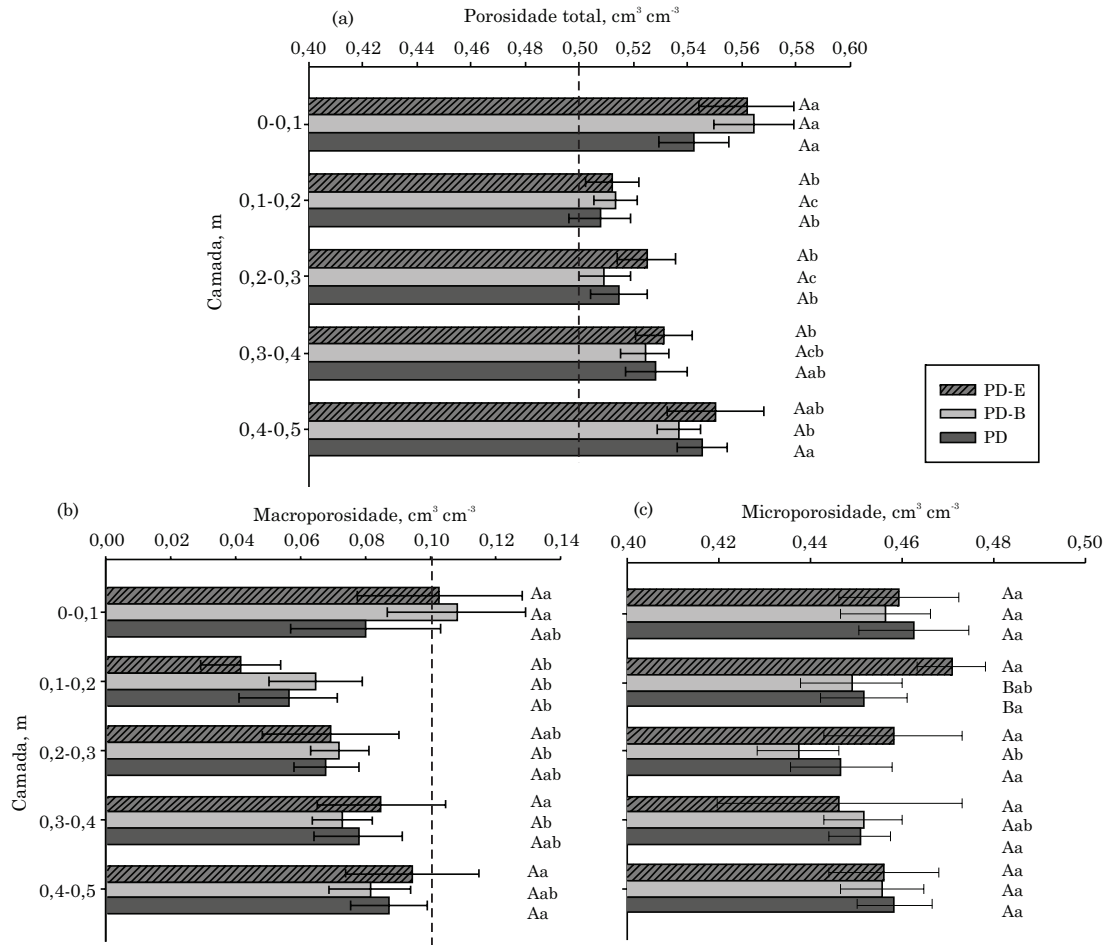
**Figura 2.** Valores médios de densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica (PD-B), nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3, 0,3-0,4 e 0,4-0,5 m. Letras maiúsculas referem-se aos tratamentos e, minúsculas, às camadas; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12.

numericamente maior na camada de 0,0-0,1 m, onde houve mobilização do solo através da escarificação e atuação de raízes do nabo forrageiro, essa diferença não foi significativa ( $p > 0,05$ ) (Figura 3b). Os valores da macroporosidade nas camadas 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,4; e 0,4-0,5 m foram inferiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , provavelmente em razão do intenso tráfego de máquinas associado à não mobilização do solo (Tormena et al., 1998).

Um solo fisicamente adequado ao crescimento de plantas deve apresentar, no mínimo, 10 % de macroporos, a fim de que se mantenham os níveis adequados de aeração do solo (Grable & Siemer, 1968; Baver et al. 1972; Carter, 1988; Drewry et al., 2008). As descompactações mecânica e biológica apresentaram diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) de macroporosidade entre as camadas de 0,0-0,1 e 0,1-0,2 m. Os maiores valores de macroporosidade na camada de 0,0-0,1 m demonstram a eficiência dessas práticas na mobilização do solo e consequente formação de poros destinados às trocas gasosas, infiltração da água e desenvolvimento radicular. A camada de 0,1-0,2 m foi a que apresentou maior redução na macroporosidade, associada à maior  $D_s$ , o que indica que a compactação do solo em semeadura direta normalmente se encontra na camada entre 0,08 e 0,15 m (Reichert et al., 2003; Genro Junior et al., 2004). Na camada de 0,1-0,2 m, para o PD-E, e na camada de 0,2-0,3 m, para o PD-B, os valores de macroporosidade elevaram-se gradualmente para mais próximos aos da camada superficial, o que pode ser reflexo da menor interferência da pressão exercida pelo tráfego de máquinas na estrutura do solo com o aumento de sua profundidade.

