Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica

Sérgio Damaso da Silveira Junior

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

Piracicaba
2012

Sérgio Damaso da Silveira Junior
Engenheiro Agrônomo

Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica

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
2012

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

Silveira Junior, Sérgio Damaso da
Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica / Sérgio Damaso da Silveira Junior. - - Piracicaba, 2012.
64 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Aeração 2. Descompactação do solo 3. Latossolos - Propriedades físicas 4. Permeabilidade do solo 5. Plantio direto 6. Porosidade do solo 7. Solos - Qualidade I. Título

CDD 631.43
S587q

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

Dedicatória

Para meus pais, Sérgio e Elisa
e irmão, Rafael,
sem o apoio e inspiração de vocês,
nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de cursar o mestrado e executar o presente projeto;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante o mestrado;

Ao prof. Dr. Álvaro Pires da Silva, pela orientação e apoio durante todo este período;

A profª Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola pela concessão da área experimental e pelas contribuições dadas durante toda a condução deste trabalho;

Ao prof. Dr. Cássio Antônio Tormena, pela amizade e fundamental auxílio na correção;

Ao pós-doutorando Getúlio Coutinho Figueiredo, pelos ensinamentos, paciência e principalmente pela amizade;

A equipe da Física do Solo: Edson, Marina, Osvaldo, Sâmala e Sueli, pelo apoio e bom convívio;

Aos meus novos irmãos Thiago e Tânia, pela amizade e momentos de descontração;

Ao apoio constante dado por toda minha família;

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 17
1 INTRODUÇÃO 19
2 DESENVOLVIMENTO 21
2.1 Revisão bibliográfica 21
2.1.1 Plantio Direto e propriedades físicas do solo..... 21
2.1.2 Aeração do solo..... 22
2.1.3 Escarificação mecânica e biológica..... 23
2.1.4 Permeabilidade do solo ao ar..... 26
2.2 Material e métodos..... 31
2.2.1 Caracterização da área experimental..... 31
2.2.2 Textura e densidade de partículas do solo..... 31
2.2.3 Delineamento experimental e tratamentos..... 33
2.2.4 Amostragem..... 34
2.2.5 Determinação dos atributos físicos do solo..... 34
2.2.5.1 Permeabilidade ao ar (K_a)..... 34
2.2.5.2 Densidade, macro e microporosidade, porosidade total, porosidade de aeração e densidade de partículas do solo..... 35
2.2.5.3 Índices de continuidade de poros..... 36
2.2.6 Análise estatística..... 37
2.3 Resultados e discussão 37
2.3.1 Densidade do solo 37
2.3.2 Porosidade do solo 39
2.3.3 Permeabilidade ao ar do solo..... 42
2.3.4 Índices de continuidade de poros..... 45
3 CONCLUSÕES 53
REFERÊNCIAS 55

RESUMO

Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica

O objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos de práticas de descompactação em propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa, após dezesseis anos em sistema plantio direto. Os tratamentos, aplicados em maio de 2009, consistiram de: plantio direto (PD), plantio direto com escarificação mecânica feita por subsolagem a 0,25 m (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica por meio da cultura do nabo forrageiro (PD-B). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições, perfazendo 12 unidades experimentais. Dezoito meses após a aplicação dos tratamentos, foram coletadas amostras indeformadas de solo em cada unidade experimental, em cinco profundidades: 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m. Foram avaliados as propriedades físicas porosidade, densidade do solo (Ds), permeabilidade ao ar (K_a) e índices de continuidade de poros.. A K_a foi medida através de um permeâmetro de carga constante de ar em nove potenciais mátricos (ψ_m): -0,5; -1; -2; -3; -5; -7; -10; -50 e -100 kPa. Os resultados indicaram que as propriedades físicas do solo avaliadas não foram alteradas pelos tratamentos de descompactação do solo. Por outro lado, houve diferenças entre camadas de solo, principalmente entre 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Na camada de 0,10-0,20 m, a Ds foi maior e a porosidade total e K_a (ψ_m = -5 kPa) foram menores do que na camada de 0,0-0,10 m. No tratamento PD-E verificou-se que a macroporosidade foi maior na camada de 0-0,10 m comparado com os outros tratamentos. Os índices de continuidade de poros K_1 e N não foram influenciados pelos tratamentos. Os resultados sugerem que, no solo estudado, o efeito da escarificação é de limitada persistência.

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

ABSTRACT

Physical quality of non-tilled Oxisol subjected to mechanical and biological decompaction

This study aimed to evaluate the effects of decompaction practices on physical properties of Typic Hapludox, clayey texture, after 16 years under no-tillage. The treatments, applied in May 2009, consisted of the following: no-tillage (PD), no-tillage mechanically chiseled at 0.25 m depth (PD-E), and no-tillage biologically loosened with radish crop (PD-B). The experiment was randomized block design, with four replicates, totaling 12 experimental units. Eighteen months after the treatment application, undisturbed soil samples were collected from each experimental unit at five depths: 0.0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30; 0.30-0.40; and 0.40-0.50 m. We assessed the following soil physical properties: porosity, bulk density (Bd), air permeability (K_a) and pore continuity indices. K_a was measured using a constant head air permeameter in nine soil matric potentials (ψ_m): -0.5, -1, -2, -3, -5, -7, -10, -50, and -100 kPa. The results indicated that the soil physical properties measured were unaltered by the soil decompaction treatments. In contrast, there were differences between soil layers, especially between 0.0-0.10 m and 0.10-0.20 m. At the 0.10-0.20 m depth layer, Bd was higher, whereas total porosity and K_a (ψ_m = -5 kPa) were lower than the 0.0-0.10 m depth layer. In the treatment PD-E, macroporosity was higher in the 0-0.10 m layer depth compared with the other treatments. The pore continuity indices were not influenced by the treatments. These results suggest that, in the soil studied, the effect of chiseling is limited.

Keywords: Soil aeration; Air permeability; Pore continuity; Soil quality

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem de satélite da área avaliada na Fazenda Escola Capão da Onça, no município de Ponta Grossa-PR 31

Figura 2 - Espacialização e dimensão das parcelas experimentais na área de estudo..... 32

Figura 3 - Principais características da relação log–log entre a permeabilidade ao ar (K_a) e a porosidade de aeração (ε_a); slope *N*, intercepto com o eixo log (K_a), *M* e o limite do conteúdo de ar, ε_b 35

Figura 4 - Valores médios de densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12..... 38

Figura 5 - Valores médios de porosidade total (a), macroporosidade (b) e microporosidade (c) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Nas alíneas *a* e *b*, as linhas tracejadas representam o valor de porosidade total considerado ideal (BRADY; WEIL, 2007) e o limite crítico de macroporosidade para o desenvolvimento de plantas (BAVER, 1972), respectivamente. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e minúsculas, às profundidades, letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12..... 39

Figura 6 - Valores médios do log da permeabilidade ao ar (K_a) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos, e minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12..... 43

Figura 7 - Valores médios do log do índice de continuidade de poros, K_1, derivado da razão

entre permeabilidade ao ar e porosidade de aeração (K_a/ε_a) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e, minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12 45

Figura 8 - Valores médios do parâmetro *N*, do modelo: $\log K_a = \log M + N \log \varepsilon_a$, para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12 46

Figura 9 - Relação log–log entre a permeabilidade ao ar (K_a) e a porosidade de aeração (ε_a); de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Os pontos representam os valores de $\log\varepsilon_a$ correspondente a cinco potenciais mátricos (-5, -7, -10, -50, -100 kPa) 47

Figura 10 - Valores médios da porosidade bloqueada ($\varepsilon_b=10^{-\log(M)/N}$, % v/v) para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e, minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12 48

Figura 11 - Valores médios da porosidade de aeração na capacidade de campo (-10 kPa) para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. A linha tracejada representa o valor crítico para porosidade de aeração de 0,10 m^3 m^{-3}, proposto por Baver et al. (1972). Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e, minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12..... 49

Figura 12 - Perfil da distribuição das fases para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m..... 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição do tamanho de partículas e densidade de partículas de um Latossolo Vermelho distrófico, nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m..... 31

Tabela 2 - Análise descritiva da densidade do solo (Ds) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. N=12..... 37

Tabela 3 - Parâmetros da regressão do modelo $\log K_a = \log M + N \log \varepsilon_a$, em Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. N=60..... 46

1 INTRODUÇÃO

O potencial do solo para agricultura é dado por sua fertilidade, que em relação às exigências da planta, compreende a capacidade de fornecimento adequado de água, oxigênio, nutrientes, calor e possibilidade de penetração de raízes. Em relação à aeração do solo, esta refere-se à capacidade deste, através de seus poros interconectados, armazenar e transmitir ar, particularmente os gases mais comuns encontrados no ar atmosférico: O_2 e CO_2. O processo de aeração, além de fundamental para o desenvolvimento de plantas, atua também como regulador da temperatura do solo. Os poros utilizados para a aeração também são canais para a infiltração da água, dos quais, os menores funcionalmente atuam na retenção de modo que ela permaneça disponível por mais tempo para a absorção pelas plantas.

A adoção de sistemas de preparo com menor revolvimento do solo pode resultar num maior grau de compactação de sua camada superficial. Ao mesmo tempo, tem-se constatado que várias culturas são mais sensíveis à compactação do solo, pois as alterações nas propriedades físicas podem induzir condições adversas ao desenvolvimento das plantas, como redução das taxas de difusão de oxigênio no solo e elevada resistência à penetração de raízes. Poucas práticas de manejo têm o potencial de modificar a aeração, tanto diretamente quanto rapidamente, como o preparo do solo. Um manejo inadequado pode acarretar em deterioração da estrutura e, consequentemente, na redução do espaço poroso do solo, limitando os processos de aeração e aqueles dependentes da disponibilidade e organização de poros.

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) determina o fluxo convectivo de gases na matriz do solo e tem sido utilizada para descrever a disposição estrutural e a continuidade de poros do solo. Portanto, é um indicador da eficiência da aeração do sistema. Para sua medida, faz-se uso da teoria que rege o movimento de massa de ar através do solo, a qual é baseada na Lei de Darcy para o fluxo laminar de líquidos. Esta define que a velocidade de um fluido através de uma coluna porosa é diretamente proporcional a diferença de pressão e inversamente proporcional ao comprimento da coluna. Isso pode ser adaptado para o fluxo de massa de ar, assumindo condições isotérmicas e fluxo não turbulento de um gás viscoso.

A permeabilidade ao ar é muito sensível às diferenças na estrutura do solo e tem sido largamente utilizada para caracterizar as influências de sistemas de manejo. Além da modificação do sistema poroso, a aeração sofre alterações de acordo com a umidade do solo pois ambos – ar e água – ocupam o espaço poroso da matriz. Isso pode ser problemático em solos compactados devido à redução da macroporosidade, que pode ser reduzida à valores menores que o limite de 10%, considerado como valor mínimo para que a planta desenvolva

sem restrições. Além da porosidade total e macroporosidade, os índices de continuidade de poros são indicadores da movimentação tridimensional da água e do ar no solo, pois estimam a quantidade de poros que são efetivamente utilizados para seus fluxos.

A subsolagem e a escarificação são alternativas recomendadas freqüentemente para mitigar a compactação do solo. Essas práticas são realizadas por equipamentos cujas hastes penetram no solo, sendo tracionados por tratores. A operação permite a mobilização na camada definida sem haver inversão de camadas. Outra alternativa, refere-se ao uso de plantas que tenham sistema radicular profundo e agressivo, capazes de crescerem em camadas de solo compactado, promovendo a formação de novos poros no solo. Entre estas plantas, destaca-se a cultura do nabo forrageiro (*Raphanus sativus*).

No Brasil, estudos sobre a dinâmica de aeração dos solos ainda são incipientes em comparação com outras propriedades físicas. Portanto, há carência desse tipo de informação para os solos brasileiros. Ademais, o fluxo de ar apresenta vantagem por causar menores distúrbios na estrutura da amostra de solo do que o fluxo de água. A hipótese deste estudo é de que as práticas de escarificação, mecânica e biológica, em um Latossolo Vermelho distrófico sob sistema de plantio direto há mais de 16 anos, são eficientes em promover a melhoria dos atributos físicos do solo relacionados à aeração. Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos de práticas de descompactação, aos 18 meses após sua aplicação, na qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa, sob sistema plantio direto.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Plantio Direto e propriedades físicas do solo

Um dos maiores avanços no processo produtivo da agricultura brasileira foi a introdução a partir do início da década de 1970, do sistema plantio direto (PD), mais especificamente na região Sul do Brasil. Em 2006, a área sob PD já somava cerca de 25,5 milhões de hectares, ou seja, metade da área cultivada com grãos no país. Um terço dessa área está localizado na região dos cerrados e existe ainda uma grande perspectiva de que a adoção desse sistema de cultivo se estenda para outras regiões agrícolas do país (FEBRAPD, 2011).

O manejo influi nas propriedades físicas do solo, alterando a dinâmica do ar, água e de solutos no solo. O sistema de plantio direto é a forma de manejo conservacionista, que envolve um conjunto de técnicas integradas que visam aperfeiçoar a expressão do potencial genético de produção das culturas com simultânea melhoria das condições ambientais (MACHADO et al., 2004). Segundo Seixas (2001), o plantio direto é caracterizado pela manutenção da palhada deixada pela cultura anterior, aplicação de rotação de culturas, redução da taxa de mineralização da matéria orgânica, favorecimento da atividade biológica no controle de pragas e plantas daninhas e intensificação dos processos de agregação do solo. Dessa forma, Amado et al. (2005) afirmam que o PD é uma das mais eficientes estratégias para melhoria da qualidade e do potencial produtivo do solo agrícola. Fernandes et al. (1983) e Silva et al. (2000a,b) encontraram efeito do sistema de preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto na densidade do solo. Dentre os sistemas estudados, esses autores observaram que o sistema plantio direto apresentou uma distribuição de poros mais uniforme com a profundidade, refletindo a melhor estruturação natural do solo. Oliveira et al. (2002) em solos de igual declividade, constataram que o PD reduz em cerca de 75% as perdas de solo e em 20% as perdas de água, em relação às áreas onde há revolvimento do solo.

A ausência de revolvimento do solo, associado à modernização da agricultura nas últimas décadas visando à otimização de práticas agrícolas, tem levado ao uso intensivo de máquinas agrícolas de grande porte e consequentemente, maior intensidade do uso das terras (CHAMEN et al., 2003). Somado a isso, o surgimento de novas doenças tem estimulado à aplicação intensa de defensivos e, dessa forma, aumenta-se a freqüência de tráfego das máquinas sobre o solo. Portanto, sob plantio direto é comum a ocorrência de compactação da camada superficial do solo e que, dependendo do seu grau, poderá prejudicar o desenvolvimento das plantas. Além do impacto usual, causado pela pressão dos rodados e

outros componentes das máquinas agrícolas, quando as operações são feitas em condições de elevada umidade, os danos na qualidade estrutural do solo são potencializados, o que acarreta aumento da compactação em muitas áreas manejadas sob esse sistema (ARAÚJO et al., 2001; COLLARES et al., 2006).

