

# PERMEABILIDADE AO AR EM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO<sup>(1)</sup>

Sueli Rodrigues<sup>(2)</sup>, Alvaro Pires da Silva<sup>(3)</sup>, Neyde Fabíola Balarezo  
Giarola<sup>(4)</sup> & Jadir Aparecido Rosa<sup>(5)</sup>

## RESUMO

A permeabilidade ao ar pode ser utilizada para avaliar alterações que ocorrem na estrutura do solo em virtude da adoção de diferentes sistemas de manejo. Este estudo testou a hipótese de que o menor revolvimento do solo sob sistema plantio direto resulta na formação de poros mais contínuos e melhor condição de aeração no solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar, por meio da permeabilidade ao ar ( $K_a$ ), da porosidade de aeração ( $\epsilon_a$ ) e dos índices de continuidade de poros ( $K_I$  e  $N$ ), a aeração em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD). Oitenta amostras de solo (2 tratamentos x 2 profundidades x 20 repetições) com estrutura indeformada foram coletadas de cada sistema de manejo do solo nas profundidades de 0–0,10 e 0,10–0,20 m em área experimental do Instituto Agrônomo do Paraná, no município de Ponta Grossa, Paraná. Depois de saturadas e equilibradas em seis potenciais mátricos (-2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa), determinou-se a permeabilidade ao ar e a porosidade de aeração em cada potencial. Também foram determinados a densidade do solo, a densidade de partícula, o carbono orgânico e a porosidade. A densidade do solo não consistiu em fator limitante, ficando abaixo do limite crítico para solos argilosos nos dois sistemas. No SPD, o maior volume de microporos resultou em maior retenção de água no intervalo de umidade avaliado (-2 a -100 kPa) e em maior volume de poros bloqueados para o fluxo de ar ( $\epsilon_b$ ), ou seja, redução de  $K_a$ . Na profundidade avaliada (0–0,20 m), os índices de continuidade de poros ( $K_I$  e  $N$ ) revelaram que o PC apresentou poros mais contínuos do que o SPD, contradizendo a hipótese testada.

**Termos de indexação:** aeração do solo, sistema plantio direto, preparo convencional, continuidade de poros.

---

<sup>(1)</sup> Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor realizada na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Recebido para publicação em dezembro de 2009 e aprovado em novembro de 2010.

<sup>(2)</sup> Mestranda, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Caixa Postal 9, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: srodrigu@esalq.usp.br

<sup>(3)</sup> Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail: apsilva@esalq.usp.br

<sup>(4)</sup> Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG. Av. General Carlos Cavalcanti 4748, CEP 84030–900 Ponta Grossa (PR). E-mail: neydef@uepg.br

<sup>(5)</sup> Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR. Área de Engenharia Agrícola, Av. Pres. Kennedy s/n – BR 376, km 496, Caixa Postal 129, CEP 84001-970 Ponta Grossa (PR). E-mail: jrosa@iapar.br

**SUMMARY: SOIL AIR PERMEABILITY IN A RHODIC HAPLUDOX UNDER DIFFERENT TILLAGE SYSTEMS**

*Air permeability ( $K_a$ ) can be used to assess soil structure changes resulting from different tillage systems. This study tested the hypothesis that the reduced soil disturbance in no-tillage results in continuous pores and better soil aeration conditions. The objective was to evaluate the aeration of a Rhodic Hapludox under conventional tillage (CT) and no-tillage (NT), based on soil air permeability ( $K_a$ ), air-filled porosity ( $\epsilon_a$ ) and indices of pore continuity ( $K_1$  and N). Eighty undisturbed soil cores (2 treatments x 2 depths x 20 repetitions) were collected from each tillage system at 0–0.10 and 0.10–0.20 m in an experimental area of the Agronomic Institute of Paraná in Ponta Grossa, Paraná. After the samples had been saturated and equilibrated at six matric potentials (-2, -6, -10, -30, -70, and -100 kPa), the air permeability and air-filled porosity were determined for each matrix potential. The soil bulk density, particle density, organic carbon and soil porosity were also evaluated. Soil bulk density was not a limiting factor, with values below the critical limit for clay soils in both systems. In NT, the greater micropore volume was related to higher water retention in the evaluated moisture range (-2 to -100 kPa) and greater volume of pores blocked for air flow ( $\epsilon_b$ ), thus reducing  $K_a$  in this system. At 0–0.20 m, the indices of pore continuity ( $K_1$  and N) indicated more continuous pores in CT than NT, contradicting the hypothesis tested.*

*Index terms: soil aeration; no-tillage system; conventional tillage; pore continuity.*

## INTRODUÇÃO

O ar do solo é uma fonte de energia para a atividade microbiana do solo e para o desenvolvimento das culturas (Bowen et al., 1983). A aeração limitada altera a dinâmica de nutrientes, modifica as reações químico-biológicas oxidativas para redutivas e promove crescimento deficiente das plantas (Horne & Sojka, 2006). O conhecimento da quantidade de ar disponível para as plantas é fundamental para as regiões em que se pratica a produção agrícola em larga escala.

As práticas de manejo do solo têm grande impacto sobre a sua aeração. As que promovem o revolvimento do solo com o auxílio de arados tendem a incrementar o volume de poros, a permeabilidade e o armazenamento de ar (Braunack & Dexter, 1989). No entanto, o revolvimento mecânico dos 20 ± 25 cm superficiais do solo consome energia, expõe as sementes das camadas mais profundas para a cama de semeadura e elimina grande parte da fauna ativa do solo ao incorporar a matéria orgânica (Andrén & Lagerlöf, 1983). O preparo contínuo compacta a camada de solo logo abaixo da profundidade de aração e cria condições críticas para as trocas de ar (Rydberg, 1987).

Cultivos sucessivos sob plantio direto tendem a aumentar a densidade das camadas de solo não cultivadas (Rydberg, 1987) e a diminuir o volume de macroporos (Douglas et al., 1980). Apesar do menor volume de macroporos em relação ao solo arado, no solo sob plantio direto a infiltração é mais rápida em função da maior continuidade de poros (Douglas et al., 1980).

