

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho
sob plantio direto e preparo convencional**

Sueli Rodrigues

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

**Piracicaba
2009**

Sueli Rodrigues
Engenheiro Agrônomo

Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob plantio direto e preparo convencional

Orientador:
Prof. Dr **ALVARO PIRES DA SILVA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Piracicaba
2009

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Rodrigues, Sueli
Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob plantio direto e preparo convencional /
Sueli Rodrigues. - - Piracicaba, 2009.
66 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Aeração do solo 2. Latossolos 3. Permeabilidade do solo 4. Plantio direto 5. Preparo do solo I. Título

CDD 631.5
R696p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

A DEUS incondicionalmente, pelas dificuldades que me fortaleceram, pela sabedoria para resolver os problemas, pelos trabalhos que me fizeram prosperar, pelas pessoas amadas que sempre me ajudaram e por ter me oferecido tudo que precisei através de oportunidades.

DEDICO

Aos meus pais, Ademir e Iracilda, pelo apoio, confiança e amor que sempre me dedicaram. Aos meus irmãos, Claudinei e Edson, pelo companheirismo e amizade compartilhados.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Expresso minha sincera gratidão,

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela oportunidade concedida para a realização do Curso de Mestrado e do presente trabalho;

Ao Professor Dr. Álvaro Pires, pela valiosa orientação e apoio;

A Professora Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola, pela valiosa colaboração na realização do trabalho;

Ao Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR, pela concessão da área de estudo;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de estudos;

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para esse acontecimento, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 DESENVOLVIMENTO	19
2.1 Revisão bibliográfica	19
2.1.1 Fatores que afetam o crescimento das plantas	19
2.1.2 Aeração do solo	21
2.1.3 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar	22
2.2 Material e métodos	30
2.2.1 Caracterização da área experimental	30
2.2.2 Amostragem	31
2.2.3 Análises	32
2.2.3.1 Permeabilidade do solo ao ar	32
2.2.3.2 Índices de continuidade dos poros	34
2.2.3.3 Densidade do solo, densidade de partícula, umidade, porosidade do solo e carbono orgânico	35
2.2.4 Análise dos dados	36
2.3 Resultados e discussão	36
2.3.1 Textura e densidade do solo	36
2.3.2 Porosidade do solo	38
2.3.3 Densidade do solo	42
2.3.4 Permeabilidade do solo ao ar	44
2.3.5 Índices de continuidade	48
3 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	57

RESUMO

Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob plantio direto e preparo convencional

A permeabilidade ao ar (K_a) pode ser utilizada para avaliar alterações que ocorrem na estrutura do solo em virtude 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 contínuos e melhor condição de aeração no solo. O objetivo do estudo foi avaliar, por meio da K_a , porosidade de aeração (ε_a) e índices de continuidade de poros (K_l e N), a aeração em um Latossolo Vermelho submetido ao preparo do solo convencional (PC) e plantio direto (PD). Amostras de solo indeformadas foram coletadas em cada sistema nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m em área experimental do Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR, no município de Ponta Grossa, Paraná. A K_a foi medida pelo método da carga decrescente em seis potenciais mátricos, -2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa. A macroporosidade e a K_a foi maior no PC nas duas camadas avaliadas. A continuidade de poros avaliada pela razão entre K_a e ε_a (K_l) foi similar entre os sistemas na camada superficial e foi maior para o PC em subsuperfície. O índice de continuidade N , referente ao coeficiente angular da relação log-log entre K_a e ε_a foi diferente quando determinado para cada amostra individualmente ($n=6$) e quando obtido com todas as observações ($n=120$). Os dois métodos revelaram poros mais contínuos no PC em superfície. Na camada de 0,10-0,20 m o primeiro ($n=6$) não indicou diferença de continuidade de poros entre os sistemas, enquanto o segundo ($n=120$) resultou em uma maior continuidade de poros nesta profundidade no PD.

Palavras-chave: Aeração do solo; Sistemas de preparo; Permeabilidade ar; Continuidade de poros

ABSTRACT

Soil air permeability in a Rhodic Hapludox under no-tillage and conventional tillage

Air permeability (K_a) can be used for assessing soil structure changes due tillage systems. This study tested the hypothesis that the less soil disturbance under no-tillage result in continuous pores and better soil aeration conditions. The objective of this study was to evaluate a Rhodic Hapludox aeration dynamics, by measuring K_a , air-filled porosity (ϵ_a) and pore continuity indices (K_I and N), under conventional tillage (CT) and no-tillage (NT). Undisturbed soil cores were collected in each systems at depths of 0-0,10 and 0,10-0,20 m in Parana Agronomic Institute research farm - IAPAR, in Ponta Grossa, Paraná. K_a was determined using falling pressure method in six soil water potentials, -2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa. The soil macroporosity and K_a was higher in CT in both depths. The pore continuity assessment by ratio between K_a and ϵ_a (K_I) was similar between the systems in the top layer and was higher at CT at depth of 0,10-0,20 m. The continuity index N , relative to the slope from the log-log relationship between K_a and ϵ_a was different when calculated for each core individually (n=6) or obtained including all data for each tillage (n=120). The two methods revealed a more continuous pores in CT in the top layer. At depth of 0,10-0,20 m the first (n=6) did not indicate pore continuity difference between the systems, while the second resulted in better pore continuity in NT at this depth.

Keywords: Soil aeration; Tillage systems; Air permeability; Pores continuity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem de satélite da área avaliada. Estação experimental do IAPAR, no município de Ponta Grossa-PR (2008)	31
Figura 2 - Equipamento utilizado para determinar a permeabilidade do solo ao ar em amostras de solo indeformadas	33
Figura 3 - Principais características da relação \log (conteúdo volumétrico de ar, ϵ_a) – \log (permeabilidade ao ar, K_a); slope N , intercepto com o eixo \log (K_a), M e o limite do conteúdo de ar, ϵ_b	35
Figura 4 - Distribuição dos valores de densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (C) e plantio direto (PD), nas profundidades de 0,0-0,10 m (1) e 0,10-0,20 m (2)	42
Figura 5 - Valores médios de densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional e sistema plantio direto, nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%)	44
Figura 6 - Valores médios de porosidade de aeração (ϵ_a) em função do conteúdo volumétrico de água (θ) nos potenciais de -2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa nos sistemas de manejo convencional e plantio direto, em duas profundidades.....	47
Figura 7 - Valores médios do \log da permeabilidade ao ar (K_a) de um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto, nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%).....	49
Figura 8 - Valores médios do \log do índice de continuidade de poros, K_l , derivado da razão entre permeabilidade ao ar e porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto, nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%).....	49
Figura 9 - Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar (K_a) e porosidade de aeração (ϵ_a) de um Latossolo Vermelho distrófico para dois sistemas de preparo 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, -100 kPa)	51
Figura 10 - Valores médios do parâmetro N , do modelo: $\log K_a = \log M + N \log \epsilon_a$, para um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto,	52

nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%)

- Figura 11 - Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar (K_a) e porosidade de aeração (ϵ_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, -100 kPa)..... 53
- Figura 12 - Valores médios da porosidade bloqueada ($10^{-\log(M/N)}$) para um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto, nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%) 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros físicos do Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional e sistema plantio direto, no município de Ponta Grossa – PR	37
Tabela 2 - Desdobramento da interação manejo do solo x profundidade para carbono orgânico, $F(1,76)=21,83$; $p = <0,0001$ e densidade de partícula, $F(1,76)=20,69$; $p = <0,0001$	38
Tabela 3 - Desdobramento da interação manejo do solo x profundidade para macroporosidade, $F(1,76)=18,62$; $p = <0,0001$; microporosidade, $F(1,76)=35,45$; $p = <0,0001$ e porosidade total $F(1,76)=4,89$; $p = 0,03$	41
Tabela 4 - Parâmetros da regressão do modelo $\log K_a = \log M + N \log \varepsilon_a$ e porosidade bloqueada, $10^{(-\log M)/N}$, para um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto, nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m	53

1 INTRODUÇÃO

As plantas respiram e deste modo, consomem oxigênio (O_2) e produzem dióxido de carbono (CO_2). Para um ótimo metabolismo da planta, é necessário que haja uma adequada troca desses gases entre as raízes e o ar atmosférico. Essa troca de gases é denominada de aeração do solo. Além do conteúdo de água e nutrientes, o ar do solo é um dos fatores mais importantes que afetam sua fertilidade. A influência do ar do solo sobre as plantas é complexo e engloba efeitos diretos e indiretos. Os primeiros estão relacionados com os efeitos fisiológicos do O_2 e CO_2 , que são componentes básicos do ar do solo. Os últimos referem-se às numerosas mudanças que ocorrem no solo sob a influência desses dois gases. Quaisquer dessas mudanças acarretam em efeitos sobre as plantas.

A aeração ou a permeabilidade ao ar do solo, sofre modificações sob diferentes condições de umidade ou em resposta a diferentes práticas culturais. Poucas práticas de manejo tem o potencial de impacto sob a aeração do solo tanto diretamente quanto rapidamente como o preparo para cultivo. O preparo é uma atividade que atua diretamente sobre a estrutura do solo e sua execução tem por objetivo modificar ou melhorar suas propriedades físicas incluindo a aeração. No entanto, um manejo inadequado pode acarretar em deterioração da estrutura, como a redução do espaço poroso do solo, limitando o processo de aeração. Uma aeração limitada causa efeitos consideráveis na produtividade incluindo a alteração da dinâmica de nutrientes, mudança das reações químicas/biológicas de oxidativas para redutivas, o prejuízo ao crescimento das plantas e as mudanças no equilíbrio dos gases afetando as atmosferas do solo e do ambiente.

Os efeitos do preparo têm sido largamente estudados, mas com pouca ênfase na aeração do solo. Apesar da densidade do solo, conteúdo de umidade, e distribuição do tamanho dos poros estarem relacionados com a aeração, podendo assim, serem indicativos do estado desse processo no solo, suas relevâncias diretas a um entendimento sutil da aeração do solo é problemático. Por exemplo, medidas do espaço poroso do solo fornecem poucas informações a respeito da continuidade dos poros, tortuosidade, ou estabilidade, enquanto estes efeitos são largamente integrados nas medidas de taxa de difusão de oxigênio.

O transporte de água e ar através do solo é determinado pelas características dos poros. Um entendimento mais completo do arranjo desses poros pode ser obtido a partir de medidas do transporte de ar e água no solo.

A permeabilidade ao ar, que se refere à capacidade do solo de permitir que o ar passe através de seus horizontes, pode ser usada para determinar as características dos poros e é um dos parâmetros mais importantes que controlam o transporte dos gases, sendo maior em solos estruturados do que em solos não estruturados com a mesma porosidade de aeração. Isto significa que a permeabilidade ao ar é sensível às mudanças na estrutura do solo e pode ser utilizada para avaliar as alterações que ocorrem na estrutura, resultantes de diferentes práticas de manejo.

As modificações na estrutura do solo podem ser diferentes de acordo com o tipo de manejo efetuado. O preparo convencional, utilizando maquinários com potência e carga cada vez maiores, tem impacto mais pronunciado nos solos, principalmente em solos argilosos, sujeitos a uma maior compactação, aumento de densidade e consequentemente maior redução na aeração da camada mobilizada. Os preparos conservacionistas, como o plantio direto, pelo menor revolvimento, podem propiciar melhores condições físicas do solo para o desenvolvimento das plantas. Uma aeração mais adequada poderia ser encontrada em áreas sob este sistema de cultivo principalmente devido à formação de canais biológicos contínuos formados por microrganismos, que são mais abundantes no plantio direto em comparação ao preparo convencional.

No Brasil os estudos de permeabilidade dão ênfase em descrever a condutividade hidráulica do solo como uma função do conteúdo de água, havendo grande carência de estudos da dinâmica de aeração dos solos brasileiros.

A hipótese deste estudo é que o sistema plantio direto, pelo menor revolvimento do solo, resulta na formação de poros mais contínuos e consequentemente em uma melhor condição de aeração do solo. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a aeração de um Latossolo Vermelho, sob sistema plantio direto e preparo convencional, quantificando a permeabilidade ao ar, a porosidade de aeração e a continuidade dos poros.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Fatores que afetam o crescimento das plantas

Definir um solo como sendo ideal fisicamente é um trabalho difícil, pois variações físicas de diferentes tipos e natureza ocorrem no solo ao longo do tempo tanto em superfície como em profundidade. Como exemplo tem-se o abastecimento de água e ar que variam sucessivamente com os ciclos de umedecimento e secagem em função da ocorrência de chuvas e estiagens. Um solo com propriedades físicas favoráveis deve apresentar certos atributos como, boa retenção de água, boa aeração, temperatura adequada e ausência de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular.

Os fatores que afetam o crescimento das plantas podem ser divididos em fatores diretos e indiretos. Água, temperatura, resistência mecânica e oxigênio, constituem os fatores que afetam diretamente o crescimento das plantas enquanto a densidade do solo, textura, agregação, estabilidade de agregados e distribuição do tamanho de poros exercem influências indiretas (LETEY, 1985).

Dentre esses fatores, a água tem um papel fundamental no desenvolvimento das plantas. A água do solo afeta o crescimento das plantas diretamente pelo seu efeito sobre o estado da água na planta e indiretamente por sua influência na aeração, temperatura, transporte de nutrientes e absorção. Assim, a manutenção da umidade do solo sem alteração na sua aeração, ocasiona um maior consumo e melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas.

A temperatura do solo também é um importante fator para o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois afeta a germinação de sementes, o desenvolvimento radicular e vegetal, as atividades dos microorganismos, a difusão de solutos e gases, as reações químicas, dentre outros processos que ocorrem no solo.

Outro fator, que como mencionado, está diretamente relacionado com o crescimento e desenvolvimento das plantas, é a resistência mecânica do solo à penetração. A resistência à penetração pode ser utilizada para avaliar o efeito de diferentes sistemas de manejo (BENGHOUGH; MULLINS, 1990; DIAS Jr.; PIERCE, 1996). Essa resistência geralmente aumenta com a compactação e com o aumento da umidade do solo, sendo indesejável em certos

limites para o crescimento das plantas, o que pode ocasionar uma redução no desenvolvimento radicular (BENGHOUGH; MULLINS, 1990). Várias pesquisas têm mostrado que a resistência mecânica é um importante fator de stress no solo, visto que ela pode controlar o crescimento da planta reduzindo a taxa de alongamento das raízes (TAYLOR; RATLIFF, 1969; BOONE; VEEN, 1982; MATERECHERA; MLOZA-BANDA, 1997; ZOU et al., 2001).

O O₂ presente na atmosfera do solo, assim como o CO₂ fazem parte da respiração das raízes das plantas e microrganismos. A maioria das plantas não conseguem translocar o O₂ de suas folhas para suas raízes a uma taxa requerida para a respiração. Para que o processo de respiração das raízes seja adequado, é necessário que o próprio solo seja adequadamente aerado. Isto permitirá a troca do O₂ e CO₂ entre o solo e a atmosfera. O fator predominante que controla a disponibilidade de O₂ na zona radicular não é, como se possa presumir, o seu volume presente, mas sim a taxa de difusão de oxigênio (TDO) e liberação de CO₂. Letey (1985) propõe uma TDO de 0,2 mg cm⁻² como o mínimo requerido para um crescimento radicular adequado. Para fins práticos, considera-se o valor de porosidade de aeração (ϵ_a) de 10%, ou seja, 10% da porosidade total do solo, livre de água, como o valor mínimo para garantia de uma TDO adequada para um desenvolvimento vegetal satisfatório (BETZ et al., 1998; GRABLE; SIEMER, 1968; HALL et al., 1994; MCKENZIE; MCBRATNEY, 2001; SILVA et al., 1994; ZOU et al., 2000). A redução da porosidade de aeração para valores inferiores a 10% causam limitações em umidades iguais ou menores do que a da capacidade de campo, podendo ser um fator limitante para o pleno desenvolvimento das plantas.