2.1.2 Aeração do solo

A aeração do solo é definida como a renovação da composição do seu ar, tendendo a igualá-la à do ar atmosférico, pois, devido à respiração das plantas e dos microrganismos e à decomposição do material orgânico, a atmosfera livre e a do solo tendem a diferenciar-se, quantitativamente, na sua composição (CAMARGO; GTIOKMAIN, 2008). É a renovação do ar do solo e o aumento da concentração de oxigênio que permitem que o processo de respiração radicular e o metabolismo microbiano aeróbico sejam mantidos em níveis adequados (SCANLON et al., 2002). No solo, as trocas gasosas são governadas pela difusão e, em menor escala, pelo fluxo de massa (HILLEL, 1980). Para que a aeração ocorra de forma eficiente em ambos os processos, é necessário que existam poros ocupados por ar (porosidade de aeração, εa), conectados entre si e com a superfície do solo (HILLEL, 1980; SCANLON et al., 2002).

A aeração do solo é diretamente dependente da estrutura do solo e, conseqüentemente, de seu sistema poroso. Em solos bem estruturados, os macroporos (> 0,08 mm) são geralmente encontrados entre as unidades estruturais. Estes poros podem ocorrer como espaços entre os agregados ou como fissuras entre blocos e/ou prismas (BRADY; WEIL, 2007) ou devido à atividade biológica, neste caso, a bioturbação do solo é responsável pela formação de poros grandes e contínuos que interferem em processos dinâmicos do solo, como o fluxo de água e ar no solo (LOGSDON et al., 1990; GABET et al., 2003; CULLUM, 2009). Ao contrário dos macroporos, os poros menores (< 0,08 mm), denominados microporos, geralmente são ocupados por água. Seu movimento é lento e a maior parte da água retida nestes poros não está disponível para as plantas. Devido ao seu tamanho reduzido, mesmo quando não preenchidos por água, este tamanho de poros não permite uma movimentação adequada do ar no solo (BRADY; WEIL, 2007).

Diante do exposto, a aeração do solo se mostra dependente da quantidade, tamanho e continuidade dos poros e do conteúdo volumétrico de água, ou seja, dependente do manejo do solo, que, quando praticado de forma inadequada promove a compactação, o que reduz a continuidade, obstrui e fragmenta os poros, e compromete a funcionalidade do sistema poroso do solo (JEGOU et al., 2002; LANDEFELD et al., 2004). Vários 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; LETEY et al., 1985; GERIK et al., 1987; GLIŃSKI; LIPIEC, 1990; DOMŻAŁ et al., 1991; BOONE; VEEN, 1982; CARTER et al., 1994; CZYŻ; KUKIER, 1997; CZYŻ et al., 2001).

O crescimento das plantas é restringido quando a taxa de difusão de gases no solo é drasticamente reduzida, sendo isso possível quando a porosidade de aeração for menor que 0,10 m^3m^{-3} por longo tempo (GRABLE; SIEMER, 1968; DREWRY et al, 2008). Em períodos quando o solo permanece com alto conteúdo de água a situação piora, pois as trocas gasosas são praticamente comprometidas, e a difusão dos gases na água é bastante lenta (BALL; SMITH, 1991). A compactação torna essa situação ainda mais crítica, pois o processo de reduzir ou cessar as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera é antecipado. Ou seja, mesmo se o solo não estiver muito úmido o espaço poroso ocupado por ar pode ser comprometido (BRADY; WEIL, 2007).

O efeito da deficiência no transporte de gases no solo sobre o metabolismo das plantas é dependente do tempo de duração dessas restrições (DREW; LINCH, 1980). Nas plantas, o primeiro efeito de uma aeração deficiente no solo é a deficiência de oxigênio na rizosfera e, consequentemente, o cessamento da respiração. Isto leva à paralisação na absorção de nutrientes e do crescimento da planta (SOJKA, 1992), podendo ser irreversível se a deficiência for prolongada, causando a morte da planta (DREW, 1997). A aeração deficiente do solo também promove o aumento da incidência de doenças radiculares (COOK; PAMPENDICK, 1972) e o condicionamento do metabolismo microbiano anaeróbico, que leva à síntese de substâncias fitotóxicas as raízes (DREW; LINCH, 1980; ALLMARAS et al., 1988), aumento dos riscos de emissão de gases nocivos a qualidade do ar, como o gás carbônico, metano e óxido nitroso (QUASTEL, 1965; HALL; MATSON, 1996), os quais contribuem com o aumento do efeito estufa (MANCINELLI, 1995; SCHARON et al., 1996).

2.1.3 Escarificação mecânica e biológica

A compactação gera alterações físicas no solo, expressas pela redução do volume de macroporos (STONE et al., 2002), que diminui a aeração, repercutindo em um ambiente que pode ser inadequado ao desenvolvimento das raízes. Conforme Séguy et al. (1999), a compactação aumenta a resistência à penetração das raízes em função da elevação da densidade do solo e conseqüente maior resistência de sua estrutura física e diminuição da

concentração de oxigênio, resultando em menor taxa de mineralização da matéria orgânica e difusão lenta dos nutrientes e oxigênio para as raízes.

Dado a isso, fica clara a importância do desenvolvimento e aperfeiçoamento de práticas que visem combater os danos sofridos pelo solo, e que ao mesmo tempo busquem a manutenção dos benefícios gerados através da adoção do PD. Dentre as opções para a operação de descompactação do solo em sistema de semeadura direta, escarificadores e subsoladores são os implementos mais usados devido à maior capacidade de penetração e mobilização, sem que haja o revolvimento do solo, como ocorre quando da utilização de arados e grades de discos (ARAÚJO, 1999). A escarificação pode ser descrita como a ação de uma ferramenta estreita que rompe camadas adensadas, com o objetivo de diminuir sua resistência à penetração de raízes, aumentar a aeração e a drenagem interna do solo, de modo a diminuir o escoamento superficial e o tempo de encharcamento (TAYLOR; BELTRAME, 1980). A utilização desses implementos com hastes produzem superfícies mais rugosas (KOCHHANN; DENARDIN, 2000; CARVALHO FILHO et al., 2007) e apresentam menor poder desagregador do solo do que aração e gradagem, além de manter maior quantidade de restos culturais em superfície (VERNETTI JÚNIOR; GOMES, 1999). Alguns autores afirmam que esse implemento que consegue deixar mais de 1/3 da cobertura vegetal intacta, mantendo, assim, uma das características idealizadas pelo sistema de semeadura direta (ORTIZ-CAÑAVATE; HERNANZ, 1989; TAYLOR; BELTRAME, 1980). Nesse contexto, Suzuki (2005) encontrou eficiência do escarificador na descompactação até a profundidade de 0,20 m de um Latossolo Vermelho sob semeadura direta.

No entanto, antes de realizar a subsolagem ou a escarificação de uma área agrícola, deve-se levar em conta que esta é uma operação de alto consumo energético, provavelmente o maior dentre as operações agrícolas. Portanto, somente devem ser mobilizados os solos que realmente necessitem dessa operação, o que ressalta a importância do aperfeiçoamento de indicadores da qualidade física, para avaliação dessas áreas. Levantamentos iniciais sobre o tipo de solo e suas condições (densidade do solo, resistência mecânica à penetração, teor de água e profundidade da camada compactada) são de extrema importância para a tomada de decisão (LANÇAS, 2002). Machado et al. (1996) ressaltam que a melhoria ou manutenção das condições físicas do solo não se consegue somente por essas práticas mecânicas, porém, quando estas são corretamente empregadas, propiciam aumento do período de uso do solo com condições adequadas para o estabelecimento das culturas.

Além da escarificação mecânica, a escarificação biológica refere-se à inclusão de plantas que tenham sistema radicular pivotante e agressivo capaz de crescer em camadas de

solo compactado (SILVA; ROSOLEM, 2002; ABREU et al. 2004; MUZILLI, 2006; MAGALHÃES et al., 2009; SEVERIANO et al., 2010). O uso desse tipo de planta de cobertura, como o nabo-forrageiro, tem capacidade de formar bioporos estáveis e melhorar os atributos físicos do solo (Cubilla et al., 2002). No entanto, o mesmo autor afirma que a eficiência do método biológico depende do estado inicial de compactação do solo, pois mesmo espécies indicadas para essa finalidade têm o desenvolvimento de suas raízes limitado quando ocorrem níveis muito elevados de densidade do solo e de resistência à penetração.

Isso pode ser comprovado no estudo feito por Materechera et al. (1991), no qual avaliaram a capacidade do sistema radicular de 22 espécies em se desenvolver em recipientes preenchidos com solo arenoso à 4,2 MPa de resistência à penetração e 0,2 kg kg^{-1} de conteúdo de água: eles observaram aumento do diâmetro e redução média de 90 % no comprimento das raízes em relação ao controle. Kubota et al. (2005), logo após o manejo utilizando nabo-forrageiro em Argissolo de textura média, verificaram aumento da densidade do solo na camada superficial (0 - 0,05 m), ou seja, de imediato, a pressão exercida no solo pelas raízes de grande diâmetro do nabo-forrageiro contribuiu de forma negativa na qualidade física do solo. Porém, nas avaliações após a cultura de soja, cultivada em sequência ao nabo, verificou-se maiores valores de macroporosidade, porosidade total e a estabilidade de agregados do solo. Por essa razão, concluiu-se que nessas condições o nabo-forrageiro pode ser indicado como subsolador biológico.

Câmara e Klein (2005) realizaram escarificação em área sob semeadura direta durante seis anos e a operação provocou melhoria nas propriedades físicas do solo, como redução da densidade do solo, aumento da rugosidade superficial, condutividade hidráulica e da taxa de infiltração de água. Seis meses após o manejo mecânico, os restos culturais na superfície do solo foram semelhantes aos do solo sem revolvimento. Abreu et al. (2004) avaliaram o efeito da escarificação mecânica e biológica utilizando crotalaria (*Crotalaria spectabilis*) sob cultivo mínimo e encontraram resultados contrastantes dependendo da propriedade física considerada: se o indicador de qualidade física utilizado for a resistência à penetração, a escarificação mecânica é mais eficiente. Considerando a condutividade hidráulica do solo, há maior eficácia da escarificação biológica na ruptura da camada compactada e o estabelecimento de poros condutores de água. Ao avaliar a produção do capim-tifton 85, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, Magalhães et al. (2009) concluíram que essa cultura recuperou a estrutura do solo e promoveu condições físicas adequadas ao desenvolvimento da forrageira.

Contudo, dependendo do manejo realizado após a escarificação, como a escolha das culturas no esquema de rotação e o tráfego, seus efeitos sobre as propriedades físicas do solo podem ter duração de seis meses a três anos (FRANCHINI; DEBIASI, 2009), e os maiores benefícios da subsolagem e escarificação são conseguidos nos anos com deficiências hídricas pronunciadas, consideradas como fator limitante para o desenvolvimento das plantas (CASSEL, 1979).

2.1.4 Permeabilidade do solo ao ar

Tendo em vista a importância da manutenção da qualidade física do solo, a partir da escolha do manejo adequado para determinada área, somada a utilização de práticas remediadoras do processo de compactação, é necessário escolher métodos para avaliar o comportamento do solo e a validação das práticas adotadas. Uma melhor capacidade de avaliar as alterações estruturais no solo devido ao manejo tem implicações nas decisões administrativas relacionadas ao crescimento das raízes das plantas (THOMAS; PHILLIPS, 1979; BEVEN; GERMANN, 1982). Esse crescimento depende de dois fatores físicos incorporados no conceito de estrutura do solo: a resistência à penetração do solo e o número, tamanho, e geometria dos poros (LETEY, 1985).

Os impactos na qualidade física do solo, em conseqüência do seu manejo, têm sido quantificados utilizando-se diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, como a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (BEUTLER et al., 2001), a permeabilidade do solo ao ar e a infiltração de água (CASTRO FILHO et al., 1998; CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990; VEZZANI, 2001, REICHERT et al., 2003).

A permeabilidade ao ar, K_a, é definida como a facilidade com que o ar entra ou passa por meio de uma massa de solo. Essa resistência imposta pelo solo à passagem do ar é influenciada principalmente pela quantidade, tamanho e continuidade do sistema de poros. A determinação da K_a é rápida e fácil e permite coletar informações acerca da estrutura do solo (BUEHRER, 1932; IVERSEN et al., 2001; BALL; SCHJØNNING, 2002) e sua estabilidade (REEVE, 1953, 1965), além disso, tem sido utilizada como um índice da estrutura do solo em estudos de compactação, pois apresenta relação inversa com a mesma (BARDEN; PAVLAKIS, 1971). Nessa linha, Peth e Horn (2006) e BEUTLER et al. (2001) utilizam a K_a como indicador da eficiência funcional do sistema de poros com deformação.

Outro fator que influencia K_a é a temperatura, pois essa apresenta grande influência na viscosidade do fluido. Para gases sob baixas pressões, por exemplo, a viscosidade aumenta

com a redução da temperatura. Dado a isso, muitos cientistas realizam medições de permeabilidade ao ar em condições controladas de laboratório porque a temperatura, as dimensões e as variáveis geométricas são mais facilmente definidas (IVERSEN et al., 2000; TARTAKOVSKY et al., 2000). Além disso, informações mais detalhadas sobre a rede de poros podem ser obtidas em laboratório por medições em uma ampla gama de potenciais mátricos (BUEHRER, 1932; MOLDRUP et al., 2003).

A infiltração da água no solo apresenta grande amplitude de variação (REICHERT et al., 2003) pois integra vários fatores, como distribuição do tamanho e continuidade de poros, presença de poros biológicos, cobertura do solo entre outros. Estes mesmos aspectos são avaliados pela permeabilidade do solo ao ar, a qual utiliza baixos gradientes de pressão, de acordo com a Lei de Darcy, para caracterizar o espaço poroso (MAASLAND; KIRKHAM, 1955). A permeabilidade ao ar do solo possui vantagens sobre a determinação de valores de permeabilidade por fluxo de água, tais como eliminação do efeito do ar aprisionado no meio; eliminação da possibilidade de obstrução por corpos estranhos no líquido; não desintegração da estrutura do solo, especialmente na superfície; requerer menor força para transportá-lo através do meio, devido à sua baixa viscosidade e, como vantagem adicional, a possibilidade de ser medida em diferentes tensões de água no solo (com diferentes diâmetros de poros drenados). Além disso, o ar não interage com a matriz do solo. Reeve (1953) demonstrou que a permeabilidade pode ser determinada independentemente do fluido. Dado a isso, o uso do ar em vez de água reduz potencialmente o tempo e a complexidade das medidas de permeabilidade (FRITTON, 1970).

Os primeiros trabalhos a reconhecerem a importância da estrutura do solo para o movimento de gás foram os de Kirkham (1946) e Evans e Kirkham (1949), os quais construíram permeâmetros de ar onde o gás comprimido foi passado diretamente para o solo *in situ*, utilizando equilíbrio dinâmico (*steady-state*), ou *falling-head*. Medidas de alta permeabilidade indicam uma boa estrutura do solo. O gás segue através de vias de fluxo não controladas para a atmosfera, resultando em medições de campo de difícil interpretação e, conseqüentemente, estimativas de *Ka* de baixa confiabilidade. Limitações desse método incluem: a taxa de fluxo não é medida e é possível que o número de Reynolds se torne grande o suficiente para a ocorrência de fluxo turbulento, não sendo aplicável a Lei de Darcy (JANSE; BOLT, 1960); é essencialmente limitada à superfície dos solos; e diferenças entre fluxo horizontal e vertical não podem ser medidas.