Os efeitos das práticas de manejo na aeração do solo podem ser quantificados pela permeabilidade ao

ar (Stepniewski et al., 1994). A permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) é uma medida da capacidade do solo (material poroso) de conduzir ar (gases), em resposta a um gradiente de pressão, por um processo denominado fluxo de massa (ou fluxo convectivo) (Lal, 2000). Sob baixos gradientes de pressão, o fluxo de ar através do solo é comparável ao fluxo de água e pode ser estimado pela lei de Darcy (Nield & Bejan, 2006). De modo similar à condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar depende do conteúdo volumétrico de água e da quantidade, forma, tamanho e continuidade de poros (Roseberg & McCoy, 1990).

A permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) é um atributo físico sensível aos efeitos dos sistemas de uso e manejo na estrutura do solo e pode fornecer uma descrição significativa do estado de compactação do solo (Phillips & Kirkham, 1962). Em níveis similares de compactação, a permeabilidade ao ar é maior em solos com estruturas maiores (peds de 4–8 mm) do que naqueles com estruturas menores (peds < 2 mm) (Lipiec, 1992). Ball et al. (1994) relataram que, em experimentos de longa duração (20–25 anos) desenvolvidos em solos francos imperfeitamente drenados, a permeabilidade ao ar foi menor sob sistema plantio direto do que sob plantio convencional. Em outro estudo, Schjønning & Rasmussen (2000) observaram que a rede de poros de solos arenosos e franco-arenosos apresentou-se bem conectada, independentemente do sistema de manejo (convencional ou direto), mas em solos franco-siltosos arados a permeabilidade ao ar atingiu níveis limitantes, que foram melhorados com a adoção de quatro anos de plantio direto.

A permeabilidade ao ar é útil na caracterização dos poros do solo (Blackwell et al., 1990), e o

conhecimento de sua variação com o conteúdo de água no solo permite modelar a convecção de ar e o transporte de gases (Poulsen et al., 1999). A permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) e a porosidade de aeração ( $\epsilon_a$ ) têm sido relacionadas na tentativa de avaliar possíveis diferenças na geometria dos poros resultantes das práticas de manejo adotadas (Blackwell et al., 1990). A razão entre permeabilidade ao ar e volume de macroporos (Blackwell et al., 1990) ou permeabilidade ao ar e porosidade preenchida com ar (Ball et al., 1994) é considerada uma medida da continuidade dos poros e organização destes. Valores mais baixos da relação refletem uma continuidade dos poros muito reduzida devido à compactação (Lipiec & Glinski, 1997; Munkholm et al., 2002).

O conhecimento da quantidade de ar disponível no solo depois de realizadas as diferentes práticas de cultivo pode auxiliar os agricultores e pesquisadores a planejar com eficiência as exigências de manejo para a produção de uma dada cultura. Este estudo testou a hipótese de que o menor revolvimento do solo sob sistema plantio direto leva à formação de poros mais contínuos e, por sua vez, a uma melhor condição de aeração do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a aeração de um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso cultivado há 23 anos sob sistema de plantio direto e plantio convencional, por meio da permeabilidade ao ar, porosidade de aeração e continuidade de poros.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Polo Regional de Pesquisa do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), localizado no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná, nas coordenadas médias de 25° 06' S e 50° 09' O. O solo avaliado foi classificado como um Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2006), em relevo com declividade média de 0,8 m m<sup>-1</sup>. A área avaliada vem sendo cultivada desde 1981 com sistema de rotação de culturas (aveia-preta ou trigo/soja e ervilhaca ou tremoço/milho).

Foram avaliados dois sistemas de manejo de solo: preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD) de longa duração (23 anos), com parcelas de 5.000 m<sup>2</sup> (100 x 50 m) e 10.000 m<sup>2</sup> (100 x 100 m), respectivamente. O PC consistiu de uma aração e duas gradagens na profundidade de 20 cm. No PD, entre os anos de 1981 e 1988 realizou-se uma alternância de preparo com uso de aração e gradagem e semeadura direta em três ocasiões. A partir de 1989 a parcela passou a ser cultivada apenas sob SPD.

A amostragem foi realizada em abril de 2008, no estágio final da cultura do milho. De cada parcela experimental foram retiradas amostras de solo com estrutura indeformada, utilizando-se anéis volumétricos de aproximadamente 100 cm<sup>3</sup> (altura e diâmetro de 5 cm). As amostras, orientadas

verticalmente, foram coletadas nas profundidades de 0–0,10 e 0,10–0,20 m, totalizando 80 amostras (2 tratamentos x 2 profundidades x 20 repetições). As amostras de solo foram, então, lentamente saturadas e, posteriormente, submetidas a diferentes potenciais mátricos ( $\Psi_m$ ): -2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa, utilizando câmaras de pressão (Klute, 1986). As amostras permaneceram nas câmaras até que o equilíbrio fosse atingido em cada potencial. Após atingir o equilíbrio, determinou-se a  $K_a$  pelo método adaptado de McKenzie & Dexter (1996), conforme Da Silva et al. (2009). Esse método é baseado no princípio da quantificação do decréscimo da pressão ( $h$ ) em função do tempo ( $t$ ), o qual é proporcional ao fluxo de ar que atravessa a amostra de solo. Segundo Kirkham (1946) o gráfico do logaritmo natural da pressão em função do tempo fornece o coeficiente angular  $S$ , em que:

$$S = \frac{\ln h_2 - \ln h_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Se  $S$  é linear numa faixa de pressão e tempo, então o comportamento é consistente com o fluxo laminar do ar, e a permeabilidade intrínseca ao ar,  $K_a$ , em m<sup>2</sup>, é dada por:

$$K_a = \frac{\nu_a - Vl}{A P_a} |S| \quad (2)$$

em que  $\nu_a$  é a viscosidade do ar (18,1 x 10<sup>-6</sup> kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> a 20 °C);  $V$ , o volume do reservatório, m<sup>3</sup>;  $l$ , a altura da amostra, m;  $A$ , a área da amostra, m<sup>2</sup>;  $P_a$ , a pressão do ar atmosférico (101,3 kPa a 20 °C); e  $|S|$ , o módulo da inclinação da reta da relação pressão versus tempo.

