

EDNER BETIOLI JUNIOR

**GRAU DE COMPACTAÇÃO, INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E
PERMEABILIDADE AO AR DE UM LATOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRICO SOB PLANTIO DIRETO**

**MARINGÁ
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2012**

EDNER BETIOLI JUNIOR

**GRAU DE COMPACTAÇÃO, INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E
PERMEABILIDADE AO AR DE UM LATOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRICO SOB PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

**MARINGÁ
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO – 2012**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

B562g Betioli Junior, Edner
 Grau de compactação, intervalo hídrico ótimo e
 permeabilidade ao ar de um latossolo vermelho
 dístroférico sob plantio direto/ Edner Betioli
 Junior -- Maringá, 2012.
 72 f. , figs. , tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Cássio Antônio Tormena
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Departamento
 de Agrônoma, Programa de Pós-Graduação em Agrônoma,
 2012.

 1. Aeração do solo. 2. Intervalo hídrico ótimo 3.
 Grau de compactação. 4. Permeabilidade do solo ao
 ar. 5. Índice de continuidade de poros . I. Tormena,
 Cássio Antônio, orient. II. Universidade Estadual de
 Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Departamento
 de Agrônoma . Programa de Pós-Graduação em
 Agrônoma. III. Título.

CDD 21.ed. 631.452

JLM000430

EDNER BETIOLI JÚNIOR

**GRAU DE COMPACTAÇÃO, INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E
PERMEABILIDADE AO AR DE UM LATOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRRICO SOB PLANTIO DIRETO**

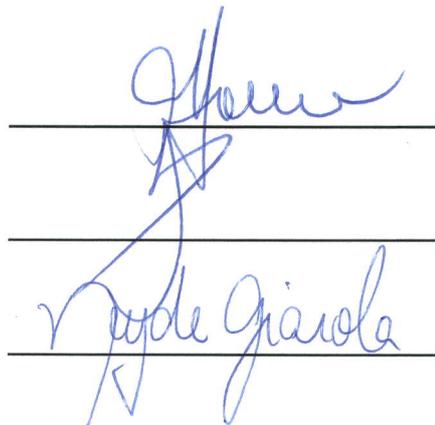
Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de fevereiro de 2012.

Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena
Presidente

Prof. Dr. Alvaro Pires da Silva
Membro

Prof^ª. Dr^ª. Neyde Fabíola Balarezo Giarola
Membro



Three horizontal lines with handwritten signatures in blue ink. The top signature is for Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena, the middle for Prof. Dr. Alvaro Pires da Silva, and the bottom for Prof.ª. Dr.ª. Neyde Fabíola Balarezo Giarola.

A minha mãe Inês Favoreto Betioli
“in memoriam”

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida e por todas as bênçãos a mim concedidas.

À Universidade Estadual de Maringá (UEM) e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia (PGA), pela oportunidade de realização do Curso de Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da Bolsa de Estudo.

Ao Prof. Dr. Cássio Antônio Tormena, pela orientação e generosidade em compartilhar os conhecimentos.

Aos companheiros de trabalho Guilherme Anghinoni, Hélio Henrique Soares Franco, Jonez Fidalski, Leonardo Pim Petean, Marco Aurélio Teixeira Costa, Marlon Julian Castañeda Serrano, Reinaldo Bernardo, Wagner Henrique Moreira, Camila Jorge Bernabé Ferreira, Éricka Sato, Rachel Muylaert Locks Guimarães e Renata de Guimarães, por terem contribuído direta ou indiretamente para a execução deste trabalho.

Ao Engenheiro Agrônomo Moacir Ferro, pela disponibilização da área agrícola para a realização do estudo.

Em especial, ao meu pai Edner, minha irmã Lorena e minha namorada Bruna, simplesmente por serem pessoas maravilhosas pelas quais eu tenho um amor incondicional.

BIOGRAFIA

EDNER BETIOLI JUNIOR, filho de Edner Betioli e Inês Favoreto Betioli, nasceu na cidade de Maringá (PR) no dia 12 de maio de 1987. Em sua cidade natal, concluiu o ensino fundamental no Colégio Estadual Dr. Gastão Vidigal e o ensino médio no Colégio Objetivo.

De 2005 a 2009 cursou Agronomia na Universidade Estadual de Maringá sendo bolsista do Programa de Iniciação Científica por três anos. Após formar-se Engenheiro Agrônomo, ingressou, em 2010, no Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, Área de Concentração de Solos e Nutrição de Plantas.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 3 |
| 2.1 | PLANTIO DIRETO..... | 3 |
| 2.2 | GRAU DE COMPACTAÇÃO..... | 7 |
| 2.3 | INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO..... | 10 |
| 2.4 | PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR..... | 13 |
| 3 | CAPÍTULO 1: INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E GRAU DE COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO APÓS 30 ANOS SOB PLANTIO DIRETO | 18 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO..... | 20 |
| 3.2 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 23 |
| 3.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 27 |
| 3.4 | CONCLUSÕES..... | 38 |
| 4 | CAPÍTULO 2: PERMEABILIDADE AO AR EM LATOSSOLO VERMELHO APÓS 30 ANOS SOB PLANTIO DIRETO | 39 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO..... | 41 |
| 4.2 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 44 |
| 4.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 48 |
| 4.4 | CONCLUSÕES..... | 59 |
| 5 | CONCLUSÕES GERAIS | 60 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 61 |

RESUMO

BETIOLI JR, EDNER, M.Sc. Universidade Estadual de Maringá (UEM), Fevereiro de 2011. **Qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após longo tempo sob plantio direto**. Professor Orientador: Dr. Cássio Antônio Tormena.

O objetivo do presente estudo foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado por 30 anos sob sistema plantio direto (SPD). Para tal foram realizados dois experimentos em uma área de lavouras comerciais localizada no Município de Maringá, PR. No primeiro experimento, amostras de solo com estrutura preservada e deformada foram coletadas na camada de 0-0,10 m, para determinação da densidade do solo (D_s), do intervalo hídrico ótimo (IHO) e do grau de compactação do solo (GC). As amostras com estrutura preservada foram obtidas em três posições relativas às linhas (L), entrelinhas (E) e posição intermediária entre as linhas e entrelinhas (PI) da cultura do milho. Foram determinadas as curvas de retenção de água e resistência do solo à penetração bem como a D_s . O solo com estrutura deformada foi utilizado para obtenção da curva de compactação utilizando o teste de Proctor. A densidade do solo máxima (D_{max}) foi obtida a partir da curva de compactação e o GC foi determinado pela razão entre a D_s e a D_{max} . No segundo experimento, foram avaliados a permeabilidade do solo ao ar (K_a), a porosidade de aeração (ϵ_a) e os índices de continuidade de poros (K_1 e N) em posições de amostragem relativas à linha (L), entrelinha (E) e posição intermediária à linha e entrelinha (PI). Em cada posição de amostragem, foram retiradas quarenta amostras de solo com estrutura preservada num transecto estabelecido perpendicularmente às linhas de plantio da cultura do milho e em duas profundidades (0-0,10 e 0,10-0,20 m). A K_a e ϵ_a foram determinadas nos potenciais mátricos de -2, -4, -6, -10, -30 e -50 kPa. A D_s e o teor de água (base volumétrica) também foram determinados. Os resultados mostraram que, independentemente dos limites críticos de resistência à penetração (RP) adotados, verificou-se uma redução do IHO com o aumento da D_s . Os maiores valores do IHO foram verificados na posição de amostragem L e a utilização de RP crítica maior que 2,0 MPa resultou em IHO condizente com a qualidade

física deste solo sob SPD de longo tempo. A D_{max} foi $1,52 \text{ kg dm}^{-3}$ e o GC variou de 64 a 87%, sendo os maiores valores obtidos nas posições E e PI. As diferentes posições de amostragem apresentaram diferenças estatísticas na K_a e nos índices de continuidade de poros, com destaque para os maiores valores observados na L na camada de 0-0,10 m. Contudo, tais diferenças não estiveram necessariamente relacionadas com as diferenças observadas na D_s e na ε_a . Os valores de IHO e GC obtidos neste estudo indicam que a qualidade física deste solo não é limitante à produção das culturas após 30 anos de utilização do SPD. A K_a comprovou sua habilidade na detecção das alterações no sistema poroso e demonstrou ser eficiente na avaliação da qualidade física do solo do presente estudo.

Palavras-chave: aeração do solo, intervalo hídrico ótimo, grau de compactação, permeabilidade do solo ao ar, índice de continuidade de poros.

ABSTRACT

BETIOLI JR, EDNER, M.Sc. Universidade Estadual de Maringá (UEM), Fevereiro de 2011. **Physical quality of an oxisol after long-term under no-tillage**. Adviser: Dr. Cássio Antônio Tormena.

The objective of this study was to evaluate the physical quality of an Oxisol cultivated for 30 years under no-tillage (NT). For this purpose two experiments were conducted in an area of commercial fields located in Maringá, PR: in the first, soil samples with preserved and deformed structure were collected from the 0-0.10 m layer, for determination of bulk density (BD), the least limiting water range (LLWR) and the degree of compaction (DC). The samples with preserved structure were obtained at three sampling positions: on the lines (L); at the midpoint between two lines (E) and at an intermediate position (IP) between the L and E of corn plants. The water retention curve, the soil resistance curve and the BD were determined. The soil sample with deformed structure was used to obtain the compaction curve using the Proctor test. The maximum bulk density (D_{max}) was obtained from the compaction curve and DC was determined by the ratio between the BD and D_{max} . In the second experiment, the soil air permeability (K_a), the air-filled porosity (ϵ_a) and pore continuity indices (K_1 and N) were evaluated for the sampling positions related to the lines (L), to the midpoint between two lines (E) and to an intermediate position (IP) between the L and E. Forty samples were taken from each sampling position in a transect set perpendicularly to the planting lines of corn, in two depths (0-0.10 and 0.10-0.20 m). The K_a and the ϵ_a were determined at the matric potentials of -2, -4, -6, -10, -30 e -50 kPa. The BD and the water content were determined too. The results showed that regardless of the critical limits of penetration resistance (PR) adopted, there was a reduction in the LLWR with increasing BD. The LLWR highest values were observed in the L sampling position and the use of the critical PR greater than 2.0 MPa resulted in a LLWR consistent with the physical quality of the soil for long time under NT. The D_{max} was 1.52 kg dm^{-3} and the DC ranged from 64 to 87%, with the highest values obtained at positions E and IP. The different sampling positions were statistical differences in the K_a and pore continuity indices, with the higher values obtained in the L at

the 0-0.10 m layer. However, these differences were not necessarily related to the observed differences in BD and ϵ_a . The values of LLWR and DC obtained in this study indicate that the physical quality of this soil is not limiting for crop yields after 30 years under no tillage. The K_a has proved its ability to detect changes in the pore system and proved to be efficient in the evaluation of the soil physical quality of this study.

Key words: soil aeration, least limiting water range, degree of compactness, air permeability, pore continuity indices.

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Sistema Plantio Direto (SPD) é apontado como um dos maiores avanços no âmbito tecnológico e filosófico da agricultura. Sua invenção agrega uma série de valores básicos pautados em um sistema de produção sustentável.

Conceitualmente, o SPD é um sistema conservacionista de manejo caracterizado pela manutenção da palhada remanescente do cultivo, ausência de mobilização do solo, utilização de rotação de culturas, reduzida taxa de mineralização da matéria orgânica, maior atividade biológica no solo e pela intensificação dos processos de agregação do solo. Comparado com sistemas de mobilização intensa do solo, o SPD proporciona menores riscos de erosão hídrica, redução no consumo de combustível fóssil, menores custos de produção e menor poluição de recursos hídricos. Decorrente destas e outras vantagens, a área de SPD teve expressivo crescimento no Brasil, que é atualmente estimada em cerca de 26 milhões de hectares.