Os fatores indiretos que afetam o crescimento das plantas são fortemente relacionados. A textura, definida pela proporção relativa das classes de tamanho de partículas de um solo (areia, silte e argila), não incluindo a fração orgânica e a estrutura, que se refere ao arranjo dessas partículas em unidades denominadas de agregados influenciam largamente a infiltração, capacidade de retenção e permeabilidade do solo. A porosidade também depende da textura e estrutura do solo. Solos de textura fina (com predomínio da fração argila) apresentam poros menores, porém, mais abundantes do que solos de textura grosseira (predomínio de partículas maiores). A água é retida com maior intensidade nestes poros menores assim, solos de textura fina possuem maior capacidade de retenção de água. A degradação da estrutura do solo resultante principalmente do manejo inadequado por ocasião de práticas agrícolas e florestais,

afeta grandemente o espaço poroso do solo, podendo acarretar em efeitos deletérios às propriedades físicas do solo.

2.1.2 Aeração do solo

A aeração do solo se refere à capacidade do solo de armazenar e transmitir ar, particularmente os gases mais comuns encontrados no ar atmosférico, O_2 e CO_2 . A contínua absorção de O_2 e liberação de CO_2 pelas raízes das plantas são processos fundamentais para o seu crescimento, porque mantêm o O_2 na zona radicular ao nível necessário para a respiração das raízes e microrganismos. A circulação de ar dentro e fora da matriz do solo também regula a temperatura do solo (SHUKLA; LAL, 2006).

O processo de aeração é um importante aspecto da qualidade física do solo, pois a maioria das atividades biológicas no solo requer um fornecimento contínuo de O_2 . Por esta razão, é comum utilizar a atividade biológica como um indicador da qualidade ou sanidade do solo (WARKENTIN, 1995; WILSON; MALISZEWSKA-KORDYBACH, 2000). Diversos autores evidenciaram a importância da aeração como um fator limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, crescimento e produção das culturas em solos compactados (LETEY et al., 1962; GERIK et al., 1987; GLIŃSKI; LIPIEC, 1990; DOMŹAŁ et al., 1991; BOONE; VEEN, 1994; CARTER et al., 1994; CZYŹ; KUKIER, 1997; CZYŹ et al., 2001).

A respiração dos microrganismos e das raízes do solo é o principal processo que envolve o fornecimento de O_2 e CO_2 . Em um solo com boa aeração, a troca desses gases entre o solo e a atmosfera é suficientemente rápida para prevenir a deficiência de O_2 ou a toxicidade por excesso de CO_2 . A disponibilidade de O_2 nos solos é regulada principalmente por três fatores: (i) macroporosidade, definida pela textura e estrutura do solo; (ii) umidade, afetada pela proporção da porosidade do solo ocupada pelo ar; e (iii) consumo de O_2 pela respiração dos organismos, incluindo raízes e microrganismos. O termo 'aeração pobre' refere-se à condição na qual a disponibilidade de O_2 na zona radicular é insuficiente para sustentar o ótimo crescimento da maioria das plantas e microrganismos aeróbicos. Na maioria dos casos, a aeração torna-se um impedimento sério ao crescimento das plantas quando mais de 80 a 90% do espaço poroso está ocupado por água, deixando menos de 10 a 20% da porosidade ocupada por ar. A alta umidade do solo não somente reduz a aeração, mas, mais importante, a água bloqueia os caminhos pelos quais os gases realizariam a troca com o ar atmosférico. A compactação também pode reduzir

e/ou cessar as trocas gasosas, mesmo se o solo não estiver muito úmido e possuir uma grande porcentagem do espaço poroso ocupado por ar (BRADY; WEIL, 2002).

Apesar de ambos, O₂ e CO₂, estarem envolvidos no processo de respiração no solo, avaliações são realizadas mais frequentemente com relação ao O₂, supondo-se que a troca de CO₂ está adequada quando a troca de O₂ é adequada (LETEY, 1985). Em condições de campo a demanda anual de oxigênio é da ordem de milhares de quilogramas por hectare, sendo utilizado por processos como a oxidação microbiana da matéria orgânica e na respiração das raízes das plantas. A proporção desses dois processos varia amplamente (GLIŃSKI; STĘPNIEWSKI, 1985).

A quantidade e composição do ar do solo são determinadas pelo conteúdo de água a menos que o solo esteja em condição muito seca. O conteúdo de O₂ em um solo com boa aeração é maior do que a de um solo pobremente aerado. O último tem maiores concentrações de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), e óxido nitroso (N₂O) do que o ar atmosférico (SHUKLA; LAL, 2006). A disponibilidade de O₂ para as raízes das plantas não depende somente da sua concentração no ar do solo, mas das propriedades físicas e condições ao redor das raízes que governará a taxa de oxigênio que será transportado para as raízes. Propriedades como a porosidade de aeração, a densidade do solo e o tamanho dos agregados influenciam a atividade respiratória no solo indiretamente, através de sua influência no transporte de O₂ e CO₂. Reduzida porosidade de aeração (normalmente abaixo de 0,2 m³ m⁻³) acarreta em um decréscimo na atividade respiratória do solo, devido à distribuição insatisfatória de O₂ e o aparecimento de metabolismo anóxico em determinadas áreas do solo (GLIŃSKI; STĘPNIEWSKI, 1985).

Medidas das características dos poros, por influenciarem numerosas funções no solo, podem ser usadas para caracterizar a sua estrutura. Uma importante função dos poros consiste na infiltração e transmissão da água para as raízes das plantas, armazenamento de água no solo, abastecimento do lençol freático e redução dos riscos de erosão, além de manter uma adequada condição para a respiração das raízes e microrganismos.

2.1.3 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

O sistema poroso do solo não pode ser avaliado somente por seu volume ou distribuição do tamanho dos poros, mas também por sua capacidade de conduzir fluídos como água e gases. Essas funções dos poros são conhecidas como condutividade ou permeabilidade. A

condutividade é um parâmetro que representa a facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil do solo e atinge o seu valor máximo quando o solo se encontra saturado, sendo denominada de condutividade hidráulica do solo saturado (REICHARDT, 1990). A geometria e a continuidade dos poros preenchidos com água são as características que determinam a condutividade hidráulica saturada de determinado solo, portanto, ela é dependente da forma, quantidade, distribuição e continuidade desses poros. Já a permeabilidade ao ar (K_a) é definida como a facilidade com que o ar entra ou passa através de uma massa de solo. O movimento dos gases através de um meio poroso é governado por dois processos, pelo fluxo convectivo e o fluxo por difusão. Difusão é o mecanismo de troca de gases entre o solo e a atmosfera, resultante de gradientes de concentração estabelecido dentro do solo pela respiração dos microorganismos e raízes das plantas, pela produção de gases associados com as reações biológicas tais como fermentação, nitrificação, e denitrificação; e pela incorporação de materiais no solo tais como fumigantes, pesticidas e vários compostos químicos voláteis em locais de deposição resíduos tóxicos (ROLSTON; MOLDRUP, 2002).

O fluxo convectivo é o movimento das moléculas em resposta a gradientes de pressão. A capacidade de um material poroso (incluindo o solo) de conduzir ar por este processo em geral é denominada de permeabilidade ao ar (ou gás). O fluxo de gases através do solo é comparável ao da água, com certas restrições, pois o ar é compressível e dependente da densidade e viscosidade, a gravidade não afeta o fluxo de gás e este não é atraído por superfícies minerais. O fluxo convectivo segue a Lei de Darcy, que declara que a taxa do fluxo de um fluido através de uma coluna porosa é diretamente proporcional a um gradiente de pressão (BALL; SCHØNNING, 2002). O termo permeabilidade intrínseca foi introduzido por Reeve (1953) como um termo quantitativo para descrever a permeabilidade em termos da estrutura do solo e é independente do fluido utilizado para suas medidas. Teoricamente, para um meio poroso totalmente seco, K_a deveria ser igual a permeabilidade intrínseca. Dependendo do fluido utilizado, no entanto, valores para a permeabilidade intrínseca são frequentemente diferentes para determinado solo.

O fluxo convectivo é menos sensível as mudanças na temperatura do que o fluxo por difusão, apesar da temperatura ambiente, pressão e umidade o afetarem por suas influências na viscosidade do gás. Desvios do fluxo laminar ou viscoso ocorrem quando diferenças de pressão aplicadas em amostras com poros de raios grandes são suficientemente altas para dar

velocidade ao fluxo resultando em um número de Reynolds > 1 (BEAR, 1972; MCCARTHY; BROWN, 1992); sob essas condições, o fluxo torna-se turbulento.

A K_a é fortemente influenciada pelo conteúdo de água no solo. Ela alcança seu valor máximo em solos seco e progressivamente decresce a medida que o solo é umedecido até alcançar um valor de zero quando o solo está próximo ou na saturação. Isto é causado pela obstrução dos poros do solo por água. A maior redução na permeabilidade ocorre quando os macroporos, principais condutores de ar, são bloqueados. Reduções na K_a com o aumento do conteúdo de água também são influenciadas pelo tipo de solo, principalmente pelo efeito da estrutura do solo (SCHØNNING et al., 1999). A medida que o conteúdo de argila aumenta, a K_a decresce mais rapidamente com o aumento do conteúdo de água. Isto se deve principalmente ao desenvolvimento estrutural dos solos argilosos que dão origem a macroporos mais contínuos do que solos arenosos. Desta forma, é essencial determinar o conteúdo de água na determinação da K_a .

Para melhor entender os valores de K_a , é importante também conhecer a porosidade de aeração dos diferentes solos. Visto que o aumento da umidade do solo reduz o volume de poros preenchidos com ar, os canais que conduzem o fluxo de ar deveriam, da mesma forma serem reduzidos, juntamente com K_a . Taylor e Aschcroft (1972) determinaram que as medidas de K_a seriam melhoradas se fossem medidas como uma função do conteúdo de umidade mas, reconheceram a dificuldade de se fazer isso. Corey (1986) tirou conclusões similares.

A K_a é um dos parâmetros mais importantes em todas as simulações de fluxo de gases (SHAN et al., 1992; SHAN, 1995). Ela é comumente medida para permitir a previsão do fluxo de ar e também como indicadora de outras características do solo tais como a condutividade hidráulica (LOLL; MOLDRUP, 1999; POULSEN et al., 2001), compactação do solo (PHILLIPS; KIRKHAM, 1962), difusividade do gás (MOLDRUP et al., 2001), e variabilidade espacial (IVERSEN et al., 2003).

Os poros do solo podem ser caracterizados pelas medidas de K_a . Groenevelt et al. (1984) e Blackwell et al. (1990) empregaram a K_a e a macroporosidade para caracterizar o solo, incluindo a relação entre esses dois parâmetros para identificar mudanças na estrutura oriundas das práticas de manejo e atividade biológica. Roseberg e McCoy (1990) mediram a permeabilidade em diferentes conteúdos de água na e próximo a saturação para analisar o comportamento dos macroporos do solo. O conhecimento da permeabilidade também é útil na

modelagem de sistemas de extração de vapor do solo para a remediação de solos contaminados com compostos orgânicos voláteis (POULSEN et al., 1996; MOLDRUP et al., 1998).

Os fatores geométricos dos poros influenciam fortemente o fluxo de ar no solo, como revelado por análises teóricas (BEAR, 1972). Estes fatores geométricos incluem a porosidade total, distribuição do tamanho de poros, continuidade dos poros, tortuosidade e forma. Estudos utilizando valores de K_a avaliam as relações funcionais entre o fluxo e estes fatores geométricos (BALL, 1981; HAMBLIN; TENNANT, 1981; GROENEVELT et al., 1984; DOUGLAS et al., 1986; BALL et al., 1988). Pelo fato de K_a ser muito sensível a presença de poros com diâmetros maiores (BALL, 1981), pesquisadores tem tentado usar K_a para caracterizar os processos influenciados pelos macroporos, incluindo o potencial de enraizamento do solo (GROENEVELT et al., 1984), aeração (BOWEN et al., 1983b), densidade do solo (HOWARD; SINGER, 1981; BOWEN et al., 1983a), e estado da água (HAMBLIN; TENNANT, 1981; DOUGLAS et al., 1986). A dificuldade destas tentativas barrava na incapacidade da obtenção de medidas diretas ou na confiabilidade dos valores estimados para um ou mais dos fatores geométricos dos poros. No entanto, K_a pode ainda servir como uma ferramenta promissora para avaliar os fatores geométricos dos poros (COREY, 1986).

Técnicas de campo e de laboratório estão disponíveis e envolvem tanto fluxo em estado-estacionário como em estado- não-estacionário, apesar de medidas em estado-estacionário serem preferidas. A maioria dos métodos de campo são baseados nos mesmos princípios das medidas realizadas em laboratório; isto é, envolvem medidas das taxas de fluxo do ar através de uma coluna de solo.

Medir a K_a em campo é um procedimento desejável (VAN GROENEWOUD, 1968; GREEN; FORDHAM, 1975) mas a camada superficial do solo frequentemente possui estrutura anisotrópica, de modo que a variabilidade é muito grande e a distribuição irregular (MCINTYRE; TANNER, 1959) e a interpretação dos dados de campo podem ser difíceis (JANSE; BOLT, 1960). Consideráveis trabalhos tem sido realizados na tentativa de resolver os problemas associados com as medidas em campo, aumentando sua utilidade (DAVIS et al., 1994; FISH; KOPPI; 1994; IVERSEN et al., 2001, 2003; JALBERT; DANE, 2003). Todavia, muitos pesquisadores conduzem medidas de K_a em laboratório devido as variáveis dimensão e geometria serem mais facilmente definidas (IVERSEN et al., 2000; TARTAKOVSKY et al., 2000). Além disto, uma imagem mais detalhada da rede de poros pode ser obtida em laboratório realizando

medidas de K_a dentro de uma ampla faixa de potenciais mátricos (MOLDRUP et al., 2003). A K_a pode ser medida em laboratório de diversas maneiras (COREY, 1986; BALL; SCHJØNNING, 2002). A escolha do método usualmente é uma questão de conveniência, mas cada método tem suas próprias vantagens.

A K_a é reconhecida como um índice da estrutura do solo (DOBRIAKOV, 1952; EVANS; KIRKHAM, 1949; KIRKHAM, 1946;) e muitos equipamentos para sua determinação em campo tem sido descritos (DOBRIAKOV, 1952; EVANS; KIRKHAM, 1949; KIRKHAM, 1946).