Os valores de  $K_a$  e  $\epsilon_a$  foram relacionados usando a equação de Kozeny-Carman em uma forma análoga àquela dada por Ahuja et al. (1984):

$$K_a = M \epsilon_a^N \quad (3)$$

em que  $M$  e  $N$  são constantes empíricas. Esses autores consideraram o expoente  $N$  como um índice de continuidade de poros, que reflete o aumento da  $K_a$  com o aumento da  $\epsilon_a$  ou o decréscimo da tortuosidade dos poros e área superficial com o aumento da fração de poros disponíveis para o fluxo. A relação de  $K_a$  e  $\epsilon_a$  foi ajustada para uma forma logarítmica da equação 3:

$$\log K_a = \log M + N \log \epsilon_a \quad (4)$$

A relação linear na equação 4 pode ser caracterizada usando as três informações indicadas na figura 1: a inclinação da reta ( $N$ ), o intercepto com o eixo  $\log K_a$  no qual  $\log \epsilon_a = 0$  ( $M$ ), e o intercepto com o eixo  $\log \epsilon_a$ , em que  $\log K_a = 0$  ( $\epsilon_b$ ). O intercepto com o eixo  $\log \epsilon_a$  (em que  $K_a = 1 \mu\text{m}^2$ ) é denominado de conteúdo de ar limitante e foi proposto por Ball et al. (1988) e Schjønning et al. (2002) como a quantidade de poros de aeração bloqueados no solo, que não faz parte do transporte convectivo de ar. Desse modo,  $\epsilon_b$  é o valor de  $\epsilon_a$  abaixo do qual o fluxo de ar através do

solo cessa devido à descontinuidade na rede de poros de aeração e pode ser obtido da equação 3 pela equação 5.

$$\varepsilon_b = 10^{(-\log M)/N} \quad (5)$$

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

$$K_L = \frac{K_a}{\varepsilon_a} \quad (6)$$

Finalizadas as determinações da  $K_a$ , as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 h, para obtenção da massa de solo seco. Para cada amostra, foram determinados os seguintes atributos:

- Densidade do solo ( $\rho_s$ ) em Mg m<sup>-3</sup>, segundo Blake & Hartge (1986).
- Densidade de partículas ( $\rho_p$ ), em Mg m<sup>-3</sup>, pelo método do picnômetro de gás hélio (modelo ACCUPYC 1330, Micromeritics Instrument Corporation®), utilizando amostras de solo secas e passadas em peneira de 2,0 mm.
- Umidade gravimétrica (U) em cada potencial, em g g<sup>-1</sup>, de acordo com Gardner (1986).
- Umidade volumétrica ( $\theta$ ) em cada potencial, em cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, obtida por:  $\theta = (\rho_s/\rho_a)U$ , em que  $\rho_a$  é a densidade da água (g cm<sup>-3</sup>).
- Porosidade total do solo ( $\alpha$ ) em cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> pela fórmula  $\alpha = 1 - (\rho_s/\rho_p)$ .
- Porosidade de aeração ( $\varepsilon_a$ ) em cada potencial, em cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, calculada como a diferença entre o

conteúdo de água medido em cada potencial e a porosidade total estimada a partir das medidas da densidade de partículas para cada amostra:  $\varepsilon_a = \alpha - \theta$ .

g) Carbono orgânico (CO), em g dm<sup>-3</sup>, determinado para cada amostra pelo método da colorimetria (Cantarella & Quaggio, 2001).

h) Granulometria, determinada pelo método do densímetro (Gee & Bauder, 1986).

As análises estatísticas foram efetuadas no programa SAS (SAS, 2002). Os resultados foram submetidos à análise de variância (two-way Anova), e as médias, comparadas pelo teste de Tukey a 5 %.

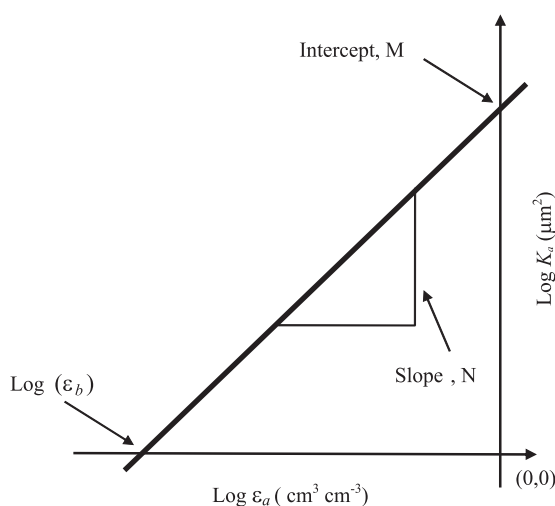
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parte do conjunto de atributos do solo avaliados é apresentada no quadro 1. O solo selecionado para o estudo foi classificado como muito argiloso ( $\geq 600$  g kg<sup>-1</sup> de argila). A densidade do solo ficou abaixo do limite crítico para solos argilosos nos dois sistemas de manejo e nas duas profundidades. O maior teor de CO no SPD em superfície resultou em menor  $\rho_p$ , devido à baixa densidade da matéria orgânica (0,9 a 1,3 Mg m<sup>-3</sup>). Houve redução no teor de CO na camada de 0,10–0,20 m, em relação à camada superior, nos dois sistemas. Esse decréscimo é frequentemente evidenciado nos solos dos trópicos úmidos e, em particular, em solos brasileiros (Desjardins et al., 1991; Cavalieri et al., 2009).