A única operação de revolvimento do solo no SPD é caracterizada pela abertura do sulco durante a operação de semeadura. Nesta ocasião, o implemento propicia um reduzido preparo vertical e horizontal na linha de semeadura, modificando fisicamente o solo na camada acima do limite de profundidade da sua atuação, onde ocorrerá a deposição do fertilizante e das sementes. Em decorrência do baixo revolvimento, o SPD proporciona a homogeneização do ambiente físico do solo e pode acarretar a compactação das camadas superficiais, principalmente em solos argilosos, fator apontado como limitante ao aumento da produtividade e ao uso contínuo do SPD.

Um crescente número de trabalhos científicos avaliando a descompactação do solo em SPD tem sido observado e, na prática, o revolvimento periódico tem sido realizado pelos agricultores, especialmente em solos argilosos e sob condições de sucessão de culturas e baixos teores de matéria orgânica. Por outro lado, diversos estudos demonstram que, apesar da maior compactação em SPD, o solo é fisicamente mais funcional em termos de transmissão de água e ar, devido à presença de bioporos e à maior continuidade e conectividade do sistema poroso, características que

contribuem para as maiores produtividades observadas no SPD em relação aos sistemas de manejo convencionais. No Estado do Paraná, por exemplo, existem registros de áreas com elevadas produções sob SPD implantado em solos argilosos por mais de 20 anos, sem necessidade de correção de eventuais problemas de compactação. Estas constatações sugerem que mecanismos associados ao manejo destas áreas propiciam uma interação entre a mobilização do solo na linha de semeadura e o sistema de rotação de culturas que controla e mantém a qualidade física dos solos.

Apesar do grande número de pesquisas relacionadas à qualidade física do solo em SPD, poucas consideram os efeitos positivos deste sistema em longo prazo e ainda, raramente, fazem distinção quanto à posição espacial de amostragem. Nestes casos, assume-se que a amostragem foi realizada na entrelinha da cultura, negligenciando-se as possíveis diferenças físicas associadas à funcionalidade do solo existentes nas posições da linha e da entrelinha das plantas.

O presente trabalho foi estruturado em dois capítulos nos quais diferentes indicadores foram utilizados para avaliação da qualidade física do solo sob SPD. A hipótese geral deste trabalho é que o SPD, após longo tempo de implantação, pode proporcionar e manter a qualidade física do solo, a qual é dependente da posição relativa à linha e entrelinha de cultivo em função da variação temporal e espacial dos diferentes espaçamentos das culturas e mecanismos de abertura de sulcos associados à semeadura das culturas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade física do solo em uma área conduzida por trinta anos em SPD a partir de três indicadores amplamente utilizados: Grau de Compactação, Intervalo Hídrico Ótimo e Permeabilidade do Solo ao Ar, levando-se em consideração a posição espacial de obtenção das amostras.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PLANTIO DIRETO

Em nível de agricultor, o início oficial do Sistema Plantio Direto (SPD) data o ano de 1972, por iniciativa do produtor Herbert Bartz, na cidade de Rolândia, PR. O domínio da tecnologia envolveu diferentes segmentos ligados ao agronegócio e o foco principal era combater a erosão do solo que promovia a degradação acelerada do solo e da água, a partir da substituição de culturas permanentes por culturas de cereais mecanizadas como a soja, o trigo e, posteriormente, o milho. O sistema de preparo convencional do solo exigia o seu revolvimento por sucessivas operações de aração e gradagem, compactando o solo em subsuperfície formando o “pé de arado” ou “pé de grade”, além de pulverizar a camada superficial. Este procedimento promovia elevadas perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes, formando sulcos de erosão que culminavam no assoreamento dos corpos d’água.

Norteados pelos princípios do não revolvimento do solo, da manutenção permanente da palhada e cobertura do solo, e da manutenção de um sistema de diversificação ou rotação de culturas, o SPD assistiu a um aumento expressivo no seu número de adeptos. A adoção generalizada do SPD ocorreu devido ao efetivo controle da erosão e redução nos custos de produção associado ao menor gasto de combustível com operações mecanizadas. Atualmente, o SPD abrange mais de 5 milhões de hectares no Paraná e cerca de 26 milhões de hectares no Brasil (FEBRAPDP, 2008). Em nível mundial, as estimativas são de cerca de 105 milhões de hectares (Derpsch & Friedrich, 2009). O sucesso do SPD no Brasil rendeu-lhe o título de avanço mais significativo na sustentabilidade da agricultura nacional desde a ECO 92 (CNA, 1997), citado pela Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil em documento mundial das confederações nacionais de agricultura apresentado em 1997 à ONU.

Do ponto de vista do solo, quando o SPD é conduzido adequadamente, respeitando-se suas premissas básicas, outros benefícios podem ser atingidos: aumento no teor de matéria orgânica do solo que contribui para a infiltração de

água e sua disponibilidade no solo (Bescansa et al., 2006); aumento na disponibilidade de nutrientes às plantas e na diversidade biológica (Reicosky and Saxton 2007). Estudos com experimentos de longo prazo mostraram que, em geral, o SPD apresenta maiores teores de carbono orgânico no solo do que outros sistemas de preparo do solo (Salvo et al., 2010; Melero et al., 2011; Dalal et al., 2011; López-Fando & Pardo, 2011). Helgason et al. (2010) encontraram que a biomassa microbiana avaliada em diferentes classes de tamanhos de agregados foi 32% superior no SPD comparado ao plantio convencional (PC). Neste estudo, os fungos micorrízicos arbusculares foram afetados pelo revolvimento causado no PC com redução de 40 a 60% nas diferentes classes de agregados em relação ao SPD. Ding et al. (2011) demonstraram que, após 6 anos de implantação do SPD, os aminoaçúcares do solo, indicadores da atividade microbiana, foram 59% superiores em relação ao PC. Tabaglio et al. (2009) verificaram que o total de micro artrópodes do solo foi 29% superior no SPD em relação ao PC.

Os benefícios obtidos com o SPD podem contribuir para maiores produtividades em relação aos outros sistemas de manejo. Em um estudo conduzido por 14 anos sob solo siltoso da Austrália, So et al. (2009) não observaram diferenças significativas na produção de soja sob SPD e PC nos primeiros cinco anos de avaliação do experimento. Contudo, do sexto ano em diante, o PC não foi capaz de sustentar boas produtividades e o SPD passou a apresentar produtividades significativamente superiores. Estes resultados foram determinados pela maior macroporosidade, estabilidade estrutural, infiltração de água e pelo maior teor de carbono orgânico do solo e maior conteúdo de água disponível às plantas verificado ao longo dos anos no SPD.

Dentre os princípios do SPD a rotação de culturas tende a ser o mais negligenciado, o que reflete principalmente na inadequada cobertura do solo. Desta forma, solos com pouca cobertura e conduzidos em sistema de sucessão, especialmente pertencentes à classe textural argilosa ou muito argilosa, estão predispostos à formação de camadas superficiais compactadas. A reduzida mobilização do solo e a possibilidade de tráfego sob condições de elevada umidade são particularidades do SPD que, associadas ao aumento da massa dos maquinários, também têm contribuído para uma maior compactação superficial do solo (Tormena et al., 1998a), situação apontada como uma das

principais restrições para a expansão do SPD (Siqueira, 2008). Tal condição exige que as semeadoras-adubadoras para SPD sejam equipadas com mecanismos eficientes para corte do solo compactado e dos restos culturais, uma vez que o revolvimento do solo é restrito à linha de semeadura, onde serão abertos os sulcos para deposição dos fertilizantes e sementes nas profundidades e distâncias adequadas.

Em estudo sobre os impactos dos diferentes sistemas de manejo sobre o solo, Gál et al (2007) obtiveram que as densidades do solo (Ds) no SPD superaram significativamente as encontradas no PC, sendo que as diferenças foram de 10, 15 e 17% para as camadas de 0-5, 5-15 e 15-30 cm, respectivamente. Após 5 anos de experimentação, Bescansa et al (2006) encontraram maiores Ds no SPD em relação ao PC, na profundidade de 0-10 cm. O mesmo comportamento da Ds foi observado por Hernanz et al. (2002) após 20 anos de condução de um experimento com SPD e PC.

Para romper a compactação superficial, em algumas regiões, o uso de sulcadores do tipo haste nas semeadoras de SPD tem se generalizado como a melhor estratégia (Siqueira, 2008). Siqueira & Casão Jr (2004) verificaram que o uso de hastes com formato parabólico, ângulo de ataque em torno de 20 graus e espessura máxima da ponteira de 22 mm pode representar até 50% de redução na potência requerida de tração de uma semeadora-adubadora de plantio direto com 9 linhas, revolvendo uma menor área de solo e, conseqüentemente, mantendo o solo mais protegido, além de diminuir consideravelmente o custo com combustível por área. Reis et al. (2004) verificaram que o sistema de abertura de sulcos por hastes proporcionou maior porcentagem de emergência de plantas em relação ao sistema de discos duplos. Modolo et al. (2004) demonstraram que o sistema de hastes proporcionou menor variação na profundidade média de deposição das sementes do que o de discos duplos.

Em alguns casos, a descompactação do solo em SPD promove efeitos positivos como a redução da resistência à penetração das raízes (Abreu et al., 2004) e o aumento da taxa de infiltração de água (Camara & Klein, 2005), da condutividade hidráulica saturada (Vieira & Klein, 2007), da amplitude do intervalo hídrico ótimo (Klein & Camara, 2007) e da densidade de raízes (Seixas et al., 2005). Contudo, outros casos demonstram que a

descompactação no SPD não tem reflexo sobre a produtividade das culturas (Secco et al., 2004; Seixas et al., 2005; Collares et al., 2008).

Apesar destas constatações, a maioria dos estudos sobre a qualidade física do solo em SPD não leva em conta a variação espacial sistemática dos atributos físicos do solo (Cassel & Nelson, 1985), que são determinados pelo tráfego de máquinas nas entrelinhas e pela mobilização do solo durante a semeadura (Onofiok, 1988), e ainda, por meio da ação física, química e biológica do sistema radicular das culturas sobre a estrutura do solo. Nestas situações, a posição de amostragem não é discriminada ou assume-se que esta foi realizada na entrelinha da cultura. Alguns autores indicam a importância da posição de amostragem: Kaspar et al. (1991) concluíram que a camada de 0-15 cm da entrelinha trafegada apresentava 50% menos raízes de milho comparada a entrelinha sem tráfego; Mohanty et al. (1996) verificaram que a taxa de infiltração de água foi máxima na posição relativa à linha da cultura; Correchel et al. (1999) concluíram que a Ds foi maior na entrelinha comparada a posição relativa à linha da cultura do milho; Starr & Timlin (2004) avaliaram a dinâmica da água na linha e entrelinha da cultura do milho e encontraram que a maior absorção pelas plantas ocorreu na linha.

Os efeitos do tráfego em SPD são ainda pouco pesquisados em solos tropicais e muitas dúvidas ainda persistem acerca da variação dinâmica da estrutura do solo sob o efeito do tráfego de máquinas e implementos. Como o crescimento das culturas é fundamentalmente determinado pela disponibilidade de água, oxigênio e nutrientes, que por sua vez depende da habilidade das plantas desenvolverem um adequado sistema radicular, capaz de explorar o solo, o revolvimento do solo possivelmente apresenta efeitos distintos nos diferentes sistemas de produção em curto e longo prazo. A disponibilidade de água e oxigênio no solo para o desenvolvimento do sistema radicular é fortemente influenciada pela porosidade do solo. Logo, o manejo pode imediatamente aumentar a porosidade total do solo (Lindstrom and Onstad, 1984) a partir da criação de poucos e irregulares macroporos (Pagliai et al., 1984) e até contribuir para uma melhor difusão de oxigênio às raízes e infiltração de água até camadas do solo mais profundas. Contudo, o cultivo sob sistema convencional por longo prazo tende a reduzir a porosidade devido à perturbação mecânica da estrutura do solo e à compactação das camadas

superficiais. Os indícios da degradação da estrutura do solo em função do manejo podem aparecer antes do terceiro (Burch et al., 1986) ou quinto ano (Hamblin, 1984) após sua implantação, e geralmente acarreta redução na produtividade.