Grover (1955) descreveu três permeâmetros de campo caracterizados por serem mais simples do que os descritos anteriormente, provido de uma câmara de ar que não requer fechamento de válvulas nem necessita de bombeamento de ar. Os três equipamentos seguiram o mesmo princípio geral, com pouca variação entre eles. O planejamento incorporou características de um gasômetro e consistiram de um flutuador, um reservatório de água anular e um pequeno tubo de entrada introduzido no solo. O flutuador, aberto na parte inferior, sustenta-se sobre a água no reservatório, formando uma câmara de ar. O tubo de entrada é afixado no solo e preso na parede interna do reservatório. O ar da câmara entra no solo passando pelo tubo, que forma a parede interna do reservatório, e através do tubo de entrada introduzido no solo. O flutuador cai a medida que o ar entra no solo. A taxa de queda é uma medida de permeabilidade. O reduzido tamanho da câmara de ar dos equipamentos (1 galão, equivalente a 3,78 litros) foi o seu principal diferencial em relação aos utilizados previamente (MATHY, 1940; EVANS; KIRKHAM, 1949). Devido ao reduzido tamanho da câmara de ar, os permeâmetros desenvolvidos eram muito menores e fáceis de manejar. O volume efetivo de ar fornecido por eles também foi maior do que o fornecido por equipamentos anteriores de tamanho similar. Cada um dos três permeâmetros foram planejados para um desses objetivos especiais: medir a permeabilidade a uma dada profundidade, medir a permeabilidade a uma dada profundidade e ser capaz de usar parte do mesmo equipamento para outros tipos de medidas físicas, sem perturbar o solo e, medir a permeabilidade de pequenas camadas, como crostas, ou camadas superficiais sedimentadas.

Pesquisadores, reconhecendo a importância da estrutura do solo para o movimento dos gases, construíram permeâmetros de ar onde gás comprimido passava diretamente pelo solo *in situ*, escapando para a atmosfera por caminhos não controlados (EVANS, 1965). Estas medidas realizadas em campo não são totalmente confiáveis, devido a incerteza no caminho do

fluxo, resultando em uma confiança pobre na K_a estimada. Para simplificar as medidas de K_a , permeâmetros de laboratório foram desenvolvidos com amostras de dimensões conhecidas e caminhos de fluxo mais controláveis (EVANS, 1965). O conteúdo volumétrico de água (θ) também foi controlado, equilibrando as amostras de solo a potenciais pré-determinados anterior as medidas de K_a .

Vários métodos tem sido propostos para medir o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado (KLUTE, 1965, 1972; KLUTE; DIRKSEN, 1986). O método do regime estacionário tem provado ser o mais simples (STONESTROM; RUBIN, 1989; SPRINGER et al., 1998). Kirkham (1946) e Evans e Kirkham (1949) avaliaram a estrutura do solo através da determinação da K_a em amostras de solo indeformadas, utilizando o método do regime estacionário.

Duas técnicas de regime estacionário tem sido propostas. Uma controla a carga hidráulica enquanto outra a descarga através da amostra (KLUTE; DIRKSEN, 1986). A técnica que controla a carga hidráulica é a mais comumente utilizada. Alguns autores trabalharam com variações deste método (COREY, 1957; KLUTE, 1965, 1972; KLUTE; DIRKSEN 1986). Alguns destes métodos foram desenvolvidos para medir o coeficiente de permeabilidade com respeito as fases líquida e gasosa simultaneamente. Outros métodos tem sido desenvolvidos para medir somente o coeficiente de permeabilidade com respeito a fase líquida.

Ball et al. (1981a) e Ball (1981b) avaliaram a K_a de amostras indeformadas de solo da superfície de um solo franco siltoso e franco arenoso, em cinco potenciais mátricos (-2, -5, -10, -20 e -100 kPa). A análise de regressão dos dados de permeabilidade e porosidade de aeração resultou em uma boa correção linear, com a K_a aumentando com o aumento da ε_a . Os altos valores de permeabilidade observados no solo franco siltoso foram atribuídos a presença de maior número de canais condutores (BALL, 1981b). Para melhor ilustrar a influência da estrutura, Ball et al. (1981) mostraram que houve uma redução de duas a três ordens de magnitude na K_a quando o solo foi triturado e peneirado. Os mesmos também constataram que para solos com ε_a semelhantes, a presença de macroporos aumentou a K_a .

Estudo da permeabilidade realizado por Shtykov e Daishev (1986) em solos com variação nos teores de areia e água, também resultaram em uma boa relação linear dos dados de permeabilidade e porosidade de aeração, para a areia fina, areia grossa, e solo siltoso, o silte argiloso exibiu grande variabilidade entre as amostras e conseqüentemente um baixo valor de R^2 .

Os autores verificaram que solos não estruturados com distribuição de tamanho de partículas mais finas resultaram em menor permeabilidade ao ar. Em todos os casos a permeabilidade aumentou com o aumento da porosidade de aeração.

Para caracterizar a relação entre a permeabilidade ao ar e porosidade de aeração, e o efeito de várias propriedades físicas sobre esta relação, McCarthy e Brown (1992) utilizaram uma série de solos com diferentes texturas, representando uma faixa de propriedades físicas. Os autores dividiram os solos em duas categorias: solos estruturados (> 20% de argila) e solos pobremente estruturados (< 20% de argila). Um permeâmetro de ar foi desenvolvido para estudar o fluxo de gás horizontal e vertical através de amostras indeformadas retiradas destes solos. A relação entre ϵ_a e K_a foi razoavelmente aproximada por uma equação linear em solos contendo <20% de argila. A equação linear foi única para cada solo e pareceu estar correlacionada com a estrutura e textura dos solos. Em geral, solos estruturados exibiram maiores permeabilidades do que solos pobremente estruturados. Este comportamento foi atribuído ao maior fluxo em canais interagregados característicos de solos estruturados. Em solos pobremente estruturados, os de textura mais fina foram menos permeáveis na direção horizontal do que na vertical devido a suas origens aluviais.

Iversen et al. (2001) desenvolveram um permeâmetro de ar portátil capaz de medir a permeabilidade ao ar *in situ* e em laboratório usando amostras de dois tamanhos (100 cm³ e 3140 cm³). O equipamento foi construído com base em modelos de permeâmetros anteriores (STEINBRENNER, 1959; VAN GROENEWOUD, 1968; GREEN; FORDHAM, 1975; FISH; KOPPI, 1994). O objetivo dos autores também foi testar o fator forma expresso por Liang et al. (1995) sob condições de campo para diferentes solos agrícolas. O permeâmetro desenvolvido atuou bem, e foi possível realizar medidas confiáveis nas três situações. Os resultados do estudo mostraram que é possível fazer medidas *in situ* confiáveis da K_a em solos estruturados e não estruturados usando o modelo do fator forma.

No Brasil os estudos de permeabilidade dão ênfase em descrever a permeabilidade do solo a água (condutividade hidráulica) como uma função do conteúdo de água (MARQUES, et al., 2008; JUHASZ, et al., 2006; SILVA, et al., 2005; SILVA; KATO, 1997), e pouca importância tem sido dada sobre a permeabilidade do solo ao ar como uma função do conteúdo de ar no solo. Medir a permeabilidade do solo é importante porque fornece informações valiosas sobre: (i) estrutura do solo, (ii) distribuição de tamanho de poros, (iii) mudanças na estrutura do

solo devido ao uso da terra e práticas de manejo; e (iv) condutividade hidráulica do solo saturado. Muitos estudos tem enfatizado a importância da porosidade de aeração para o bom crescimento das plantas e produção (ERIKSSON, 1982; GLINSKI; STEPNIEWSKI, 1985; GLINSKI; LIPIEC, 1990).

Permeabilidade ao ar e a porosidade de aeração tem sido relacionadas na tentativa de determinar diferenças na geometria dos poros em consequência das práticas de manejo (BALL, 1981b; HAMBLIN; TENNANT, 1981; GROENEVELT et al., 1984; BALL et al., 1988; BLACKWELL et al., 1990). Groenevelt et al. (1984) propôs avaliar as diferenças na geometria dos poros em amostras com diferentes K_a , comparando os valores de K_a dividido pela porosidade de aeração ou por seu quadrado (K_a/ε_a ou K_a/ε_a^2). Amostras que apresentassem diferenças na K_a mas valores similares de K_a/ε_a indicariam similar distribuição de tamanho e continuidade de poros, com cada quantidade adicional de espaço poroso geometricamente similar contribuindo proporcionalmente para K_a . De acordo com a Lei de Poiseuille, um aumento no tamanho dos poros resultaria em uma aumento ao quadrado na K_a . Assim, amostras com K_a distintas, mas com valores similares de K_a/ε_a^2 , indicariam diferenças na distribuição do tamanho dos poros, assumindo continuidade de poros similar (GROENEVELT et al., 1984). Diferenças na continuidade dos poros, porém, resultaria em diferenças nos dois parâmetros acima. Assim, estes parâmetros podem ser considerados índices de continuidade de poros (BALL et al., 1988).

Outra abordagem para analisar as mudanças na geometria dos poros é o uso da forma generalizada da equação de Kozeny-Carman relacionando a K_a com a ε_a , na forma dada por Ball et al. (1988) que consideraram o slope da equação (N) como sendo um índice de continuidade dos poros, pois reflete o aumento na K_a com o aumento na ε_a ou o decréscimo na tortuosidade dos poros e área superficial com o aumento da fração de poros disponíveis para o fluxo (AHUJA et al., 1984, BALL et al., 1988).

Estes índices foram empregados por Roseberg e McCoy (1992) na tentativa de descrever quantitativamente diferenças na macroporosidade e geometria dos macroporos em virtude do preparo do solo (plantio direto com milho, plantio direto com alfafa e preparo convencional com milho) e tráfego de máquinas agrícolas (com e sem circulação na entrelinha). Neste estudo o preparo convencional do solo diminuiu a densidade do solo (aumentando a porosidade total) somente quando não houve tráfego na entrelinha, mas pareceu reduzir a estabilidade, número, e continuidade dos macroporos, em relação ao plantio direto com milho e

alfafa. Assim, o preparo do solo, apesar de criar uma redução na densidade do solo na zona de germinação (aumentando a porosidade total), não resultou automaticamente em maior K_a , visto que o índice de continuidade dos macroporos (N) também decresceu. Os mesmos autores concluíram que onde ocorreram grandes diferenças na porosidade, as contribuições relativas da distribuição do tamanho dos poros, porosidade e continuidade dos poros foram difíceis de determinar usando a transformação log dos índices derivados de Groenevelt et al. (1984). Apesar das vantagens de certas mudanças na macroporosidade e geometria dos macroporos como uma função do preparo e tráfego variarem dependendo do assunto em questão (ex, crescimento das raízes, armazenamento de água, movimento da água, movimento químico, aeração, etc.), estas medidas de K_a e técnicas de análise dos dados permitem a oportunidade para uma descrição mais quantitativa das mudanças na macroporosidade do solo e continuidade dos macroporos devido ao manejo (ROSEBERG; McCOY, 1992).

2.2 Material e métodos

2.2.1 Caracterização da Área Experimental

O estudo foi realizado na Estação Experimental do Pólo Regional de Pesquisa do Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR (25°06' de latitude sul e 50°09' de longitude oeste), no município de Ponta Grossa, estado do Paraná, localizado a uma altitude de 875 m. O clima, segundo a classificação de Köppen é o subtropical úmido mesotérmico (Cfb) com verões frescos, em que a temperatura média do mês mais quente é menor que 22°C, sem estação seca definida e com geadas severas, com a temperatura média dos três meses mais frios menores que 18°C. A precipitação pluviométrica anual situa-se entre 1300 a 1800 mm, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano.

O solo da área foi classificado como um Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2006). A área possui declividade média de 8%, sendo considerada homogênea, não havendo variação no tipo de solo. A textura foi determinada pelo método do densímetro (GEE & BAUDER, 1986), sendo o solo classificado quanto à classe textural como argiloso.

A área avaliada vem sendo cultivada desde 1981 com sistema de rotação de culturas (aveia preta ou trigo/soja e ervilhaca ou tremoço/milho). Os tratamentos consistiram de

dois sistemas de manejo do solo, preparo convencional e plantio direto (Figura 1), com parcelas de 5000 m² (100 m x 50 m) e 10000 m² (100 m x 100 m) respectivamente.

O preparo do solo no sistema convencional consistiu de uma aração e duas gradagens. No sistema plantio direto, entre os anos de 1981-1988 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 sistema plantio direto.

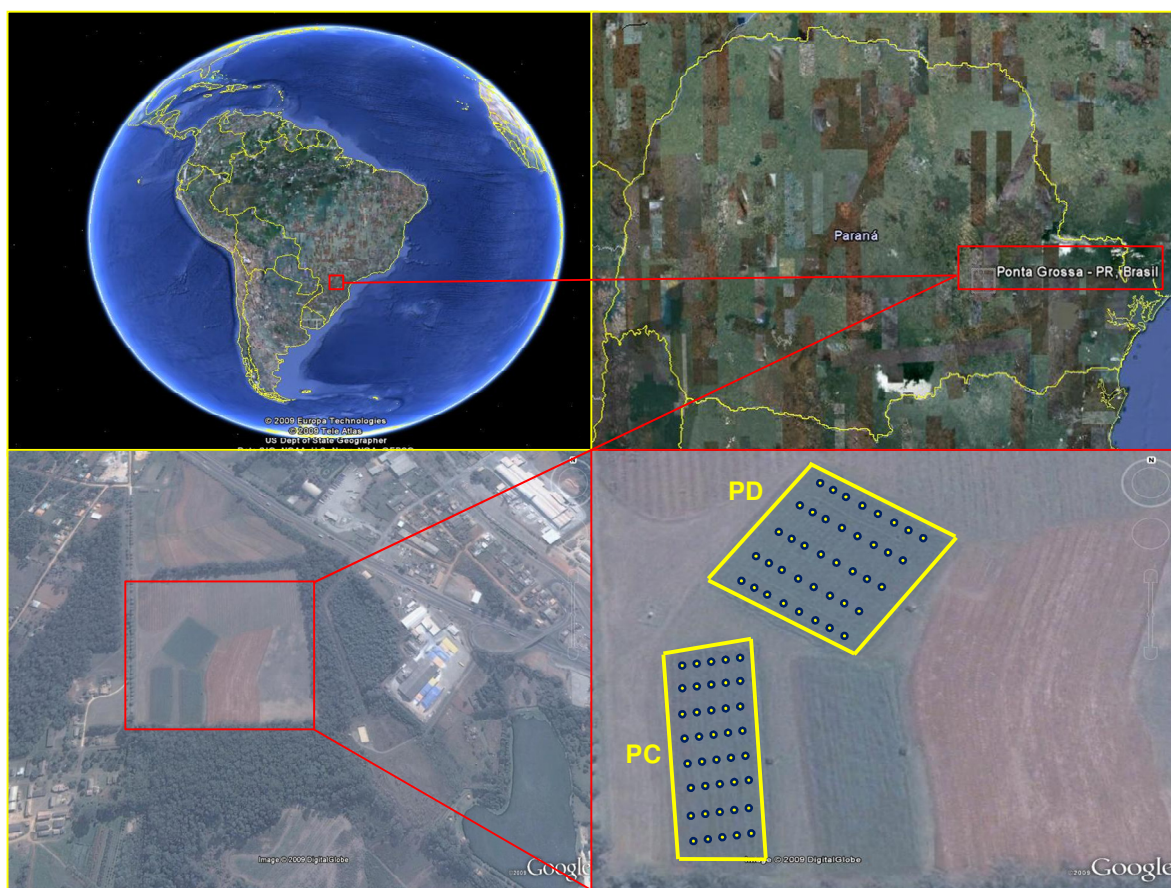


Figura 1 - Imagem de satélite da área avaliada na estação experimental do IAPAR, no município de Ponta Grossa-PR (2008)

2.2.2 Amostragem

A amostragem foi realizada em abril de 2008, no estágio final da cultura do milho. Em cada parcela foram retiradas amostras de solo com estrutura indeformada, utilizando-se anéis volumétricos de aproximadamente 100 cm³ (50 mm x 50 mm). Os pontos de amostragem

seguiram uma malha regular dentro de cada área (Figura 1), descartando a partir da linha perimetral os primeiros 5 m. As amostras foram coletadas em orientação vertical, nas profundidades de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, totalizando 80 amostras (2 tratamentos x 2 profundidades x 20 repetições).