**Quadro 1. Atributos do Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD) em duas profundidades de amostragem**

| Atributo   | Tratamento | Profundidade (m) |           |
|--|------------|------------------|-----------|
|  |            | 0,0–0,10         | 0,10–0,20 |
| Areia, g kg <sup>-1</sup>                                | PC         | 62,1aB           | 60,5aA    |
|  | SPD        | 70,6aA           | 60,9bA    |
| Silte, g kg <sup>-1</sup>                                | PC         | 272,2            | 277,6     |
|  | SPD        | 327,7            | 260,5     |
| Argila, g kg <sup>-1</sup>                               | PC         | 665,7            | 661,9     |
|  | SPD        | 601,7            | 678,6     |
| Carbono orgânico (CO), g dm <sup>-3</sup>                | PC         | 30,75aB          | 29,9aA    |
|  | SPD        | 36,43aA          | 29,08bA   |
| Densidade de partículas ( $\rho_p$ ), Mg m <sup>-3</sup> | PC         | 2,65aA           | 2,65aA    |
|  | SPD        | 2,61bB           | 2,65aA    |
| Densidade do Solo ( $\rho_s$ ), Mg m <sup>-3</sup>       | PC         | 0,99             | 1,16      |
|  | SPD        | 0,97             | 1,08      |

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.



**Figura 1. Principais características da relação  $\log$  (conteúdo volumétrico de ar,  $\varepsilon_a$ ) –  $\log$  (permeabilidade ao ar –  $K_a$ ); inclinação da reta,  $N$ ; intercepto com o eixo  $\log$  ( $K_a$ ),  $M$ ; e o limite do conteúdo de ar,  $\varepsilon_b$ .**

A porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) do solo foi influenciada pelos sistemas de manejo adotados. Os dois sistemas apresentaram redução no volume de macroporos em profundidade (Quadro 2). A maior macroporosidade superficial observada no PC em relação ao SPD deve-se ao revolvimento do solo por ocasião da aração (Kroulík, 2009). Apesar do menor volume de macroporos na camada superficial do solo sob SPD, o maior volume de microporos apresentado sob este sistema pode determinar maior retenção de água pelo solo e, por sua vez, maior fornecimento de água para as plantas. É importante destacar que o volume de macroporos observado nos dois sistemas é considerado adequado para o crescimento radicular.

A distribuição dos valores de  $K_a$  para os dois sistemas avaliados apresentou-se assimétrica e não normal. Diante disso, optou-se por ajustar os dados a distribuições mais próximas da normalidade, por meio da aplicação do logaritmo de  $K_a$  (Groenevelt et al., 1984; Ball et al., 1988; Blackwell et al., 1990).

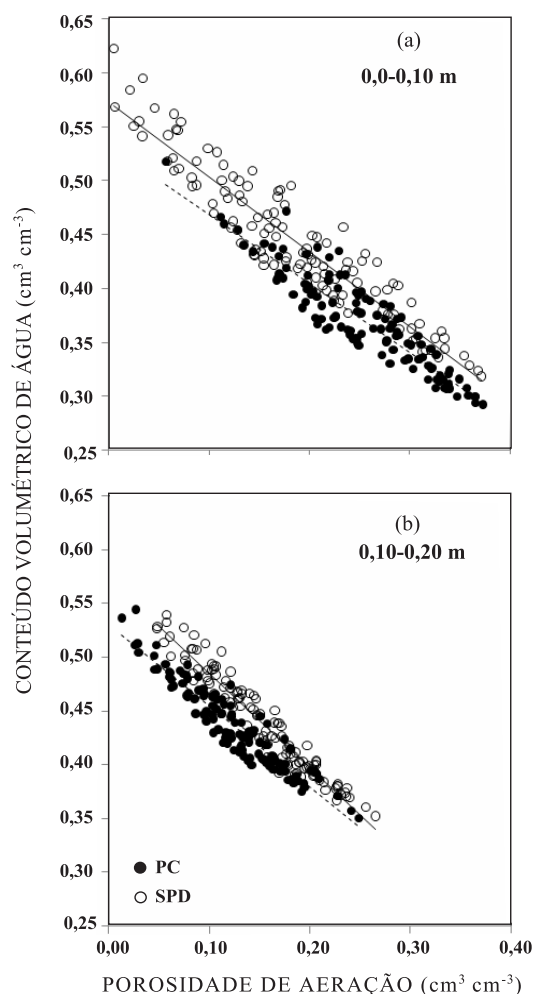
Para entender melhor os valores de  $K_a$  é necessário conhecer a relação entre a porosidade de aeração ( $\epsilon_a$ ) e o conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) (Figura 2). Normalmente, o aumento do conteúdo de água no solo reduz o volume de poros ocupados por ar, bem como os canais condutores de ar. Os resultados demonstraram que a maior microporosidade encontrada no SPD assegurou maior retenção de água no intervalo avaliado (-2 a -100 kPa), ou seja, maior volume de poros preenchidos com água, o que constitui um bloqueio para a passagem de ar, resultando em redução na  $K_a$  (Quadro 3).

Os valores de  $K_a$ , principalmente no  $\Psi_m$  de -2 kPa, foram altamente variáveis, com CV de 82,07 %, diminuindo com o decréscimo do potencial, apresentando CV de 41,46; 32,09; 23,12; 14,85; e 12,26 % para os  $\Psi_m$  de -6, -10, -30, -70 e -100 kPa, respectivamente. Os valores de  $K_a$  na umidade de

**Quadro 2. Medidas de porosidade do Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD) em duas profundidades de amostragem**

| Porosidade                   | Tratamento | Profundidade (m) |           |
|------------------------------|------------|------------------|-----------|
|                              |            | 0,0-0,10         | 0,10-0,20 |
| $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ |            |                  |           |
| Macroporosidade              | PC         | 0,247aA          | 0,116bA   |
|                              | SPD        | 0,173aB          | 0,140bA   |
| Microporosidade              | PC         | 0,378aB          | 0,446bA   |
|                              | SPD        | 0,456aA          | 0,452aA   |
| Total                        | PC         | 0,624aA          | 0,562bB   |
|                              | SPD        | 0,629aA          | 0,592bA   |

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.