Para simplificação das medidas de K_a, permeâmetros de laboratório foram criados com as dimensões da amostra conhecida e uma via de fluxo mais controlada (EVANS, 1965). O

controle do conteúdo de água volumétrico, θ, também foi conseguido através do equilíbrio da amostra de solo em determinado potencial mátrico (Ψ_m), antes da medição de K_a. Corey (1957), Renk (1879) e Wyckoff e Botset (1936), mostraram um aumento da permeabilidade ao ar com a diminuição da umidade do solo. A maior alteração na permeabilidade ao ar ocorreu quando o teor de água do solo estava próximo da saturação, quando estava em menor teor de água a alteração na permeabilidade ao ar era menor.

O trabalho de Ball e Schjønning (2002) reafirma a forte influência do conteúdo de água no solo na permeabilidade ao ar: K_a atinge valores máximos em solo seco e diminui progressivamente com o solo úmido até que chegue a um valor zero ou próximo à saturação. Eles sugerem que solos cujos valores de Ka são menores que 1 μm^2 podem ser considerados impermeáveis. A relação entre a umidade do solo e a tensão de água, permeabilidade ao ar, e condutividade hidráulica saturada foi determinada por Aljibury e Evans (1965) para amostras deformadas de solo, com texturas de areia grossa até argilosa. Através da relação tensão de água *versus* permeabilidade ao ar, esses autores mostraram que a aplicação de uma baixa tensão de água foi necessária para que a permeabilidade ao ar se tornar-se diferente de zero. Com o aumento dessa tensão, inicialmente, os poros maiores drenaram e começaram a conduzir ar através do solo. A permeabilidade ao ar aumentou drasticamente até os níveis se distanciarem dos valores de condutividade hidráulica.

Os resultados das amostras obtidas por Aljibury e Evans (1965) também revelaram uma estreita correlação entre a permeabilidade ao ar na capacidade de campo e a condutividade hidráulica saturada. Os resultados mostraram também que os poros do solo nas tensões <100 cm de H_2O foram os que mais contribuíram para o fluxo de drenagem e que a permeabilidade ao ar e a condutividade hidráulica são quase as mesmas para tensões >100cm de H_2O, a menos que fissuras ocorram em tensões mais elevadas, nesse caso, os valores de permeabilidade ao ar são maiores. Os mesmos autores demonstram que a relação porosidade de aeração *versus* permeabilidade ao ar é a mesma da tensão de água *versus* condutividade hidráulica saturada. Isto enfatiza a importância do tamanho dos poros, bem como a porcentagem do espaço poroso sobre as medidas de permeabilidade ao ar. É esperado que em solos não expansivos, a permeabilidade ao ar em qualquer tensão entre 100 cm de H_2O e ponto de murcha permanente seja quase constante e possa ser uma boa estimativa da condutividade hidráulica saturada. Para solos que se contraem com o secamento, a permeabilidade ao ar dará estimativas errôneas sobre a condutividade hidráulica, ao ser medido em tensões onde ocorre contração (ALJIBURY; EVANS, 1965).

O método de Corey (1986) permitiu controlar o potencial mátrico (ψ_m) e, portanto, o conteúdo de água volumétrico (θ) através do contato hidráulico com uma coluna de água suspensa, de diâmetro aproximado à circunferência da amostra de solo úmida. Gradientes de potencial gravitacional são eliminados pela passagem do ar verticalmente para cima através do solo com pressão igual à altura da amostra. A câmara de amostra de Corey (1986) permitiu a medição da K_a próxima à saturação apenas para amostras perturbadas (remontadas). Devido à estrutura dos macroporos ser fortemente influenciada pela deformação do solo, análises em amostras deformadas não revelam informação geométrica necessária para melhorar a compreensão do movimento do ar e da água através dos macroporos de solos agrícolas (ROSEBERG; McCOY, 1990).

O início do incremento de água no solo reduz o volume de poros ocupados por ar, os canais de condução de fluxo de ar também são reduzidos juntamente com a permeabilidade ao ar. Ball (1981a) e Ball (1981b) coletaram amostras indeformadas de solo da superfície de solos agrícolas siltosos e argilosos, e as equilibraram nos seguintes ψ_m -2, -5, -10, -20, e -100 kPa e secas em estufa, e depois as colocaram em um permeâmetro a ar. Análises de regressão dos dados de *Ka* e de porosidade de aeração (εa) resultaram uma correlação linear satisfatória, com *Ka* aumentando juntamente com εa. Shtykov e Daishev (1986) estudaram a permeabilidade ao ar de solos estruturados e vários tipos de areia em diferentes teores de umidade. A análise dos dados mostrou uma relação linear satisfatória entre *Ka* e εa para areia fina, areia grossa e de textura franca; e o argiloso apresentou grande variabilidade entre as amostras, que resultou em um valor baixo de coeficiente de determinação. Entretanto, a *Ka* sempre aumentou com a εa.

Para solos com a mesma porosidade de aeração, a presença de macroporos (raio >30 μm) proporcionou aumento da *Ka* (BALL, 1981b). A análise de regressão dos dados de Shtykov e Daishev (1986) mostrou que os solos não-estruturados, com distribuição predominante de partículas de menor tamanho, resultaram em valores mais baixos de permeabilidade ao ar. Ball (1981b) relatou altos valores de *Ka* para um solo franco estruturado de superfície, devido à presença de grandes canais de condução que possibilitavam maior passagem de ar. Para ilustrar ainda mais a influência da estrutura, Ball (1981b) mostraram que houve uma redução da magnitude de duas a três vezes na *Ka* quando o solo franco estruturado de superfície foi moído e peneirado.

A distribuição do tamanho de poros do solo não é gradual e nem homogênea. Em função disso, caso haja predominância de uma classe de tamanho de poros e este conjunto de poros for drenado, haverá aumentos significativos na porosidade de aeração do solo e no grau

de interligação de todos os poros drenados (PEREIRA; CRUCIANI, 2001). Nesse sentido, o sistema de poros do solo depende não só da distribuição do tamanho de poros, mas também da porosidade total, da geometria e forma do sistema de poros e da continuidade de poros (COREY, 1986; REICHERT et al., 2003), sendo esses descritos pela permeabilidade do solo ao ar.

A permeabilidade do solo ao ar é uma ferramenta promissora para determinar a influência da geometria dos poros nos processos de transporte. A incapacidade dos primeiros permeâmetros em permitir a medição do fluxo de ar em amostras indeformadas de solo na saturação ou próximo dela, quando somente os macroporos conduzem ar, impedia o uso rotineiro desta técnica para a investigação da geometria dos macroporos. As características do permêametro à ar de Roseberg e McCoy (1990), permitiram um melhor controle sobre o estado da água em amostras indeformadas, quando comparado com dispositivos citados anteriormente, pois possibilitou a medição da *Ka* e θ em amostras indeformadas próximas ou na saturação, sob condições de equilíbrio dinâmico, realizando-se a análise do comportamento dos macroporos sob condições de umidecimento e secamento no intervalo de ψ_m entre 0 e -6,0 kPa. Isso foi conseguido através da neutralização do potencial gravitacional a partir da pressão de ar controlada.

Fatores ligados à geometria dos poros influenciam fortemente o fluxo de ar do solo, como revelado pela análise teórica de Bear (1972). Vários experimentos usando *Ka* foram conduzidos para avaliar as relações funcionais entre o fluxo e os fatores ligados à geometria dos poros (BALL, 1981b; HAMBLIN e TENNANT, 1981; GROENEVELT et al., 1984; DOUGLAS et al., 1986; BALL et al., 1988). Devido *Ka* ser altamente sensível à presença de poros grandes (BALL, 1981b), pesquisadores têm utilizado a *Ka* para caracterizar 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 o estado da água (HAMBLIN; TENNANT, 1981; DOUGLAS et al., 1986). De acordo com Corey (1986), estes esforços são dificultados pela incapacidade de obter medição direta ou estimar valores confiáveis para um ou mais fatores ligados à geometria dos poros.

Recentemente, o avanço da tecnologia dos componentes utilizados na construção de permeâmetros (controladores de fluxo, medidores de vazão mássica de ar, etc) possibilitou o desenvolvimento de permeâmetros mais confiáveis, compactos e portáteis. Isto permite que a *Ka* seja mais amplamente difundida como ferramenta para avaliação da qualidade física do solo (FIGUEIREDO, 2010). Portando, a partir de uma de uma amostra de solo, de dimensões

conhecidas, é possível obter a *Ka* com instrumentos que medem a vazão de ar, que atravessa a área transversal dessa coluna de solo, e o gradiente de pressão gerado (BALL; HARRIS; BURFORD, 1981; CHIEF; FERRÉ; NIJSSEN, 2006 e 2008; FIGUEIREDO, 2010).

Portando, a permeabilidade do solo ao ar representa uma medida do estado de aeração desse meio poroso, diretamente ligado à porosidade de aeração e à continuidade dos poros do solo (BALL et al., 1988). A determinação da permeabilidade ao ar tem se mostrado uma alternativa promissora para avaliação da funcionalidade do sistema poroso do solo, portanto, uma útil ferramenta no diagnóstico de sua qualidade física.

No desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o permeâmetro proposto por Figueiredo (2010), o qual possui instrumentos dedicados à eliminação de oscilações durante as medições do gradiente de pressão, e também aperfeiçoado sistema de seleção de diferentes níveis de vazão mássica de ar, visando tornar mais simples e rápida a sua operação.

2.2 Material e métodos

2.2.1. Caracterização da área experimental

O trabalho foi conduzido na Fazenda Experimental "Capão da Onça", pertencente à Universidade Estadual de Ponta Grossa, situada no município de Ponta Grossa, no Estado do Paraná. A área experimental localiza-se geograficamente nas coordenadas 25°05'52" latitude Sul e 50°02'43" longitude Oeste, com altitude média de 1.080 metros e declividade entre 0,03 e 0,08 m m^{-1}. A região apresenta clima mesotérmico, subtropical úmido do tipo Cfb, com precipitação média anual de 1.545 mm e temperatura média anual de 18,7° C (IAPAR, 2000). Segundo Bhering et al.(2008), as classes de solo predominantes na região são os Latossolos Vermelhos distróficos e Cambissolos Háplicos distróficos provenientes da alteração de folhelhos do Período Paleozóico, e o solo da área em estudo foi classificado como um Latossolo Vermelho distrófico, o qual é originado de retrabalhamento de folhelhos e arenitos das Formações Ponta Grossa e Furnas.

2.2.2 Textura e densidade de partículas do solo

De acordo com a Tabela 1, o solo da área em estudo está classificado como pertencente à classe textural argilosa (SANTOS et al., 2005). Não ocorre aumento abrupto no teor de argila em profundidade, indicando uma distribuição textural uniforme, característica dos Latossolos (EMBRAPA, 2006). A densidade de partículas é menor na camada superficial do solo devido à maior influência do conteúdo de matéria orgânica.

Tabela 1 - Distribuição do tamanho de partículas e densidade de partículas de um Latossolo Vermelho distrófico, nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m

Camada	Argila	Silte	Areia	Dp
m	----------g kg^{-1}----------			g cm^{-3}
0,0-0,10	506,2	52,4	441,4	2,54
0,10-0,20	518,4	53,3	428,3	2,58
0,20-0,30	512,3	54,3	433,4	2,59
0,30-0,40	520,5	54,4	425,1	2,60
0,40-0,50	526,2	58,3	415,5	2,60

Dp: densidade de partículas.

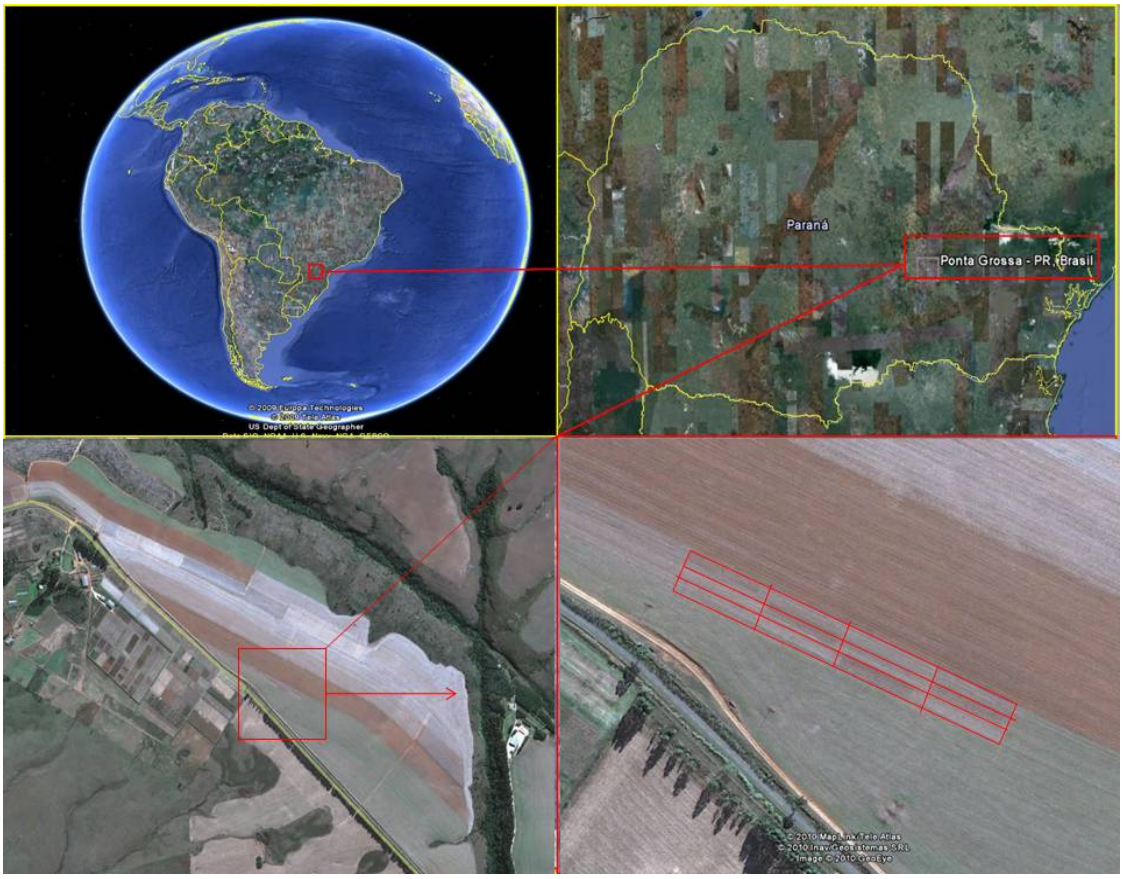


Figura 1 - Imagem de satélite do experimento avaliado, localizado na Fazenda Escola Capão da Onça, no município de Ponta Grossa-PR

O histórico de manejo indica o uso da área por mais de dezesseis anos em sistema de plantio direto, com a implantação rotacionada de milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.) no período primavera/verão, e trigo (*Triticum aestivum* L.) e consórcio aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) + ervilhaca (*Vicia sativa* L.), no outono/inverno. O milho e a soja são semeados em sulcos abertos com o auxílio de implementos agrícolas que dispõe de hastes sulcadoras, mobilizando o solo apenas nas linhas de plantio. A adubação de base (NPK) é realizada de acordo com a recomendação para cada cultura, com base na interpretação de análises de solo. Para a adubação de manutenção, considera-se a exportação de nutrientes. As

épocas de semeadura, o controle de plantas daninhas e os tratamentos fitossanitários são realizados de acordo com a recomendação para cada cultura.