2.2 GRAU DE COMPACTAÇÃO

Os parâmetros mais utilizados na caracterização do estado de compactação do solo são a densidade e a porosidade do solo. Contudo, para se caracterizar as propriedades do solo sob um ponto de vista de qualidade, com relação à produção das culturas, por exemplo, estes parâmetros não são satisfatórios, visto que originam para cada tipo de solo diferentes curvas de respostas produtivas e valores ótimos relacionados à produção das culturas (Hakansson & Lipiec, 2000). Isto dificulta a aplicação dos resultados experimentais e sua comparação entre os distintos estudos sobre compactação do solo.

Frente a este problema, esforços foram feitos para se encontrar um parâmetro que eliminasse ao máximo as diferenças entre solos em relação às curvas de resposta de produção e os seus valores ótimos associados. E foi da pesquisa Sueca que se originou o Grau de Compactação (GC) (Hakansson, 1973; Ericksson, 1974), parâmetro resultante da relação entre a densidade do solo (D_s) e a densidade máxima ou de referência (D_{sr}) obtida por um teste de compactação padrão.

Originalmente, o GC era obtido pela relação entre a D_s e a D_{sr} resultante de um teste de compressão uniaxial com energia de 200 kPa e sua aplicação era restrita à caracterização das camadas de solo revolvidas anualmente por decorrência do manejo. Posteriormente, o GC passou a ser principalmente utilizado em trabalhos experimentais relacionados à influência do tráfego de máquinas agrícolas sobre o solo e sobre a produção das culturas, inclusive sob sistema plantio direto (SPD). Outros testes de compactação com distintas energias aplicadas também passaram a ser utilizados para a determinação da D_{sr} , como por exemplo, o teste de Proctor com energia aproximada de 560 kPa (Carter, 1990; Dias Junior & Etanislau, 1999). Em SPD,

Suzuki et al. (2007) obtiveram a Dsr pelo teste de compressão uniaxial com pressão de 1600 kPa, utilizando amostras com estrutura preservada.

O GC, também denominado Densidade Relativa, foi introduzido com o objetivo principal de simplificar os diversos estudos sobre o estado de compactação do solo. A hipótese inicial era que o uso do GC, ao contrário da porosidade e da Ds, forneceria resultados menos específicos e, conseqüentemente, mais aplicáveis. Esse parâmetro foi apontado como um “parâmetro integrador de alto nível para a qualidade física do solo” (Topp et al., 1997). A expectativa era de que o GC se tornasse uma ferramenta útil na ligação entre os estudos sobre a resposta do solo ao tráfego e os estudos sobre a resposta das culturas em função das condições do solo resultantes do tráfego.

Para comprovar a independência do GC em relação à textura e ao teor de matéria orgânica do solo, Hakansson (1990) avaliou o GC em uma série de 102 experimentos de campo em uma ampla faixa de solos cultivados com cevada como cultura padrão. Nestes experimentos, o tráfego de máquina foi conduzido para gerar uma amplitude de valores de GC na camada de 4-25 cm. Todos os valores de GC ótimos ao desenvolvimento das plantas obtidos nos diferentes solos foram equivalentes a 87%, mesmo considerando a ampla variação do teor de argila de 20 a 600 g kg⁻¹ e do teor de matéria orgânica de 1 a 11%.

Silva et al. (1997) estudaram os efeitos do manejo, do tráfego de máquinas, da textura e do teor de matéria orgânica do solo sobre a Ds e sobre a densidade relativa. Estes autores verificaram que enquanto a Ds foi fortemente influenciada por todos os fatores citados, o uso da densidade relativa eliminou os efeitos da textura e do teor de matéria orgânica do solo, destacando os efeitos efetivamente ligados ao manejo do solo e ao tráfego de máquinas.

Trabalhando com 4 solos de texturas distintas, Lipiec & Hakansson (2000) obtiveram que os limites críticos de resistência do solo à penetração e de porosidade de aeração se relacionaram com o GC de uma forma muito semelhante, comprovando o fato de que o GC ótimo ao desenvolvimento das culturas é similar em solos distintos, enquanto que a Ds e a porosidade de aeração ótimas variam consideravelmente.

A literatura é repleta de trabalhos que estabelecem valores de GC ótimos para o desenvolvimento das culturas, ou ainda, críticos às mesmas. Em solos arenosos (100 g kg⁻¹ argila, 300 g kg⁻¹ silte e 600 g kg⁻¹ areia), Carter (1990) obteve uma produção relativa de cereais $\geq 95\%$ em uma faixa de GC de 77,5-84%. O mesmo autor obteve que, em áreas sob SPD, GC > 89% afeta o desenvolvimento de plantas principalmente por deficiente aeração do solo.

Em estudo com cevada, Lipiec et al. (1991) verificaram que o aumento do GC resultou em maior resistência do solo à penetração, menor porosidade de aeração e maior acúmulo de raízes nas proximidades da superfície. O índice de área foliar e o rendimento de grãos decresceram acentuadamente quando o GC excedeu 88%.

O GC de 80% foi verificado por Beutler et al. (2005) como ótimo para a cultura da soja em Latossolo Vermelho de textura média, utilizando Dsr obtida a partir do teste de Proctor realizado com amostras de solo com estrutura alterada. Em Latossolo Vermelho de textura argilosa, Klein (2006) encontrou intervalo hídrico ótimo (IHO) nulo em valores de GC superiores a 88%.

Em avaliação da susceptibilidade à compactação de um Argissolo Distrocoeso submetido a diferentes sistemas de manejos em cultivo de cana de açúcar, Oliveira et al. (2010) consideraram o GC de 86% como limite acima do qual algumas culturas têm o rendimento afetado negativamente, e concluíram que apenas o sistema de manejo de irrigação por 25 anos superou o valor limite, na camada de 0-20 cm.

Em Latossolo sob SPD, Suzuki et al. (2007) encontraram que o GC de 86% correspondeu à maior altura de plantas e ao maior rendimento da soja, utilizando Dsr obtida pelo teste de compressão uniaxial com pressão de 1600 kPa em amostras de solo com estrutura preservada. De acordo com os autores, o estudo do GC ainda é incipiente no Brasil, especialmente em solos sob SPD, e as relações entre GC e as propriedades físicas do solo carecem de maior avaliação para que sejam definidos os valores críticos de GC para o desenvolvimento das diferentes culturas.

2.3 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

Entre os fatores físicos do solo diretamente relacionados com o desenvolvimento das plantas, o teor de água do solo é o mais intensivamente estudado e diferentes abordagens são usadas para sua quantificação. O clássico conceito de água disponível (AD) estabelece que o teor de água compreendido entre a capacidade de campo (CC) (equivalente ao teor de água no potencial mátrico de $-0,01$ MPa) e o ponto de murcha permanente (PMP) (equivalente ao teor de água no potencial mátrico de $-1,5$ MPa) corresponde à amplitude do teor de água no solo disponível às plantas. A AD incorpora uma ampla variação de tamanhos de poros, e sua utilização como indicador da qualidade do solo para o crescimento das plantas implica assumir que, dentro destes limites, não ocorre nenhum outro tipo de limitação (Tormena et al., 1998a). Porém, dependendo da condição estrutural do solo, entre o limite superior e inferior da AD, podem ocorrer limitações por excessiva resistência do solo à penetração das raízes (RP) ou aeração deficiente (Topp et al., 1994).

As condições físicas na interface solo-raiz são principalmente controladas pela disponibilidade de água, ar e pela resistência à penetração (RP), cujas magnitudes são determinadas pela estrutura do solo (Hadas, 1997). A dinâmica inter-relação entre estes fatores dificulta o estabelecimento dos seus respectivos níveis ótimos em relação à produtividade das culturas (Letey, 1985). Com relação à disponibilidade de ar, o valor mínimo de porosidade de aeração equivalente a 10% tem sido associado como limite abaixo do qual a difusão de oxigênio no solo torna-se limitante ao funcionamento das raízes (Glinski & Lipiec, 1990). Com relação à RP, o valor de 2,0 MPa tem sido geralmente associado como impeditivo para o crescimento das raízes (Taylor et al., 1966) e da parte aérea das plantas (Weaich et al., 1996).

A grande limitação da aplicação da AD nos estudos sobre disponibilidade de água às plantas e qualidade física dos solos é que esta considera apenas o efeito do potencial da água no solo como limitação ao crescimento radicular. Num solo compactado, por exemplo, a taxa de difusão de oxigênio pode limitar o crescimento radicular em potenciais menores ou iguais à CC, enquanto que a excessiva RP pode limitar o crescimento das raízes sob condições mais secas. O reconhecimento da ocorrência destas

interações e de que as culturas estão sujeitas às suas interferências implica a necessidade de quantificá-las quando da avaliação da qualidade física do solo para o crescimento das plantas.

O “Least Limiting Water Range”, introduzido por Silva et al. (1994) e traduzido como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) (Tormena et al., 1998b) é o conceito de um único parâmetro que descreve as interações entre os atributos físicos do solo diretamente relacionados com o crescimento das plantas. O IHO é definido como a amplitude do teor de água no solo em que são mínimas as limitações ao crescimento das plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes (Silva et al., 1994). O IHO é um parâmetro físico do solo que integra numa única medida os efeitos da estrutura do solo nos fatores físicos que diretamente influenciam o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (Bengough et al., 2006).

O IHO foi proposto como um índice da qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas (Silva et al., 1994). A degradação da estrutura do solo resulta numa redução do IHO (Letey, 1985), de tal maneira que aumenta a probabilidade das raízes das culturas serem expostas à ocorrência de limitações físicas no solo (Silva & Kay, 1997). Diversos trabalhos demonstram que o IHO é positivamente correlacionado com o teor de matéria orgânica e negativamente com a densidade do solo (Ds) (Kay et al., 1997; Lapen et al., 2004).

Cavaliere et al. (2006) utilizaram o IHO para avaliar os efeitos de diferentes sistemas de preparo utilizados para o plantio da cultura da mandioca em um Latossolo Vermelho distrófico, demonstrando que os sistemas de preparo mínimo com escarificação e preparo convencional com aração e gradagem não diferiram entre si, porém foram mais eficientes em proporcionar boas condições físicas ao solo do que o sistema de plantio sem revolvimento. Resultados semelhantes foram encontrados por Tormena et al. (2003), que adicionalmente obtiveram relação positiva entre os valores do IHO e a produtividade da cultura da mandioca.

Kadziene et al. (2011) utilizaram o IHO para quantificar o impacto de diferentes sistemas de manejo do solo, cultivado com cevada, sobre as condições físicas críticas ao crescimento das raízes, e concluíram que os valores da capacidade de campo e da resistência do solo à penetração das

raízes foram os que mais influenciaram o IHO, em todos os tratamentos. Calonego & Rosolem (2011) demonstraram através do IHO que os efeitos positivos da escarificação e da rotação de culturas em SPD puderam ser observados até três anos após sua realização. Estes autores destacam o efeito positivo da redução da Ds sobre o IHO, devido à redução do teor de água em que a RP atinge o valor crítico de 2,0 MPa.

Roque et al. (2011) aplicaram o IHO em um estudo sobre compactação do solo em área de cana de açúcar. Os autores encontraram menor amplitude do IHO para o tratamento de colheita tradicional, enquanto que os maiores valores foram encontrados nos tratamentos com controle de tráfego. Tais resultados foram associados ao aumento da Ds e da RP e da redução da macroporosidade na região das linhas da cultura por ocasião do tráfego, o que não ocorreu no tratamento com controle de tráfego.

Lapen et al. (2004) obtiveram que o crescimento de plantas de milho foi negativamente correlacionado com a magnitude do IHO e com a frequência de ocorrência do teor de água do solo fora dos seus limites.

A redução do IHO aumenta a dificuldade em manter o teor de água do solo dentro dos limites da faixa de umidade ótima para o crescimento das plantas. Stirzaker (1997) demonstrou que o aumento da compactação do solo reduziu o IHO e o crescimento vegetativo de plantas de tomate. Em adição aos resultados obtidos por Silva & Kay (1996), estes estudos confirmam a hipótese de que a magnitude do IHO é um indicador da frequência com que a estrutura do solo determina condições físicas adequadas ou não para o crescimento das plantas. Assim, quanto maior a amplitude do IHO, menor a probabilidade e frequência de ocorrência de situações críticas às culturas (Kay, 1990).