**Figura 2. Porosidade de aeração ( $\epsilon_a$ ) em função do conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) nos potenciais de -2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa em um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD), nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.**

capacidade de campo (-10 kPa) estão de acordo com os encontrados por Cavalieri et al. (2009) em solo com 40 % de argila. No entanto, foram menores do que os encontrados por McKenzie & Dexter (1996) em um estudo do fluxo de água e ar através de agregados do solo. Esses autores afirmam que valores de  $K_a$  obtidos utilizando anéis volumétricos são sempre maiores em relação a agregados, provavelmente devido à existência de caminhos de fluxo preferenciais ao redor e entre os agregados nos anéis.

A  $K_a$  apresentou interação entre os tratamentos e a profundidade de amostragem apenas nos  $\Psi_m$  de -30 e -70 kPa (Quadro 3). Nos demais  $\Psi_m$  houve efeito simples para sistema de manejo e profundidade, com maior  $K_a$  na profundidade de 0,0-0,10 m do PC (Quadro 3). Geralmente,  $K_a$  e  $\epsilon_a$  são maiores em solo arado do que em plantio direto pelo fato de o preparo alterar diretamente a porosidade do solo,

**Quadro 3. Permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) e índice de continuidade de poros ( $K_I$ ) para o Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD), em duas profundidades de amostragem**

| Sistema de manejo | Potencial mátrico | Profundidade (m) |           | Profundidade (m) |           |
|-------------------|-------------------|------------------|-----------|------------------|-----------|
|                   |                   | 0,0–0,10         | 0,10–0,20 | 0,0–0,10         | 0,10–0,20 |
|                   |                   | $\log_{10} K_a$  |           | $\log_{10} K_I$  |           |
|                   | kPa               | $\mu\text{m}^2$  |           |                  |           |
| PC                | -2                | 1,690            | 0,397     | 2,424aA          | 1,608bA   |
| SPD               | -2                | 1,253            | 0,002     | 2,456aA          | 1,11bB    |
| Sistema x Prof.   |                   | ns               | ns        | **               | **        |
| PC                | -6                | 1,860            | 0,882     | 2,512aA          | 1,917bA   |
| SPD               | -6                | 1,512            | 0,455     | 2,412aA          | 1,401bB   |
| Sistema x Prof.   |                   | ns               | ns        | **               | **        |
| PC                | -10               | 1,974            | 1,269     | 2,59 3aA         | 2,227bA   |
| SPD               | -10               | 1,653            | 0,628     | 2,455aA          | 1,489bB   |
| Sistema x Prof.   |                   | ns               | ns        | **               | **        |
| PC                | -30               | 2,076 aA         | 1,675 bA  | 2,651aA          | 2,542aA   |
| SPD               | -30               | 1,948 aA         | 1,133 bB  | 2,649aA          | 1,894bB   |
| Sistema x Prof.   |                   | **               | **        | **               | **        |
| PC                | -70               | 2,198 aA         | 1,931 bA  | 2,744aA          | 2,744aA   |
| SPD               | -70               | 2,085 aA         | 1,527 bB  | 2,735aA          | 2,239bB   |
| Sistema x Prof.   |                   | **               | **        | **               | **        |
| PC                | -100              | 2,286            | 2,031     | 2,820aA          | 2,821aA   |
| SPD               | -100              | 2,176            | 1,715     | 2,805aA          | 2,407bB   |
| Sistema x Prof.   |                   | ns               | ns        | **               | **        |

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste LSD.

principalmente a macroporosidade (Ball et al., 1988). A permeabilidade do solo ao ar e à água ocorre principalmente nos macroporos e, assim, a maior macroporosidade do PC resultou em maior  $K_a$ . Feiza et al. (2008) investigaram a qualidade de um solo da Lituânia sob diferentes sistemas de manejo e verificaram que o preparo reduzido e o SPD não asseguraram uma  $K_a$  adequada no estágio final do crescimento da cultura, eles encontraram maior  $K_a$  sob o sistema convencional de manejo do solo.

Um solo com  $K_a$  de  $1 \mu\text{m}^2$  ( $\log K_a=0$ ) é considerado impermeável, onde os poros de aeração estão bloqueados e não fazem parte do transporte convectivo do ar (McQueen & Shepherd, 2002). Essa condição foi observada na profundidade de 0,10–0,20 m no SPD, em condição próxima à saturação (-2 kPa) (Quadro 3). É possível encontrar  $K_a$  zero (ausência de fluxo) em um solo com porosidade elevada, caso todos os poros estejam preenchidos com água e, ou, estejam isolados (não conectados). Também é possível haver  $K_a$  próximo de zero se os poros apresentarem tamanho muito reduzido, situação frequentemente encontrada em solos com conteúdo elevado de argila (Roseberg & McCoy, 1992).

O índice de continuidade de poros  $K_I$  também apresentou distribuição log-normal, de forma que todas as análises posteriores foram executadas usando a transformação  $\log_{10}$  para cada amostra

individualmente. Os dados de  $K_I$  apresentaram interação entre os tratamentos de manejo e a profundidade de amostragem em todos os potenciais mátricos aplicados (Quadro 3). Para o SPD, observou-se maior continuidade ou menor tortuosidade dos poros na camada superficial no intervalo de umidade avaliado, enquanto no PC essa maior continuidade foi observada até o potencial -10 kPa; a partir daí, essa diferença foi suprimida.