2.2.3 Delineamento experimental e tratamentos

Os tratamentos utilizados neste experimento são: plantio direto com escarificação mecânica (PD-E), plantio direto com escarificação biológica (PD-B) e plantio direto não mobilizado ou testemunha (PD). Os mesmos foram dispostos em delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. As dimensões das parcelas foram de 9,0 x 50,0 m, totalizando 450 m^2 (Figura 2).

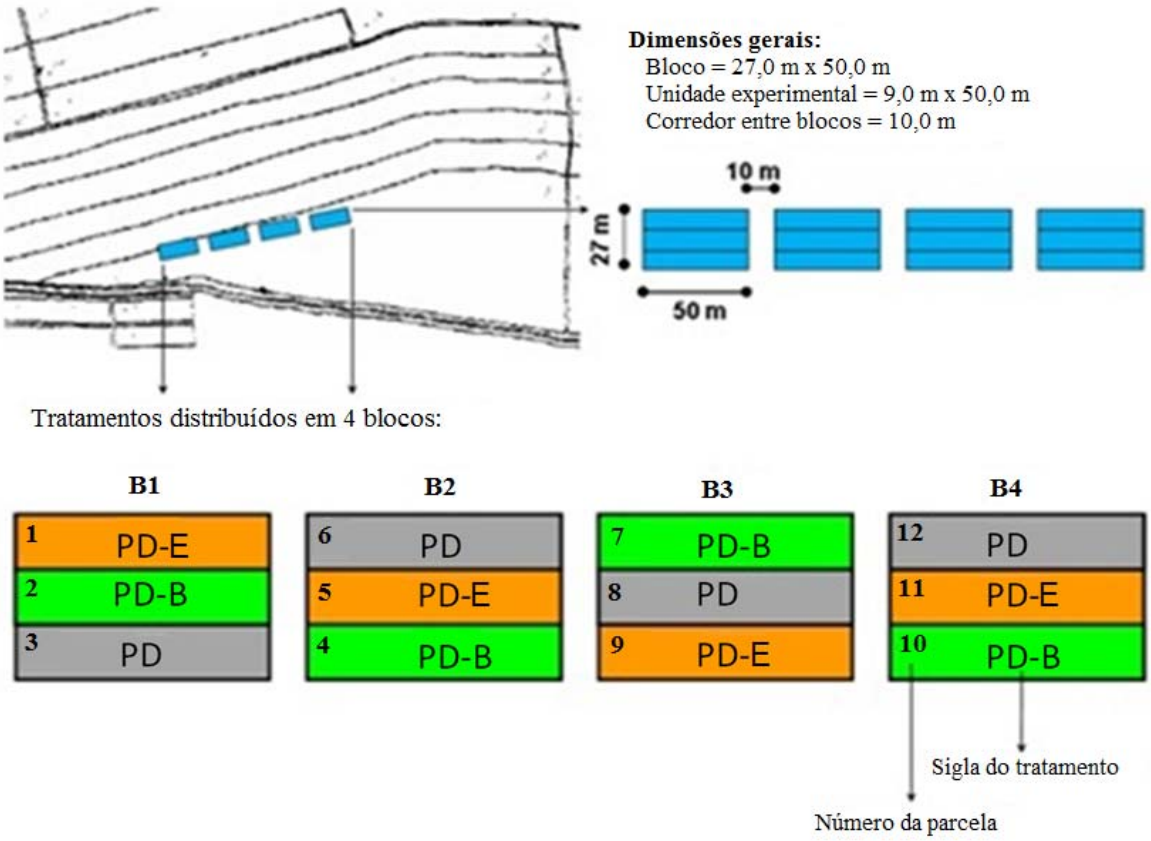


Figura 2 - Espacialização e dimensão das parcelas experimentais na área de estudo

Na área sob plantio direto, a semeadura vem sendo realizada com disco duplo a 0,03m de profundidade para as culturas de inverno e com haste sulcadora a 0,04 m de profundidade (para a colocação da semente) e a 0,10 m (para a deposição do adubo) para as culturas de verão.

A mobilização mecânica foi realizada em maio de 2009, através do uso de um subsolador Jumbo Matic acoplado ao sistema de acionamento hidráulico do trator, ajustado à profundidade média de 0,25 m (para escarificação), dois dias antes da semeadura da cultura de inverno. O subsolador dispõe de cinco hastes (três na barra dianteira e duas na traseira) de

formato parabólico e ponteira em cinzel, com espaçamento entre hastes de 200 mm e ângulo de ataque de 22°.

A escarificação biológica foi realizada pelo Nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) semeado no outono/inverno em substituição à aveia + ervilhaca. O nabo foi semeado com semeadora/adubadora na densidade aproximada de 22 sementes por metro linear e espaçamento de 0,17 m. O trator usado para o preparo do solo e semeadura apresentava 75,7 kW de potência nominal no motor e tração dianteira assistida.

2.2.4 Amostragem

A amostragem foi realizada em outubro de 2010, dezoito meses após a escarificação e no estágio final da cultura do trigo. Para cada tratamento foram selecionados, aleatoriamente, 12 pontos de amostragem. Em cada ponto, foram retiradas 5 amostras, correspondentes ao centro das camadas 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m de profundidade. Foram coletadas amostras indeformadas em anéis cilíndricos de aço inox (50 mm de diâmetro x 50 mm de altura), perfazendo um total de 180 amostras (n = 180). Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura de ± 5°C até serem processadas.

Em laboratório, as amostras foram preparadas, retirando-se o excesso de solo, de modo que representasse somente o volume interno do anel. Na abertura inferior de cada anel colocou-se uma tela permeável à água e ar, a fim de permitir a saturação sem perda de solo. Em seguida, as amostras foram dispostas em bandejas onde foram saturadas por capilaridade, pela elevação gradual da lâmina de água.

2.2.5 Determinação dos atributos físicos do solo

2.2.5.1 Permeabilidade ao ar (K_a)

As amostras foram submetidas em mesa de tensão e extratores de Richards, aos seguintes potenciais mátricos: -0,5, -1,0, -2,0, -3,0, -5,0, -7,0, -10,0, -50,0 e -100,0 kPa. Após o equilíbrio em cada potencial, foram pesadas e, imediatamente, quantificado o fluxo de ar. A partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) pode ser descrita pela equação (1):

$$q = -\frac{k_a}{\eta}\left(\frac{dP}{dz} + \rho g\right), \qquad (1)$$

onde, k_a a permeabilidade ao ar, P a pressão de ar, z a distância na direção do movimento de ar no sistema poroso, η a viscosidade do ar, ρ a densidade do ar e g a aceleração da gravidade.

A densidade de fluxo corresponde à vazão de ar (Q) por área perpendicular ao movimento do fluido (A_s) e, considerando como desprezível a influência da densidade do ar (SPRINGER et al., 1998), a eq. (2) foi utilizada para as estimativas da k_a:

$$k_a = \frac{Q\eta}{A_s}\left(\frac{dz}{dP}\right), \qquad (2)$$

2.2.5.2 Densidade do solo, macro e microporosidade, porosidade total, porosidade de aeração e densidade de partículas

As amostras foram colocadas em estufa a 105°C durante período de 24 horas, para obtenção de sua massa seca, utilizada no cálculo da densidade do solo (BLAKE; HARTGE,1986) a partir da equação 3:

$$Ds = \frac{MS}{V} \qquad (3)$$

onde, MS, é a massa seca de solo e V o volume do solo.

A microporosidade foi obtida a partir da quantidade de água retida nas amostras indeformadas de solo submetidas à tensão de -0,005 MPa (50 cm de H_2O). A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

A porosidade total e a porosidade de aeração foram obtidas pelas equações (4) e (5), respectivamente:

$$PT = 1 - \frac{Ds}{Dp}, \qquad (4)$$

$$\varepsilon_a = PT - \theta, \qquad (5)$$

onde, PT a porosidade total do solo, Dp a densidade de partículas do solo, e ε_a a porosidade de aeração do solo, estimada considerando a densidade da água igual a 1,0 Mg m^{-3}.

A densidade de partículas do solo foi determinada utilizando-se um picnômetro a gás (Hélio), modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritrics Instrument Corporation®). Para tanto, nesse equipamento foram processados aproximadamente 8 g de terra fina seca em estufa de uma amostra composta obtida da quantidade total de solo coletado, com três replicatas.

2.2.5.3 Índices de continuidade de poros

A estimativa da continuidade de poros do solo foi avaliada pela relação entre as propriedades físicas k_a e ε_a, sendo utilizada a equação de Kozeny-Carman, conforme Ball, Sullivan e Hunter (1988):

$$k_a = M(\varepsilon_a)^N, \tag{6}$$

onde, M e N os coeficientes de ajuste do modelo.

Os valores do parâmetro N, utilizado como um índice de continuidade de poros (BALL; SULLIVAN; HUNTER, 1988; ROSEBERG; McCOY, 1990), foram estimados mediante a linearização da equação de Kozeny-Carman:

$$\log(k_a) = \log(M) + N\log(\varepsilon_a), \tag{7}$$

A relação linear na eq. 7 pode ser caracterizada usando as três informações indicadas na Figura 3.

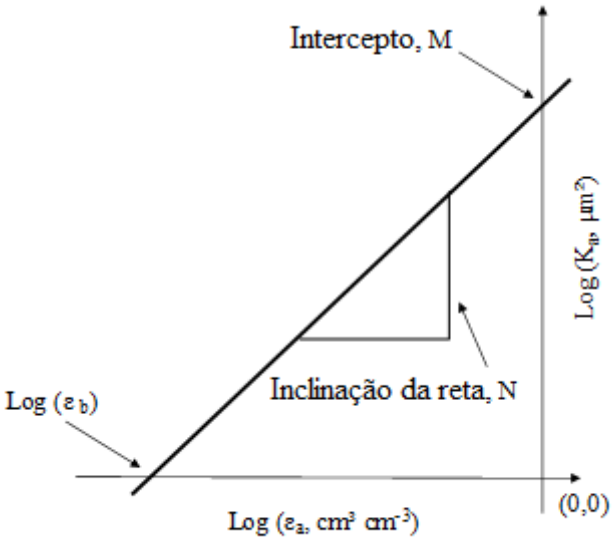


Figura 3 - Principais características da relação log–log entre a permeabilidade ao ar (K_a) e a porosidade de aeração (ε_a); slope *N*, intercepto com o eixo log (K_a), *M* e o limite do conteúdo de ar, ε_b

O slope (*N*), o intercepto com o eixo log K_a no qual log ε_a=0 (*M*), e o intercepto com o eixo log ε_a em que log K_a=0 (ε_b). Este intercepto com o eixo foi proposto por Ball et al. (1988) e utilizado por Schjønning et al. (2002) como a quantidade de poros de aeração bloqueados no solo que não tomam 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. 6 pela eq. 8.

$$\varepsilon_b = 10^{-\log(M)/N} \tag{8}$$

Outro índice de continuidade de poros, K_1, proposto por Groenevelt et al. (1984) também foi calculado com base na relação entre K_a e ε_a:

$$K_1 = \frac{K_a}{\varepsilon_a} \quad (9)$$

2.2.6 Análise estatística

O intervalo de confiança da média 95% (P < 0,05) foi adotado como critério estatístico para discriminação e comparação do efeito dos tratamentos na densidade do solo, permeabilidade ao ar, e nos índices de continuidade de poros. Considerou-se que houve diferenças significativas entre tratamentos e/ou profundidades quando não houve sobreposição dos limites superior e inferior. O intervalo de confiança representa os limites onde a média dos valores de um conjunto de dados está contida. É um método eficiente e confiável para a interpretação de diferenças significativas (PAYTON et al., 2000).

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Densidade do solo

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise estatística descritiva para a densidade do solo (Ds), com pequenas diferenças numéricas (máximo 0,06 Mg m^{-3}); a média da Ds variou de 1,11 a 1,17 Mg m^{-3}; na profundidade de 0, a 0,10 m, permaneceu em 1,27 Mg m^{-3}; na profundidade de 0,10 a 0,20 m, de 1,24 a 1,28 Mg m^{-3}; na profundidade de 0,20 a 0,30 m, de 1,22 a 1,24 Mg m^{-3}; na profundidade de 0,30 a 0,40 m e de 1,18 a 1,20 Mg m^{-3}; na profundidade de 0,40 a 0,50 m. Numericamente, os maiores valores de Ds foram observados na profundidade de 0,10 a 0,20 m, para todos os tratamentos. Os valores de Ds medidos enquadram-se dentro da faixa comumente observada em solos agrícolas de textura argilosa (BRADY; WEIL, 2007), especialmente na região estudada (CAVALIERI et al., 2009).

A distribuição de poros e a densidade do solo são as características estruturais possíveis de serem alteradas pelo manejo. Nos três sistemas de manejo estudados, a densidade do solo (Figura 4) apresentou incremento abrupto entre a camada superficial (0,0-0,10 m) e a camada subsuperficial (0,10-0,20 m), e essa diferença permaneceu até a camada 0,30-0,40 m. Isso foi menos intenso no plantio direto, visto que este apresentou valor médio de densidade do solo ligeiramente superior aos demais tratamentos na camada mais superficial, porém, não o suficiente para apresentar diferença estatística significativa. Esse fato é comum, visto que outros autores estudaram o efeito do sistema plantio direto sob as propriedades físicas do solo

e evidenciaram esse aumento da densidade, devido à compactação causada pelo tráfego de máquinas e o não revolvimento do solo (FABRIZZI et al., 2005; CARDOSO et al., 2006).

Tabela 2 – Análise descritiva da densidade do solo (Ds) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. N=12

Tratamento	Mínimo	Média	Máximo	DP	CV (%)
			0,0-0,10 m		
PD-E	0,96	1,12	1,28	0,101	9
PD-B	0,99	1,11	1,24	0,085	7,64
PD	1,05	1,17	1,26	0,073	6,23
			0,10-0,20 m		
PD-E	1,14	1,27	1,34	0,057	4,49
PD-B	1,21	1,27	1,36	0,047	3,68
PD	1,19	1,27	1,37	0,065	5,12
			0,20-0,30 m		
PD-E	1,09	1,24	1,3	0,056	4,52
PD-B	1,16	1,28	1,36	0,056	4,38
PD	1,16	1,26	1,33	0,06	4,79
			0,30-0,40 m		
PD-E	1,09	1,22	1,29	0,061	4,97
PD-B	1,16	1,24	1,33	0,053	4,29
PD	1,08	1,23	1,28	0,066	5,4
			0,40-0,50 m		
PD-E	1,12	1,2	1,27	0,052	4,32
PD-B	1,12	1,2	1,29	0,047	3,89
PD	1,07	1,18	1,25	0,055	4,61

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação.