Com o aumento da  $D_s$  os macroporos sofrem maior redução e, conseqüentemente, aumento dos microporos, reduzindo a PT, porém em menor proporção que a macroporosidade (Araújo, 2004). Essa relação pode ser verificada na figura 3, no tratamento PD-E, o qual apresentou menor macroporosidade na camada mais compactada (0,1-0,2 m) e maior microporosidade entre os tratamentos. A redução do volume de macroporos do solo pode restringir o fluxo de água e nutrientes na zona de desenvolvimento radicular.

A microporosidade (poros  $< 60 \mu\text{m}$ ) praticamente não foi alterada de forma significativa pelos tratamentos, exceto o PD-E na camada de 0,1-0,2 m, que apresentou microporosidade significativamente maior ( $p < 0,05$ ) que a dos demais tratamentos (Figura 3c), indicando que essa classe de tamanho de poros foi pouco influenciada pelos manejos aplicados. Os resultados encontrados para a microporosidade estão coerentes com os de  $D_s$  e PT, pois, nas camadas do solo mais compactadas, predominou a classe de poros com diâmetro  $< 60 \mu\text{m}$ . É fato encontrado comumente na literatura o aumento da proporção de poros de menor diâmetro em virtude da redução dos poros de maior diâmetro com o aumento da  $D_s$  (Hill et al., 1985; Streck, 2007).



**Figura 3.** Valores médios de porosidade total (a), macroporosidade (b) e microporosidade (c) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica (PD-B), nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3, 0,3-0,4 e 0,4-0,5 m. Nas alíneas a e b, as linhas tracejadas representam o valor de porosidade total considerado ideal (BRADY & WEIL, 2007) e o limite crítico de macroporosidade para o desenvolvimento de plantas (BAVER et al., 1972), respectivamente. Letras maiúsculas referem-se aos tratamentos e, minúsculas, às camadas; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12.

No presente trabalho, aos 18 meses após a descompactação também não foram detectadas diferenças entre os tratamentos, como indicado pelos valores de PT e macroporosidade (Figura 3a,b). Camara & Klein (2005) não detectaram efeitos da escarificação em plantio direto aos seis meses após essa operação. Vários autores justificam o fato de o efeito da mobilização do solo desaparecer em razão da reconsolidação do solo que ocorre devido aos ciclos de umedecimento e secagem, ao impacto das gotas de chuva e ao tráfego das máquinas agrícolas utilizadas na semeadura, colheita e tratos culturais (Veiga et al., 2008; Reichert et al., 2009).

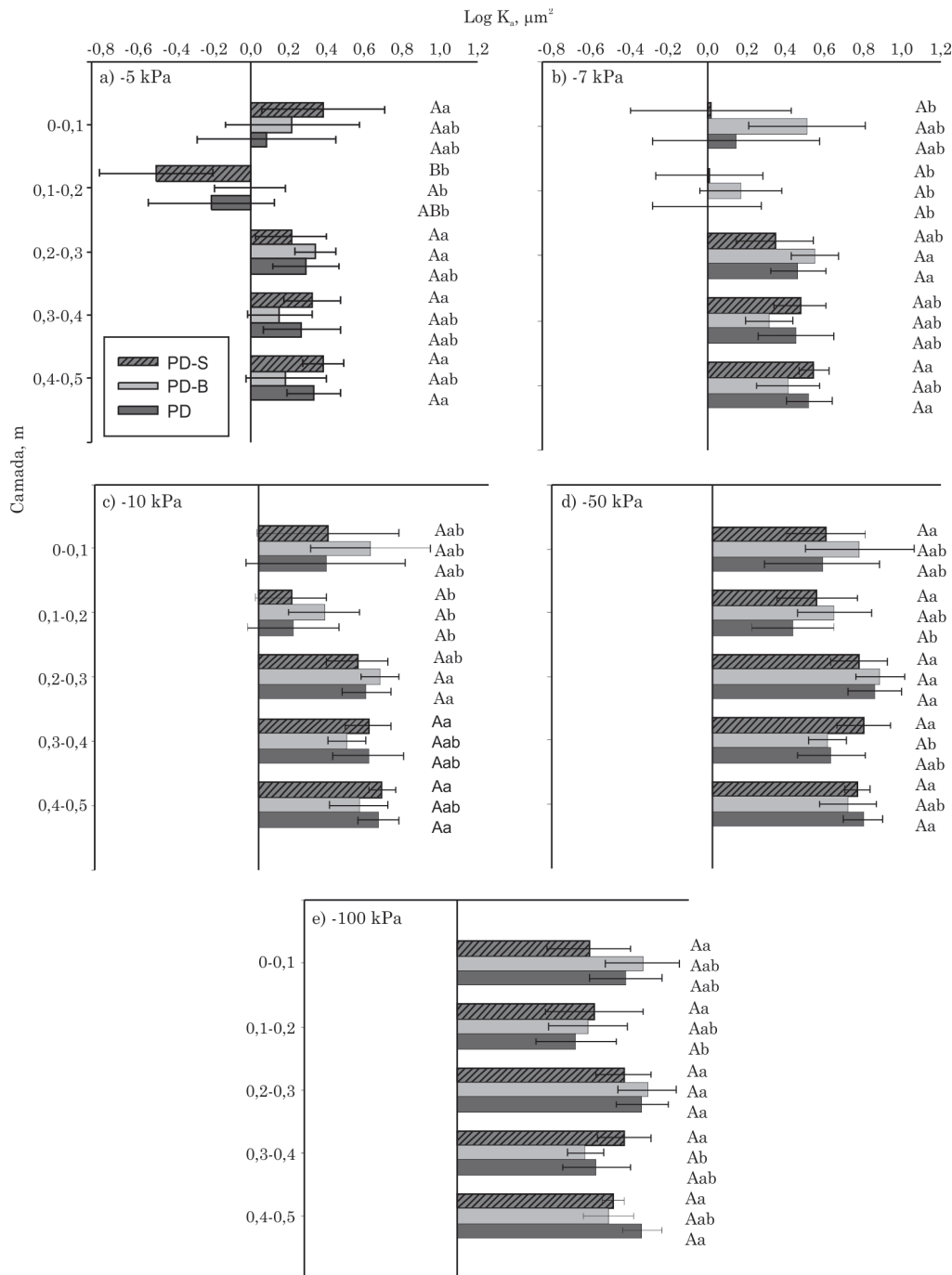
A normalidade dos dados de permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) foi verificada com o teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965), e a distribuição dos dados de  $K_a$  dentro dos tratamentos foi encontrada como sendo