Segundo Groenevelt et al. (1984), o cálculo da razão entre a  $K_a$  e a  $\epsilon_a$  ( $K_I$ ) é uma técnica útil para determinar se as diferenças na  $K_a$  podem ser atribuídas somente às diferenças na  $\epsilon_a$ , ou se elas podem ser atribuídas a outros aspectos geométricos do espaço poroso preenchido com ar, como a distribuição do tamanho, tortuosidade e continuidade dos poros. Solos com diferentes  $K_a$ , mas com valores similares de  $K_I$ , indicam similar distribuição de tamanho e continuidade de poros. Dessa forma, comparando os valores de  $K_I$  entre os sistemas de manejo, nas duas profundidades de amostragem, percebe-se que os sistemas de manejo não diferiram quanto à continuidade dos poros na camada superficial (0,0–0,10 m) e, na camada subsequente, foi maior no PC.

As raízes e a atividade biológica são os principais responsáveis pela criação de poros contínuos e alongados no solo. Ressalta-se que, no momento da coleta de amostras, a cultura instalada era o milho e

a distribuição do seu sistema radicular apresentava-se similar entre os dois sistemas de manejo avaliados. Visualmente, observou-se atividade biológica mais intensa no SPD, porém esta não foi eficiente para superar a maior porosidade criada pelo revolvimento do solo no PC (0–0,20 m). Schjønning & Rasmussen (2000), em um solo franco-siltoso, notaram que houve redução na continuidade dos poros na camada superficial (0–0,20 m) para diferentes solos sob semeadura direta, porém, abaixo de 0,20 m, houve aumento na continuidade dos macroporos. Possivelmente, a presença de poros mais contínuos no tratamento SPD, devido à atividade biológica mais intensa, seria verificada abaixo da camada arável, ou seja, abaixo de 0,20 m.

A  $K_a$  também foi relacionada com a  $\varepsilon_a$  por um modelo exponencial (Equação 4), obtendo-se as constantes  $M$  e  $N$ . O modelo ajustou adequadamente os dados ( $R^2 > 0,88$ ), conforme demonstrado pela representação log-log na figura 3. A inclinação da reta ( $N$ ) da relação log-log entre  $K_a$  e  $\varepsilon_a$  também é um índice de continuidade de poros e mostra a porcentagem de abertura dos caminhos dos poros contínuos disponíveis para o fluxo de ar com o aumento da  $\varepsilon_a$ . A  $N$  foi maior no PC em relação ao SPD (Quadro 4), mas diferiu de  $K_I$ , o qual indicou a presença de poros mais contínuos na profundidade de 0,10–0,20 m nos dois sistemas de manejo.

Os valores de  $N$  para o solo sob PC foram semelhantes aos encontrados por Ball et al. (1988) em solo arado, porém esses autores reportaram maior  $N$  sob semeadura direta com valores mais altos do que os aqui obtidos para SPD. Os valores de  $N$  para a profundidade de 0–0,10 m também foram menores do que os encontrados por Ahuja et al. (1984), os quais encontraram  $N$  correspondente à constante de Kozeny-Carman na faixa de 4 a 5 quando relacionaram a condutividade hidráulica e a macroporosidade do solo. Assim, infere-se que a taxa de abertura de caminhos de poros contínuos disponíveis para o fluxo de água com o aumento do conteúdo de água é maior do que a taxa de abertura de caminhos similares disponíveis para o fluxo de ar com o aumento da porosidade de aeração. Na camada de 0,10–0,20 m, os valores foram semelhantes aos encontrados por esses autores (Ahuja et al., 1984).

Um aumento em  $N$  com o aumento no conteúdo de argila para manejo de solos similares foi avaliado por Schjønning et al. (1999). Esses autores mencionaram que maior valor de  $N$  pode ser interpretado como solo de estrutura complexa. Então, um  $N$  significativamente maior ( $N=2,82$ ) para o PC em relação ao SPD ( $N=1,83$ ) na camada superficial, provavelmente, indica uma diferença na complexidade da estrutura do solo nessa camada. Entretanto, em profundidade (0,10–0,20 m), essa diferença não foi significativa.

A continuidade de poros determinada pela relação logarítmica entre  $K_a$  e  $\varepsilon_a$  apresentou comportamento inverso ao daquela determinada pela razão entre essas

duas variáveis ( $K_I$ ). O primeiro método revelou poros supostamente mais contínuos na profundidade de 0,0–0,10 m, enquanto maior continuidade foi observada em 0,10–0,20 m quando determinada pelo segundo método. No entanto, nos dois métodos, o SPD apresentou menor continuidade ou maior tortuosidade em relação ao PC.

A análise de variância dos dados de  $\varepsilon_b$ , mostrou que na camada superficial, o PC apresentou maior volume de poros bloqueados (4,5 %); o inverso ocorreu na camada de 0,10–0,20 m, onde o volume de poros indisponível para o fluxo de ar foi maior no SPD (8,37 %) (Quadro 4). Utilizando o mesmo modelo da equação aqui empregada para um solo franco-argiloso na Escócia, Ball et al. (1988) estimaram volumes de  $\varepsilon_b$  na faixa de 0 a 3,6 %, com os maiores valores para o solo sob semeadura direta.

Os valores de  $N$  apresentados foram calculados com base na média da regressão de cada amostra individualmente, cada qual com seis pontos equivalentes às médias de  $K_a$  e  $\varepsilon_a$  em cada  $\psi_m$ . No entanto, outra abordagem pode ser utilizada, obtendo-se o intercepto e a inclinação da reta da relação log-log entre  $K_a$  e  $\varepsilon_a$  com todos os valores em cada potencial, em ambos os sistemas e profundidades (Figura 4).