Tomando como referência o trabalho de Suzuki et al. (2006) que estima um valor restritivo de densidade do solo (DSr) ao crescimento de raízes (obtido pelo teor médio de argila de 516 g kg^{-1} - Tabela 1 e pela equação DSr = - 0,00074 argila + 1,79420) obteve-se um valor de Dsr igual a 1,41 Mg m^{-3}. Observa-se que as parcelas experimentais avaliadas não apresentaram grau de compactação inicial elevado indicado pelos valores de Ds<Dsr.

Não houve diferença significativa entre os valores de Ds medidos numa mesma camada de solo (Figura 4). Também não foi verificado o efeito significativo de Ds maior na camada superficial do solo (0-0,1 m) após o uso do nabo-forrageiro, devido ao grande diâmetro de sua raiz principal, descrito por Kubota et al. (2005) em solo de textura franco-argilosa (34 % argila, 43 % areia). Portanto, nem a escarificação mecânica ou a escarificação biológica se mostraram alternativas eficientes para melhorar a qualidade física do solo quando o parâmetro avaliado foi a Ds. Em um Argissolo de textura franco arenosa com elevada resistência à penetração Abreu et al. (2004) também não encontraram melhorias nos atributos físicos do solo, dessa vez, com o uso da *Crotalaria spectabilis* como escarificador biológico.

A semelhança do valor da Ds em solo escarificado (PD-E) em relação ao solo não mobilizado deveu-se, possivelmente, ao processo de reconsolidação do solo, ocorrido no período de dezoito meses entre a mecanização e a determinação da Ds. Como a Ds encontrada no plantio direto (PD) não era elevada, a mobilização do solo através da escarificação não aumentou significativamente seu espaço poroso.

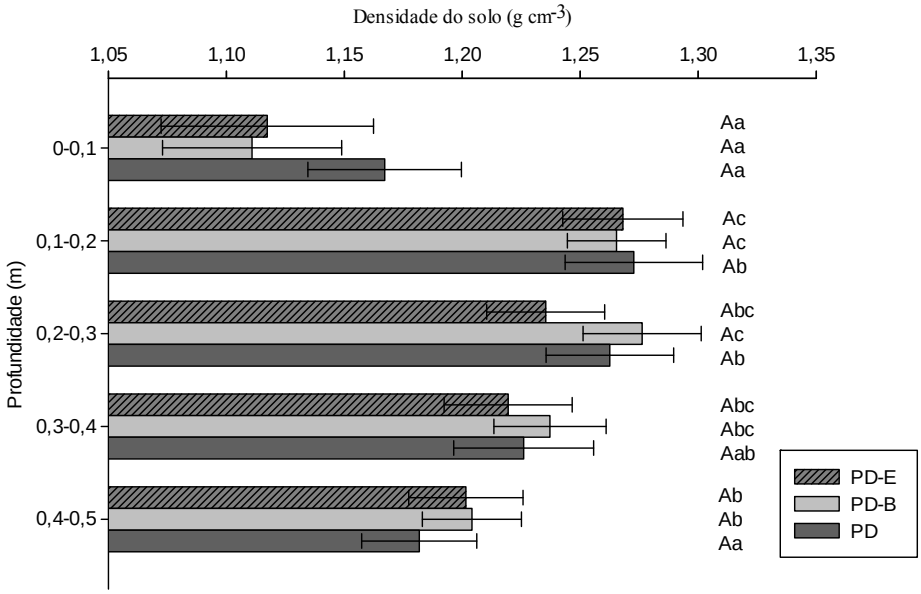


Figura 4 - Valores médios de densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e, minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12

2.3.2 Porosidade do solo

O volume total de poros ficou acima de 0,50 cm^3 cm^{-3} em todas as camadas de solo nos três sistemas de manejo avaliados (Figura 5a), considerado ideal para um solo bem estruturado e com condições satisfatórias para o crescimento de plantas (KIEHL, 1979; BRADY; WEIL, 2007). A análise da porosidade total do solo pode ser feita a partir da figura 5a, na qual observa-se que a camada superficial possui significativamente ($p < 0,05$) maior quantidade de poros em relação as demais profundidades avaliadas. Entre os tratamentos estudados, a porosidade total foi menor para o plantio direto na camada superficial (0-0,10 m), mas não foi significativamente ($p > 0,05$) alterada pela mobilização do solo (PD-E e PD-B). Entre as profundidades, a porosidade total diferiu de forma pouco pronunciada, havendo comportamento semelhante entre tratamentos na redução da porosidade até a camada de 0,20-0,30 m, e, então, um retorno gradual para valores próximos aos da camada superficial.

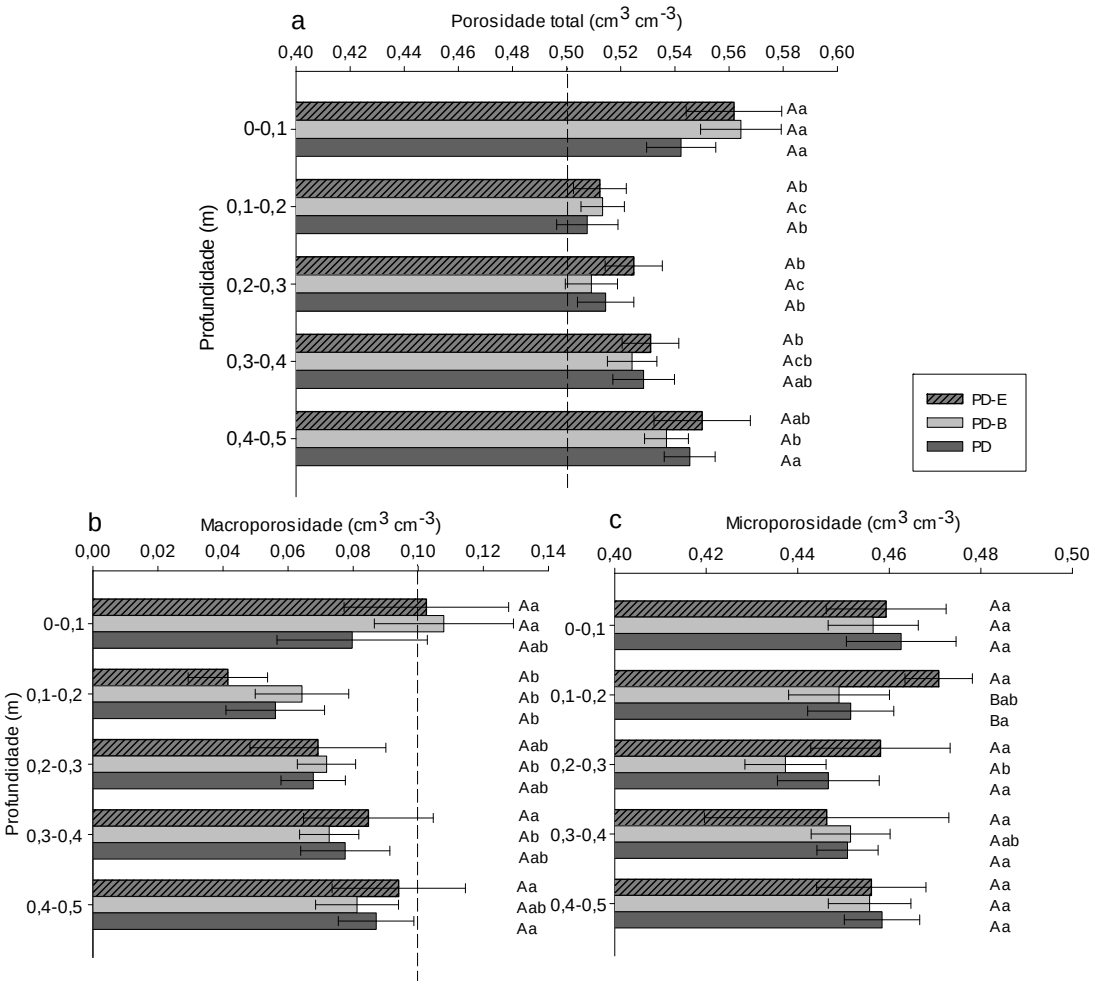


Figura 5 - Valores médios de porosidade total (a), macroporosidade (b) e microporosidade (c) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Nas alíneas *a* e *b*, as linhas tracejadas representam o valor de porosidade total considerado ideal (BRADY; WEIL, 2007) e o limite crítico de macroporosidade para o desenvolvimento de plantas (BAVER, 1972), respectivamente. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e minúsculas, às profundidades, letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12

O volume de macroporos foi maior na camada de 0-0,1 m, onde houve mobilização do solo através da escarificação mecânica e biológica, do que onde foi praticado o PD, porém, não de forma significativa ($p > 0,05$) (Figura 5b). O PD foi o tratamento que apresentou valores de macroporosidade mais próximos entre a camada superficial e as demais camadas. Provavelmente, isso se deve aos valores mais baixos encontrados na superfície do solo nesse manejo, decorrentes do tráfego de máquinas associado a não mobilização do solo (TORMENA et al., 1998). As escarificações mecânica e biológica apresentaram diferenças significativas ($p<0,05$) na macroporosidade entre as camadas superficial (0-0,10 m) e subsuperficial (0,10-0,20 m). Os maiores valores de macroporosidade nesta camada demonstram a eficiência dessas práticas na mobilização do solo e conseqüente formação de poros destinados a trocas gasosas, infiltração da água e desenvolvimento radicular. A camada

de 0,10-0,20 m foi a que apresentou maior redução na macroporosidade, associado à maior densidade do solo, concordando com outros autores que indicam que a compactação do solo em semeadura direta normalmente se encontra na camada entre 0,08 e 0,15 m (REICHERT et al., 2003), e próximo aos 0,10 m de profundidade (GENRO JUNIOR et al., 2004). Esta camada compactada pode causar algumas restrições ao crescimento de plantas, como será abordado mais adiante. A partir da camada de 0,10-0,20 m, para PD-E, e de 0,20-0,30 m, para PD-B, os valores de macroporosidade retornaram gradualmente para próximo aos da camada superficial, o que pode ser reflexo da menor interferência da pressão exercida pelo tráfego de máquinas na estrutura do solo com o aumento de sua profundidade.

A análise da porosidade do solo entre tratamentos mostrou que, exceto para a microporosidade da camada subsuperficial (0,10-0,20 m) (Figura 5c), na qual o plantio direto escarificado mecanicamente apresentou significativamente maior microporosidade que os demais tratamentos, não houve efeito significativo ($p > 0,05$) dos tratamentos em uma mesma camada de solo.

Com o aumento da densidade do solo os macroporos sofrem maior redução e, consequentemente, aumento dos microporos, reduzindo a porosidade total, porém em menor proporção que a macroporosidade (ARAÚJO, 2004). Essa relação pode ser verificada na figura 5, pois o PD-E foi o tratamento que apresentou menor macroporosidade na camada mais compactada (Figura 4) e, portanto maior microporosidade. A redução do volume de macroporos do solo pode restringir a transmissão de água e nutrientes na 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).

Um solo fisicamente adequado ao crescimento de plantas deve apresentar, no mínimo, 10% de macroporos, para que se mantenham os níveis adequados de aeração do solo (GRADWELL, 1965; GRABLE; SIEMER, 1968; GRABLE, 1971; BAVER et al. 1972, CARTER, 1988; DREWRY et al, 2008). Os tratamentos estudados não apresentaram valores restritivos de macroporosidade na camada superficial, pois apresentaram o valor de 10% inserido no intervalo de confiança (Figura 5b). Entretanto, em camadas subsuperficias (> 0,10 m), os valores referentes à macroporosidade apresentaram-se abaixo de 10%, ou seja, podendo limitar as trocas gasosas em todos os tratamentos, exceto pelo tratamento PD-E, que de forma mais pronunciada, tendeu a retornar aos valores não restritivos com o aumento da profundidade.

A microporosidade (poros < 60 μm) praticamente não foi alterada de forma significativa pelos tratamentos, exceto o PD-E em subsuperfície, indicando que essa classe de tamanho de poros é pouco influenciada pelos manejos aplicados. Porém, no estudo com diferentes solos argilosos que apresentavam compactação, conduzido por Streck (2007), ocorreu o aumento na quantidade de poros < 50 μm, com conseqüente redução da permeabilidade ao ar do solo. Os resultados encontrados para microporosidade estão coerentes com os dados de densidade do solo e porosidade total, pois, nas camadas do solo mais compactadas, predominou a classe de poros < 60 μm. É fato encontrado comumente na literatura, o aumento da proporção de poros de menor diâmetro em virtude da redução dos poros de maior diâmetro com o aumento da densidade do solo (HILL et al., 1985; STARTSEV; McNABB, 2001; TARAWALLY et al., 2004; STRECK, 2007).

Nicoloso et al. (2008), estudando um Latossolo de textura muito argilosa, verificaram que o uso consorciado do nabo forrageiro e da aveia-preta associados à escarificação evitaram a reconsolidação do solo, prolongando os efeitos dessa operação. Camara e Klein (2005) não detectaram efeitos da escarificação em plantio direto aos seis meses após essa operação. No presente trabalho, aos 18 meses após à escarificação também não foram detectadas diferenças entre os tratamentos como indicado pelos valores de porosidade total e macroporosidade (Figura 5a e 5b). Secco e Reinert (1997) também observaram a persistência do aumento da porosidade total do solo, com duração de até 10 meses após a escarificação. Vários autores justificam o fato do efeito da mobilização do solo poder desaparecer, em razão da reconsolidação do solo, devido aos ciclos de umedecimento e secagem, o impacto das gotas de chuva, e o tráfego das máquinas agrícolas utilizadas na semeadura, colheita e tratos culturais (BUSSCHER et al. 2002; SILVA, 2003; VEIGA et al., 2008; REICHERT et al., 2009).

2.3.3 Permeabilidade ao ar do solo

A normalidade dos dados de permeabilidade ao ar (K_a) foi verificada com o teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965) e a distribuição dos dados de K_a dentro dos tratamentos foram encontradas como sendo assimétricas e não normais. Assim, os logaritmos de K_a foram usados para tornar as distribuições mais próximas da normalidade (McINTYRE; TANNER, 1959; GROENEVELT et al., 1984; BALL et al., 1988; BLACKWELL et al., 1990). Foram utilizados apenas os potenciais mátricos a partir de -5,0 kPa para avaliar a permeabilidade ao ar e calcular os índices de continuidade de poros, pois em condições de maiores ψ_m (-0,5; -1,0; -2,0 e -3,0 kPa) o solo apresentou-se impermeável ou, em raras medições, baixas leituras de

K_a. Isso pode causar um déficit de aeração mais prolongado já que a região possui volume elevado de chuvas. Portanto, pode-se inferir que a aeração do solo será prejudicada até o ψ_m de -3,0 kPa, pois os poros (< 100 μm) encontram-se bloqueados. Nesse contexto,os efeitos deletérios na planta dependem do tempo necessário para o reestabelecimento da aeração no solo (DREW; LINCH, 1980), que poderia ser menor caso fossem detectados valores de Ka > 1 mm2 (Ball, 1981*) em ψ_m maiores que -3,0 kPa.