Até o momento do preparo das amostras para análises, estas permaneceram acondicionadas em ambiente refrigerado a 5°C. As amostras foram preparadas no laboratório, retirando-se o excesso de solo de modo a preencher somente o volume interno do anel. Na parte inferior de cada anel foi colocada uma tela permeável à água e ar, a fim de permitir a saturação sem perda de solo. Em seguida, as amostras foram dispostas em uma bandeja onde foram saturadas pela adição gradual de lâminas de água. Após estarem totalmente saturadas, as amostras foram pesadas para a obtenção da massa do solo saturado.

2.2.3 Análises

2.2.3.1 Permeabilidade ao ar

Foram definidos seis potenciais mátricos (Ψ_m), -2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa, nos quais todas as amostras foram submetidas a drenagem, utilizando câmaras de pressão descritas em Klute (1986). As amostras permaneceram nas câmaras até que o equilíbrio fosse atingido em cada potencial. Após atingir o equilíbrio, as amostras foram retiradas das câmaras, pesadas (para cálculo da umidade volumétrica no potencial) e em seguida realizou-se a determinação da permeabilidade do solo ao ar.

A permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_a) foi determinada utilizando-se o método adaptado de McKenzie e Dexter (1996), conforme Neves et al. (2004). Para essa determinação foi utilizado um permeâmetro de carga decrescente composto de um cilindro de aço para GLP (gás liquefeito de petróleo) com capacidade de 30 litros, um transmissor de pressão diferencial modelo 850S – TP1/Vectus, com faixa de pressão de zero até 10.000 Pa e um sistema de aquisição e processamento de dados modelo AqDXY 3.0/Lynux Tecnologia (Figura 2). O volume do reservatório deve ser selecionado de forma que a diferença de pressão através da amostra de solo seja suficientemente pequena para assegurar um fluxo laminar, evitar o rompimento de filmes de água que bloqueiam o fluxo de ar, e assegurar que os efeitos devido à compressibilidade do ar sejam negligíveis (MCKENZIE; DEXTER, 1996).

A metodologia baseia-se 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. Inicialmente, a válvula entre o reservatório de ar e a amostra permanece fechada. O reservatório de ar de volume conhecido é pressurizado com o auxílio de uma bomba de bicicleta até a pressão de 1000 Pa registrada pelo transmissor e indicada pelo sistema. A válvula é então aberta permitindo que o ar flua através da amostra, resultando em um decréscimo exponencial da pressão com o tempo. Essa relação é registrada em intervalos de um segundo pelo sistema de aquisição de dados.

Segundo Kirkham (1946) o gráfico do logaritmo natural da pressão em função do tempo fornece o coeficiente angular S onde:

$$S = \frac{\ln h_2 - \ln h_1}{t_2 - t_1} \quad [1]$$

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^2 , é dada por:

$$K_a = \frac{v_a V l}{A P_a} |S| \quad [2]$$

onde v_a é a viscosidade do ar ($18,1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$); V o volume do reservatório, m^3 ; P_a a pressão do ar atmosférico ($101,3 \text{ kPa}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$); l a altura da amostra, m ; A a área da amostra, m^2 ; e $|S|$ é o módulo da inclinação da reta da relação pressão versus tempo.

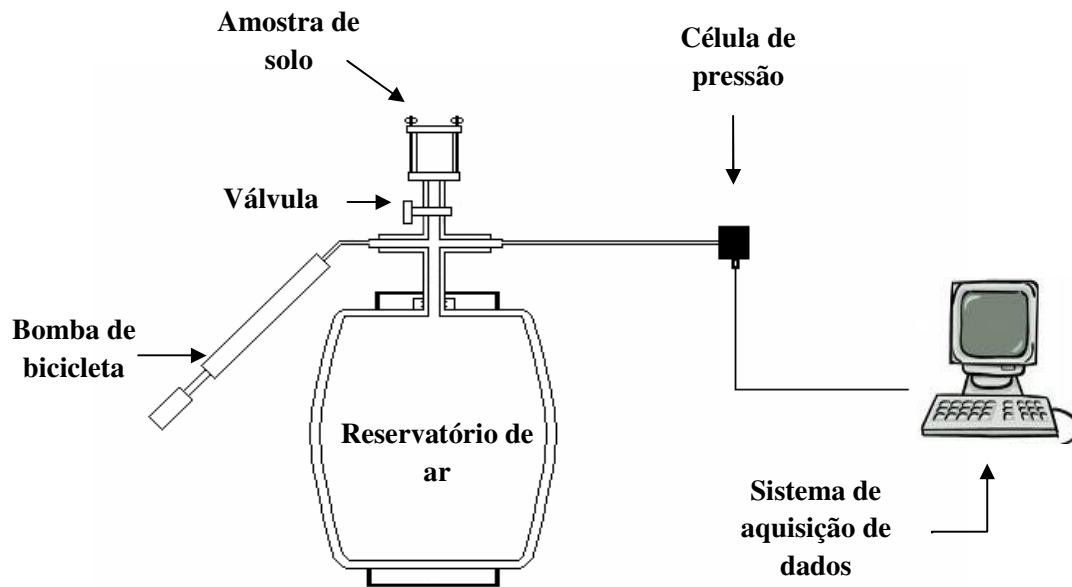


Figura 2 - Equipamento utilizado para determinar a permeabilidade do solo ao ar em amostras de solo indeformadas.

2.2.3.2 Índices de continuidade dos poros

Os valores de permeabilidade (K_a) e porosidade de aeração (ε_a) foram relacionados usando a equação de Kozeny-Carman em uma forma análoga à dada por Ahuja et al. (1984):

[3]

onde M e N são constantes empíricas. Os autores consideraram o expoente N como um índice de continuidade de poros, que reflete o aumento da K_a com o aumento da ε_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 ε_a foi ajustada para uma forma logarítmica da Eq. 3:

[4]

A relação linear na Eq. 4 pode ser caracterizada usando as três informações indicadas na Figura 3. O slope (N), o intercepto com o eixo $\log K_a$ no qual $\log \varepsilon_a = 0$ (M), e o intercepto com o eixo $\log \varepsilon_a$ em que $\log K_a = 0$ (ε_b). Este intercepto com o eixo $\log \varepsilon_a$ (onde $K_a = 1 \mu\text{m}^2$) 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 do ar. Deste modo, ε_b é o valor de ε_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 Eq. 3 pela Eq. 5.

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

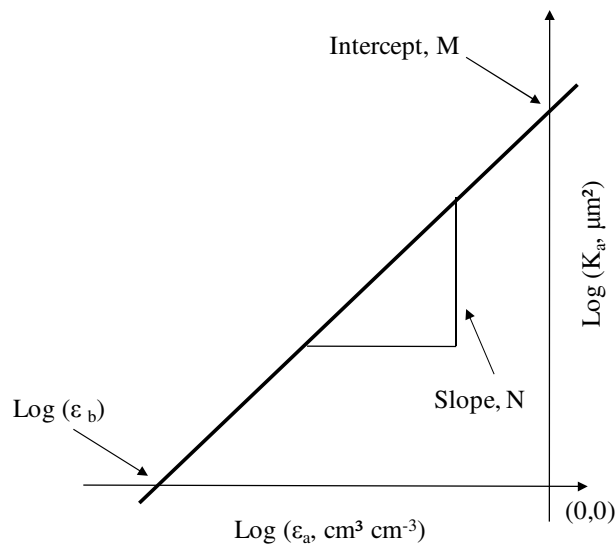


Figura 3 - Principais características da relação \log (conteúdo volumétrico de ar, ε_a) – \log (permeabilidade ao ar K_a); slope N , intercepto com o eixo $\log (K_a)$, M e o limite do conteúdo de ar, ε_b .

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 ε_a :

$$K_l = \frac{K_a}{\varepsilon_a} \quad [6]$$

Groenevelt et al. (1984) relataram que solos que apresentam distribuição de tamanho de poros e continuidade de poros semelhantes tem valores equivalentes de K_l .

2.2.3.3 Densidade do solo, densidade de partícula, umidade, porosidade do solo e carbono orgânico

Finalizadas as determinações da K_a as amostras foram levadas para estufa à 105 °C por um período de 24 horas para a obtenção da massa de solo seco. Para cada amostra foi calculada:

- a) Densidade do solo (ρ_s) em g cm^{-3} segundo Blake e Hartge (1986);
- b) Densidade de partícula (ρ_p) em g cm^{-3} 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;
- c) Umidade gravimétrica (U) em cada potencial em g g^{-1} de acordo com Gardner (1986);
- d) Umidade volumétrica (θ) em cada potencial em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ obtida por: $\theta = (\rho_s / \rho_a) U$, onde ρ_a é a densidade da água (g cm^{-3});
- e) Porosidade total do solo (α) em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ pela fórmula $\alpha = 1 - (\rho_s / \rho_p)$;
- f) Porosidade de aeração (ε_a) em cada potencial em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, 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: $\varepsilon_a = \alpha - \theta_v$.
- g) Carbono orgânico em g dm^{-3} , determinado para cada amostra pelo método da colorimetria (CANTARELLA; QUAGGIO, 2001).

2.2.4 Análise dos dados

As análises estatísticas dos dados foram feitas no programa SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE, 2002). Os resultados foram submetidos a análise de variância (two-way Anova) e as médias foram comparadas pelo teste LSD (Least Significant Difference) que considera a diferença mínima de 5%.

Os dados foram apresentados em tabelas e gráficos, sendo o último representado pelas médias das variáveis juntamente com o intervalo de confiança (95%) a fim de permitir a visualização de diferenças significativas entre os tratamentos. O intervalo de confiança representa os limites onde a média dos valores de um conjunto de dados está contida. O intervalo de confiança é uma ferramenta útil na interpretação de diferenças significativas entre médias (PAYTON et al., 2000).

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Textura e densidade do solo

Houve pouca variação na proporção relativa das partículas primárias do solo nos dois sistemas e profundidades (Tabela 1), assim, as áreas podem ser consideradas homogêneas,

sem a ocorrência de mudança textural e classificadas quanto a classe textural como solos argilosos.

Tabela 1 - Parâmetros físicos do Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional e sistema plantio direto.

Manejo do solo	Profundidade	Textura do solo			Carbono orgânico	Densidade de partícula
		Argila	Areia total	Silte		
	m	----- g kg ⁻¹ -----			g dm ⁻³	g cm ⁻³
Convencional	0,0-0,10	665,7	62,1	272,2	30,75	2,65
	0,10-0,20	661,9	60,5	277,6	29,90	2,65
Plantio direto	0,0-0,10	601,7	70,6	327,7	36,43	2,61
	0,10-0,20	678,6	60,9	260,5	29,08	2,65

A análise estatística para os dados de carbono orgânico e densidade de partícula revelou uma interação significativa entre sistema de manejo do solo x profundidade. Análises subsequentes para carbono orgânico revelaram que houve um efeito simples para sistema de manejo na camada superficial (0-0,10 m) no fator profundidade, $F(1,76) = 33,29$; $p < 0,05$, onde o sistema plantio direto apresentou maior conteúdo de carbono em relação ao convencional (Tabela 2). O efeito simples para sistema de manejo na profundidade de 0,10-0,20 m mostrou não ser significativo, $F(1,76) = 0,70$; $p > 0,05$. A densidade de partícula também apresentou efeito simples para sistema de manejo somente na primeira camada, $F(1,76) = 32,9$; $p < 0,05$, sendo maior no convencional. Estando os valores de densidade de partícula diretamente relacionados com o conteúdo de carbono orgânico não houve efeito simples para sistema de manejo em subsuperfície ($F(1,76) = 0,49$; $p > 0,05$), visto que o conteúdo de carbono nessa camada também não foi significativamente diferente nos dois sistemas.

O plantio direto apresentou maior teor de carbono em relação ao preparo convencional somente na camada superficial, o que pode estar associado à manutenção de uma cobertura vegetal nessa camada, remanescente dos cultivos anteriores. Esse acúmulo de material orgânico evidenciou-se somente em superfície devido ao não revolvimento do solo e, portanto, a sua falta de incorporação e influência em profundidade. A manutenção de resíduos culturais na superfície do solo provenientes de sucessivos cultivos é uma prática bem conhecida e recomendada para a conservação do solo e da água (LAMARCA, 1996; BECHER, 2005; PABIN

et al., 2004). Outros benefícios são as mudanças favoráveis no microclima do solo e redução na variação de temperatura (SHARRATT, 2002).

Tabela 2 - Desdobramento da interação manejo do solo x profundidade para carbono orgânico, $F(1,76) = 21,83$; $p < 0,0001$ e densidade de partícula, $F(1,76) = 20,69$; $p < 0,0001$

Manejo do solo	Profundidade (m)	
	0-0,10	0,10-0,20
Carbono orgânico (g dm^{-3})		
Convencional	30,75 (2,10) bA	29,90 (2,52) aA
Plantio direto	36,43 (4,42) aA	29,08 (2,91) aB
Densidade de partícula (g cm^{-3})		
Convencional	2,65 (0,01) aA	2,65 (0,03) aA
Plantio direto	2,61 (0,02) bB	2,65 (0,02) aA

Médias seguidas por letras distintas, minúscula na coluna e maiúscula na linha para cada fator, diferem entre si ao nível de 5% pelo teste LSD. Os valores entre parênteses representam ± 1 desvio padrão.

Em ambos os sistemas o teor de carbono diminuiu em profundidade. Este decréscimo é frequentemente evidenciado no trópico úmido e em particular em solos brasileiros (VOLKOFF; CERRI, 1988; DESJARDINS et al., 1991; CAVALIERI et al., 2009). Kay et al. (1997) mostraram que o aumento do conteúdo de carbono tem um impacto positivo em diversas propriedades físicas do solo. So et al. (2009) compararam o efeito de 14 anos de preparo convencional e plantio direto no contexto da agricultura mecanizada em solo da Austrália e inferiu as melhorias na estrutura do solo observada sob plantio direto com o aumento significativo do conteúdo de carbono orgânico na superfície que, mostrou também ser o principal contribuinte do constante aumento da produtividade.

2.3.2 Porosidade do solo

A avaliação dos dados de porosidade revelou interação significativa entre sistema de manejo do solo x profundidade para a macroporosidade, $F(1, 76) = 18,62$; $p < 0,0001$, microporosidade $F(1, 76) = 35,45$; $p < 0,0001$ e porosidade total, $F(1, 76) = 4,89$; $p = 0,03$. Os desdobramentos destas interações estão apresentados na Tabela 3. Para a camada superficial houve um efeito simples de manejo para macroporosidade, $F(1, 76) = 21,19$, $p < 0,05$ e microporosidade, $F(1, 76) = 82,94$, $p < 0,05$, o que não foi evidenciado para a porosidade total do solo, $F(1, 76) = 0,30$, $p > 0,05$. Comportamento oposto ocorreu na camada de 0,10-0,20 m, onde somente a porosidade total apresentou efeito simples de manejo $F(1, 76) = 13,49$, $p < 0,05$, com o

plantio direto apresentando maior porosidade total em subsuperfície. A análise da porosidade do solo dentro de cada sistema mostrou que, com exceção da microporosidade no sistema plantio direto, houve diferença significativa da porosidade no solo (macro, micro e total) em profundidade, onde a camada de 0-0,10 m apresentou maior porosidade total nos dois sistemas.