assimétrica e não normal. Assim, os logaritmos de  $K_a$  foram utilizados para tornar as distribuições mais próximas da normalidade (Groenevelt et al., 1984; Ball et al., 1988; Blackwell et al., 1990). Apenas os potenciais mátricos a partir de -5,0 kPa foram utilizados na avaliação da permeabilidade ao ar e na estimativa dos índices de continuidade de poros, pois em condições de  $\psi_m$  maiores (-0,5; -1,0; -2,0 e -3,0 kPa) o solo apresentou-se impermeável ou, em raras medições, com baixos valores de  $K_a$ . Isso pode causar déficit de aeração mais prolongado, já que a região possui volume elevado de chuvas. Assim, pode-se inferir que a aeração do solo poderá ser mais prejudicada até o  $\psi_m$  de -3,0 kPa, pois os poros (< 100  $\mu\text{m}$ ) encontram-se preenchidos por água. Nesse contexto, os efeitos deletérios na planta dependem do tempo necessário para o restabelecimento da aeração no solo (Drew & Linch, 1980), que poderia ser menor

caso fossem detectados valores de  $K_a > 1 \mu\text{m}^2$  (Ball, 1981b) em  $\psi_m$  maiores que -3,0 kPa.

Os valores médios de  $\log K_a$  em todos os  $\psi_m (< -5,0 \text{ kPa})$  estão apresentados na figura 4. Houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) para os sistemas de manejo apenas no  $\psi_m$  de -5,0 kPa, na camada de 0,1-0,2 m,

onde o tratamento com nabo forrageiro apresentou permeabilidade do solo ao ar maior que a do PD-E. Isso pode ser relacionado ao fato de o PD-B possuir, numericamente, maior macroporosidade nessa camada (Figura 3b). Com a redução do  $\psi_m (< -5,0 \text{ kPa})$ , não se verificam diferenças entre os tratamentos já



**Figura 4.** Valores médios do log da permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica (PD-B), nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3, 0,3-0,4 e 0,4-0,5 m, para diferentes potenciais matriciais: -5 kPa (a), -7 kPa (b), -10 kPa (c), -50 kPa (d) e -100 kPa (e). Letras maiúsculas referem-se aos tratamentos e, minúsculas, às camadas; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95%). N=12.



que os poros menores (diâmetros equivalentes < 60  $\mu\text{m}$ ) passam a ter maior influência na condução de ar. Portanto, a  $K_a$  não foi significativamente alterada pela ação dos tratamentos. Por ser um parâmetro com grande variabilidade espacial no solo, e dependente principalmente da quantidade e continuidade dos macroporos, a  $K_a$  mostrou comportamento semelhante à macroporosidade, praticamente sem diferenças significativas entre tratamentos. No entanto, esses resultados confirmam o efeito positivo do secamento do solo no aumento da  $K_a$  (Aljibury & Evans, 1965).

Não foram verificados valores médios de  $K_a$  mais elevados na camada de 0-0,10 m em relação às mais profundas. Esses resultados diferem dos de Streck (2007) e Sequinato (2010), os quais verificaram, na camada de 0,0-0,1 m, maiores valores de permeabilidade ao ar. Nesses casos, não foi verificada alteração na estrutura do solo pela compactação, que reduziria a permeabilidade ao ar em superfície (Fontanela, 2008; Brandt, 2009).