A Ds em que o $IHO=0$ foi considerada por Silva et al. (1994) como a densidade do solo crítica (Dsc), a partir da qual as condições físicas do solo são severamente limitantes ao desenvolvimento das plantas. Neste contexto, o conhecimento da Dsc permite que a avaliação temporal da Ds possa ser utilizada para estabelecer a evolução da qualidade física do solo com base no IHO.

As práticas de manejo do solo que propiciam maiores valores do IHO podem ser consideradas como adequadas para a condução do sistema com o mínimo de restrições físicas às culturas. Isto se justifica pelo fato de que, nesta

condição, as plantas são mais frequentemente expostas às condições físicas adequadas, uma vez que a redução da D_s e/ou a conservação da água no solo favorece uma maior frequência de ocorrência de umidade dentro dos limites do IHO.

2.4 PERMEABILIDADE DO SOLO AO AR

A Permeabilidade do Solo ao Ar (K_a) é definida como a habilidade do solo em conduzir ar em resposta a um gradiente de pressão (Ball & Schjonning, 2002). Sua importância em estudos agronômicos é grande por tratar-se de um dos atributos físicos que governa o processo da aeração do solo, que por sua vez consiste na troca de ar (O_2 e CO_2) entre o solo e a atmosfera.

A aeração do solo é importante para o crescimento das plantas por manter a concentração de O_2 no ambiente radicular em nível adequado para a respiração das raízes e dos microorganismos, além de ser vital na manutenção da fotossíntese. O O_2 no ar do solo governa reações químicas que fornecem as condições necessárias para a oxidação e a redução de elementos que podem ser tóxicos às plantas. A deficiência de O_2 pode causar fechamento estomático (Sojka & Stolzy, 1980), restringir a emergência de plântulas (Lal & Shukla, 2004) e a absorção de água e nutrientes além de modificar o metabolismo das raízes em função da fermentação. A quantificação de parâmetros relacionados com a capacidade do solo em suprir oxigênio às raízes é fundamental para a avaliação da qualidade física do solo.

Em termos agronômicos, o valor de porosidade de aeração (ϵ_a) de $\leq 10\%$ foi estabelecido como restritivo à adequada difusão de oxigênio no solo para o pleno desenvolvimento das raízes (Grable & Siemer, 1968). No entanto, este índice é estático e a aeração deve ser considerada e avaliada como resultado de um processo dinâmico do solo. De acordo com Lal & Shukla (2004), a caracterização da aeração do solo a partir da medida do seu volume não é adequada por não levar em consideração processos dinâmicos envolvidos, a direção e a taxa da troca de ar.

A K_a exibe uma relação não-linear com a ϵ_a (Resurreccion et al., 2007), de modo que o conhecimento da K_a implica em respostas mais exatas e confiáveis do comportamento dos gases no solo, em especial do oxigênio,

quando comparada com a utilização de um valor constante de ϵ_a de 10% (Silva et al., 2009a). Kirkham et al. (1958) afirmam que as medidas de K_a obtidas em potencial de -10 kPa têm grande potencial em fornecer informações sobre mudanças e diferenças na estrutura do solo. Um valor de $K_a=10^{-12} \text{ m}^2$ ($1\mu\text{m}^2$) foi sugerido como limite crítico por McQueen & Shepherd (2002), abaixo do qual o crescimento das plantas pode ser limitado pela insuficiente aeração do solo.

Ar e água competem pelo mesmo espaço nos poros do solo, de modo que a presença de um implica obrigatoriamente na ausência do outro. Logo, o conteúdo de água no solo tem grande influência sobre a K_a que atinge seu valor máximo quando o solo está seco e diminui progressivamente conforme o solo umedece até atingir o valor zero próximo à condição de saturação. A principal redução na K_a decorre da obstrução dos macroporos, que são os principais condutores de ar. Segundo Ball & Schjonning (2002), conforme aumenta o teor de argila do solo, a K_a decresce mais rapidamente com o aumento do conteúdo de água. Tal afirmação deve-se ao fato de a estrutura desenvolvida nos solos argilosos possuir macroporos mais contínuos do que nos solos arenosos. Portanto, é fundamental que se determine o teor de água no momento da medição da K_a . Ball (1991) utilizou a K_a e outros parâmetros relacionados ao fluxo de gases no solo para descrever aspectos funcionais da macroporosidade, como a continuidade e a tortuosidade dos poros. Neste estudo, para solos com a mesma ϵ_a , o maior volume de macroporos foi determinante para a obtenção dos maiores valores de K_a .

As medidas de K_a são fortemente dependentes da estrutura do solo, particularmente em relação ao tamanho e continuidade dos macroporos, justificando sua utilização na estimativa do espaço poroso que contribui para a transmissão de ar e água no solo (Fish & Koppi, 1994). Corey (1986) afirma que a K_a apresenta elevada sensibilidade para descrever os fatores geométricos do sistema poroso, que envolvem a porosidade total, a distribuição do tamanho de poros, o formato do sistema poroso, a continuidade e a tortuosidade dos poros. Silva et al. (2009a) utilizaram a K_a para avaliar os efeitos da compactação pelo pisoteio animal e concluíram que esta propriedade física mostrou-se sensível às alterações de densidade e teor de água dos solos estudados.

Em experimento sobre a compactação imposta pelo tráfego de máquinas, Sweeney et al. (2006) encontraram os menores valores de K_a na posição dos rodados. Outros estudos têm utilizado a K_a para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) e a difusividade de ar no solo (D), considerando que as medidas de K_a são mais fáceis, mais rápidas e menos sujeitas aos erros experimentais do que as de K_s e D (Wells et al., 2006).

Os equipamentos que determinam a K_a são denominados permeômetros e diferentes modelos, com distintos métodos de determinação, têm sido propostos para medir a K_a no campo ou em laboratório, no último caso utilizando-se de amostras indeformadas de solo. Entretanto, a maioria desses equipamentos requer o uso de componentes caros, metodologias complexas e em geral muito trabalhosas. Este não é o caso do método proposto por Kirkham (1946), considerado simples e baseado no decréscimo da pressão de ar num reservatório em função do tempo. Essa metodologia foi utilizada por Whelan et al. (1995) para amostras de solo e por McKenzie & Dexter (1996) para a determinação da K_a ar em agregados. McKenzie & Dexter (1996) efetuaram a medida em amostras indeformadas e verificaram que a K_a nestas amostras era maior do que aquela obtida em agregados individuais, aparentemente devido à existência de caminhos preferenciais para o fluxo de gases entre os agregados que compõem a estrutura do solo na amostra. Ball & Schjonning (2002) descrevem uma metodologia na qual a K_a é medida pela aplicação de uma carga constante de ar em amostras de solo equilibradas num determinado potencial mátrico. Recentemente, Figueiredo (2011) utilizou este mesmo princípio no desenvolvimento de um permeômetro de alta portabilidade, com aprimoramentos instrumentais destinados à eliminação de oscilações durante as medições do gradiente de pressão bem como à otimização da seleção de diferentes níveis de vazão mássica de ar, no intuito de facilitar sua operação.

A K_a é relacionada com a ε_a para identificação de mudanças na estrutura do solo bem como na geometria dos poros por decorrência das práticas de manejo (Blackwell et al., 1990). Os parâmetros resultantes dessas relações são designados índices de continuidade de poros (ICP) (Ball et al. 1988). Groenevelt et al. (1984) propuseram os índices K_1 e K_2 , resultantes da

relação entre K_a / ε_a e K_a / ε_a^2 , respectivamente. De acordo com estes autores, solos com diferentes K_a mas que exibem K1 similares apresentam semelhante distribuição do tamanho e continuidade de poros, enquanto que solos com K2 similares apresentam apenas distribuição do tamanho de poros semelhantes, ou seja, diferenças entre K1 e K2 devem estar relacionadas às diferenças na continuidade de poros, independentemente da distribuição do tamanho de poros.

K_a e ε_a são também relacionadas utilizado-se a equação de Kozeny-Carman: $K_a = M \varepsilon_a^N$, onde M e N são constantes empíricas. Ahuja et al. (1984) e Ball et al. (1988) utilizaram esta relação e consideraram o expoente N (slope de equação) como um índice empírico da continuidade de poros que reflete o aumento da K_a com o aumento da ε_a ou a redução da tortuosidade dos poros e da área superficial com o incremento da fração de poros disponíveis para o fluxo.

Dorner & Horn (2006) utilizaram os ICP para determinar se K_a e a condutividade hidráulica apresentavam comportamento dependente da direção (horizontal ou vertical), concluindo que estas são propriedades anisotrópicas, ou seja, apresentam valores diferentes para distintas direções. No estudo de Rodrigues et al. (2011), os ICP revelaram que o plantio convencional apresentou poros mais contínuos do que o plantio direto, na profundidade de 0-0,20 m. Cavalieri et al. (2009) utilizaram a K_a na avaliação da funcionalidade física de um Latossolo Vermelho conduzido em SPD por 14 anos, encontrando as melhores condições relacionadas a troca de gases até a profundidade de 0,30 m e concluindo que o SPD foi eficiente em proporcionar boa funcionalidade física ao desenvolvimento das culturas. Nesta mesma área experimental, Figueiredo (2011) obteve que os menores valores de K_a foram encontrados na posição de amostragem relativa à entrelinha da cultura da aveia-preta, devido ao efeito do tráfego de máquinas na área, enquanto que os maiores valores de K_a obtidos na linha da cultura foram relacionados à ação do mecanismo da abertura de sulcos para a semeadura.

Considerando a relevância do SPD para a agricultura de um modo geral, ressalta-se a importância de estudos com permeabilidade do solo ao ar neste sistema de manejo, para que novas informações sejam geradas e

disponibilizadas tendo em vista o seu aprimoramento e a garantia da condução de um SPD de qualidade.

3 CAPÍTULO 1:

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E GRAU DE COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO APÓS 30 ANOS SOB PLANTIO DIRETO

RESUMO. A compactação do solo tem sido apontada como um dos fatores de redução da qualidade física em solos sob sistema plantio direto (SPD). Contudo, com a utilização do SPD pode haver o incremento de matéria orgânica do solo e o desenvolvimento de um sistema poroso contínuo e estável que atenuam os impactos negativos da compactação. O objetivo desse trabalho foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico sob SPD durante 30 anos, utilizando o intervalo hídrico ótimo (IHO) e o grau de compactação do solo (GC). Em uma área comercial conduzida sob SPD desde 1980, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e deformada para determinação da densidade do solo (D_s), do IHO e do GC. As amostras com estrutura preservada foram obtidas em três posições relativas às linhas (L), entrelinhas (E) e posição intermediária entre as linhas e entrelinhas (PI) da cultura do milho. Foram determinadas as curvas de retenção de água e resistência do solo à penetração bem como a D_s . A amostra de solo com estrutura deformada foi utilizada para obter a curva de compactação utilizando o teste de Proctor. A D_{max} foi obtida a partir da curva de compactação e o GC foi determinado pela razão entre a D_s e a D_{max} . Independentemente dos limites críticos de resistência à penetração (RP) adotados, verifica-se uma redução do IHO com o aumento da D_s . Os maiores valores do IHO foram verificados na posição de amostragem L e a utilização de RP crítica maior que 2,0 MPa resultou em IHO condizente com a qualidade física deste solo sob SPD de longo tempo. A D_{max} foi de 1,52 kg dm⁻³ e o GC variou de 64 a 87%, sendo os maiores valores obtidos nas posições E e PI. Os valores de IHO e GC obtidos neste estudo indicam que a qualidade física deste solo não é limitante à produção das culturas após 30 anos de utilização do SPD.

Palavras-chave: qualidade física do solo, densidade do solo, estrutura do solo, resistência do solo à penetração, IHO.