Apesar dos sistemas terem apresentado uma redução significativa da macroporosidade em subsuperfície em relação à superfície, o sistema convencional sofreu uma redução mais acentuada, passando de 25% para 12%, enquanto que no sistema plantio direto essa diferença foi pouco pronunciada, reduzindo de 17% para 14%. A maior redução em profundidade da macroporosidade no sistema convencional se deve ao maior adensamento dessa camada em virtude do tráfego mais intenso de máquinas agrícolas neste sistema. Kroulík et al. (2009) avaliaram a frequência de passagens e área trafegada por máquinas agrícolas durante uma estação de cultivo, sob diferentes sistemas de manejo do solo e encontraram que sob preparo convencional 87,5% da área total foi trafegada pelo menos uma vez durante o ano, enquanto que 72,8% e 55,7% da área total foi trafegada com a prática do cultivo mínimo e semeadura direta, respectivamente. Calculou-se também que da área total abrangida 90,9% foi trafegada repetidamente para o preparo convencional, 44,8% para o cultivo mínimo e somente 18,4% para a semeadura direta.

Com a compactação os macroporos sofrem maior redução, com conseqüente aumento dos microporos reduzindo a porosidade total, porém em menor proporção que a macroporosidade (ARAÚJO, 2004). A redução do volume de macroporos do solo pode restringir a transmissão de água e nutrientes através da zona de desenvolvimento radicular. Em situações onde a macroporosidade é reduzida e a drenagem é impedida, a difusão de oxigênio pode ser prejudicada ocasionando redução no crescimento das plantas (DREWRY et al., 1999). Com base nos resultados para macroporosidade obtidos, o sistema de preparo convencional apresenta uma melhor condição inicial de infiltração (0,0-0,10 m) em relação ao plantio direto, no entanto, tal diferença não foi observada na camada seguinte, onde os sistemas não diferiram em relação ao volume de macroporos.

Comparando métodos de manejo do solo, Wu et al. (1992), encontraram que a porosidade do solo no sistema plantio direto foi mais eficaz em conduzir água. Para Dunn e Phillips, (1991), a elevada macroporosidade em sistemas com mínimo revolvimento do solo se deve a ação de raízes, minhocas e insetos presentes no solo favorecendo assim a infiltração de

água, ao contrário do sistema de manejo com revolvimento onde toda essa rede de macroporos é comprometida. Carter et al. (1999) não encontraram diferenças significativas em relação a macroporosidade quando avaliaram a qualidade física do solo de um sistema de cultivo conservacionista.

Segundo Baver et al. (1972) a faixa de macroporos considerada ideal é de 10 a 16%, deste modo, os tratamentos não apresentaram valores restritivos de macroporosidade, ficando todos acima de 10%, valor comumente usado para definir condições limitantes da aeração do solo (GRADWELL, 1965; GRABLE, 1971; CARTER, 1988). Alguns estudos demonstraram que, quanto maior a densidade de macroporos, maior a capacidade das plantas de explorar esse solo (TIMLIM et al., 1994; LONGSDON et al., 1993; SCOOT et al., 1988) aumentando a área de atuação do sistema radicular.

O sistema plantio direto apresentou uma microporosidade superficial significativamente maior, equivalente a 46% da porosidade total composta de poros menores (poros com diâmetro menor que 30 μm). Na camada de 0,10-0,20 m os sistemas de manejo não diferiram em relação ao volume de microporos. Apesar do plantio direto ter apresentado uma menor macroporosidade em relação ao preparo convencional do solo, a maior microporosidade pode representar um importante fator, visto que os microporos são importantes para a retenção de umidade no solo e crescimento das plantas. A água retida nestes poros, que não é livremente drenada através do perfil, consiste numa fonte de armazenamento de água e solutos. A difusão destes solutos auxilia no suprimento de nutrientes para as raízes das plantas.

A microporosidade é fortemente influenciada pela textura do solo e teor de carbono orgânico e pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo devido ao peso exercido pelo tráfego de máquinas, implementos, etc (DA SILVA; KAY, 1997). No sistema plantio direto o solo está sujeito a um menor tráfego, não sendo revolvido no processo agrícola, deste modo, há uma tendência a uma compactação superficial do solo, que se verifica por um aumento da densidade e da microporosidade e diminuição da porosidade total, principalmente da macroporosidade (SIDIRAS et al., 1984), sendo estas variações mais frequentes em solos de textura argilosa (RAGHAVAN et al., 1977). A área sob plantio direto avaliada neste estudo apresentou uma redução dos macroporos e aumento da microporosidade, no entanto, essa alteração na porosidade não acarretou no aumento da densidade do solo (Figura 5). Segundo

Tormena et al. (1998), com o passar dos anos, a densidade de solo no sistema plantio direto tende a diminuir devido o aumento do nível de matéria orgânica na camada superficial.

Comparando a porosidade total superficial dos dois sistemas de manejo, verifica-se que os mesmos não diferiram significativamente quanto ao volume total de poros, já na camada inferior (0,10-0,20 m), o plantio direto apresentou uma porosidade total maior comparada com ao convencional, apesar desse aumento ser pouco pronunciado.

Tabela 3 - Desdobramento da interação manejo do solo x profundidade para macroporosidade, $F(1,76) = 18,62$; $p = <0,0001$; microporosidade, $F(1,76) = 35,45$; $p = <0,0001$ e porosidade total $F(1,76) = 4,89$; $p = 0,03$

Manejo do solo	Profundidade (m)	
	0-0,10	0,10-0,20
Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		
Convencional	0,247 (0,05) aA	0,116 (0,04) aB
Plantio direto	0,173 (0,07) bA	0,140 (0,03) aB
Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		
Convencional	0,378 (0,03) bB	0,446 (0,02) aA
Plantio direto	0,456 (0,04) aA	0,452 (0,01) aA
Porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		
Convencional	0,624 (2,95) aA	0,561 (1,76) bB
Plantio direto	0,629 (3,59) aA	0,591 (1,41) aB

Médias seguidas por letras distintas, minúscula na coluna e maiúscula na linha para cada fator, diferem entre si ao nível de 5% pelo teste LSD. Os valores entre parênteses representam ± 1 desvio padrão.

O volume total de poros ficou acima de $0,50 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ nos dois sistemas de manejo e em ambas as profundidades, volume considerado ideal para um solo bem estruturado e com boas condições de crescimento para as plantas (BRADY; WEIL, 2002). O tipo de solo e o manejo destinado a ele são determinantes nos valores de espaço poroso total. Uma elevada porosidade total é característica dos Latossolos e limitações associadas à porosidade de aeração são raras, exceto em casos de compactação severa, excesso de umidade e elevado conteúdo de argila (LEÃO, 2006).

2.3.3 Densidade do solo

A distribuição dos valores de densidades do solo (ρ_s) está indicada no gráfico Box-plot (Figura 4). O emprego deste gráfico permite uma melhor visualização da variação dos dados obtidos, como os valores máximo e mínimo de 1,24 e 0,81 g cm^{-3} na camada subsuperficial do preparo convencional e na superfície do plantio direto respectivamente. A ampla faixa de valores na camada 0-0,10 m para os dois sistemas de manejo denota a maior variabilidade de ρ_s nesta profundidade.

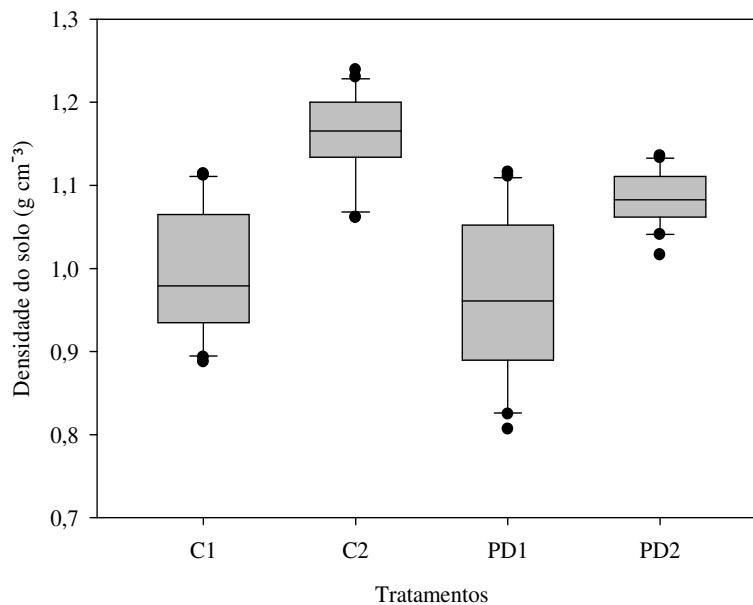


Figura 4 - Distribuição dos valores de densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional (C) e plantio direto (PD), nas profundidades de 0,0-0,10 m (1) e 0,10-0,20 m (2)

A análise de variância dos dados de ρ_s revelou um efeito principal para os dois fatores, sistema de manejo e profundidade, $F(1, 76) = 11,63$; $p = 0,001$ e $F(1, 76) = 87,29$; $p < 0,0001$, respectivamente. O teste LSD mostrou que a ρ_s no sistema convencional foi significativamente maior do que o sistema plantio direto ($p < 0,05$). O efeito principal para profundidade revelou uma camada subsuperficial mais adensada. A interação entre os dois fatores não foi significativa, $F(1, 76) = 3,06$; $p = 0,085$.

Para os dois sistemas de manejo a ρ_s foi significativamente menor na camada superficial (0-0,10 m) em relação a camada subsequente, no entanto, não houve diferença significativa entre os sistemas, com valores de densidade de 0,99 e 0,97 g cm^{-3} para o sistema

convencional e plantio direto respectivamente (Figura 5). A menor ρ_s superficial na área sob sistema de preparo convencional do solo se deve ao revolvimento por ocasião das práticas de manejo, enquanto que no sistema plantio direto, a ausência de revolvimento foi contrabalanceada pela manutenção de uma cobertura vegetal que assegurou uma menor ρ_s na superfície. A ocorrência de atividade biológica (raízes e mesofauna), e ciclos de umedecimento e secamento também contribuem para a redução da ρ_s do solo na superfície em relação à subsuperfície. Concordando com os resultados aqui obtidos, Martínez et al. (2008), avaliando o efeito do manejo convencional e plantio direto sobre as propriedades físicas do solo, encontrou que a densidade não foi significativamente afetada na camada superficial. Outros estudos mostraram resultados opostos (BALL-COELHO et al., 1998; SCHØNNING; RASMUSSEN, 2000).

A ρ_s na camada de 0,10-0,20 m no sistema de preparo convencional foi maior ($1,16 \text{ g cm}^{-3}$) em relação ao plantio direto ($1,08 \text{ g cm}^{-3}$). Este adensamento em subsuperfície possivelmente se deve ao longo período de uso agrícola desta área, com tráfego de máquinas e implementos, o que acarreta na formação de uma camada mais compactada denominada de “pé de grade”. Muitos autores estudando o efeito do sistema plantio direto sob as propriedades físicas do solo evidenciaram um aumento de densidade nesse sistema de manejo em relação ao convencional, devido a compactação causada pelo tráfego de máquinas e o não revolvimento do solo (FABRIZZI et al., 2005; CARDOSO et al., 2006). Por outro lado, há estudos que demonstram não haver nenhuma diferença significativa na ρ_s entre o plantio direto e o preparo convencional (XU; MERMOUD, 2001; ANKEN et al., 2004). Avaliando a funcionalidade física de um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto na fazenda experimental da Universidade de Ponta Grossa, estado do Paraná, Cavalieri et al. (2009) encontrou uma maior densidade em subsuperfície (0,20-0,30 m), relacionada com uma porosidade total mais baixa nesta profundidade.

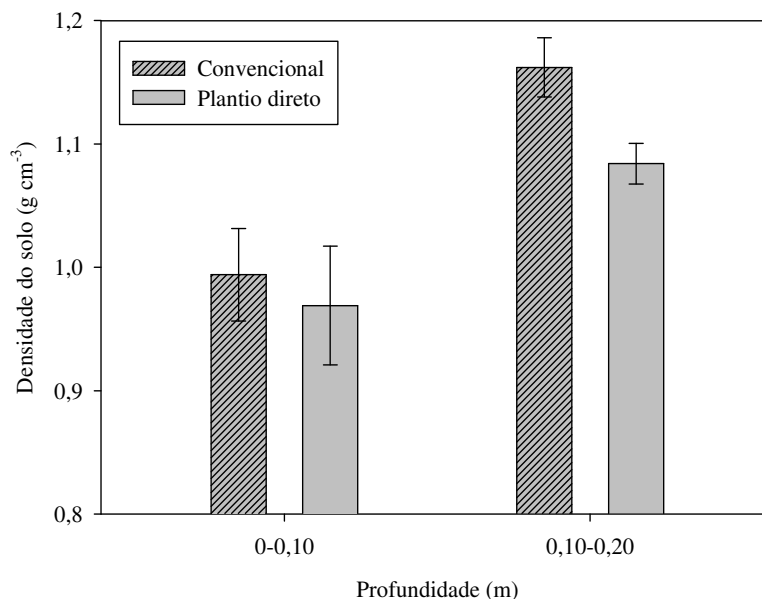


Figura 5 - Valores médios de densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob preparo convencional e sistema plantio direto, nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%).

2.3.4 Permeabilidade ao ar

A normalidade dos dados de permeabilidade ao ar (K_a) foi testada usando o teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965) e a distribuição das amostras dentro dos tratamentos foram encontradas como sendo assimétricas e não normais. Assim, os logaritmos de K_a foram usados para fazer as distribuições mais próximas da normalidade (MCINTYRE; TANNER, 1959; GROENEVELT et al., 1984; BALL et al., 1988; BLACKWELL et al., 1990).

Para melhor entender os valores de K_a reportados, seria de grande vantagem conhecer a porosidade de aeração (ε_a) e umidade (θ) do solo avaliado, visto que o aumento da umidade reduz o volume de poros ocupados por ar, e os canais condutores de ar são da mesma forma reduzidos juntamente com a K_a . Assim, o aumento na ε_a com a redução da θ em virtude do decréscimo do potencial mátrico, para cada tratamento e profundidade estão apresentados na Figura 6.

Os valores médios do $\log K_a$ em todos os potenciais estão apresentados na Figura 7. Houve interação significativa entre sistema de manejo do solo x profundidade apenas nos potenciais -30 kPa ($p= 0,0216$) e -70 kPa ($p= 0,0257$). Para os demais potenciais, houve efeito

simples para sistema de manejo em ambas as camadas, com o sistema convencional apresentando maior K_a em relação ao plantio direto, com exceção apenas para a subsuperfície em condição de maior umidade (-2 kPa), onde os sistemas não diferiram em relação à K_a .