Os valores médios de log K_a em todos os ψ_m (< -5,0 kPa) estão apresentados na figura 6. Houve efeito significativo ($p < 0,05$) para os sistemas de manejo apenas no ψ_m de -5,0 kPa, na camada de 0,10-0,20 m, onde o tratamento com escarificação biológica apresentou permeabilidade ao ar maior que a do plantio direto escarificado. Isso pode ser relacionado ao fato de o PD-B possuir numericamente maior macroporosidade nessa camada (Figura 5b). Com a redução do ψ_m, não se verificam diferenças entre os tratamentos já que a partir desse ψ_m os poros menores (diâmetros equivalentes < 60 μm) passam a conduzir ar e ter maior influência. Portanto, a K_a não foi significativamente alterada pela ação dos tratamentos. Como visto anteriormente, a permeabilidade ao ar é um parâmetro com grande variabilidade espacial no solo, e dependente principalmente da quantidade e continuidade dos macroporos. Dessa forma, a K_a apresentou comportamento semelhante à macroporosidade, praticamente sem diferenças significativas entre tratamentos. No entanto, estes resultados confirmam o efeito positivo do secamento no aumento da Ka.

Não foram verificados valores médios de permeabilidade ao ar mais elevados na camada superficial do solo (0-0,10 m) em relação às camadas mais profundas. Estes resultados diferem daqueles de Streck (2007) e Sequinatto (2010), os quais verificaram, na camada superficial, maiores valores permeabilidade ao ar. Nesses casos, não foi verificada a alteração na estrutura pela compactação do solo que reduziria a permeabilidade ao ar em superfície (FONTANELA, 2008; BRANDT, 2009).

Em todos os tratamentos e profundidades houve um incremento de K_a com a redução do ψ_m, pois o espaço poroso, que estava ocupado por água, gradualmente cedeu espaço para o processo de aeração, primeiramente os macroporos e, em seguida, os poros menores. A K_a apresentou numericamente decréscimo da camada superficial (0-0,1 m) para a subsuperficial (0,1-0,2 m) do solo, em função da redução de volume de macroporos (Figura 5b). Fato observado apenas nos valores de ψ_m, em que os macroporos estão preenchidos por água (< -10 kPa). Ou seja, o fluxo de ar preferencial ocorre pelos macroporos grandes e contínuos. Dessa forma, a permeabilidade ao ar, medida próxima à capacidade de campo, permite uma estimativa adequada da condutividade da fração de poros grandes (IVERSEN et al., 2003).

Resultados semelhantes também foram obtidos por Streck (2007), que determinou a condutividade ao ar em solos submetidos a diferentes manejos, e concluiu que a condutividade ao ar se mostrou bastante dependente da macroporosidade, expressando as alterações na estrutura do solo quando a proporção de macroporos foi afetada.

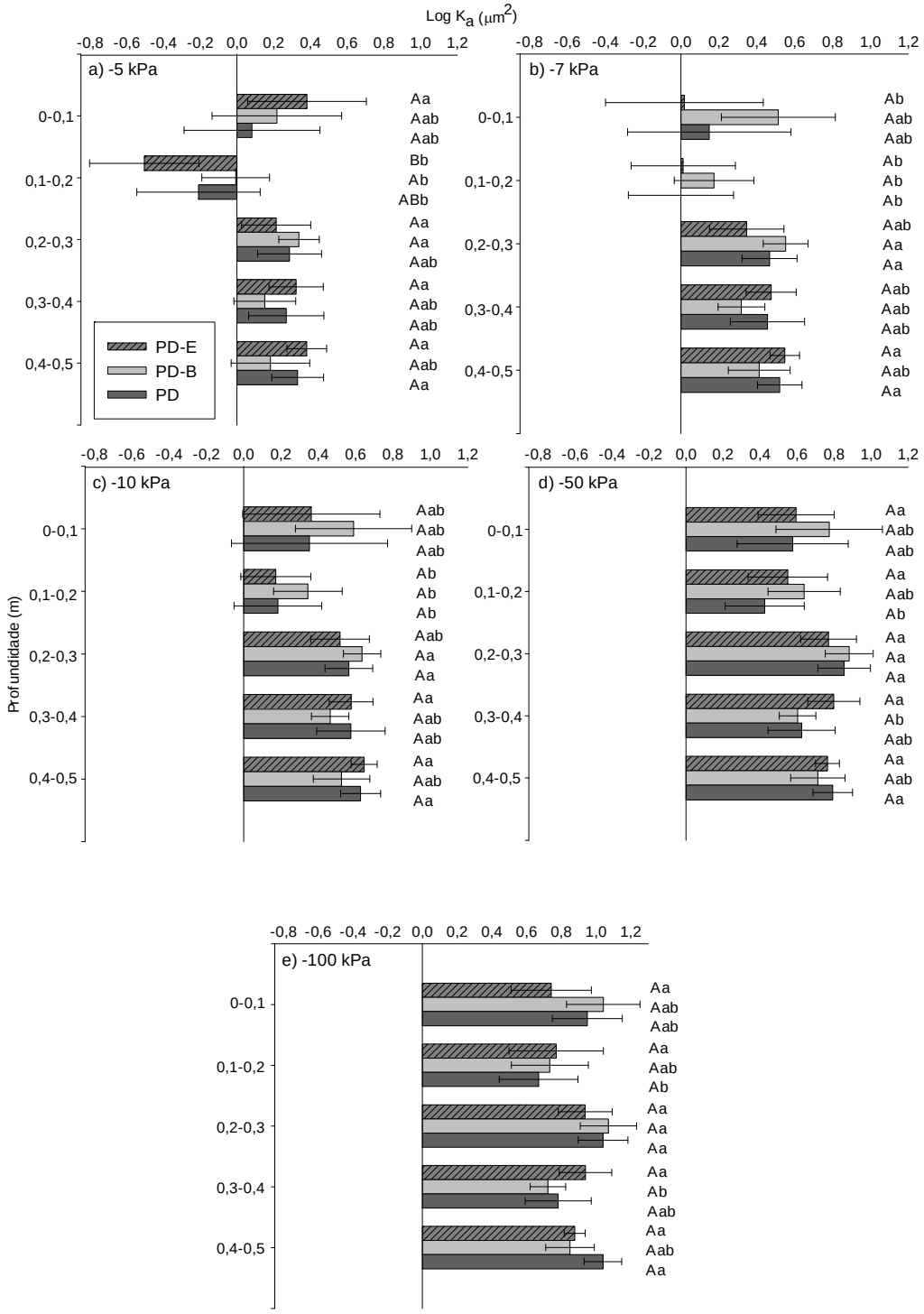
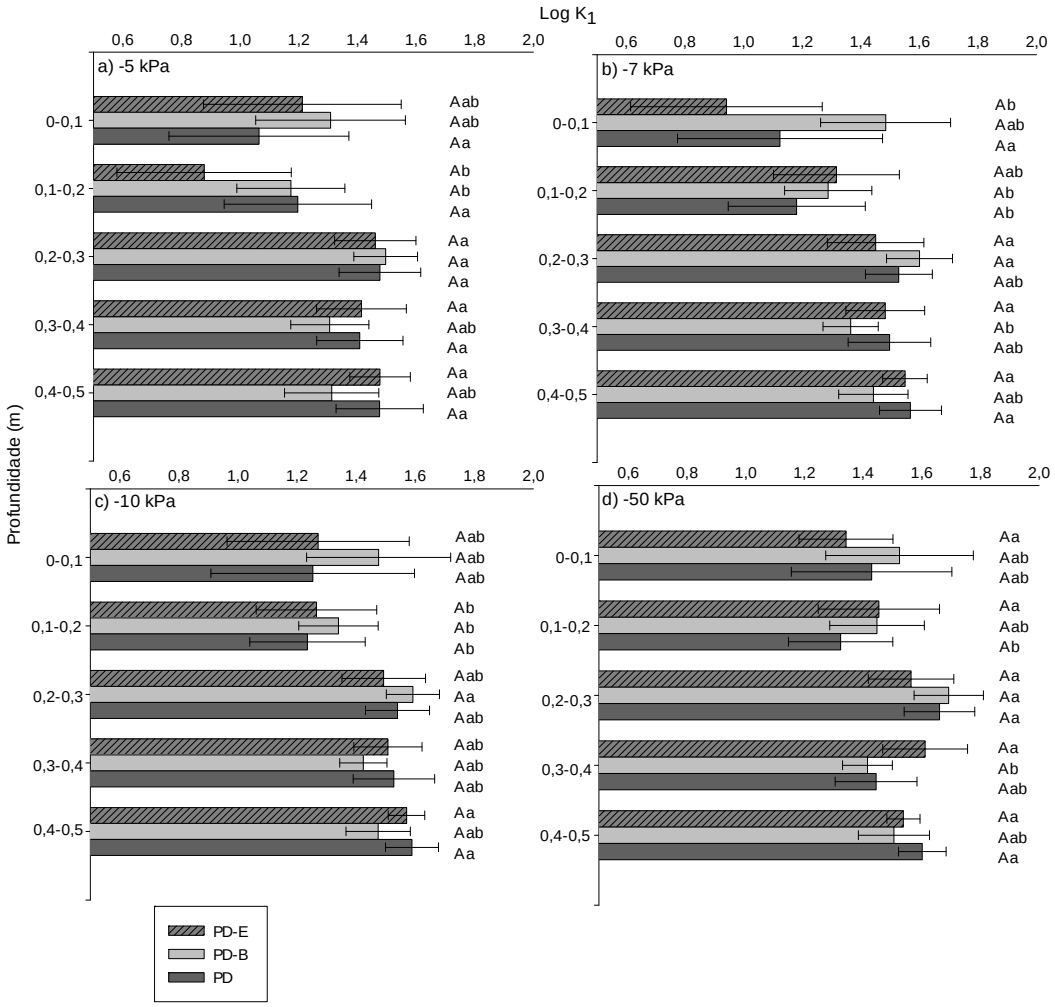


Figura 6 - Valores médios do log da permeabilidade ao ar (K_a) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos, e minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12

2.3.4 Índices de continuidade de poros

Para determinar se as diferenças em K_a podem ser atribuídas somente às diferenças de ε_a ou se elas deveriam ser atribuídas a outros aspectos geométricos do espaço poroso preenchido com ar, tais como a tortuosidade e continuidade, foi utilizado o índice de continuidade de poros K_1, que corresponde ao cálculo da razão K_a/ε_a (GROENEVELT et al. 1984). Assim como K_a, o índice de continuidade de poros K_1 apresentou distribuição log-normal, de forma que todas as análises posteriores foram executadas usando a transformação logarítmica para cada amostra individualmente. Porém, as análises de log K_a/ε_a não foram sensíveis o suficiente para diferenciar efeitos entre porosidade, distribuição do tamanho e continuidade de poros entre os tratamentos propostos em nenhum potencial mátrico, como indicado na figura 7.



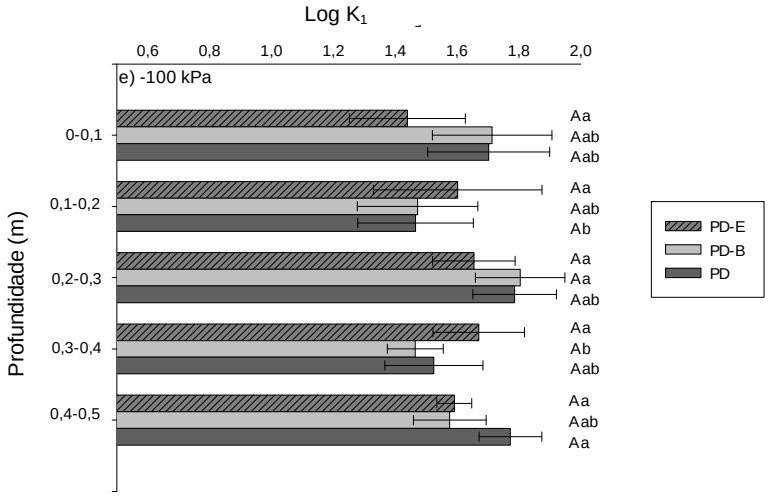


Figura 7 - Valores médios do log do índice de continuidade de poros, K_1, derivado da razão entre permeabilidade ao ar e porosidade de aeração (K_a/ε_a) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e, minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12

A K_a também foi relacionada com a ε_a por um modelo exponencial (Equação 7) obtendo-se as constantes *M* e *N*. A inclinação da reta (*N*) da relação log-log entre K_a e ε_a representa um índice de continuidade de poros, que determina a percentagem de poros contínuos interligados disponíveis para o fluxo de ar. Esse índice de continuidade de poros é um indicativo da eficiência dos poros em permitir a passagem do ar (BALL et al., 1988). Streck (2007) afirma que, mais importante que a porosidade, é a continuidade de poros, pois poros obstruídos não contribuem para a realização da troca gasosa entre o solo e a atmosfera. Como pode ser visto na figura 8, ocorreu redução no valor médio de *N* entre a camada superficial (0-0,10 m) e as demais camadas para todos os sistemas de manejo. Estes resultados sugerem um decréscimo na continuidade dos poros ou uma maior tortuosidade em profundidade, exceto para PD-B, o que pode ser atribuído à alta variabilidade dos valores de N na camada superficial.

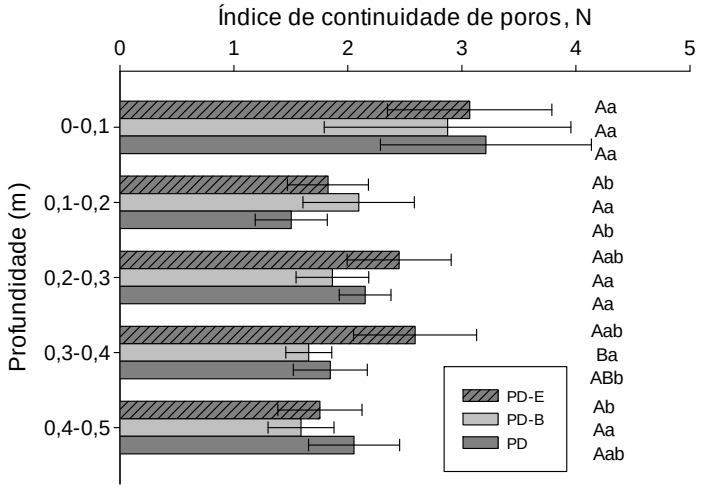


Figura 8 - Valores médios do parâmetro *N*, do modelo: log K_a= log*M* + *N* logε_a, para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e, minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12

Tabela 3 – Parâmetros da regressão do modelo logK_a = log*M* + *N* logε_a, em Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. N=60

Tratamento	M	N	R^2	ε_b (% v/v)
		0,0-0,10 m		
PD	2,74	2,59	0,44	8,79
PD-B	2,43	2,06	0,64	6,61
PD-E	2,39	2,39	0,52	10,02
		0,10-0,20 m		
PD	1,97	1,66	0,56	6,46
PD-B	1,81	1,48	0,56	5,99
PD-E	1,78	1,44	0,42	5,84
		0,20-0,30 m		
PD	2,29	1,72	0,65	4,69
PD-B	2,11	1,51	0,53	3,97
PD-E	1,74	1,22	0,55	3,73
		0,30-0,40 m		
PD	2,28	1,85	0,63	5,82
PD-B	1,90	1,54	0,64	5,79
PD-E	2,02	1,52	0,39	4,73
		0,40-0,50 m		
PD	2,09	1,52	0,62	4,20
PD-B	2,12	1,71	0,66	5,77
PD-E	1,61	1,07	0,58	3,15

ε_b: $10^{(-\log M)/N}$

Outra abordagem foi obtida pelo intercepto e pela inclinação da reta da relação log-log de K_a e ε_a com todos os dados em cada potencial, em todos os sistemas e profundidades (Figura 9). Calculado dessa maneira, cerca de 56 % da variabilidade de K_a foi explicada pelo modelo da regressão (Tabela 3). O índice de continuidade *N* apresentou diferença não significativa ($p > 0,05$) entre os três sistemas nas quatro primeiras camadas. Porém, na camada de 0,40-0,50 m, o tratamento PD-E diferiu ($F = 6,5878$; $p = 0,01130$) dos demais.