Em todos os tratamentos e camadas houve incremento de  $K_a$  com a redução do  $\psi_m$ ; os poros que estavam ocupados por água gradualmente cederam espaço para o processo de aeração: primeiramente os macroporos e, em seguida, os poros menores. A  $K_a$  apresentou, numericamente, decréscimo da camada de solo de 0,0-0,1 m para a de 0,1-0,2 m, em função da redução de volume de macroporos (Figura 3b). Esse fato foi observado apenas nos valores de  $\psi_m$ , em que os macroporos estão preenchidos por água (< -10 kPa). Ou seja, o fluxo de ar preferencial ocorre pelos macroporos contínuos. Dessa forma, a permeabilidade ao ar, medida próxima à capacidade de campo, permite uma estimativa adequada da condutividade dos poros grandes (Iversen et al., 2003). Resultados semelhantes também foram obtidos por Streck (2007), que determinou a condutividade ao ar em solos submetidos a diferentes manejos e concluiu que ela se mostrou bastante dependente da macroporosidade, expressando as alterações na estrutura do solo quando a proporção de macroporos foi alterada.

Para determinar se as diferenças de  $K_a$  podem ser atribuídas somente àquelas de  $\varepsilon_a$  ou se elas deveriam ser atribuídas a outros aspectos geométricos do espaço poroso preenchido com ar, tais como a tortuosidade e continuidade, foi utilizado o índice de continuidade de poros  $K_I$ , que corresponde ao cálculo da razão  $K_a/\varepsilon_a$  (Groenevelt et al., 1984). Assim como  $K_a$ , o índice de continuidade de poros  $K_I$  apresentou distribuição log-normal, de forma que todas as análises posteriores foram executadas utilizando a transformação logarítmica para cada amostra individualmente. Contudo, as análises de  $\log K_a/\varepsilon_a$  não foram sensíveis o suficiente para diferenciar efeitos entre porosidade, distribuição do tamanho e continuidade de poros entre os tratamentos propostos em nenhum potencial mátrico avaliado (Figura 5).

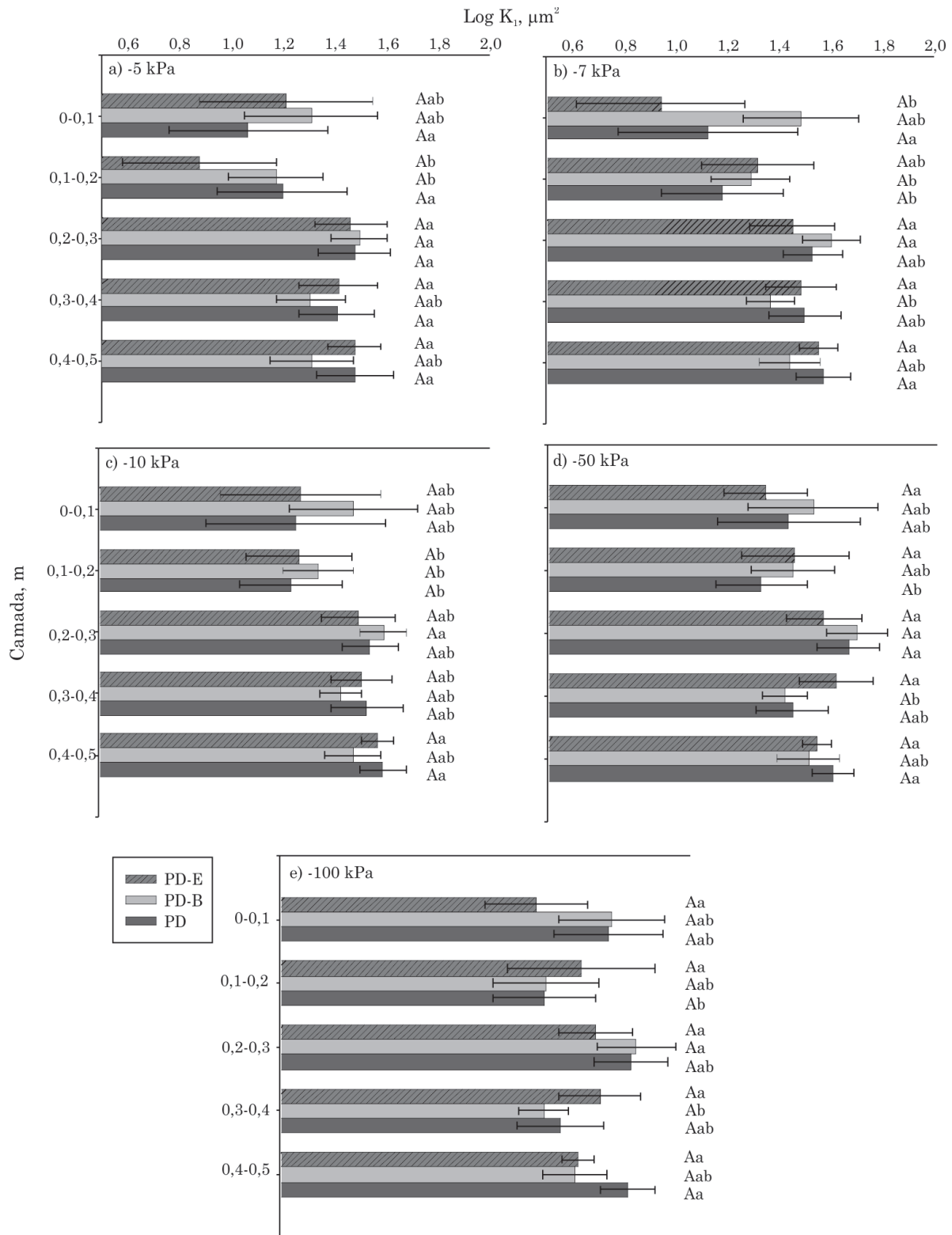
A  $K_a$  foi relacionada com a  $\varepsilon_a$  por um modelo exponencial (Equação 7), obtendo-se as constantes  $M$