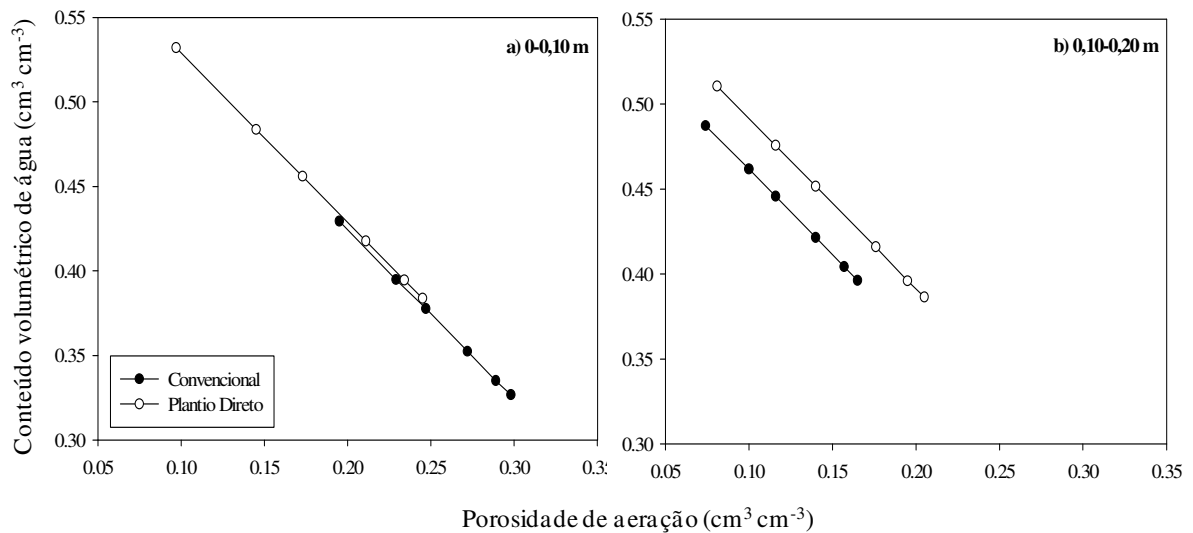


Figura 6 – Valores médios de porosidade de aeração (ϵ_a) em função do conteúdo volumétrico de água (θ) nos potenciais de -2, -6, -10, -30, -70 e -100 kPa nos sistemas de manejo convencional e plantio direto, em duas profundidades.

Com o decréscimo do potencial mátrico, a K_a ar aumenta a medida que o espaço poroso inicialmente ocupado pela água é preenchido com ar e, foi significativamente menor na profundidade de 0,10-0,20 m em ambos os sistemas de manejo do solo. Geralmente K_a e ϵ_a são maiores em solo arado do que em plantio direto (BALL et al., 1988) devido ao fato do preparo afetar diretamente a porosidade do solo, principalmente a macroporosidade.

K_a seguiu a mesma tendência da macroporosidade e porosidade total, diminuindo com o aumento da profundidade. A permeabilidade depende diretamente do número, continuidade, tortuosidade e do quadrado do diâmetro dos poros de aeração, portanto, é sensível à presença de macroporos contínuos e pode reduzir o crescimento de plantas (ARAÚJO, 2004).

O tamanho dos poros e sua conectividade determinam se o solo possui alta ou baixa permeabilidade. A prevalência de poros menores (microporos) em ambos os sistemas na profundidade de 0,10-0,20 m resultou em uma redução na K_a . É possível encontrar K_a zero (ausência de fluxo) em um solo de alta porosidade caso os poros estejam todos preenchidos com água e/ou os poros estejam isolados (não conectados). Também é possível haver K_a próximo de

zero se os poros forem muitos pequenos, situação frequentemente encontrada em solos com alto conteúdo de argila.

McKenzie e Dexter (1996) estudando o fluxo de água e ar através de agregados de solo, compararam seus resultados com amostras de solo indeformadas coletadas em anéis volumétricos, identificando valores médios de K_a na ordem de $0,1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ em agregados (em umidade equivalente à capacidade de campo). Os valores de K_a obtidos para os tratamentos avaliados neste estudo estão bem acima dos reportados por esses autores para agregados, no entanto, os mesmos afirmam que valores de K_a obtidos utilizando anéis são sempre maiores em relação à agregados, provavelmente devido a existência de caminhos de fluxo preferenciais ao redor e entre os agregados nos anéis.

Feiza et al. (2008) investigaram a qualidade de um solo da Lituânia sob diferentes sistemas de manejo. O preparo reduzido e o plantio direto não asseguraram uma K_a adequada no estágio final do crescimento da cultura. A maior K_a foi registrada sob o sistema convencional de manejo do solo. Os autores encontraram que na camada de 0,0-0,10 m sob plantio direto a K_a foi de 54-68 % menor comparada ao sistema convencional. Na camada de 0,10-0,20 m a diferença foi de 32-47 %. Concordando com os resultados obtidos por estes autores, a K_a obtida para o sistema plantio direto foi menor em relação ao convencional nas duas profundidades.

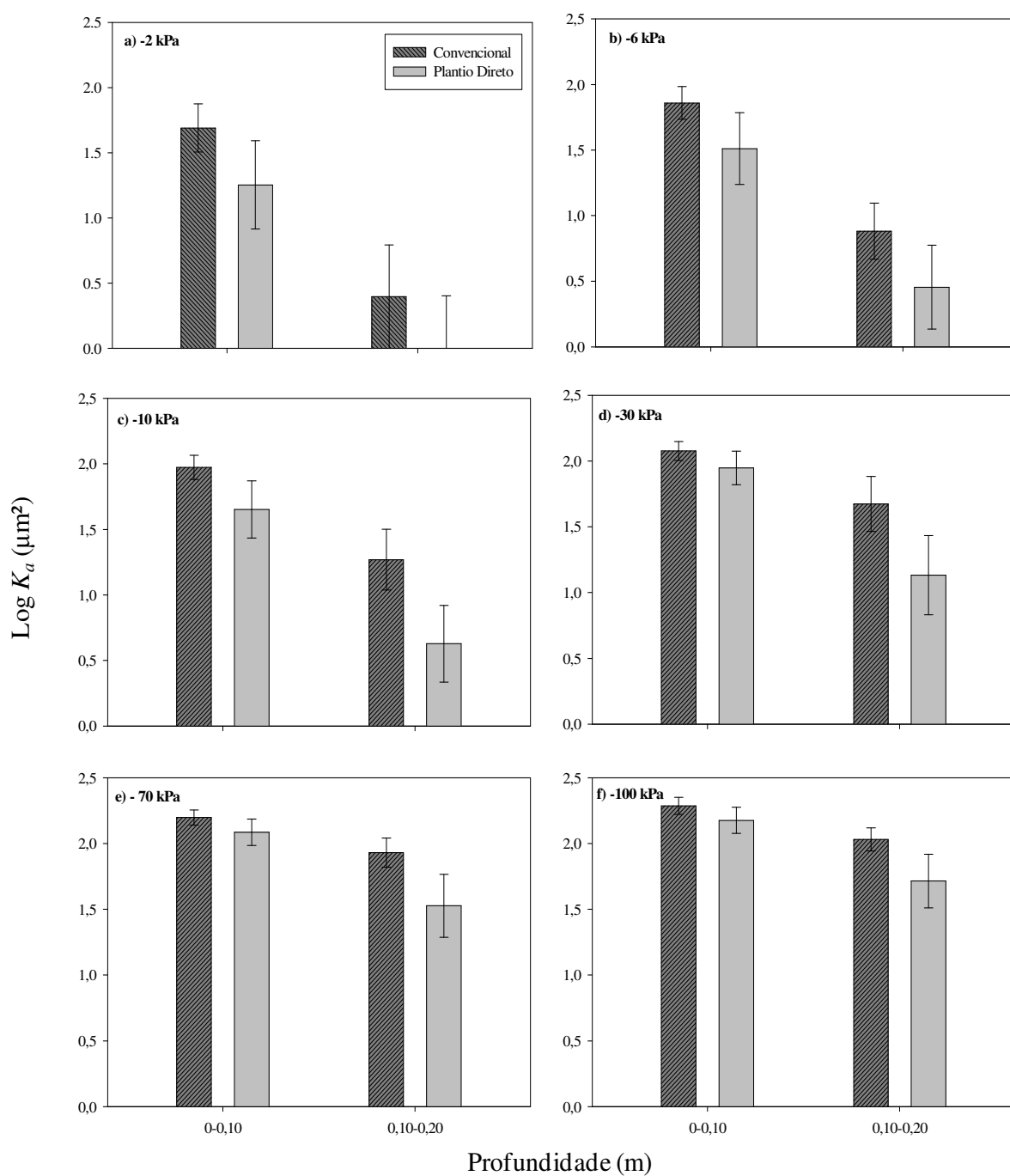


Figura 7 - Valores médios do log da permeabilidade ao ar (K_a) de um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto, nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%).

2.3.5 Índices de continuidade

Assim como K_a o índice de continuidade de poros K_l apresentou distribuição log-normal, de forma que todas as análises posteriores foram executadas usando a transformação \log_{10} para cada amostra individualmente.

A análise estatística para K_l revelou uma interação significativa entre sistema de manejo do solo x profundidade em todos os potenciais avaliados (Figura 8). Na camada de 0-0,10 m a continuidade dos poros não diferiu entre os sistemas de manejo divergindo da camada subsequente (0,10-0,20 m) onde o sistema de manejo convencional apresentou maior continuidade ou menor tortuosidade em todos os potenciais. Dentro de sistemas, o preparo convencional apresentou diferença significativa de continuidade de poros em profundidade até o potencial mátrico de -10 kPa, a partir do qual a redução do conteúdo de água e consequente aumento da aeração suprimiu essa diferença. No sistema plantio direto a diferença de continuidade de poros em profundidade foi observada em todos os potenciais.

Segundo Groenevelt et al. (1984) o cálculo da razão K_a/ε_a é uma técnica útil para determinar se as diferenças em K_a podem ser atribuídas somente as diferenças em ε_a ou se elas deveriam ser atribuídas a outros aspectos geométricos do espaço poroso preenchido com ar tais como a distribuição do tamanho de poros, tortuosidade e continuidade. Altos valores de K_l indicam um sistema poroso com alta capacidade de transporte de ar devido ao alto grau de continuidade ou a baixa tortuosidade.

Roseberg e McCoy (1992) na tentativa de descrever quantitativamente diferenças na macroporosidade e geometria dos macroporos resultantes das práticas decorrentes do preparo do solo e tráfego de máquinas, também relacionaram K_a e ε_a a fim de determinar índices de continuidade de poros. Os autores encontraram muitos valores de $K_a=0$, de forma que os dados foram inclinados negativamente. Deste modo, as análises de $\log_{10} K_a/\varepsilon_a$ não foram sensíveis o suficiente para diferenciar efeitos entre porosidade, distribuição do tamanho de poros, e continuidade. Os mesmos salientaram que mais estudos seriam requeridos para determinar a faixa de sensibilidade deste método para análise da continuidade dos poros.

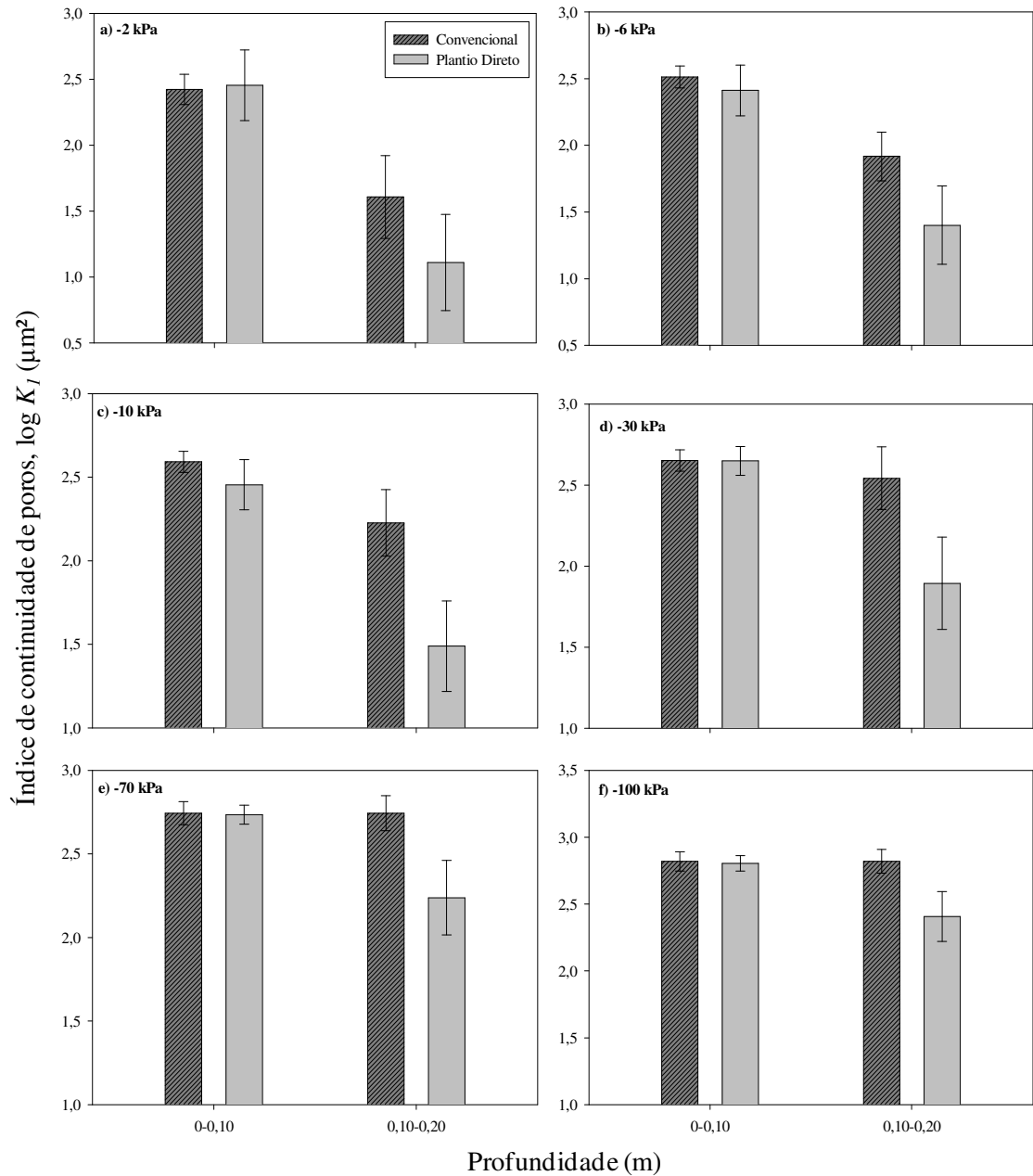


Figura 8 - Valores médios do log do índice de continuidade de poros, K_I , derivado da razão entre permeabilidade ao ar e porosidade de aeração (K_a/ϵ_a) de um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto, nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%).

A K_a também foi relacionada com a ϵ_a por um modelo exponencial (Eq. 4) obtendo as constantes M e N . O modelo ajustou bem os dados ($R^2 > 0,88$) como mostra a representação

log-log na Figura 9. A inclinação da reta da relação log-log entre K_a e ε_a também é um índice de continuidade de poros que mostra a percentagem de abertura dos caminhos dos poros contínuos disponíveis para o fluxo de ar com o aumento da ε_a .

A interação entre sistema de manejo x profundidade para o intercepto M e slope N provenientes da regressão entre $\log K_a$ e $\log \varepsilon_a$ mostrou não ser significativa. A análise de variância desses coeficientes revelou um efeito principal para ambos os fatores, manejo do solo e profundidade, $F(1, 76) = 1,42$; $p = 0,24$ e $F(1, 76) = 0,97$; $p = 0,33$, respectivamente. O teste LSD mostrou que para ambos os coeficientes o sistema convencional de preparo do solo foi significativamente maior do que o plantio direto ($p < 0,05$) e a profundidade de 0,10-0,20 m apresentou uma maior inclinação e por conjectura uma maior continuidade de poros em relação à superfície.