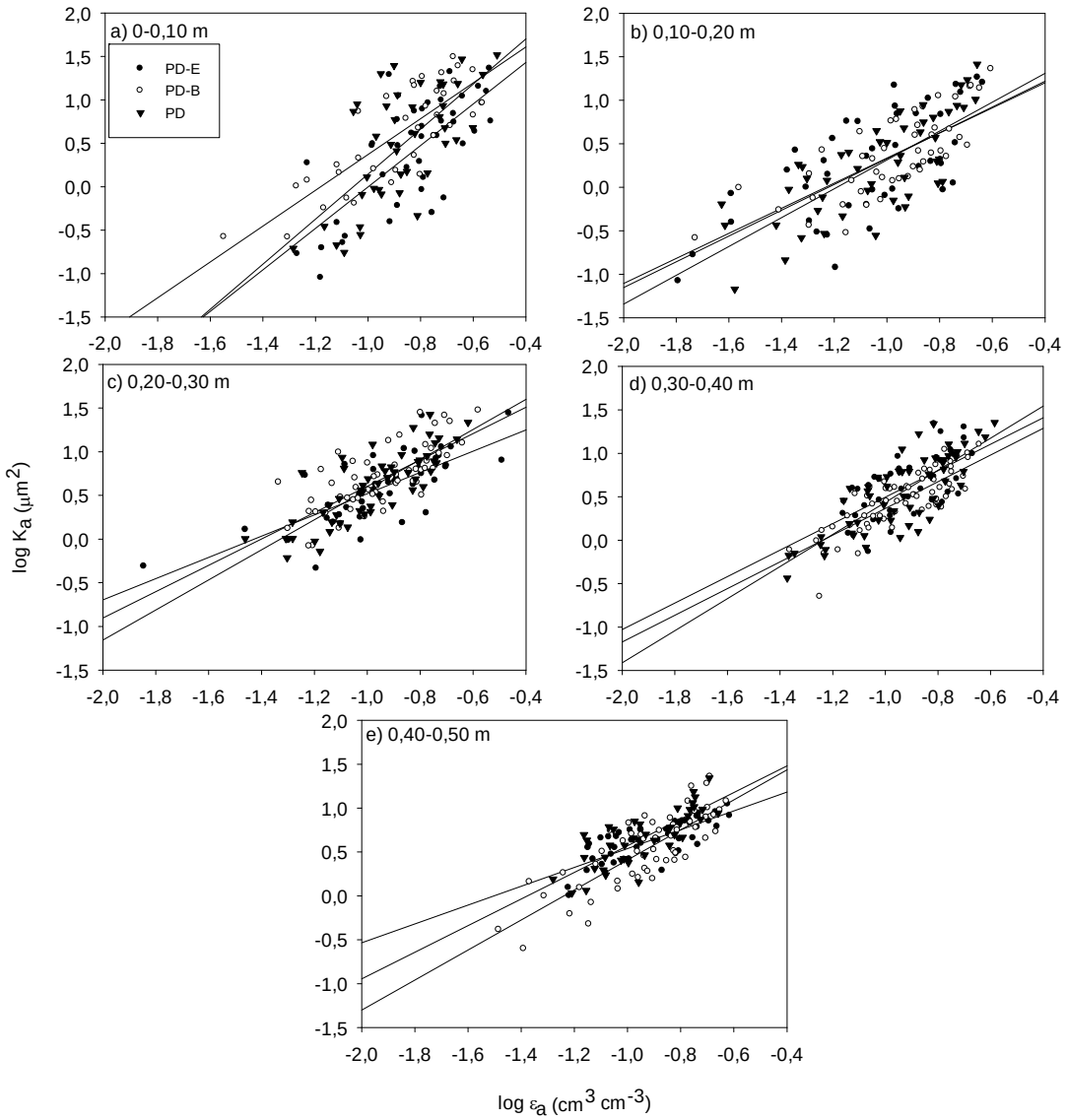


Figura 9 - Relação log-log entre a permeabilidade ao ar (K_a) e porosidade de aeração (ε_a) de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Os pontos representam os valores de logε_a correspondente a cinco potenciais mátricos (-5, -7, -10, -50, -100 kPa)

Os valores médios da porosidade bloqueada (ε_b), não apresentaram diferença significativa ($p > 0,05$) entre os tratamentos, nem entre profundidades (Figura 10). Utilizando esse mesmo atributo para um solo franco argiloso, Ball et al. (1988) estimaram valores de ε_b ligeiramente inferiores aos encontrados (Tabela 3), na faixa de 0 a 3,6 %, com os maiores valores sob semeadura direta. Isso pode ser atribuído à diferença entre os tamanhos de partículas e, conseqüente menor complexidade do sistema poroso do solo.

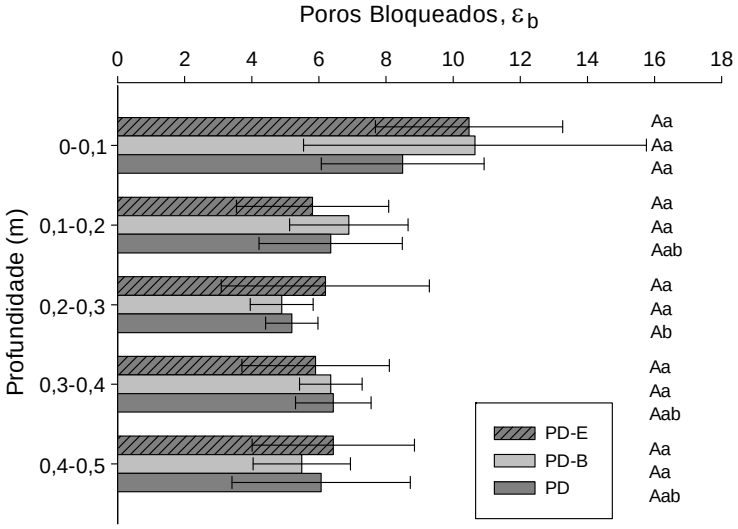


Figura 10 - Valores médios da porosidade bloqueada ($\varepsilon_b=10^{-\log(M)/N}$, % v/v) para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e, minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12

Nesse estudo, a porosidade de aeração na capacidade de campo (-10 kPa) não apresentou diferenças estatísticas ($p > 0,05$) entre os tratamentos em nenhuma das camadas avaliadas (Figura 11). Já entre profundidades, o PD-E, na camada 0,10-0,20 m, atingiu um valor de εa abaixo do limite adequado para o desenvolvimento das plantas, quando porosidade de aeração deve ser de no mínimo 0,10 m^3 m^{-3} (BAVER et al.,1972; GRABLE; SIEMER, 1968; DREWRY et al., 2008). Portanto, nesse caso, pode ocorrer limitação nas trocas gasosas entre o ar da rizosfera com a atmosfera externa, o que reduz a taxa de respiração radicular e compromete a absorção de nutrientes pelas raízes das plantas (MORARD; SILVESTRE,1996). Essa limitação pode ser agravada em períodos mais chuvosos, nos quais o fluxo de ar no solo é prejudicado, já que a partir da camada 0,1-0,2 m todos tratamentos apresentam valores médios próximo ao limite crítico de 0,10 m^3m^{-3} (LINN; DORAN, 1984).

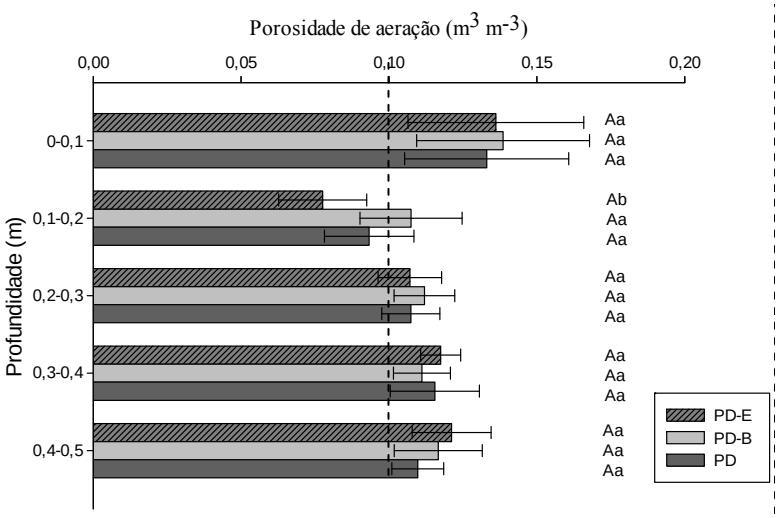


Figura 11 - Valores médios da porosidade de aeração na capacidade de campo (-10 kPa) para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. A linha tracejada representa o valor crítico de porosidade de aeração de 0,10 m^3 m^{-3}, proposto por Baver et al. (1972). Letras maiúsculas se referem aos tratamentos e, minúsculas, às profundidades; letras iguais indicam médias não diferentes devido à sobreposição dos intervalos de confiança (95 %). N=12

Na Figura 12 é possível perceber a semelhança entre a distribuição das fases quem compõem o solo no potencial mátrico de -10 kPa, destacando que a fase gasosa apresentou volume semelhante em todas as profundidades, com leve aumento em superfície.

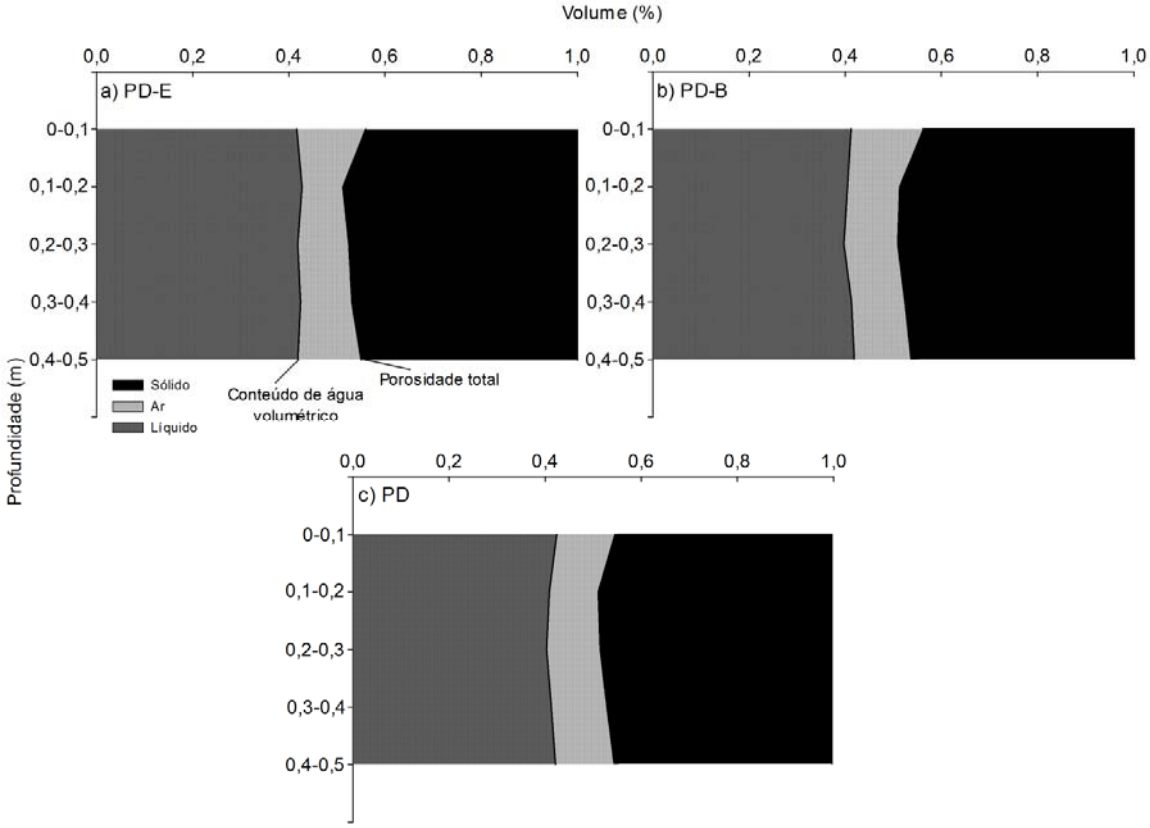


Figura 12 – Perfil da distribuição das fases para um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD), plantio direto com escarificação (PD-E) e plantio direto com escarificação biológica (PD-B), nas camadas de 0-0,10 m,0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m

3 CONCLUSÕES

a) A hipótese do estudo foi rejeitada, pois os atributos físicos avaliados não constataram melhorias na qualidade física do solo em virtude das práticas de descompactação aos 18 meses após sua aplicação.

b) Entre camadas, onde a densidade do solo foi maior (0,10-0,20 m), a porosidade total e a permeabilidade do solo ao ar (ψ_m = -5 kPa) foram menores que na camada 0,0-0,10 m. Onde houve escarificação, a macroporosidade foi maior na camada mais superfícial (0,0-0,10 m). Os índices de continuidade de poros (K_1 e N) não foram sensíveis em detectar diferenças na qualidade física do solo.

c) Constatou-se limitada persistência do efeito do escarificador como tentativa de melhorar a qualidade física de um Latossolo de textura argilosa quando esse apresenta grau de compactação inicial não restritivo ao crescimento de plantas. No período avaliado (18 meses), o plantio direto com ou sem práticas de descompactação apresentou praticamente a mesma qualidade física, como indicado pela densidade do solo, porosidade, permeabilidade ao ar e continuidade de poros.

REFERÊNCIAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.519-531, 2004.

ALJIBURY, F.K.; EVANS D.D. Water permeability of saturated soils as related to air permeability at different moisture tensions. **Soil Science Society of American, Proceedings** Madison, v.29, p. 366–369, 1965.

ALLMARAS, R.R.; KRAFT, J.M.; MILLER, D.E. Effects of soil compaction and incorporated crop residue on root health. **Annual Review of Plant Biology,** Palo Alto, v. 26, p.219-243, 1988.

AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.; LANZANOVA, M.; SANTI, A.L.; LOVATO, T. A compactação pode comprometer os rendimentos de áreas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n.89, p.34-42, 2005.

ARAUJO, A.G. Máquinas para descompactação de solos. In: CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. (Org.). **Uso e manejo de solos de baixa aptidão agrícola.** Londrina Iapar, 1999. p. 168-178.

ARAÚJO, A.G.; CASÃO JUNIOR, R.;SIQUEIRA, R. Máquinas para semear. **Cultivar Máquinas,** Pelotas v.1, n.2, p.10-11, 2001.