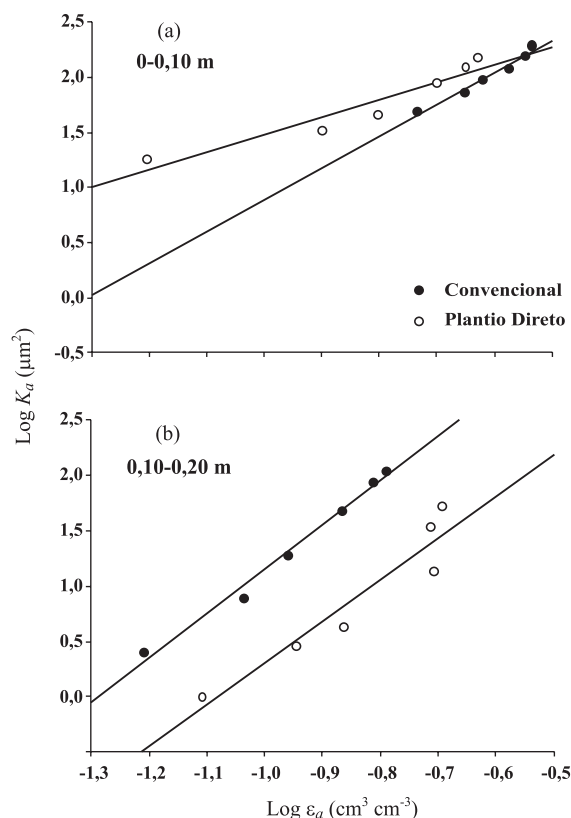
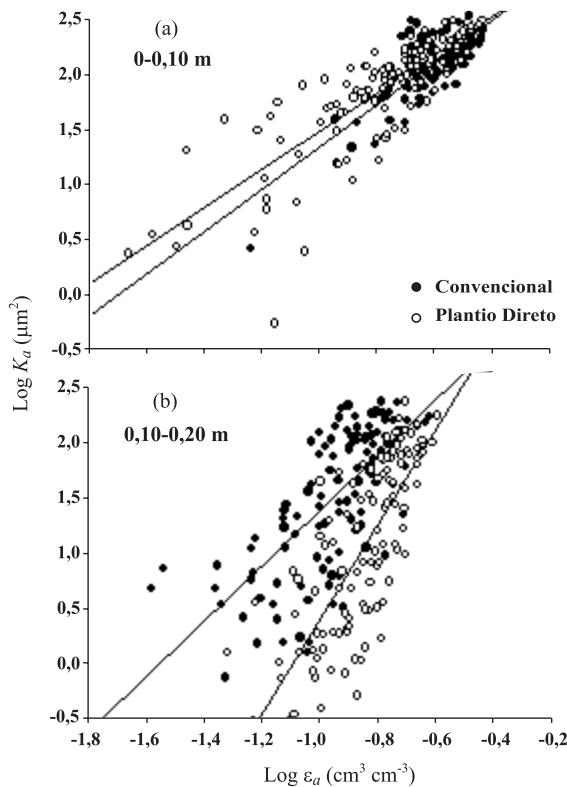


Figura 3. Relação logarítmica entre  $K_a$  e  $\varepsilon_a$  de um Latossolo Vermelho distrófico para dois sistemas de manejo do solo e duas profundidades. Cada ponto representa a média das 20 amostras de cada tratamento nos seis potenciais mátricos (-2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa).

**Quadro 4. Médias dos parâmetros da regressão do modelo  $\log K_a = \log M + N \log \epsilon_a$  e porosidade bloqueada,  $\epsilon_b$ , no Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD), em duas profundidades de amostragem**

| Profundidade | PC          |             |                |              | SPD         |             |                |              |
|--------------|-------------|-------------|----------------|--------------|-------------|-------------|----------------|--------------|
|              | Log M       | N           | R <sup>2</sup> | $\epsilon_b$ | Log M       | N           | R <sup>2</sup> | $\epsilon_b$ |
| m            | % v/v       |             |                |              |             |             |                |              |
| 0,0 –0,10    | 3,78 (0,63) | 2,82 (0,79) | 0,89           | 4,50 (1,79)  | 3,19 (0,55) | 1,83 (0,93) | 0,88           | 2,18 (2,45)  |
| 0,10–0,20    | 5,48 (1,35) | 4,50 (1,81) | 0,93           | 5,79 (3,04)  | 4,37 (1,11) | 4,10 (1,47) | 0,92           | 8,37 (3,17)  |

Valores entre parênteses representam  $\pm 1$  erro-padrão da média.



**Figura 4. Relação logarítmica entre  $K_a$  e  $\epsilon_a$  de um Latossolo Vermelho distrófico para dois sistemas de preparo do solo e duas profundidades. Os pontos representam os valores em seis potenciais mátricos (-2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa).**

Calculado dessa maneira houve uma redução no ajuste dos dados ( $R^2$ ) (Quadro 5). No entanto, obtido desse modo, o índice  $N$  de continuidade foi significativamente diferente nos dois sistemas e nas duas profundidades ( $p < 0,05$ ). O PC continuou apresentando maior  $N$  em superfície, porém na camada subsuperficial a continuidade de poros foi significativamente maior no SPD. O volume de poros bloqueados ( $\epsilon_b$ ) estimado com esses novos valores de intercepto ( $M$ ) e slope ( $N$ ) seguiram a mesma tendência da estimativa anterior.

### CONCLUSÕES

1. Com base na determinação da permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) e na derivação de índices de continuidade de poros ( $K_l$  e  $N$ ), não foi possível comprovar a hipótese de que o SPD resulta na formação de poros mais contínuos.
2. O revolvimento do solo sob PC alterou a porosidade, principalmente a macroporosidade, e o fluxo de ar ocorreu em maior extensão do que no SPD. Assim, o solo sob PC exibiu maior  $K_a$  nas duas profundidades avaliadas.
3. A continuidade de poros avaliada pela razão entre  $K_a$  e  $\epsilon_a$  ( $K_l$ ) não diferiu entre os dois sistemas de manejo para a camada de 0,0–0,10 m, mas foi maior para o PC na profundidade de 0,10–0,20 m.
4. O índice de continuidade  $N$ , obtido pela equação de Kozeny-Carman, foi diferente quando determinado