**LEAST LIMITING WATER RANGE AND DEGREE OF SOIL COMPACTION
OF AN OXISOL AFTER 30 YEARS UNDER NO-TILLAGE SYSTEM**

ABSTRACT. Soil compaction has been questioned as a factor that contributes to the reduction of physical quality under no-tillage system (NT). However, the use of the NT might increase the soil organic matter and develop a continuous and stable porous system that mitigates the negative impacts of compaction. The aim of this study was to evaluate the physical quality of an Oxisol under NT after 30 years of its implementation, using the least limiting water range (LLWR) and the degree of soil compaction (DC). The sampling was done in a commercial area under NT since 1980. Soil samples with preserved and deformed structure were collected to determine bulk density (BD), the LLWR and the DC. The samples with preserved structure were obtained at three sampling positions: on the lines (L); at the midpoint between two lines (E) and at an intermediate position (IP) between the L and E of corn plants. The water retention curve, the soil resistance curve and the BD were determined. The deformed structure soil sample was used to obtain the compaction curve using the Proctor test. The D_{max} was obtained from the compaction curve and DC was determined by the ratio between the BD and D_{max} . Regardless of the critical limits of resistance to penetration (RP) adopted, there is a reduction of the LLWR with increasing BD. The highest values of LLWR were observed in the L sampling position and the use of critical RP greater than 2.0 MPa resulted in LLWR consistent with the physical quality of soil under NT long term. The D_{max} was 1,52 kg dm⁻³ and the DC ranged from 64 to 87%, with the highest values obtained from the E and IP positions. The values of LLWR and DC obtained from this study suggest that the soil physical quality is not limiting to crop production after 30 years of NT.

Key words: soil physical quality, soil bulk density, soil structure, soil resistance to penetration, LLWR

3.1 INTRODUÇÃO

O Sistema Plantio Direto (SPD) é um sistema de produção agrícola no qual se utiliza um conjunto de tecnologias caracterizadas pela ausência de revolvimento mecânico do solo, pela cobertura permanente do solo por resíduos culturais e pela utilização de rotação de culturas. Tais fundamentos são eficientes em promover o aumento do conteúdo de carbono orgânico e melhoria da qualidade estrutural do solo. Em conjunto com as vantagens econômicas de redução do uso de maquinários, combustível e trabalho, os benefícios do SPD têm levado este sistema de manejo a uma grande expansão, sendo atualmente praticado em aproximadamente 100 milhões de hectares por todo o mundo (Hobbs, 2007) e em cerca de 26 milhões de hectares no Brasil em 2006 (FEBRAPDP, 2011).

A utilização do SPD por longo prazo tem levantado questionamentos sobre os possíveis impactos negativos da compactação causada pelo tráfego de máquinas e ação de implementos, apesar de que o aumento de matéria orgânica pode contribuir para a atenuação da compactação do solo (Blanco-Canqui et al., 2009). Existem grandes divergências quanto aos efeitos da compactação do solo sobre a produtividade das culturas sob SPD, principalmente se consideradas as variáveis tempo de adoção do SPD, tipo de solo, clima, manejo das culturas e, em particular, a condição estrutural do solo no momento da adoção do SPD (Ferrerias et al., 2000). Em geral, solos sob SPD têm apresentado maior compactação nas camadas próximas à superfície em relação aos solos sob manejo convencional (Alvarez & Steinbach, 2009; Veiga et al., 2007). Contudo, as produtividades das culturas sob SPD são geralmente maiores ou equivalente às aquelas sob manejo convencional (Fabrizzi et al., 2005; Cardoso et al., 2007), principalmente em regiões tropicais e subtropicais.

A melhoria da qualidade física do solo observada em áreas sob SPD de longo prazo tem sido atribuída à presença de agregados maiores e mais estáveis, face ao incremento de matéria orgânica comparado com sistemas de preparo convencional (So et al., 2009; Jin et al., 2011). Outro fator positivo para a melhoria do ambiente físico do solo é a atividade da mesofauna e raízes de

culturas que promovem uma rede de bioporos com melhor continuidade e conectividade ao longo da matriz do solo, com reflexos no movimento de água (Strudley et al., 2008) e ar (Carter, 1992) no solo. Esses bioporos podem atuar como rotas alternativas para o crescimento das raízes (Ehlers et al., 1983; Bengough et al., 2011), apesar de uma matriz mais densa e com maior resistência mecânica.

Ao contrário do preparo convencional, a mobilização do solo no SPD se restringe às linhas de semeadura, cuja intensidade depende do mecanismo utilizado para abertura do sulco. O uso de sulcadores pode reduzir a compactação superficial em SPD devido à mobilização causada pelos mecanismos de corte do solo para abertura de sulcos pelas semeadoras (Veiga et al., 2007). Os efeitos combinados da abertura do sulco e do crescimento preferencial das raízes das plantas próximo às linhas resultam em um ambiente físico mais favorável nas linhas de plantio do que nas entrelinhas da cultura. Por outro lado, condições físicas mais favoráveis na linha podem induzir a formação de manchas de qualidade física, variáveis no espaço e tempo, em solos sob SPD.

Um indicador que tem sido utilizado para quantificar os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo é o grau de compactação (GC) (Lipiec et al., 1991; Suzuki et al., 2007). O GC é resultado da razão entre a densidade do solo (D_s) obtida no campo e a densidade máxima do solo (D_{max}) resultante de um teste de compactação, como o ensaio normal de Proctor, utilizada como referência (Dias Junior & Miranda, 2000; Oliveira et al., 2010). Segundo Hakansson (1990) e Klein (2006), o GC elimina as influências da composição granulométrica, da mineralogia e da matéria orgânica do solo, facilitando a sua utilização no estudo e comparação de sistemas de uso e manejo dos solos.

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é um moderno indicador da qualidade física dos solos por integrar numa só medida, os efeitos do potencial da água no solo, da resistência mecânica à penetração das raízes e da porosidade do solo com ar não impeditiva à difusão de oxigênio às raízes (Letey, 1985; Silva et al., 1994; Tormena et al., 2007). Contudo, a definição dos níveis críticos de RP a serem utilizados nessa metodologia depende de atributos como a condição estrutural do solo e o comportamento do sistema radicular das culturas. Taylor et al. (1966), Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998b)

utilizaram o valor crítico de $RP = 2,0$ MPa, enquanto que Ehlers et al. (1983) e Torres & Saraiva (1999) sugerem valores maiores de RP em solos sob SPD, argumentando que as condições estruturais são menos restritivas ao crescimento radicular, provavelmente devido a um sistema poroso mais estável e com maior continuidade de poros.

No Brasil, poucos são os estudos que avaliam a qualidade física dos solos sob SPD após longo tempo de implantação (mais de 20 anos). Além disso, em SPD, os parâmetros físicos utilizados para avaliar a qualidade estrutural e física dos solos têm sido expressos pelo valor médio da área, sem levar em conta as mudanças físicas proporcionadas pelo posicionamento das linhas e entrelinhas das culturas. A hipótese deste estudo é que, após longo tempo sob Sistema Plantio Direto, as condições físicas do solo avaliadas pelo Grau de Compactação e pelo Intervalo Hídrico Ótimo não são favoráveis para o crescimento das plantas. O objetivo desse trabalho foi avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico sob Sistema Plantio Direto após 30 anos de sua implantação, utilizando o Grau de Compactação e o Intervalo Hídrico Ótimo.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

A amostragem foi realizada numa área de lavouras comerciais localizada no município de Maringá - PR, situada a 23° 30' S, 51° 59' W, altitude de 454 m, apresentando relevo plano a suave ondulado, declividade média de 3%, com médias anuais de temperatura e precipitação de 22 °C e 1.450 mm, respectivamente. Nesta região, o tipo climático dominante segundo a classificação de Köppen, é o Cfa (subtropical úmido mesotérmico). O solo utilizado neste estudo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico, classe textural muito argiloso. O resultado da análise granulométrica na camada de 0-0,20 m indicou conteúdos de 750 g kg⁻¹ de argila, 50 g kg⁻¹ de silte e 200 g kg⁻¹ de areia.

A área, de 50 ha, é conduzida em sistema plantio direto (SPD) desde 1980 com rotação de culturas envolvendo milho, aveia, soja, trigo e milho de segunda safra. Durante os 30 anos de cultivo sob SPD foram feitas aplicações de calcário dolomítico, em superfície, com base nos resultados das análises de solo. Os fertilizantes foram aplicados por ocasião da semeadura com semeadora-adubadora equipada de discos de corte frontal e hastes com formato parabólico, ângulo de ataque de 20°, espessura da ponteira de 20 mm e profundidade de penetração entre 10 e 12 cm. A cobertura com fertilizantes nitrogenados na cultura do milho e trigo foi feita com base nas recomendações para o material genético utilizado e produtividade esperada. O controle de pragas, doenças e plantas daninhas foi feito de acordo com as recomendações específicas para cada cultura. Na área amostrada, o tráfego de tratores, colhedoras e pulverizadores foi feito totalmente ao acaso para evitar zonas excessivamente compactadas.

A amostragem foi realizada em agosto de 2010, após a colheita do milho de segunda safra, cultivado com espaçamento de 0,90 m. Foram coletadas, aleatoriamente, 12 amostras com estrutura preservada em cada uma das três posições de amostragem relativas às linhas (L), entrelinhas (E) e posição intermediária entre as linhas e entrelinhas (PI) da cultura do milho, totalizando 36 amostras, utilizadas para a obtenção das curvas de retenção de água (CRA) e resistência do solo à penetração (CRS), da densidade do solo (Ds) e do

intervalo hídrico ótimo (IHO). As amostras com estrutura preservada foram coletadas na camada de 0-0,10 m, em cilindros metálicos com dimensões aproximadas de 7,5 cm de diâmetro por 5,0 cm de altura, introduzidos lenta e continuamente por um amostrador elétrico automatizado (Figueiredo et al., 2010) para garantir a integridade estrutural do solo na amostra. Após a coleta, os cilindros com solo foram envolvidos com papel alumínio e levados para o preparo no laboratório. O preparo das amostras consistiu na retirada do excesso de solo das extremidades de cada cilindro, de modo que o volume do solo fosse equivalente exatamente ao volume do cilindro. Em seguida, estas amostras foram saturadas durante 48 horas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura das amostras. Selecionaram-se ainda, aleatoriamente, 20 pontos, nos quais foram coletados aproximadamente 3,5 kg de solo com estrutura deformada, na camada de 0-0,10 m, totalizando 70 kg de solo que foram utilizados para a obtenção da curva de compactação e obtenção da densidade máxima do solo (D_{max}) ou de referência.

Para a determinação da D_{max} , foi utilizado o ensaio de Proctor normal em três repetições. As amostras deformadas de solo coletadas na camada de 0 - 0,10 m foram secas ao ar e, posteriormente, passadas em peneira com abertura de malha de 4 mm. O solo seco ao ar apresentava teor residual de água de aproximadamente $0,06 \text{ kg kg}^{-1}$. As amostras foram compactadas em seis teores crescentes de água, permitindo a obtenção de diferentes densidades e caracterizando a curva de compactação do solo. A compactação do solo foi feita num cilindro metálico de 1.000 cm^3 , em três camadas consecutivas, cada uma recebendo 25 golpes de um soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 0,3 m, correspondendo a uma energia de 560 kPa, conforme Nogueira (1998). Após a compactação, foi retirada uma alíquota de solo do corpo de prova para determinação do teor de água.

A determinação da CRA nas amostras indeformadas foi feita conforme o procedimento descrito por Tormena et al. (1998b). As amostras foram divididas em nove grupos de quatro amostras que foram submetidos aos potenciais de -2, -4, -6, -8, -10 kPa numa mesa de tensão conforme Ball & Hunter (1988) e -30, -100, -400 e -1500 kPa utilizando pressões aplicadas em câmaras com placas porosas, conforme Klute (1986). O teor de água no

potencial de -1,5 MPa, equivalente ao ponto de murcha permanente, foi posteriormente estimado com uso do equipamento Dewpoint potentiometer (WP4-T), conforme Decagon Devices (2011), utilizando as quatro amostras anteriormente submetidas ao potencial de -1,5 MPa nas placas porosas. Esse procedimento foi necessário para melhorar a estimativa do teor de água no potencial de -1,5 MPa, face aos erros experimentais associados com o uso de placas, conforme Bittelli & Flury (2009).