Ocorreu um aumento em N em profundidade para ambos os sistemas, sugerindo um acréscimo na continuidade dos poros ou uma menor tortuosidade (Figura 10). Os valores de N calculados para os sistemas de manejo do solo convencional e plantio direto a partir da relação entre K_a e ε_a foram menores do que aqueles definidos por Ball et al. (1988) em solo arado e sob semeadura direta. Os valores de N encontrados para a profundidade de 0-0,10 m também foram menores àqueles encontrados por Ahuja et al. (1984) que encontraram N , correspondente a constante de Kozeny, na faixa de 4 a 5 quando relacionaram a condutividade hidráulica e a macroporosidade. 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.

Um aumento em N com o aumento no conteúdo de argila para manejo de solos similares foi avaliado por Schjønning et al. (1999). Eles mencionaram que um maior valor de N pode ser interpretado como um solo de estrutura complexa. Desta forma, um N significativamente maior ($N=2,82$) para o sistema convencional em relação ao plantio direto ($N=1,83$) na camada superficial provavelmente indica uma diferença na complexidade da estrutura do solo nesta camada. Porém, em profundidade (0,10-0,20 m) tal diferença não foi significativa.

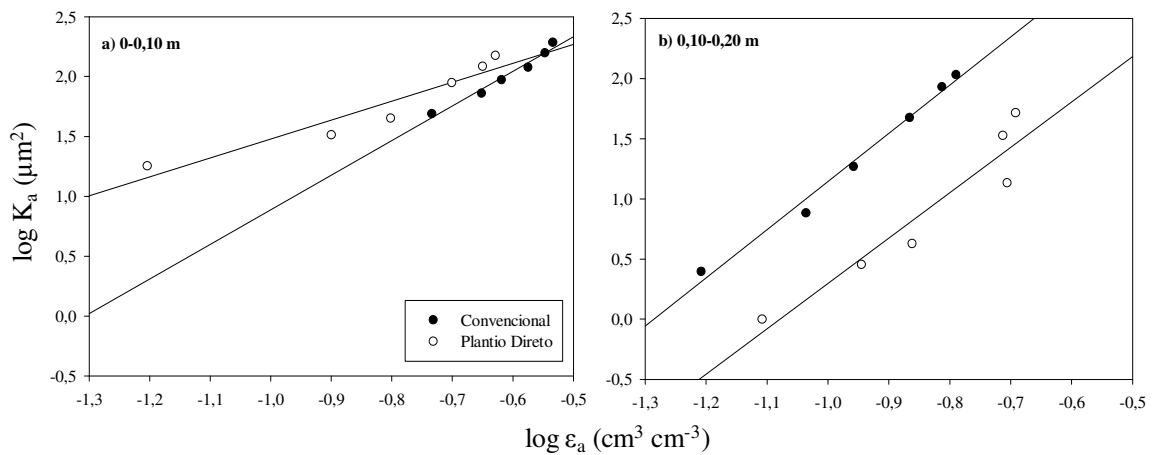


Figura 9 - Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar (K_a) e porosidade de aeração (ε_a) de um Latossolo Vermelho distrófico para dois sistemas de manejo do solo e duas profundidades. Cada ponto representa a média das 20 amostras de cada tratamento nos seis potenciais mátricos (-2, -6, -10, -30, -70, -100 kPa).

Com base nos métodos utilizados para a determinação da continuidade dos poros nos dois sistemas de manejo, obteve-se que pela razão da K_a com a ε_a ambos os sistemas não diferiram quando comparados na camada de 0-0,10 m, em profundidade a situação mudou (Figura 8). Comportamento inverso foi observado na relação log-log desses dois fatores, onde a diferença de continuidade ou tortuosidade dos poros foi obtida na camada de 0,10-0,20 m. No entanto, para os dois métodos o sistema plantio direto apresentou menor continuidade ou maior tortuosidade em relação ao preparo convencional do solo.

Os índices de continuidade obtidos pela razão individual de K_a e ε_a e pela relação geral (slopes) não necessariamente concordam. Por exemplo, Ball et al. (1988) num experimento de manejo, na profundidade entre 0,10-0,15 m encontrou que a razão K_a/ε_a foi menor e a porosidade bloqueada, ε_b , foi maior na semeadura direta do que em solo arado enquanto o slope N da relação da permeabilidade foi maior na semeadura direta do que no outro sistema. Tal diferença não foi associada com diferenças na densidade do solo.

Quando a argila torna-se o tamanho de partícula dominante, como no solo avaliado neste trabalho, a variabilidade estrutural e continuidade dos poros fazem a caracterização das propriedades de fluxo muito mais difíceis de serem medidas numa escala pequena. Medidas em amostras indeformadas e o número e tamanho usados neste estudo podem ter sido insuficientes para caracterizar precisamente a continuidade dos poros neste solo.

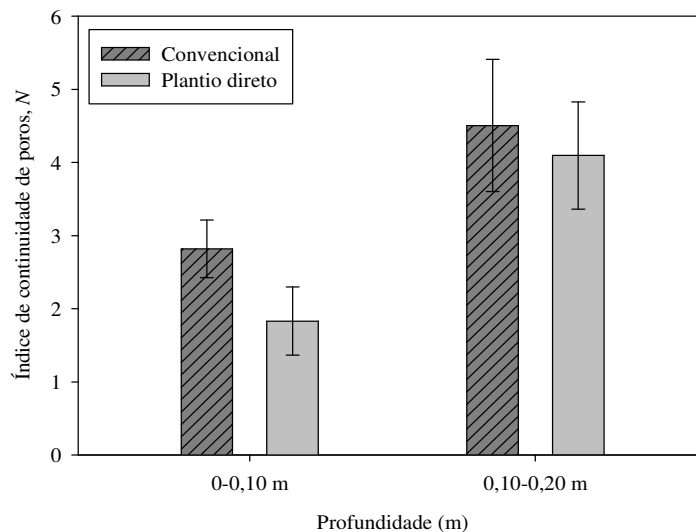


Figura 10 - Valores médios do parâmetro N , do modelo: $\log K_a = \log M + N \log \varepsilon_a$, para um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto, nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%).

Os valores de N apresentados foram calculados com base na média da regressão de cada amostra individualmente, cada qual com seis pontos equivalentes a K_a e ε_a em cada potencial mátrico. No entanto, outra abordagem pode ser utilizada, obtendo-se o intercepto e o *slope* da relação log-log de K_a e ε_a com todos os dados em cada potencial, em ambos os sistemas e profundidades (Figura 11). Calculado desta maneira, cerca de 65% da variância total em K_a foi explicada pelo modelo da regressão (Tabela 4), havendo uma pequena redução no ajuste dos dados comparado com outros ajustes, todos acima de 88%, quando realizado com amostras individuais.

No entanto, obtido desse modo, o índice N de continuidade foi significativamente diferente nos dois sistemas e nas duas profundidades ($p < 0,05$). O preparo convencional continuou apresentando maior N em superfície, porém, na camada subsuperficial, divergindo do método anterior, a continuidade de poros foi significativamente maior no sistema plantio direto (Tabela 4). O volume de poros bloqueados estimado com esses novos valores de intercepto (M) e slope (N) seguiram a mesma tendência da estimativa anterior.

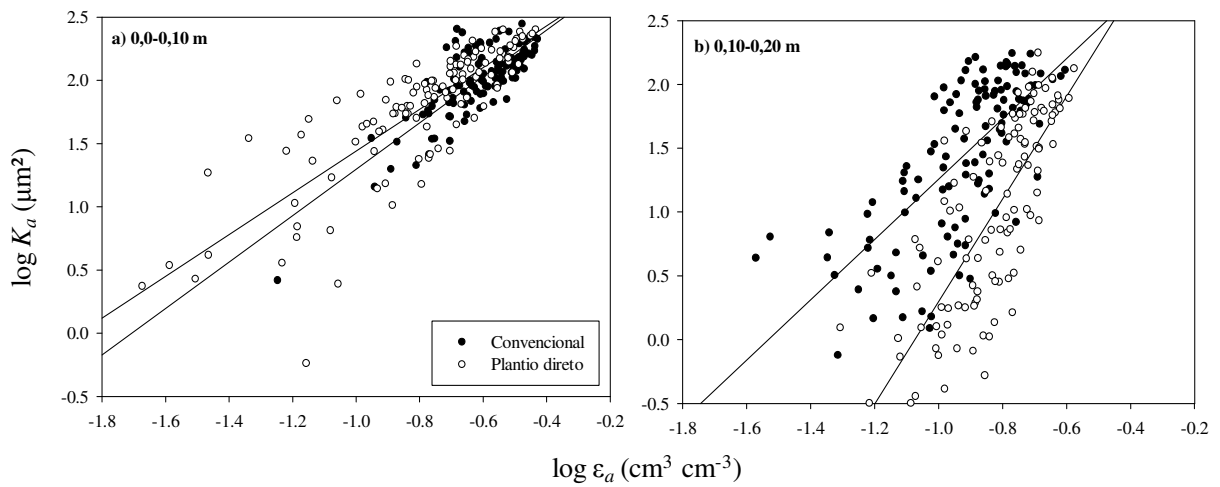


Figura 11 - Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar (K_a) e porosidade de aeração (ϵ_a) de um Latossolo Vermelho distrófico para dois sistemas de preparo do solo e duas profundidades. Os pontos representam os valores em seis potenciais mátricos (-2, -6, -10, -30, -70, -100 kPa).

Tabela 4 – Parâmetros da regressão do modelo $\log K_a = \log M + N \log \epsilon_a$ e porosidade bloqueada, $10^{(-\log M)/N}$, para um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto, nas profundidades de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m

Profundidade (m)	Convencional					Plantio Direto				
	logM	N	R ²	$10^{(-\log M)/N}$ (% v/v)	n	logM	N	R ²	$10^{(-\log M)/N}$ (% v/v)	n
0-0,10	3,134	1,837	0,64	1,97	120	2,845	1,319	0,63	0,70	120
0,10-0,20	3,906	2,689	0,62	3,53	120	4,384	4,104	0,66	8,54	120

A análise de variância dos dados de porosidade bloqueada (ϵ_b) calculada para cada amostra, revelou uma interação significativa entre sistema de manejo x profundidade, $F(1,76) = 16,85$; $p = 0,0001$. As análises subsequentes mostraram que houve um efeito simples para sistema de manejo em ambas as camadas no fator profundidade, sendo $F(1,76) = 7,55$; $p < 0,05$ para a camada de 0-0,10 m e $F(1,76) = 9,35$; $p < 0,05$ para 0,10-0,20 m. Na camada superficial o sistema convencional de preparo do solo apresentou um maior volume de poros bloqueados, o inverso ocorreu na camada de 0,10-0,20 m, onde o volume de poros disponível para o fluxo de ar foi menor no plantio direto (Figura 12).

Avaliando dentro dos sistemas, ambas as profundidades do preparo convencional do solo não apresentaram diferenças no volume de poros bloqueados calculados desta maneira,

enquanto no plantio direto a camada subsuperficial teve um volume significativamente menor de poros preenchidos com ar disponíveis para o processo de convecção em relação à superfície. Utilizando o mesmo modelo da equação aqui empregada para um solo franco argiloso na Escócia, Ball et al. (1988) estimaram volumes de ϵ_b na faixa de 0 a 3,6%, com os maiores valores para o solo sob semeadura direta.

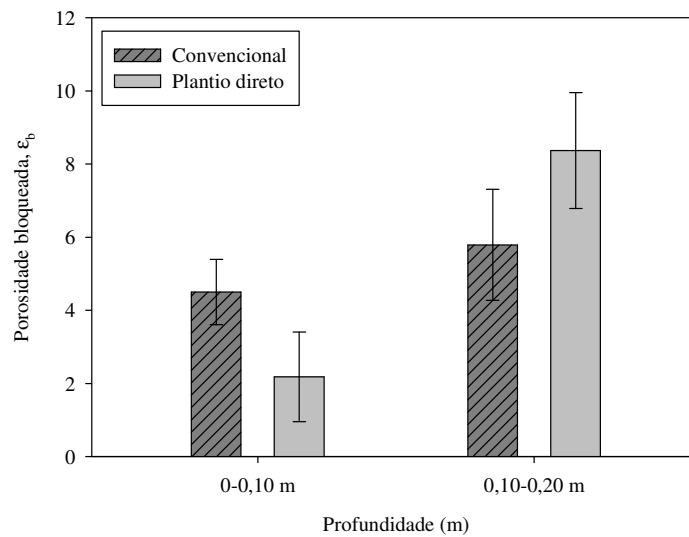


Figura 12 - Valores médios da porosidade bloqueada ($10^{-\log(M/N)}$) para um Latossolo Vermelho distrófico, sob preparo convencional e plantio direto, nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. As barras representam o intervalo de confiança (95%).

3 CONCLUSÕES

Com base na determinação da permeabilidade do solo ao ar (K_a) e a derivação de índices de continuidade de poros (K_l e N), foi possível comprovar parcialmente a hipótese de que o sistema plantio direto resulta na formação de poros mais contínuos.

O revolvimento do solo sob o sistema convencional afetou a porosidade (principalmente a macroporosidade) e o fluxo de ar em maior extensão do que o plantio direto, assim, o solo sob este sistema exibiu maior K_a nas duas camadas avaliadas.

A continuidade de poros avaliada pela razão entre K_a e ε_a (K_l) não resultou em diferença na camada superficial e foi maior para o sistema convencional em subsuperfície. O índice de continuidade N , obtido pela equação de Kozeny-Carman foi diferente quando determinado para cada amostra individualmente ($n=6$) e com base em todas as observações ($n=120$). Ambos revelaram poros mais contínuos no sistema convencional em superfície, no entanto, o primeiro não indicou diferença na camada de 0,10-0,20 m, enquanto o segundo método resultou em uma maior continuidade de poros nesta profundidade para o plantio direto, indicando que esse sistema tendeu a preservar a continuidade dos poros na camada subsuperficial.

REFERÊNCIAS

- 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 Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 699–702, 1984.
- ANKEN, T.; WEISSKOPF, P.; ZIHLMANN, U.; FORRER, H.; JANSKA, J.; PERHACOVA, K. Longterm tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, p. 171–183, 2004.
- ARAÚJO, A.G. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 2004. 224 p. Tese (Doutorado em Sistemas Digitais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- BALL, B.C. Modeling of soil pores as tubes using gas permeabilities, gas diffusivities and water release. **Journal of Soil Science**, London, v. 32, p. 465-481, 1981a.
- _____. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. **Journal of Soil Science**, London, v. 32, p. 483-498, 1981b.
- BALL, B.C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4, p. 1141–1158.
- 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. **Journal of Soil Science**, London, v. 39, p. 327-339, 1988.
- BALL-COELHO, B.R.; ROY, R.C.; SWANTON, C.J. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, p. 249–273, 1998.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil Physics**. 4th ed. New York: John Wiley, 1972. 498 p.
- BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: Elsevier, 1972. 764 p.
- BECHER, H.H. Impact of the long-term straw supply on loess derived soil structure. **International Agrophysics**, Budapest, v. 19, p. 199–202, 2005.
- BENGHOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth responses: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, p. 341-358, 1990.
- BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1384-1393, 1998.

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. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, p. 215-228, 1990.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap. 13, p. 363-375.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. The influence of mechanical resistance and phosphat supply on morphology and function of maize roots. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 30, p. 179-192, 1982.