**Quadro 5. Parâmetros da regressão do modelo  $\log K_a = \log M + N \log \epsilon_a$  e porosidade bloqueada,  $\epsilon_b$ , para o Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (PC) e sistema plantio direto (SPD), em duas profundidades de amostragem**

| Profundidade | PC    |      |                |              |     | SPD   |      |                |              |     |
|--------------|-------|------|----------------|--------------|-----|-------|------|----------------|--------------|-----|
|              | Log M | N    | R <sup>2</sup> | $\epsilon_b$ | n   | Log M | N    | R <sup>2</sup> | $\epsilon_b$ | n   |
| m            | % v/v |      |                |              |     |       |      |                |              |     |
| 0,0 –0,10    | 3,13  | 1,84 | 0,64           | 1,97         | 120 | 2,85  | 1,32 | 0,63           | 0,70         | 120 |
| 0,10–0,20    | 3,91  | 2,69 | 0,62           | 3,53         | 120 | 4,38  | 4,10 | 0,66           | 8,54         | 120 |

Valores entre parênteses representam  $\pm 1$  erro-padrão da média.



para cada amostra individualmente (n=6) e com base em todas as observações (n=120). Os dois métodos revelaram poros mais contínuos no PC em superfície; contudo, o primeiro não indicou diferença na camada de 0,10–0,20 m, enquanto o segundo resultou em maior continuidade de poros nessa profundidade para o SPD.

## LITERATURA CITADA

- AHUJA, L.R.; NANEY, J.W.; GREEN, R.E. & NIELSEN, D.R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:699-702, 1984.
- ANDRÉN, O. & LAGERLÖF, J. Soil fauna (Microarthropods, Enchytraeids, Nematodes) in Swedish agricultural cropping systems. *Acta Agric. Scand.*, 33:33-52, 1983.
- BALL, B.C.; LANG, R.W.; ROBERTSON, E.A.G. & FRANKLIN, M.F. Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20 and 25 years of conventional tillage or direct drilling. *Soil Tillage Res.*, 31:97-118, 1994.
- 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.
- 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: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. 1358p.
- BOWEN H.D.; AYERS P. & SALYANI, M. Air permeability as an aeration criterion. In: CONFERENCE ASAE, St. Joseph, 1983. *Proceedings...* St. Joseph, ASAE, 1983.
- BRAUNACK, W.A. & DEXTER, A.R. Soil aggregation in the seedbed: a review. II. Effect of aggregate sizes on plant growth. *Soil Tillage Res.*, 14:281-98, 1989.
- CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.
- 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.
- DA 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.
- DESJARDINS, T.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F. & CERRI, C.C. Distribution du carbone total et de l'isotope <sup>13</sup>C dans des sols ferrallitiques du Brésil. *Sci. du Sol*, v.29, p.175-187, 1991.
- DOUGLAS, J.T.; GOSS, M.J. & HILL, D. Measurements of pore characteristics in a clay soil under ploughing and direct drilling, including use of a radioactive tracer (<sup>144</sup>Ce) technique. *Soil Tillage Res.*, 1:11-18, 1980.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa Produção de Informação, 2006. 306p.
- FEIZA, V.; FEIZIENĖ, D. & KADPIENĖ, G. Agro-physical properties of *Endocalcari-pihypogleyic Cambisol* arable layer in long-term soil management systems. *Pemės Ūkio Mokslai*, 15:13-23, 2008.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. Part 1. p.383-411.
- GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. 1358p.
- GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D. & GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. *Geoderma*, 34:101-114, 1984.
- HORNE, D.J. & SOJKA, R.E. Aeration: Tillage effects. In: LAL, R., ed. *Encyclopedia of soil science*. 2.ed. New York, Dekker, 2006. p.36-39.
- KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 11:93-99, 1946.
- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1: p.635-662.
- KROULIK, M.; KUMHALA, F.; HULA, J. & HONZÍK, I. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. *Soil Tillage Res.*, 105:171-175, 2009.
- LAL, R. Soil management in the developing countries. *Soil Sci.*, 165:57-72, 2000.
- LIPIEC, J. Soil physical properties and crop growth in relation to soil compaction. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 93:21-30, 1992.
- LIPIEC, J. & GLINSKI, J. Field soil compaction: effects on soil physical properties and stomatal resistance of wheat. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM "SOIL, HUMAN AND ENVIRONMENT INTERACTIONS", Beijing, 1997. *Proceedings...* Beijing, China Science and Technology Press, 1997. p.422-427.
- MCKENZIE, B.M. & DEXTER, A.R. Methods for studying the permeability of individual soil aggregates. *J. Agric. Eng. Res.*, 65:23-28, 1996.

- McQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. *Soil Tillage Res.*, 25:217-230, 2002.
- MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P. & KAY, B.D. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil Tillage Res.*, 64:125-135, 2002.
- NIELD, D. & BEJAN, A. *Convection in porous media*. 3.ed. New York, Springer, 2006. 643p.
- PHILLIPS, R.E. & KIRKHAM, D. Soil compaction in the field and corn growth. *Agron. J.*, 54:29-34, 1962.
- POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; YAMAGUCHI, T.; SCHJØNNING, P. & HANSEN, J.A. Predicting soil-water and soil-air transport properties and their effects on soil-vapor extraction efficiency. *Ground Water Monit. R.*, 19:61-70, 1999.
- RYDBERG, T. *Studies in ploughless tillage in Sweden 1975-1986*. Uppsala, Division of Soil Management, 1987. 35p. (Report, 76)
- ROSEBERG, R.J. & McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:969-974, 1990.
- STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J. & BALL, B.C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.167-190.
- SCHJØNNING, P.; THOMSEN, I.K.; MØBERG, J.P.; JONGE, H.; KRISTENSEN, K. & CHRISTENSEN, B.T. Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma*, 89:177-198, 1999.
- SCHJØNNING, 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. *Europ. J. Soil Sci.*, 53:331-339, 2002.
- SCHJØNNING, P. & RASMUSSEN, K.J. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil Tillage Res.*, 57:69-82, 2000.
- SAS Institute. *SAS: User's guide: Statistics*. 9.ed. Cary, 2002.