ARAÚJO, A.G. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 2004. 224p. 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.;HARRIS, W.; BURFORD, J.R. A laboratory method to measure gas diffusion and flow in soil and other porous materials. **Journal of Soil Science**, London,v.32, p.323-333, 1981.

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, B.C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 5th ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 2002. pt 4 p. 1141-1158.

BALL, B.C.; SMITH, K.A. Gas movement. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Ed.). **Soil analysis physical methods**. 3rd. ed. Madison: Marcel Dekker, 1991. p. 511-549.

BARDEN, L.; PAVLAKIS, G. Air and water permeability of compacted unsaturated cohesive soil. **Journal of Soil Science**, London, v.22, n.3, p. 302-317, 1971.

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.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C. & PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

BEVEN, K.; GERMANN, P.Macropores and water flow in soils. **Water Resources Research ,** Washington, v. 18, p. 1311-1325, 1982.

BHERING, S.B.; SANTOS, H. G. dos; BOGNOLA, I. A.; CÚRCIO, G. R.; MANZATTO, C. V.; CARVALHO JUNIOR, W. de; CHAGAS, C. da S.; ÁGLIO, M.L.D.; SOUZA, J. S. de. **Mapa de solos do Estado do Paraná:** legenda atualizada. Rio de Janeiro: EMBRAPA/IAPAR, 2008. 74p.

BLACKWELL, P.S.; RINGROSE-VOASE, A.J.; JAYAWARDANE, N.S.; OLSSON, K.A.; MCKENZIE, D.C.; MASON, W.K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **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**. 2nd .ed. Madison:American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. Pt 1. p.363-375.

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

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

BRADY, N.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2007. 980p.

BRANDT, A.A. **Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo**. 2009. 162p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

BUEHRER, T.F. The movement of gases through the soil as a criterion of soil structure. **Arizona Agricultural Experiment Station Technical Bulletin**. [S. l.], p. 39-57, 1932.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.;FREDERICK, J.R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. Soil and tillage Research, Amsterdam, v. 68, p. 49-57, 2002.

CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p. 789-796, 2005.

CAMARGO, O.A. de; GTIOKMAIN, F. **Noções básicas da metodologia empregada no estudo da aeraçao do solo**. 2008. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/ Artigos/2008_4/aeracao/index.htm>. Acesso em: 17 dez. 2011.

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.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 99-105, jan./abr. 1990.

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

CARTER, M.R.; WHITE, R.P.; IVANY, J.A. Characterizing macropore continuity and aeration in fine loams in tillage studies. In: INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANIZATION, 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.

CARVALHO FILHO, A.;CENTURION, J.F.;SILVA, R.P. da; FURLANI, C.E.A.; CARVALHO, L.C.C. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 229-237, 2007.

CASSEL, D.K. Subsoiling. **Crops and Soils Magazine,** Madison, v. 32, p. 7-10, 1979.

CASTRO FILHO. C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 22, p. 527-538, jul./set. 1998.

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for Field traffic-induced subsoil compaction: a review. Equipment and field practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdan, v. 73, p.161-174, 2003.

CHIEF, K.; FERRÉ, T.P.A.; NIJSSEN, B. Field testing of a soil corer air permeameter (SCAP) in desert soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 5, p. 1257-1263, 2006.

CHIEF, K.; FERRÉ, T.P.A.; NIJSSEN, B. Examination of correlation between air permeability and saturated hydraulic conductivity in unburned and burned desert soils. **Soil Science Society of American Journal** , Madison, v.72, p. 1-9, 2008.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.;KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Rio de Janeiro, v.41, p. 1663-1674, 2006.

COOK, R.J.; PAPENDICK, R.I. Influence of water potential of soils and plants on root disease. **Annual Review of Phytopathology,** Palo Alto, v.10, p.349-374, 1972.

COREY, A.T. Measurement of water and air permeability in unsaturated soil. **Soil Science Society of American Journal Proceeding**s Madison, v.21, p. 7-10, 1957.

COREY, A.T. Air Permeability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Pt I:Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, Madison, 1986. p. 1121-1136.

CUBILLA, M.; REINERT, D.J.; AITA, C.; REICHERT, J.M. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.71, p. 29-32, 2002.

CULLUM, R.F. Macropore flow estimations under no-till and till systems. **Catena,** Amsterdam, v.78, p.87–91, 2009.

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.

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.

DREW, M.C. Oxygen deficiency and root metabolism: injury and acclimation under hypoxia and anoxia. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 48, p.223-250, 1997.

DREW, M.C.; LYNCH, J.M.; Soil anaerobiosis, microorganisms and root function**. Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v.18, p.37-66, 1980.

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.

DREWRY, J.J.; CAMERON, K.C.; BUCHAN, G.D. Pasture yield and soil physicalproperty responses to soil compaction from treading and grazing- a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne,, v.46, p. 237- 256, 2008.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2006. 306p.

EVANS, D.D. Gas movement. In: Black, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis.** pt l. Madison:Am. Soc. Agron., 1965. p.319-330. (Agronomy,9)

EVANS, D.D.; KIRKHAM, D. Measurement of the air permeability of soil in situ. **Soil Science Society of American Journal Proceeding**s Madison, 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.

FEBRAPDP. Disponível em <http://www.febrapdp.org.br/port/plantiodireto.html>. Acesso em:17 nov, 2011.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H.M.; BRONSON, R.D. ; MANNERING, J.V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludaf). **Revista Brasileira Ciencia do Solo**, Viçosa, v.7, p. 329-333, 1983.

FIGUEIREDO, G.C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. 163p. (Tese de Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. 163p.

FONTANELA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego.** 2008. 72p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2008.

FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H. Manejo da compactação do solo no sistema plantio direto na palha. In: SIMPÓSIO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 2009, Foz do Iguaçu. **Palestras...** Ponta Grossa: FEBRAPDP, 2009.p 27-38

FRITTON, D.D. Air permeability of undisturbed soil. **Soil Science Society of American Journal Proceeding**s, Madison,v. 35, n. 3, p. 509-510, 1970.

GABET, E.; REICHMAN, O.J.; SEABLOOM, E.W. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. **Annual Review of Earth Planetary Science,** [S. l.], v, 31, p. 249-273, 2003.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v.28, p.477-484, 2004.

GERIK, T.J.; MORRISON Jr., J.E.; CICHESTER, F.W. Effect of controlled traffic on soil hysical 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.

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.18-186, 1968.

GRADWELL, M.W. Soil physical conditions of winter and growth of ryegrass plants. N**ew Zealand Journal of Agricultural Research**, Canterbury, v. 8, p. 238-269, 1965.

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.

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

HALL, S.J.; MATSON, P.A. Nox emissions from soil: implications for air quality modeling in agricultural regions. **Annual Review of Energy and the Environment**, Palo Alto, v.21, p.311-346, 1996.

HILL, R.L.; HORTON, R.; CRUSE, R.M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols**. Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 49, p. 1264-1270, 1985.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics.** New York:Academic Press, 1980. 413 p.

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.

IAPAR-INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Cartas climáticas do Estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 2000. 1 CD-ROM.

IVERSEN, B. V.; SCHJØNNING, P.; POULSEN, T. G.; MØLDRUP, P. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale**. Soil Science,** Baltimore, v. 166, [S. l.], n. 2, p. 97-106, feb. 2001.

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

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**, Baltimore,v.166, p. 97–106, 2000.

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

JEGOU, D.; BRUNOTTE, J.; ROGASIK, H.; CAPOWIEZ, Y.; DIESTEL, H.; SCHRADER, S.; CLUZEAU, D. Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X- Ray computed tomography: preliminary study. **European Journal of Soil Biology**, Montrouge, v. 38, p.329−336, 2002.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KIRKHAM, D. Proposed method for field measurement of the permeability of soil below the water table, Soil Sci. Soc. Am. Proc., [S. l.], 1946. p. 414–418.

KOCHHANN, R.A. DENARDIN, J.E. Implantação e manejo do sistema plantio direto. Passo Fundo, EMBRAPA-CNPT, 2000. p. 36.

KUBOTA, A.; HOSHIBA, K.;BORDON, J. Green-manure turnip for soybean based no-tillage farming systems in eastern Paraguay. Scientia Agricola, Piracicaba,v.62, p.150-158, 2005.

LANÇAS, K.P. Subsolagem ou escarificação. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, n. 14, p. 34-36, 2002.

LANDEFELD, L.S.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H.J.; STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam , v. 75, p.75-86, 2004.

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.

LINN D.M.; DORAN J.W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. **Soil Science Society of American Journal,** Madison, 48, p. 1267–1272, 1984.

LOGSDON, S.D.; ALMARAS, R.R.; SWAN, J.B.; RANDALL, G.W. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 54, p.1096-1101, 1990.

MAASLAND, M.; KIRKHAM, D. Theory and measurement of anisotropic air permeability in . **Soil Science Society of American Proceedings** Madison, , p. 395–400, 1955.

MACHADO, P.L.A.; BERNADI, A.C.C.; SILVA, C.A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 209p.

MACHADO, R.L.T.; TURATTI, A.L.; MACHADO, A.L.T.; ALONÇO, A.S.; REIS, A.V. Estudo de Parâmetros Físico em solo de várzea, antes e após escarificação**. Revista Brasileira. de Agrociência,** Pelotas, v.2, nº 3, 175-178, Set.-Dez., 1996.

MAGALHÃES, E.N.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; COSTA, K.A.P.; CASTRO, M.B. Recuperação estrutural e produção do capim-Tifton 85 em um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado. **CiênciaAnimal Brasileira**, Goiania , v.10, n.1, p.68-76, 2009.

MANCINELLI, R.L. The regulation of methane oxidation in soil. **Annual Review of Microbiology**, Palo Alto, v.49, p.581-605, 1995.

MATERECHERA, S.A. ; DEXTER, A.R.;ALSTON, A.M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. Plant Soil, Madison, v.135, p. 31-41, 1991.

McINTYRE, D.S.; TANNER, C.B. Abnormally distributed soil physical measurements and no parametric statistics. **Soil Science**, Madison, v. 88, p. 133-137, 1959.

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

MORARD, P.; SILVESTRE, J. Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: A review. Plant Soil, Dordrecht, v. 184,p.243-254, 1996.

MUZILLI, O. Manejo do solo em sistema plantio direto. In: CASÃO JÚNIOR, R.; SIQUEIRA, R.; MEHTA; Y.R.; PASSINI, J.J. (Org.). Sistema plantio direto com qualidade. Londrina: IAPAR; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006. p. 9-27.

NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p1735-1742. ago. 2008.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B. e BARROS, N.D. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.2, p.393-486, 2002.

ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HERNANS, J. L. Técnica de la mecanización agraria. 3.ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1989. 641p.

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.

PETH, S.; HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. **Journal of Plant Nutrient and Soil Science,** Weinheim, v. 169, n. 3, p. 401-410. 2006.

PEREIRA, A.A.A.; CRUCIANI, D.E. Estimativa de variações no coeficiente relativo de difusão dos gases no solo com base na análise da curva de retenção de água. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 245-249, mar./abr. 2001.

QUASTEL, J.H. Soil metabolism. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 16, p.217-240, 1965.

REEVE, R.C. A method for determining the stability of soil structure based upon air and water permeability measurements. **Soil Science Society of American Journal,**Medison, v.17, p. 324–329, 1953.

REEVE, R.C.Air-to-water permeability ratio. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis.** pt.1 , Madison:ASA and SSSA, 1965. p. 128-152. (Agron. Monograph, 9)

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, [S. l.], v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**,Dordrect, v.102, p.242–254, 2009.

RENK, F. Ueber die permeabilitat des Bodens für Luft, Forgeh Gabiete **Agr. Phys.** v.2,p.339-347, 1879.

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.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo.** 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.

SCANLON, B.R.; NICOT, J.P.; MASSMANN, J.W. Soil gas movement in unsaturated systems. In: WARRICK, A.W. Soil physics companion., London, New York: CRC Press, 2002. p. 297-341.

SCHARON, J.H.; MATSON, P.A.; ROTH, P.M. NOx emissions from soil: implications for air quality modeling in agricultural regions. **Annual Review of Energy Environment,** [S. l.], v.21, p.311–346, 1996.

SECCO, D. ;REINERT, D.J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-escuro sob PD. Engenharia Agrícola,, Porto Alegre,v. 16,p.52-61, 1997.

SÉGUY, L.; BOUZINAC, S.; MARONEZZI, A. C.; TAFFAREL, V.; TAFFAREL, J. Plantio direto do arroz de sequeiro de alta tecnologia na zona tropical úmida do centro-norte do Mato Grosso. **Informações Agronômicas**, [S. l.], n. 86, p. 1-28, jun. 1999. (Encarte técnico)

SEIXAS, F. **Compactação do solo devido à colheita de madeira.** 2001. 75f. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação**. 2010.158p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; COSTA, K. A. P.; CASTRO, M. B. ; MAGALHÃES, E. N. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifton 85. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 14, n. 1, p 39-45. Jan. 2010 .

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

SHTYKOV, V.I.; DAISHEV, S.T. Determination of air permeability of soils. **Soviet Soil Science,** New York, v. 18, p.115-122, 1986.

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

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação.** 2003. 171 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Biodinâmica do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p. 191-199, 2000a.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.;REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo VermelhoEscuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa,v. 24, p.239-249, 2000b.

SOJKA, R.E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v.154, p.269-80, 1992.

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.

STARTSEV, A.D.; MCNABB, D.H. Skidder traffic effects on water retention, pore-size distribution, and van Genuchten parameters of boreal forest soils. **Soil Science Society American Journal,** Madison, v. 65, p. 224-231, 2001.*

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: I. nas propriedades físico-hídricas do solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, maio/ago. 2002.

STRECK, C.A. **Índice S e fluxo de água e ar em solos do Sul do Brasil.** 2007. 95p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007

SUZUKI, L.E.A.S**. Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005.159p. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. ; LIMA, C.L.R. Densidade restritiva ao sistema radicular em função da argila. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16, 2006. Aracajú, 2006. **Anais…** Aracajú, 2006.

TARAWALLY, M.A.citar todos et al. Field compaction at different soil-water status: effect on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. **Soil Tillage Research,**cidade, v. 76, p.95-103, 2004.

TARTAKOVSKY, D.M.; MOULTON, J.D.; ZLOTNIK, V.A. Kinematic structure of minipermeameter flow. **Water Reseach**, [S.l], v. 36, p. 2433–2442, 2000.

TAYLOR, J.C.; BELTRAME, L.F.S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem**. Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre , v.3, p.34-44, 1980.

THOMAS, G.W.; PHILLIPS, R.E. Consequences of water movements in macropores. **Journal Environmental of Quality**, v. 8, p. 149-152, 1979.

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

VEIGA, M.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 32, p.1437-1446, 2008.

VERNETTI JÚNIOR, F. de J.; GOMES, A. da S. **Plantio direto: uma opção de manejo para a produção agrícola sustentável.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. 69p. (Documentos, 58).

VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola.** 2001. 184p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

WYCKOFF, R.D.; BOTSET, H.G., The low of gas-liquid mixtures through unconsolidated sands. **Physics**, New York, v.7, p. 325-345, 1936.