Após atingir o equilíbrio hidráulico em cada potencial aplicado nas placas porosas, as amostras foram pesadas e, em seguida, foi determinada a resistência do solo à penetração (RP) utilizando o equipamento e os procedimentos descritos em Tormena et al. (1999). Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$, por 24 h, para determinação da massa de sólidos e da massa de água no solo. A D_s foi determinada pela razão entre a massa de sólidos e o volume do cilindro. O teor de água em base de volume (Θ) foi obtido pelo produto do teor de água em base de massa e a D_s .

A descrição matemática da CRS e da CRA faz-se necessária para a determinação do IHO. A CRA, expressa pela relação entre o Θ e o potencial da água no solo (Ψ), foi descrita matematicamente por meio de uma função não linear, incorporando a variação da D_s entre as amostras, segundo Leão et al. (2005), conforme a equação 1:

$$\Theta = (a + b D_s) \Psi^c \quad (1)$$

em que Θ : teor de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s : densidade do solo (kg dm^{-3}); Ψ : potencial da água no solo (hPa); a , b e c são os parâmetros obtidos no ajuste do modelo aos dados de Θ (Ψ).

A relação funcional entre a RP, Θ e D_s estabelece a CRS, a qual tem sido adequadamente modelada utilizando uma função não linear proposta por Busscher & Sojka (1987) e Busscher (1990), descrita na equação 2:

$$RP = d \Theta^e D_s^f \quad (2)$$

em que a RP: resistência do solo à penetração (MPa); Θ : teor de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s : densidade do solo (kg dm^{-3}); d , e e f são os parâmetros obtidos no ajuste do modelo aos dados.

O IHO foi determinado adotando os procedimentos descritos em Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1999). Os valores de Θ associados com o potencial mátrico, RP e porosidade de aeração foram, respectivamente: a umidade à

capacidade de campo (Θ_{cc}) ou teor de água estimado no potencial de -10 kPa (Reichardt, 1988); a umidade ao ponto de murchamento permanente (Θ_{pmp}) ou teor de água no potencial de -1500 kPa (Savage et al., 1996) e o teor de água do solo em que a porosidade de aeração (Θ_{par}) é $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Grable & Siemer, 1968). Para a RP, foram adotados os valores críticos de 2,0 MPa. Adicionalmente, foram utilizados os valores críticos de RP = 3,5 MPa, conforme Torres & Saraiva (1999), e RP = 4,6 MPa com base nos resultados de Ehlers et al. (1983). Os valores de Θ_{cc} e Θ_{pmp} foram obtidos nos potenciais de -10 e -1500 kPa, utilizando a CRA, e os valores do Θ em que a RP atinge os valores críticos (Θ_{rp}) foram obtidos por meio da CRS. O valor de Θ_{par} , teor de água no solo em que a porosidade de aeração é $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, foi obtido por $[(1-D_s/D_p)-0,1]$. Considerou-se o valor médio de densidade de partículas do solo (D_p) de $2,85 \text{ kg dm}^{-3}$, obtido conforme Embrapa (1997).

Os resultados da curva de compactação, ou seja, D_s em função do Θ , foram ajustados a uma equação polinomial de segundo grau minimizando a soma dos quadrados dos desvios. O teor de água ou umidade crítica para compactação (U_c) foi obtido por meio da primeira derivada da equação polinomial de segundo grau ajustada aos dados. A D_{max} foi obtida pela utilização do valor de U_c na equação originalmente obtida. O grau de compactação do solo (GC) foi estimado pela razão entre a D_s e a D_{max} ou de referência, conforme Hakansson (1990).

Os ajustes dos dados à CRA e CRS foram feitos utilizando o software SAS Institute (1999). As comparações dos atributos físicos entre as posições de amostragem foram feitas utilizando o intervalo de confiança da média ($P < 0,05$), conforme Payton et al. (2000). Quando não há sobreposição dos limites superior e inferior do intervalo de confiança, considera-se que há diferença significativa.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios dos parâmetros físicos, determinados nas amostras com estrutura preservada obtidas nas diferentes posições de amostragem, são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores médios dos atributos físicos das amostras com estrutura preservada obtidas nas diferentes posições de amostragem.

| | Média | CV % | Máximo | Mínimo |
|-----------------------|-----------|-------|--------|--------|
| Linha | | | | |
| RP | 0,58±0,36 | 62,07 | 1,45 | 0,19 |
| Θ | 0,35±0,06 | 17,14 | 0,50 | 0,27 |
| Ds | 1,05±0,07 | 6,67 | 1,18 | 0,97 |
| Entrelinha | | | | |
| RP | 1,35±0,80 | 59,26 | 2,71 | 0,35 |
| Θ | 0,42±0,07 | 16,67 | 0,52 | 0,31 |
| Ds | 1,17±0,07 | 5,98 | 1,33 | 1,07 |
| Posição Intermediária | | | | |
| RP | 1,80±1,49 | 82,78 | 4,43 | 0,25 |
| Θ | 0,41±0,06 | 14,63 | 0,52 | 0,33 |
| Ds | 1,19±0,08 | 6,72 | 1,31 | 1,04 |
| Média Geral da Área | | | | |
| RP | 1,24±1,10 | 88,71 | 4,43 | 0,19 |
| Θ | 0,39±0,04 | 17,95 | 0,52 | 0,27 |
| Ds | 1,14±0,10 | 8,77 | 1,33 | 0,97 |

CV: coeficiente de variação (%); RP: resistência do solo à penetração (MPa); Θ: umidade do solo ($m^3 m^{-3}$); Ds: densidade do solo ($kg dm^{-3}$).

A resistência do solo à penetração (RP) é caracterizada pela elevada variabilidade dos dados ($CV > 59\%$), já verificada em outros trabalhos (Imhoff et al., 2000 e Blainiski et al., 2009). O máximo valor de RP foi 4,43 MPa, bem abaixo dos valores obtidos por Tormena et al. (1999) e Tormena et al. (2007) em Latossolos Vermelhos de similar classe textural. Ressalta-se que a área é bastante homogênea em termos de textura e que a amostragem foi realizada utilizando a introdução lenta e contínua do cilindro por meio de um amostrador elétrico automatizado (Figueiredo, 2010), o qual garante a manutenção da integridade estrutural do solo na amostra.

A curva de compactação do solo da área estudada, utilizando a metodologia de Proctor, é apresentada na Figura 1. A curva mostrada na Figura 1 refere-se aos valores de D_s e teor de água (U) das três repetições e, uma vez que as curvas foram similares, o ajuste da função polinomial de segundo grau aos dados foi feito utilizando 18 pontos de D_s e U , para obtenção de uma curva média.

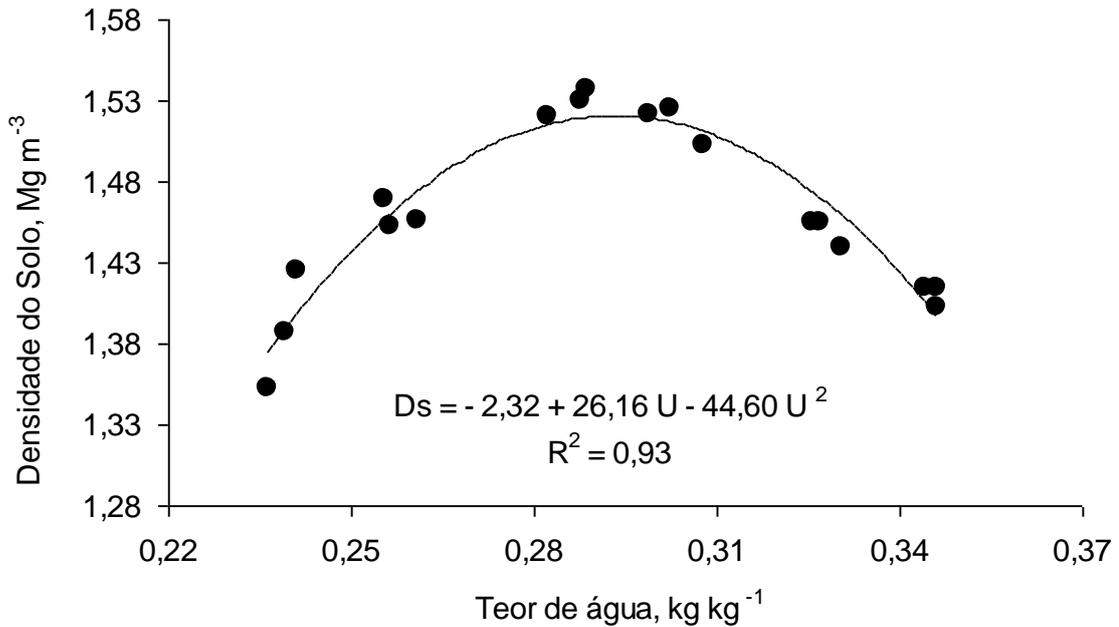


Figura 1 – Densidade do solo (D_s) em função do teor de água (U) determinada por meio do teste de Proctor com três repetições.

O ajuste dos dados ao modelo quadrático apresentou todos os parâmetros significativos ($P < 0,0001$) e resultou num coeficiente de determinação de 0,93, em acordo com Beutler et al., 2005; Vieira & Klein., 2007; Oliveira et al., 2010. A qualidade do ajuste do modelo aos dados pode ser considerada adequada principalmente levando em conta a utilização de 18 pontos de D_s e U . Os valores de U_c e D_{max} foram de $0,29\ kg\ kg^{-1}$ e $1,52\ kg\ dm^{-3}$, respectivamente. Num Latossolo Vermelho com 52% de argila e 3,7% de matéria orgânica, Beutler et al. (2005) obtiveram um valor de $D_{max} = 1,54\ kg\ dm^{-3}$. Figueiredo et al. (2000) verificaram $U_c = 0,27\ kg\ kg^{-1}$ e $D_{max} = 1,51\ kg\ dm^{-3}$, para um Latossolo Vermelho, sob plantio direto, com 65% de argila e 3,0% de matéria orgânica. A similaridade dos valores de D_{max} obtida pelo teste de Proctor nos diferentes estudos com solos semelhantes indica,

conforme Klein (2006), a adequação dessa metodologia com boa repetibilidade para obtenção de valores referenciais de D_{max} para fins de manejo e monitoramento da qualidade física dos solos.

O teor de água no solo ($U_c = 0,29 \text{ kg kg}^{-1}$) que resultou na máxima densidade está ligeiramente abaixo da capacidade de campo para este solo ($0,36 \text{ kg kg}^{-1}$), condição em que o tráfego de máquinas deveria ser evitado. A capacidade de campo foi obtida da Figura 2, através da divisão do teor de água na capacidade de campo pela D_s . De acordo com Koolen (1994), o incremento do teor de água aumenta a suscetibilidade à compactação, uma vez que reduz a resistência interna do solo e facilita o processo de deformação. Por outro lado, a diminuição no teor de água implica numa redução do potencial da água no solo, estabelecendo maior coesão e atrito entre as partículas e, portanto, menor suscetibilidade do solo à compressão (Neto et al., 2002). A manutenção da qualidade física deste solo em sistema plantio direto sob longo prazo exige cuidados em relação à umidade do solo em que ocorre o tráfego de máquinas pesadas, especialmente na colheita. Especificamente nesse solo, conforme pode ser verificado na Figura 1, pequenas variações do teor de água implicam em significativos incrementos da densidade até o teor de água limite para a máxima compactação do solo.