e  $N$ . A inclinação da reta ( $N$ ) da relação log-log entre  $K_a$  e  $\varepsilon_a$  representa um índice de continuidade de poros, que determina a percentagem de poros contínuos interligados disponíveis para o fluxo de ar. Esse índice de continuidade de poros é um indicativo da eficiência dos poros em permitir a passagem do ar (Ball et al., 1988). Streck (2007) afirma que mais importante que a porosidade é a continuidade de poros, pois poros obstruídos não contribuem para a realização da troca gasosa entre o solo e a atmosfera. Como indicado na figura 6, ocorreu redução no valor médio de  $N$  entre a camada mais superficial (0,0-0,1 m) e as demais camadas de solo para todos os sistemas de manejo. Esses resultados sugerem decréscimo na continuidade dos poros ou maior tortuosidade em profundidade, exceto para PD-B, o que pode ser atribuído à alta variabilidade dos valores de  $N$  na camada mais superficial.

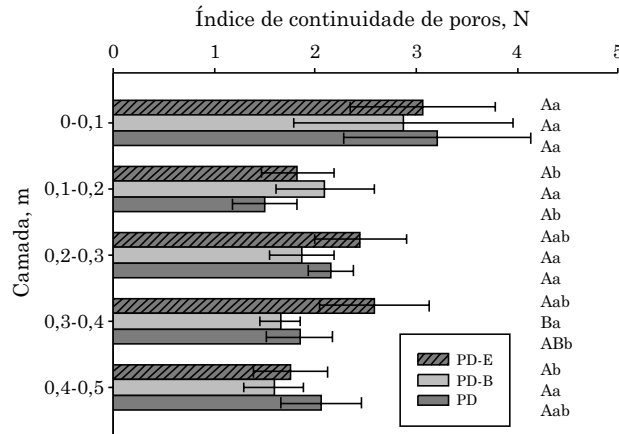
Para os sistemas de manejo e as camadas de solo avaliadas, foram obtidos valores de  $MeN$  considerando cinco  $\psi_m$  (Figura 7). Desse modo, cerca de 56 % da variabilidade de  $K_a$  foi explicada pelo modelo da regressão (Quadro 3) - resultado semelhante ao obtido por Rodrigues et al. (2011). O índice de continuidade de poros  $N$  apresentou diferença não significativa ( $p > 0,05$ ) entre os três sistemas nas quatro primeiras camadas, e somente na camada de 0,4-0,5 m o tratamento PD-E diferiu ( $F = 6,5878$ ;  $p = 0,01130$ ) dos demais.

Os valores médios da porosidade bloqueada ( $\varepsilon_b$ ) não mostraram diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos nem entre camadas (Figura 8). Utilizando esse mesmo atributo para um solo franco-argiloso, Ball et al. (1988) estimaram valores de  $\varepsilon_b$  ligeiramente inferiores aos encontrados (Quadro 3) na faixa de 0 a 3,6 %, com os maiores valores sob semeadura direta. Isso pode ser atribuído à diferença entre os tamanhos de partículas e, conseqüentemente, a um sistema poroso menos tortuoso e mais contínuo.