_____. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237-264. (Developments in Agricultural Engineering, 11).

BOWEN, H. D.; AYERS, P.; SALYANI, M. The relation of air permeability to soil parameters. In: ASAE WINTER MEETINGS, 1983, Chicago. St. Joseph: ASAE, 1983a. Paper n° 83-1541.

_____. Air permeability as an aeration criterion. In: ASAE WINTER MEETINGS, 1983, Chicago. St. Joseph: ASAE, 1983b. Paper n° 83-1551.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 13th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 960 p.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. cap. 9, p. 173-180.

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. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 493-501, 2006.

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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

CARTER, M.R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 12, p. 35-51, 1988.

CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; TOPP, G.C. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. **Soil Science**, Madison, v. 164, p.101-110, 1999.

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, OF THE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE, 13., 1994, Aalborg. **Proceedings...** Aalborg: Royal Veterinary and Agricultural University; Danish Institute of Plant and Soil Science, 1994. p. 7–12.

COREY, A.T. Air permeability. In: KLUTE, A. (Ed). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: ASA; SSSA, 1986. pt. 1, p. 1121-1136. (Agronomy Monograph, 9).

CZYŻ, E., KUKIER, U. The effect of soil bulk density and water content on soil aeration, nitrogen forms and barley yield. **Fragmenta Agronomica**, Pulawy, v. 2A/97, p. 163–166, 1997.

CZYŻ, E.A.; TOMASZEWSKA, J.; DEXTER, A.R. Response of spring barley to changes of compaction and aeration of sandy soil under model conditions. **International Agrophysics**, Lublin, v. 15, p. 9–12, 2001.

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

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

_____. Management versus inherent properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, p. 81-93, 1997.

DAVIS, J.M.; WILSON, J.L.; PHILLIPS, F.M. A portable air-minipermeameter for rapid in situ field measurements. **Ground Water**, Dublin, v. 32, p. 258–266, 1994.

DESJARDINS, T.; VOLKOFF, B.; ANDREUX, F.; CERRI, C.C. Distribution du carbone total et de l'isotope ¹³C dans des sols ferrallitiques du Brésil. **Science du Sol**, Montpellier, v. 29, p.175-187, 1991.

DIAS Jr., M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 175-182, 1996.

DOBRIAKOV, N.F. Dynamics of air permeability of moistened soil under field conditions as a method of evaluating its structural makeup. **Pochvovedenie**, New York, v. 12, p. 1089-1100, 1952.

DOMŻAŁ, H.; GLIŃSKI, J.; LIPIEC, J. Soil compaction research in Poland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 99–109, 1991.

DOUGLAS, J.T.; JARVIS, M.G.; HOWSE, K.R.; GOSS, M.J. Structure of a silty soil in relation to management. **Journal of Soil Science**, London, v. 37, p. 137-151, 1986.

DREWRY, J.J.; LOWE, J.A.; PATON, R.J. Effect of sheep stocking intensity on soil physical properties and dry matter production on a Pallic Soil in Southland. **New Zeland Journal of Agricultural Research**, Canterbury, v. 42, p. 493-499, 1999.

- DUNN, G.H.; PHILLIPS, R.E. Macroporosity of a well-drained soil under no-till and conventional tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 817-823, 1991.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2006. 306 p.
- ERIKSSON, J. **Soil compaction and root environment**. Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, 1982. (Report ,126).
- EVANS, D.D.; KIRKHAM, D. Measurement of the air permeability of soil in situation. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 14, p. 65-73, 1949.
- 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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, p. 57–69, 2005.
- FEIZA, V.; FEIZIENĖ, D.; KADŽIENĖ, G. Agro-physical properties of *Endocalcaripihypogleyic Cambisol* arable layer in long-term soil management systems. **Žemės Ūkio Mokslai**, Kėdainiai, t. 15, n. 2, p. 13–23, 2008.
- FISH, A. N.; KOPPI, A. J. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, Amsterdam, v. 63, p. 255-264, 1994.
- GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap. 21, p. 493-544.
- GERIK, T.J.; MORRISON Jr., J.E.; CICHESTER, F.W. Effect of controlled traffic on soil physical properties and crop rooting. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 434–438, 1987.
- GLIŃSKI, J., LIPIEC, J., **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton: CRC Press, 1990. 311p.
- GLIŃSKI, J.; STĘPNIEWSKI, W. **Soil aeration and its role for plants**. Boca Raton: CRC Press, 1985. 229 p.
- GRABLE, A.R. Effects of compaction on content and transmission of air in soils. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR; H.M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDEN BERG, G.E. (Ed.). **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1971. p. 154-164.
- 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 Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.
- GRADWELL, M.W. Soil physical conditions of winter and growth of ryegrass plants. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Canterbury, v. 8, p. 238-269, 1965.

GREEN, R.D.; FORDHAM, S.J. A field method for determining air permeability in soil. In: _____. **Soil physical conditions and crop production**. Silsoe: Soil Survey of England and Wales, 1975. p. 273–288. (Technical Bulletin, 29).

GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D.; GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v.34, p. 101-114, 1984.

GROVER, B.L. Simplified air permeameters for soil in place. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 19, p. 414-418, 1955.

HALL, D.J.M.; MCKENZIE, D.C.; MACLEOD, D.A.; BARRET, A. Amelioration of a hardsetting Alfisol through deep mouldboard ploughing, gypsum application and double cropping. I. Soil physical and chemical properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 28, p. 253-270, 1994.

HAMBLIN, A.P.; TENNANT, D. The influence of tillage on soil water behavior. **Soil Science**, Baltimore, v. 132, p. 233-239, 1981.

HOWARD, R.F.; SINGER, M.J. Measuring forest soil bulk-density using irregular hole, paraffin clod, and air permeability. **Forest Science**, Washington, v. 27, p. 316-322, 1981.

IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; JACOBSEN, O.H. Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 2, p. 618-626, 2003.

_____. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, Madison, v. 166, p. 97–106, 2000.

IVERSEN, B.V.; SCHJØNNING, P.; POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: Boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, Madison, v. 166, p. 97–106, 2001.

JALBERT, M.; DANE, J. H. A handheld device for intrusive and nonintrusive field measurements of air permeability. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 2, p. 611–617, 2003.

JANSE, A.R.P.; BOLT, G.H. The determination of air permeability of soils. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 8, p. 124-131, 1960.

JUHASZ, C.E.P.; CURSI, P.R.; COOPER, M.; OLIVEIRA, T.C.; RODRIGUES, R.R. Soil water dynamics in a toposequence under savanna woodland (Cerrado) in Assis, SP, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 401-412, 2006.

KAY, B.D.; SILVA, A.P.; BALDOCK, J.A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: Predictions using pedotransfer functions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 77, p. 655-667, 1997.

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 11, p. 93-99, 1946.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. pt. 1, p. 253–261.

KLUTE, A.; DIRKSEN, H.E. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Method of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. pt. 1, p. 687–734.

KROULÍK, M.; KUMHÁLA, F.; HŮLA, J.; HONZÍK, I. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 171-175, 2009.

LAMARCA, C.C. **Stubble over the soil**: the vital role of plant residue in soil management to improve soil quality. Madison: American Society Agronomy, 1996. 264 p.

LEÃO, T.P.; DA SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 279-285, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LETEY, J., STOLZY, L.H., VOLORAS, N., SZUSZKIEWICZ, T.E. Influence of soil oxygen on mineral concentration of barley. **Agronomy Journal**. Madison, v. 54, p. 538–540, 1962.

LIANG, P.; BOWERS, C.G.; BOWEN, H.D. Finite element model to determine the shape factor for soil air permeability measurements. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 38, p. 997-1003, 1995.

LOLL, P.; MOLDRUP, P. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: Application in stochastic water infiltration modeling. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 8, p. 2387-2400, 1999.

LONGSDON, S.D.; MCCOY, E.L.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R. Macropores characterization by indirect methods. **Journal of Soil Science**, London, v. 155, p. 316-324, 1993.

MARQUES, J.D.O.; TEIXEIRA, W.G.; REIS, A.M.; CRUZ Jr., O.F.; MARTINS, G.C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa toposequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, p. 193-206, 2008.

MARTÍNEZ, E.; FUENTES, J. P.; SILVA, P.; VALLE, S.; ACEVEDO, E. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, p. 232-244, 2008.

MATERECHERA, S.A.; MLOZA-BANDA, H.R. Soil penetration resistance, root growth and yield of maize as influenced by tillage system on ridges in Malawi. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.41, p. 13-24, 1997.

MATHY, W. **Einfluss von Untergrundverdichtungen auf die Wasser- und Luftbewegung im Boden**. Kühn-Archiv, Band 54, Halle, Naturwiss, Diss., 1940.

MCCARTHY, K.P.; BROWN, K.W. Soil gas permeability as influenced by soil gas-filled porosity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 997–1003, 1992.

MCKENZIE, B.M.; DEXTER, A.R. Methods for studying the permeability of individual soil aggregates. **Journal of agricultural Engineering Research**, London, v. 65, p. 23-28, 1996.

MCKENZIE, D.C.; McBRATNEY, A.B. Cotton root growth in a compacted Vertisol (Grey Vertosol): I. Predictions using strength measurements and limiting water ranges. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 39, p. 1157-1168, 2001.

MCINTYRE, D.S.; TANNER, C.B. Abnormally distributed soil physical measurements and non-parametric statistics. **Soil Science**, Madison, v. 88, p. 133-137, 1959.

MOLDRUP, P.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; SCHJØNNING, P.; ROLSTON, D.E. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 613-623, 2001.

MOLDRUP, P.; POULSEN, T.G.; SCHJØNNING, P.; OLESEN, T.; YAMAGUCHI, T. Gas permeability in undisturbed soils: Measurements and predictive models. **Soil Science**, Madison, v. 163, p. 180-189, 1998.

MOLDRUP, P.; YOSHIKAWA, S.; OLESEN, T.; KOMATSUMI, T.; ROLSTON, D. E. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 32–40, 2003.

NEVES, C.M.N.; SILVA, A.P.; LEÃO, T.P. Permeabilidade ao ar em amostras de solo pelo método da pressão decrescente. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria.

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WŁODEK, S.; BISKUPSKI, A. Effect of different tillage systems and straw management on some physical properties of soil and on the yield of winter rye in monoculture. **International Agrophysics**, Budapest, v. 17, p. 175–181, 2004.

PAYTON, M.E.; MILLER, A.E.; RAUN, W.R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, p. 547-551, 2000.

PHILLIPS, R.E.; KIRKHAM, D. Soil compaction in the field and corn growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, p. 29-34, 1962.

POULSEN, T.G.; MASSMANN, J.W.; MOLDRUP, P. Effects of vapor extraction on contaminant flux. To atmosphere and ground water. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 122, p. 700-706, 1996.

POULSEN, T.G.; IVERSEN, B.V.; YAMAGUCHI, T.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P. Spatial and temporal dynamics of air permeability in a constructed field. **Soil Science**, Madison, v. 166, p. 153-162, 2001.

RACHAVAM, G.S.V.; MCKYES, E.; CHASSÊ, M. Effect of wheel slip on soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, St. Joseph, v. 22, p.79-83, 1977.

REEVE, R.C. A method for determining the stability of soil structure based upon air and water permeability measurements. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 17, p. 324-329, 1953.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

ROLSTON, D.E.; MOLDRUP, P. Gas diffusivity. In DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4, p. 1113–1137.

ROSEBERG, R.J.; MCCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 969-974, 1990.

_____. Tillage- and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: air permeability assessment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1261-1267, 1992.

SCHJØNNING, P.; RASMUSSEN, K. J. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, p. 69–82, 2000.

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. **European Journal of Soil Science**, London, v. 53, p. 331–339, 2002.

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**, Amsterdam, v. 89, p. 177-198, 1999.

SAS INSTITUTE. **SAS: user's guide: statistics**. 9th ed. Cary, 2002. 943 p.

SCOOT, G.J.T.; WEBSTER, R.; NORTICLIFF, S. The topology of pores structure in cracking clay soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 39, p.303-314, 1988.

SHAN, C. Analytical solutions for determining vertical air permeability in unsaturated soils. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, p. 2193–2220, 1995.

SHAN, C.; FALTA, R.W.; JAVANDEL, I. Analytical solutions for steady state gas flow to a soil vapor extraction well. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, p. 1105–1120, 1992.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. Analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Cambridge, v. 52, p. 591-611, 1965.

- SHARRATT, B.S. Corn stubble height and residue placement in the Northern US Corn Belt. Part II. Spring microclimate and wheat development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p. 253–261, 2002.
- SHTYKOV, V.I.; DAISHEV, S.T. Determination of air permeability of soils. **Soviet Soil Science**, New York, v. 18, p.115-122, 1986.
- SHUKLA, M.K.; LAL, R. Air permeability of soils. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of soil science**. Madison: Marcel Dekker, 2006. p. 60-63.
- SILVA, M.A.S.; MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 544-552, 2005.
- SO, H.B.; GRABSKI, A.; DESBOROUGH, P. The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, p. 180-184, 2009.
- SIDIRAS, N.; VIEIRA, S.R.; ROTH, S.H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 265-268, 1984.
- SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, p. 213-220, 1997.
- SPRINGER, D.S.; LOAICIGA, H.A.; CULLEN, S.J.; EVERETT, L.G. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions. **Ground Water**, Dublin, v. 36, p. 558–565, 1998.
- STEINBRENNER, E.C. A portable air permeameter for forest soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Melbourne, v. 23, p. 478-481, 1959.
- STONESTROM, D.A., RUBIN, J. Air permeability and trapped-air content in two soils. **Water Resource Research**. Washington, v. 25, p. 1959–1969, 1989.
- TARTAKOVSKY, D. M.; MOULTON, J. D.; ZLOTNIK, V. A. Kinematic structure of minipermeameter flow. **Water Research**, New York, v. 36, p. 2433–2442, 2000.
- TAYLOR, H.M., RATLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. **Soil Science**, Madison, v. 108, p. 113-119, 1969.
- TAYLOR, S.A.; ASHCROFT, G.L. **Physical edaphology: the physics of irrigated and nonirrigated soils**. San Francisco: William Freeman, 1972. 532 p.
- TIMLIM, D.J.; AHUJA, L.R.; ANKENY, M.D. Comparison of three field methods to characterize apparent macro pore conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 278-284, 1994.

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

VAN GROENEWOUD, H.S. Methods and apparatus for measuring air permeability of the soil. **Soil Science**, Madison, v. 106, p. 275-279, 1968.

VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. L'humus des sols du Brésil: Nature et relations avec l'environnement. **Cahiers ORSTOM. Serie Pédologie**, Paris, v. 24, n. 2, p. 83-95, 1988.

WARKENTIN, B.P. The changing concept of soil quality. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 50, p. 226-228, 1995.

WILSON, M.J., MALISZEWSKA-KORDYBACH, B. (Ed.). **Soil quality, sustainable agriculture and environmental security in central and eastern Europe**. Dordrecht: Kluwer, 2000. 392 p. (Series 2, Environment Security, 69).

WU, L.; SWAN, J.B.; PAULSON, W.H.; RANDALL, G.W. Tillage effects on measured soil hydraulic properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.25, p. 17-33, 1992.

XU, D.; MERMOUD, A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, p. 11-19, 2001.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 38, p. 947-958, 2000.

ZOU, C.; FENFOLD, C.; SANDS, R.; MISRA, R.R.; HUDSON, I. Effects of soil air-filled porosity, matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 236, p. 105-115, 2001.