O grau de compactação (GC) tem sido utilizado para contornar a problemática da comparação de resultados de densidade entre solos que apresentam diferentes características mineralógicas, de textura e de matéria orgânica, conforme reportado por Hakansson (1990) e Klein (2006). Os valores médios de GC do solo estudado são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores médios, máximos e mínimos para o grau de compactação do solo (%) (GC) nas diferentes posições de amostragem.

| Posição | Média | Máximo | Mínimo | CV (%) | IC |
|---------------|------------|--------|--------|--------|------|
| Linha | 69,05±4,46 | 77,82 | 63,78 | 6,46 | 2,53 |
| Entrelinha | 77,10±4,52 | 87,43 | 70,35 | 5,86 | 2,56 |
| Intermediário | 78,50±5,25 | 85,92 | 68,73 | 6,69 | 2,97 |
| Média Geral | 74,89±6,26 | 87,43 | 63,78 | 8,36 | - |

CV = coeficiente de variação; IC = intervalo de confiança ($P < 0,05$).

A posição de amostragem Linha apresentou GC estatisticamente inferior às demais posições (não sobreposição dos intervalos de confiança), refletindo

os efeitos do revolvimento superficial causado pelo sulcador durante a operação de semeadura da cultura do milho e, posteriormente, ampliado pelo crescimento do sistema radicular da cultura. Verifica-se que os valores médios e máximos de GC da área estão no intervalo de valores estipulados na literatura como ideais para o máximo rendimento das culturas, estimados entre 77 a 94%.

Diversos autores sugerem valores de GC ótimos para o desenvolvimento das culturas ou ainda críticos às mesmas. Em estudo com solos arenosos, Carter (1990) indica que a faixa de GC de 77 a 84% proporcionou produção de cereais superior a 95% da máxima. O autor também salienta que, na faixa de GC entre 84 a 89%, o volume de macroporos variou de 13,5 a 10,0%, indicando não haver limitações físicas às plantas por aeração. Hakansson (1990) relata o máximo rendimento de cevada para um GC próximo a 87%. Já Lipiec et al. (1991) indicam valores ótimos de GC de 88 e 91% para o crescimento de plantas e rendimento de grãos de cevada, respectivamente. No Brasil, Suzuki et al. (2007) indicam que um GC de 86% (obtido utilizando a densidade máxima de referência em uma pressão de 1600 kPa) pode ser considerado ótimo para a cultura da soja, enquanto que Beutler et al. (2005) verificaram, por meio do teste de Proctor, um GC ótimo de 80%. Com base nos valores de GC obtidos na literatura, os resultados médios de GC da área sugerem que a mesma encontra-se em boa condição física, considerados os resultados de GC associados com condições físicas altamente satisfatórias às plantas.

O GC na posição linha (L) variou de 63 a 77%, sendo 66% dos dados inferiores a ao valor mínimo encontrado nas demais posições (69%). Para a posição intermediária (PI), a variação foi de 69 a 86% e, na posição entrelinha (E), de 70 a 87%. A PI apresentou 50% dos dados com GC acima de 80%, enquanto que em E esse valor foi de 15%. O máximo valor de GC foi obtido nas posições E e PI, resultante da compactação do solo pelas operações com máquinas na área, enquanto que o menor valor em L é derivado do revolvimento do solo por ocasião da semeadura, bem como pela atuação do sistema radicular da cultura do milho. No entanto, os valores mínimos em E e PI estão próximos do valor médio em L, sugerindo que na E e PI ocorrem baixos valores de GC associados à variabilidade espacial e temporal da

densidade do solo em função da provável presença de linhas de culturas anteriores.

As funções descritivas das curvas de retenção de água (CRA) e de resistência do solo à penetração (CRS) são mostradas no Quadro 3. O ajuste das funções aos dados mostrou-se estatisticamente significativo uma vez que os intervalos de confiança dos parâmetros das funções não incluíram o valor zero, conforme Grantz & Slinker (1990). A CRA foi significativa e positivamente influenciada pela D_s , a exemplo dos trabalhos de Petean et al. (2010) e Klein & Camara (2007), em solos de mesma classe e teores similares de argila. A influência positiva da D_s e negativa de Θ na CRS é amplamente reportada na literatura (Imhoff et al., 2001; Leão et al., 2004 e Figueiredo et al., 2011). O efeito positivo da D_s deve-se ao maior atrito entre as partículas e à coesão, enquanto que variações de Θ promovem efeitos associados à coesão entre partículas devido à variação de potencial e ao efeito lubrificante da água (Vepraskas, 1984).

Quadro 3 – Equações da curva de retenção de água no solo e resistência do solo à penetração e respectivas estatísticas.

| Função | Equação | F | P |
|--------|---|---------|---------|
| CRA | $\Theta = (0,1721 + 0,4171 D_s)\Psi^{(-0,098)}$ | 3645,25 | <0,0001 |
| CRS | $RP = 0,00147 \Theta^{-4,9838} D_s^{12,7773}$ | 131,67 | <0,0001 |

RP = resistência à penetração (MPa); D_s = densidade do solo (kg dm^{-3}) e Θ = teor de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

As funções de CRA e CRS descritas no Quadro 3 foram utilizadas para estimar os teores de Θ na capacidade de campo (Θ_{cc}), no ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) e na resistência crítica do solo à penetração (Θ_{rp}), os quais juntamente com Θ em que a porosidade com ar é de 10% (Θ_{par}) são apresentados na Figura 2. Diferentes valores críticos de RP têm sido reportados na literatura, mas o valor de RP = 2,0 MPa é o mais frequentemente utilizado como crítico para o crescimento das plantas (Taylor et al., 1966; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998b; Bengough et al., 2011). Outros pesquisadores têm sugerido que em solos sob SPD o limite crítico de RP deve ser ampliado além de 2,0 MPa devido a diferente organização e funcionalidade

do sistema poroso dos solos intensamente revolvidos (Torres & Saraiva, 1999; Hakansson & Lipiec, 2000).

A Figura 2A mostra o IHO para a área estudada utilizando a $RP = 2,0$ MPa como crítica. Torres & Saraiva (1999) sugerem que, para a cultura da soja em Latossolos Vermelho argilosos, valores de RP na faixa de 3,5 a 6,5 MPa são os mais indicados para considerar que o solo está com possíveis problemas de impedimento mecânico às raízes. Assim, na Figura 2B, o IHO foi estimado utilizando a $RP = 3,5$ MPa introduzido como limite máximo de RP crítico. Nesse contexto, Ehlers et al. (1983), estudando áreas sob plantio direto e preparo convencional num solo de clima temperado, sugerem que para solos sob plantio direto o valor crítico de RP varia de 4,6 a 5,1 MPa, sob o argumento de que o crescimento radicular nesses solos pode ser beneficiado pela presença de macroporos contínuos decorrentes da atividade biológica (mesofauna e raízes). Na Figura 2C, é apresentado o IHO utilizando um valor de RP crítico de 4,6 MPa, conforme indicado por Ehlers et al. (1983).

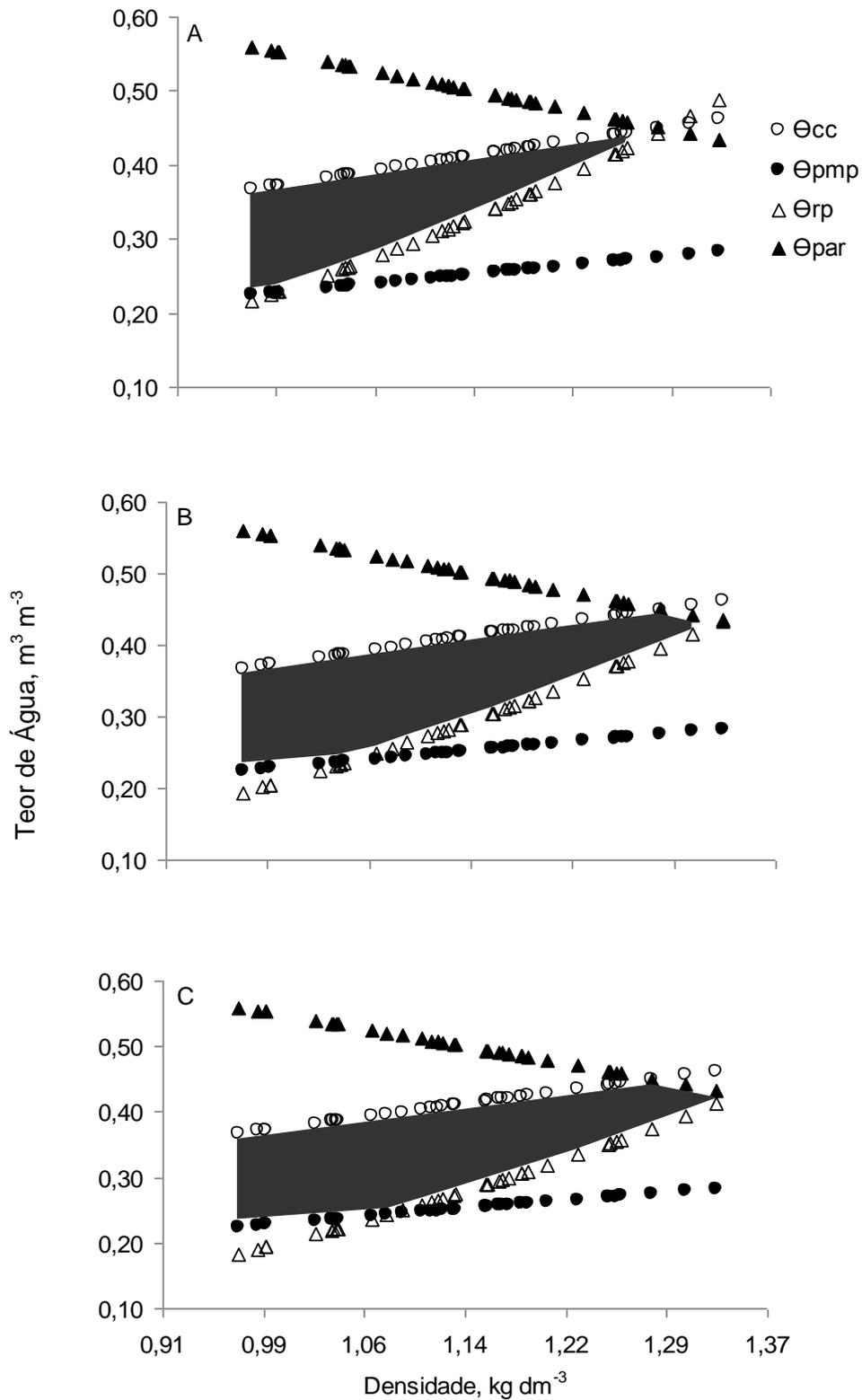


Figura 2 – Variação dos teores de água do solo na capacidade de campo (Θ_{cc}), ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}), porosidade com ar de 10% (Θ_{par}) e resistência do solo à penetração (Θ_{rp}) de 2,0 MPa (A), 3,5 MPa (B) e 4,6 MPa (C) em função da densidade do solo. A área em cor cinza corresponde ao intervalo hídrico ótimo do solo.

Na Figura 2, também verifica-se que a água disponível entre Θ_{cc} e Θ_{pmp} aumenta com a D_s , que é indicado pelo sinal positivo da D_s na função de retenção ajustada aos dados (Quadro 3). Por outro lado, o Θ em que o volume de poros com ar é de 10% reduz com o aumento da D_s . No entanto, constata-se que, apenas em poucos valores de D_s , Θ_{par} assume valores menores do que Θ_{cc} , sugerindo que a aeração não é a condição física limitante para o crescimento das plantas. Resultados similares foram obtidos por Tormena et al. (1999), Tormena et al. (2007) e Blainski et al. (2009). Similarmente à maioria dos trabalhos que medem o IHO em solos brasileiros, verifica-se que a RP é a principal variável associada com a redução da qualidade física, que é constatado na Figura 2, na qual o IHO é reduzido até zero com o aumento da D_s (Figura 2A e 2B). A constatação da RP como principal fator físico limitante às plantas também é respaldada por Bengough et al. (2011), uma vez que a variação de RP é dependente da variação de Θ e influenciada pelo aumento de D_s ou GC.