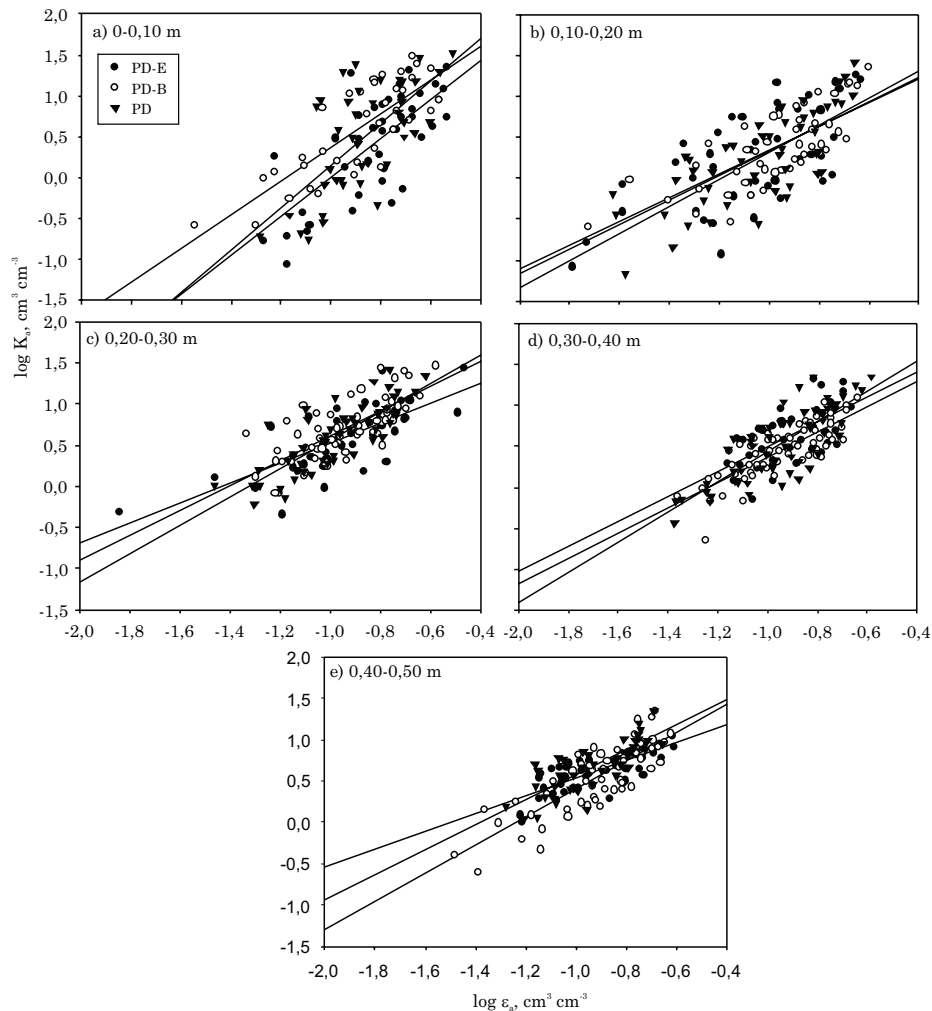
A porosidade de aeração na capacidade de campo de -10 kPa não apresentou diferenças estatísticas ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos em nenhuma das camadas avaliadas (Figura 9). O PD-E, na camada de 0,1-0,2 m, apresentou valor de  $\varepsilon_a$  abaixo do limite adequado para o desenvolvimento das plantas, quando a porosidade de aeração deve ser de no mínimo  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Grable & Siemer, 1968; Bayer et al., 1972; Drewry et al., 2008). Portanto, nesse caso, pode ocorrer limitação nas trocas gasosas entre o ar da rizosfera e a atmosfera externa, o que reduz a taxa de respiração radicular e compromete a absorção de nutrientes pelas raízes das plantas (Morard & Silvestre, 1996). Essa limitação pode ser agravada em períodos mais chuvosos, nos quais o fluxo de ar no solo é mais prejudicado, já que a partir da camada de 0,1-0,2 m todos os tratamentos apresentam valores médios próximo ao limite crítico de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Linn & Doran, 1984).



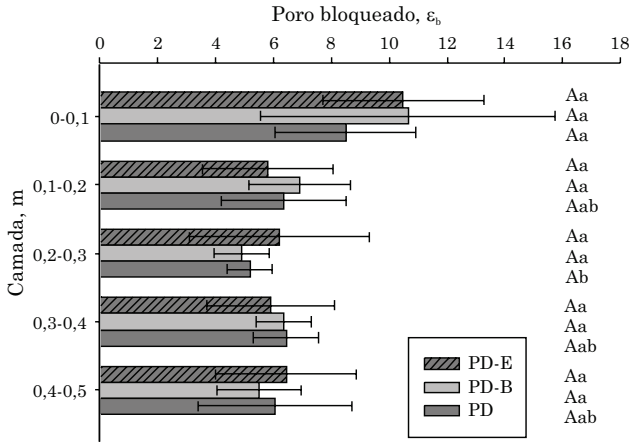
**Figura 5. Valores médios do log do índice de continuidade de poros,  $K_p$ , derivado da razão entre permeabilidade ao ar e porosidade de aeração ( $K_a/\epsilon_a$ ) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica (PD-B), nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3, 0,3-0,4 e 0,4-0,5 m, para diferentes potenciais matriciais: -5 kPa (a), -7 kPa (b), -10 kPa (c), -50 kPa (d) e -100 kPa (e). Letras maiúsculas referem-se aos tratamentos e, minúsculas, às camadas; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12.**



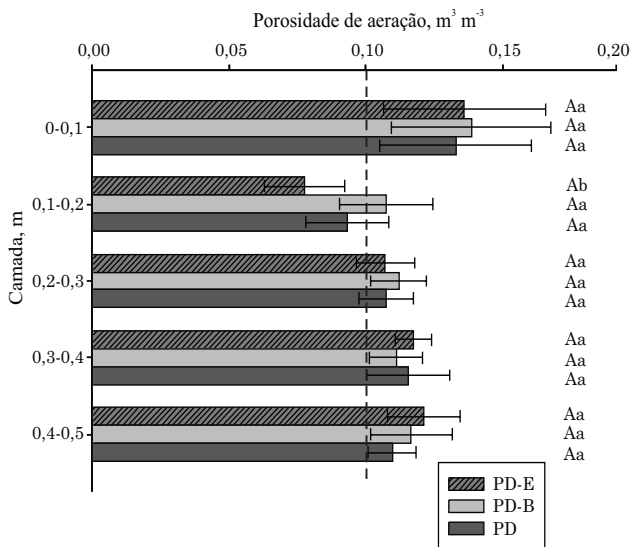
**Figura 6.** Valores médios do parâmetro  $N$ , do modelo:  $\log K_a = \log M + M \log \epsilon_a$ , para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica (PD-B), nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3, 0,3-0,4 e 0,4-0,5 m. Letras maiúsculas referem-se aos tratamentos e, minúsculas, às camadas; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %).  $N=12$ .



**Figura 7.** Relação log-log entre a permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) e porosidade de aeração ( $\epsilon_a$ ) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica (PD-B), nas camadas de 0,0-0,1 (a), 0,1-0,2 (b), 0,2-0,3 (c), 0,3-0,4 (d) e 0,4-0,5 (e) m. Os pontos representam valores obtidos em cinco potenciais mátricos (-5, -7, -10, -50 e -100 kPa).  $N=60$ .



**Figura 8.** Valores médios da porosidade bloqueada ( $\epsilon_b = 100 \times 10^{-\log(M/N)}$ , % v/v) para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica (PD-B), nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3, 0,3-0,4 e 0,4-0,5 m. Letras maiúsculas referem-se aos tratamentos e, minúsculas, às camadas; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12.



**Figura 9.** Valores médios da porosidade de aeração na capacidade de campo (-10 kPa) para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com descompactação biológica (PD-B), nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3, 0,3-0,4 e 0,4-0,5 m. A linha tracejada representa o valor crítico de porosidade de aeração de 0,10 m³ m⁻³, proposto por Baver et al. (1972). Letras maiúsculas referem-se aos tratamentos e, minúsculas, às camadas; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12.

## CONCLUSÕES

1. Após 18 meses, o plantio direto, com ou sem práticas de descompactação, apresentou praticamente a mesma qualidade física, como indicado pela densidade do solo, porosidade, permeabilidade ao ar e continuidade de poros. Portanto, constatou-se limitada persistência do efeito da escarificação como tentativa de melhorar a qualidade física de um Latossolo de textura argilosa quando o grau de compactação inicial não é restritivo ao crescimento de plantas.

2. Entre camadas, onde a densidade do solo foi maior (0,1-0,2 m), a porosidade total e a permeabilidade do solo ao ar ( $\psi_m = -5$  kPa) foram menores que na camada de 0,0-0,1 m. Onde houve escarificação, a macroporosidade foi maior na camada mais superficial.

3. Os índices de continuidade de poros ( $K_f$  e  $N$ ) não foram sensíveis em detectar diferenças na qualidade física do solo.

## LITERATURA CITADA

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 28:519-531, 2004.

ALJIBURY, F.K. & EVANS, D.D. Water permeability of saturated soils as related to air permeability at different moisture tensions. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 29:366-369, 1965.

ARAÚJO, A.G. Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa. São Paulo, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004. 224p. (Tese de Doutorado)

BALL, B.C. Modeling of soil pores as the tubes using gas permeabilities, gas diffusivities and water release. J. Soil Sci., 32:465-481, 1981a.

BALL, B.C. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. J. Soil Sci., 32:483-498, 1981b.

BALL, B.C.; O'SULLIVAN, M.F. & HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. J. Soil Sci., 39:327-339, 1988.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. Soil physics. 4.ed. New York, John Wiley, 1972. 498p.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C. & PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. R. Bras. Ci. Solo, 25:167-177, 2001.

- BHERING, S.B.; SANTOS, H.G.; BOGNOLA, I.A.; CÚRCIO, G.R.; MANZATTO, C.V.; CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C.S. & ÁGLIO, M.L.D. & SOUZA, J.S. Mapa de solos do Estado do Paraná: Legenda atualizada. Rio de Janeiro, Embrapa/IAPAR, 2008. 74p.
- BLACKWELL, P.S.; RINGROSE-VOASE, A.J.; JAYAWARDANE, N.S.; OLSSON, K.A.; MCKENZIE, D.C. & MASON, W.K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. *J. Soil Sci.*, 41:215-228, 1990.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. p.363-375.
- BRADY, N. & WEIL, R.R. *The nature and properties of soils*. 14.ed. New Jersey, Prentice Hall, 2007. 980p.
- BRANDT, A.A. Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2009. 162p. (Tese de Doutorado)
- CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:789-796, 2005.
- 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 no sistema de plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:493-501, 2006.
- CARTER, M.R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil Tillage Res.*, 12:35-51, 1988.
- CARTER, M.R.; WHITE, R.P. & IVANY, J.A. Characterizing macropore continuity and aeration in fine loams in tillage studies. In: INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANIZATION; INTERNATIONAL CONFERENCE, 13., Aalborg, 1994. *Proceedings...* Aalborg, Royal Veterinary and Agricultural University/Danish Institute of Plant and Soil Science, 1994. p.7-12.
- CAVALIERI, K.M.V.; DA SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R. & HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil. *Soil Tillage Res.*, 103:158-164, 2009.
- CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F. & WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Equipment and field practices. *Soil Tillage Res.*, 73:161-174, 2003.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:1663-1674, 2006.
- CUBILLA, M.; REINERT, D.J.; AITA, C. & REICHERT, J.M. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. *R. Plantio Direto*, 71:29-32, 2002.
- DALMAGO, G.A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I.; KRÜGER, C.A.M.B.; COMIRAN, F. & HECKLER, B.M.M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 13:855-864, 2009.
- DREW, M.C. & LYNCH, J.M. Soil anaerobiosis, microorganisms and root function. *Ann. Rev. Phytopathol.*, 18:37-66, 1980.
- DREWRY, J.J.; CAMERON, K.C. & BUCHAN, G.D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing - a review. *Austr. J. Soil Res.*, 46:237-256, 2008.
- FABRIZZI, K.P.; GARCIA, F.O.; COSTA, J.L. & PICONE, L.I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.*, 81:57-69, 2005.
- FIGUEIREDO, G.C. Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010. 163p. (Tese de Doutorado)
- FIGUEIREDO, G.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; MORAES, S.O. & ALMEIDA, B.G. Desenvolvimento de consolidômetro pneumático: Modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:389-402, 2011.
- FONTANELA, E. Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2008. 72p. (Tese de Mestrado)
- FRANCHINI, J.C. & DEBIASI, H. Manejo da compactação do solo no sistema plantio direto na palha. In: SIMPÓSIO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 2009, Foz do Iguaçu. *Palestras...* Ponta Grossa, FEBRAPDP, 2009. p.27-38.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Part 1 - Physical and mineralogical methods*. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.383-411.
- GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo Argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:477-484, 2004.
- GERIK, T.J.; MORRISON Jr., J.E. & CICHESTER, F.W. Effect of controlled traffic on soil physical properties and crop rooting. *Agron. J.*, 79:434-438, 1987.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 32:18-186, 1968.
- GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D. & GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. *Geoderma*, 34:101-114, 1984.
- HILL, R.L.; HORTON, R. & CRUSE, R.M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:1264-1270, 1985.

- HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. 413p.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. *Cartas climáticas do Estado do Paraná*. Londrina, 2000. CD-ROM.
- IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P. & JACOBSEN, O.H. Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability. *Vadose Zone J.*, 2:618-626, 2003.
- KIEHL, E.J. *Manual de edafologia*. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262p.
- KUBOTA, A.; HOSHIBA, K. & BORDON, J. Green-manure turnip for soybean based no-tillage farming systems in eastern Paraguay. *Sci. Agric.*, 62:150-158, 2005.
- LANDEFELD, L.S.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H.J. & STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. *Soil Tillage Res.*, 75:75-86, 2004.
- LETEY, J.; STOLZY, L.H.; VOLORAS, N. & SZUSZKIEWICZ, T.E. Influence of soil oxygen on mineral concentration of barley. *Agron. J.*, 54:538-540, 1962.
- LINN, D.M. & DORAN, J.W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:1267-1272, 1984.
- MAGALHÃES, E.N.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; COSTA, K.A.P. & CASTRO, M.B. Recuperação estrutural e produção do capim-Tifton 85 em um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado. *Ci. An. Bras.*, 10:68-76, 2009.
- MORARD, P. & SILVESTRE, J. Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: A review. *Plant Soil*, 184: 243-254, 1996.
- PAYTON, M.E.; MILLER, A.E. & RAUN, W.R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 31:547-551, 2000.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *R. Ci. Amb.*, 27:29-48, 2003.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.*, 102:242-254, 2009.
- RODRIGUES, S.; DA SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B. & ROSA, J.A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:105-114, 2011.
- ROSEBERG, R.J. & McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:969-974, 1990.
- SCANLON, B.R.; NICOT, J.P. & MASSMANN, J.W. Soil gas movement in unsaturated systems. In: WARRICK, A.W., ed. *Soil physics companion*. Boca Raton, CRC Press, 2002. p.297-341.
- SCHJONNING, P.; MUNKHOLM, L.J.; MOLDRUP, P. & JACOBSEN, O.H. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: The long term effects of fertilization and crop rotation. *Eur. J. Soil Sci.*, 53:331-339, 2002.
- SEQUINATTO, L. *Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. 158p. (Tese de Doutorado)
- SHAPIRO, S.S. & WILK, M.B. Analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52:591-611, 1965.
- SHTYKOV, V.I. & DAISHEV, S.T. Determination of air permeability of soils. *Sov. Soil Sci.*, 18:115-122, 1986.
- SILVA, A.P.; LEO, T.P.; TORMENA, C.A. & GONÇALVES, A.C.A. Determination of air permeability in undisturbed soil samples by the decreasing pressure method. *R. Bras. Ci. Solo*. 33:1535-1545, 2009.
- SPRINGER, D.S.; LOAICIGA, H.A.; CULLEN, S.J. & EVERETT, L.G. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions. *Ground Water*, 36:558-565, 1998.
- STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M. & MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: I. Nas propriedades físico-hídricas do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 6:213-218, 2002.
- STRECK, C.A. Índice S e fluxo de água e ar em solos do Sul do Brasil. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2007. 95p. (Tese de Doutorado)
- SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & LIMA, C.L.R. Densidade restritiva ao sistema radicular em função da argila. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., Aracajú, 2006. Anais... Aracajú, 2006. CD-ROM.
- TAYLOR, J.C. & BELTRAME, L.F.S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem. *Lav. Arroz.*, 3:34-44, 1980.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998.
- VEIGA, M.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern brazilian Hapludox. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1437-1446, 2008.