Independentemente dos limites críticos de RP adotados, verifica-se uma redução do IHO com o aumento da D_s , caracterizando uma perda da qualidade física com o aumento da compactação do solo. Utilizando o valor de RP = 2,0 MPa como crítico, as condições físicas do solo se apresentam mais restritivas as plantas do que com a RP = 3,5 e 4,6 MPa, mas em todos os casos a RP é dominante na redução do IHO. A ampliação do limite de RP aumentou o valor de D_s em que a RP substitui PMP como limite inferior do IHO, bem como ampliou o valor de D_s crítica para valores acima de $1,32 \text{ kg dm}^{-3}$, comparado com a D_s crítica = $1,29 \text{ kg dm}^{-3}$ utilizando RP = 2,0 MPa. A ampliação do IHO utilizando uma RP crítica de 3,5 a 4,6 MPa é compatível com a boa qualidade física desse solo, tendo em vista o histórico de altas produtividades da área ao longo desses últimos anos de SPD. Estes resultados sugerem que o monitoramento da compactação e da qualidade física do solo com uso de penetrômetros exige que o limite crítico de RP seja ampliado, bem como são necessários estudos para definição dos valores críticos de resistência em solos sob SPD de longo prazo. Para RP crítica acima desses valores, a aeração e a retenção de água constituem-se nos fatores mais restritivos para o IHO do que a RP.

A variação do IHO com o GC do solo é mostrada na Figura 3. Verifica-se uma ampla faixa de IHO e GC em todas as posições de amostragem, sendo que os menores valores de GC e os maiores valores de IHO predominam na posição L, associados com o revolvimento superficial do solo ocorrido durante a semeadura e pelo efeito do sistema radicular da cultura do milho. Esses resultados estão em acordo com os de Correchel et al. (1999) que também verificaram menor densidade do solo na linha da cultura, comparado à entrelinha. O aumento do GC implica em redução do IHO com os menores valores em PI e E, resultante da compactação pelo tráfego de máquinas na área. Os resultados sugerem que há variação espacial da qualidade física associada à mudança temporal das linhas das culturas em SPD. As condições físicas mais favoráveis nas linhas das culturas em solos sob SPD devem-se a ação de revolvimento superficial do solo pelos sulcadores utilizados para inserir o fertilizante ao lado e abaixo das sementes.

O IHO para a RP de 2,0 MPa correlaciona-se positivamente até o GC de 65%, enquanto que o IHO para as RPs de 3,5 e 4,6 MPa correlaciona-se positivamente até valores de GC de 69 e 71 %, respectivamente. Nestes valores de GC são verificados os máximos valores do IHO. O GC crítico ou o valor de GC no qual o IHO = 0, foi de 85% para RP = 2,0 MPa e foi superior a 87% para as demais RPs. O GC de 85% tido como limitante para RP = 2,0 MPa não condiz com os valores de GC reportados como ideais para a produtividade ótima das culturas, que variam entre 86 e 91% (Hakansson, 1990; Lipiec et al., 1991; Suzuki et al., 2007). Tal constatação é contraditória, pois neste caso os valores de GC ótimos para a produtividade das culturas correspondem a valores que já superaram o limite no qual o IHO é nulo. Isto sugere que a adoção de RP = 2,0 MPa como valor crítico pode superestimar a condição restritiva ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas em SPD sob longo prazo, desde que o sistema de manejo destas áreas estabeleça um sistema poroso estável e com bioporos abundantes e contínuos, permitindo aumentar os limites críticos de RP. Nesse estudo, a utilização de RP maior que 2,0 MPa é mais compatível com os resultados de GC ótimos para produtividade das culturas, por evidenciar uma condição de menor restrição mecânica para o aproveitamento da água disponível no solo.

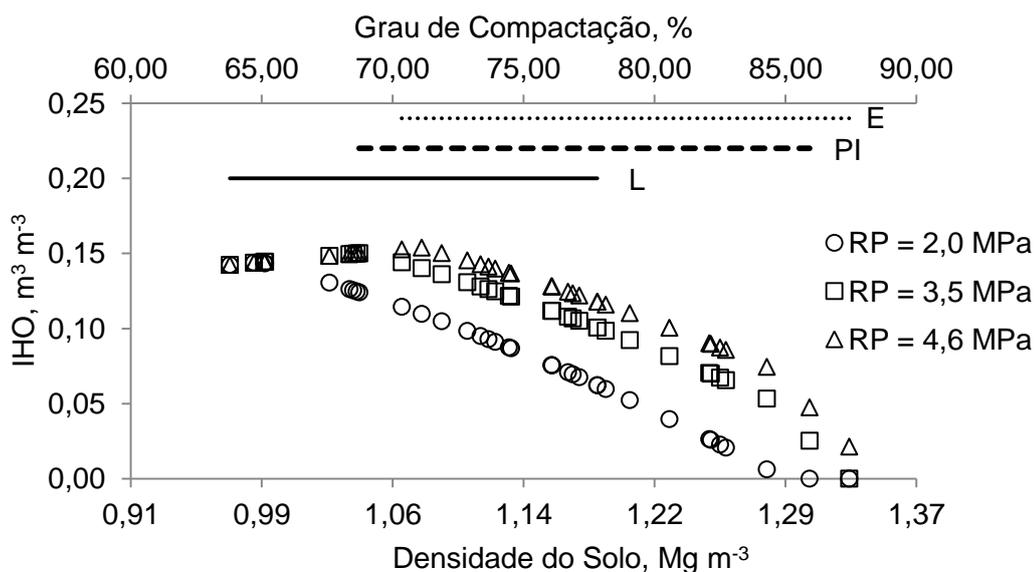


Figura 3 – Variação do intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo e do grau de compactação do solo para os valores de resistência à penetração de 2,0, 3,5 e 4,6 MPa. L, E e PI representam a amplitude dos valores de densidade do solo e/ou GC referentes às posições de amostragem linha, entrelinha e ponto intermediário entre linha e entrelinha, respectivamente.

A relação entre o GC e o rendimento das culturas ocorre de forma indireta, uma vez que o GC afeta propriedades físicas diretamente ligadas ao crescimento das plantas, a exemplo do que foi constatado por Suzuki et al. (2007). Desta forma, valores ótimos de GC para as culturas dependem da composição granulométrica e da estrutura do solo (Lipiec et al., 1991; Suzuki et al., 2007), e a magnitude destes valores de GC podem variar no tempo em função das condições climáticas, especialmente da disponibilidade hídrica e das culturas envolvidas (Carter, 1990; Hakansson, 1990; Lipiec et al., 1991). Por outro lado, o IHO tem a vantagem de ser um parâmetro físico definido pelos teores de água nos limites críticos de potencial, aeração e resistência do solo à penetração, os quais têm relação com processos fisiológicos que definem o crescimento e rendimento das culturas (Dodd et al., 1996; Masle, 1998). Utilizando o valor de GC=80% definido por Beutler et al. (2005) como ótimo para a cultura da soja, os resultados sugerem que o solo estudado apresenta condições físicas altamente favoráveis após longo tempo sob SPD. Os resultados obtidos por Suzuki et al. (2007), num solo similar ao deste estudo, indicam que o GC ótimo para a cultura da soja em SPD é de 86%, que pode estar relacionado com o fato de que a densidade de referência foi obtida utilizando uma energia equivalente a carga de 1600 kPa. Apesar da ampla

faixa de valores de GC obtidos no presente estudo (64 a 87%), não há indicações de limitações físicas às plantas devidas à aeração e à resistência, e que os valores de GC menores que os referenciados na literatura não indicam, a priori, comprometimento da retenção de água no solo.

É necessário ressaltar que a magnitude do IHO é dependente dos níveis críticos das propriedades envolvidas, em especial da resistência do solo à penetração, a qual, para a maioria dos estudos, é considerada a principal propriedade física que limita o crescimento das plantas, e por consequência o IHO (Silva et al., 2009b; Bengough et al., 2011). Considerando os valores de GC obtidos neste estudo e assumindo os valores ótimos de GC às culturas indicados na literatura, os resultados mostrados nas Figuras 2 e 3 sugerem que neste solo sob SPD por longo prazo, valores de IHO obtidos com $RP > 2,0$ MPa são condizentes com uma qualidade física do solo adequada às altas produtividades das culturas de milho, soja e trigo na área estudada. Por exemplo, o maior valor de GC encontrado em L (77%) corresponde ao IHO de $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que é equivalente à metade do IHO máximo, obtido com $RP = 2,0$ MPa, sugerindo que o desenvolvimento das plantas não seria restringido nesta condição e posição de amostragem.

A manutenção do sistema de rotação de culturas, de adequada cobertura e a ausência de revolvimento do solo neste período permitiram o estabelecimento e manutenção de boas condições físicas no solo via sistema poroso estável e contínuo que possibilita ampliar os limites de RP neste solo. Adicionalmente, o controle do teor de água por meio da cobertura do solo possibilita o aproveitamento da boa condição estrutural via manutenção da umidade dentro dos limites do IHO e constitui numa estratégia importante para o manejo físico dos solos sob SPD. Em plantio direto, a bioporosidade resultante da reduzida movimentação mecânica do solo pode oferecer caminhos alternativos para o crescimento das raízes, compensando a maior resistência da matriz do solo. Por isso, o limite de resistência crítica de 2,0 MPa pode ser ampliado no cálculo do IHO, que, em termos práticos, significa ampliar o secamento do solo sem que haja restrições mecânicas às plantas a exemplo de Tormena et al. (2007) que estabeleceu diferentes níveis de RP para distinguir diferentes sistemas de manejo em plantio direto devido a maior incidência de bioporos no solo com o uso de rotação de culturas.

3.4 CONCLUSÕES

Os valores de IHO e GC obtidos neste estudo indicam que a qualidade física deste solo não é limitante à produção das culturas após 30 anos de uso do SPD nas condições de solo e manejo estudados. Isto permite afirmar que a hipótese testada não foi confirmada.

4 CAPÍTULO 2:

PERMEABILIDADE AO AR EM LATOSSOLO VERMELHO APÓS 30 ANOS SOB PLANTIO DIRETO

RESUMO. A permeabilidade do solo ao ar (K_a) é uma ferramenta com grande habilidade em traduzir as mudanças que ocorrem no sistema poroso do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar a aeração de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado por 30 anos sob plantio direto por meio da K_a , da porosidade de aeração (ϵ_a) e dos índices de continuidade de poros (K_1 e N), obtidos da relação entre K_a e ϵ_a . A hipótese deste estudo é que o revolvimento causado na operação de semeadura impõe mudanças físicas ao solo, com melhor qualidade do solo na posição relativa à linha de semeadura e que estes efeitos são restritos à camada de 0-0,10 m. Quarenta amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas num transecto estabelecido perpendicularmente às linhas de cultivo, em cada posição de amostragem relativa às linhas da cultura do milho (L), entrelinhas (E) e posição intermediária à linha e entrelinha (PI), em duas profundidades (0-0,10 e 0,10-0,20 m). A K_a e a ϵ_a foram determinadas nos potenciais mátricos de -2, -4, -6, -10, -30 e -50 kPa. A densidade do solo (D_s) e o teor de água (base volumétrica) também foram determinados. Os resultados confirmaram a hipótese estabelecida. As diferentes posições de amostragem apresentaram diferenças estatísticas na K_a , nos índices de continuidade de poros e na ϵ_a , com destaque para os maiores valores observados na L em 0-0,10 m. Na camada de 0,10-0,20 m, não foram detectadas diferenças entre as posições de amostragem. As diferenças observadas não estiveram necessariamente relacionadas com as diferenças observadas na D_s e na ϵ_a .

Palavras-chave: aeração do solo, posição espacial de amostragem, continuidade de poros.

AIR PERMEABILITY IN AN OXISOL AFTER 30 YEARS UNDER NO-TILLAGE

ABSTRACT. The air permeability (K_a) is a tool with great ability to translate the changes that occur in the soil pore system. The aim of this study was to evaluate the aeration of an Oxisol cultivated for 30 years under no-tillage by K_a , the air-filled porosity (ϵ_a) and indices of continuity of pores (K_1 and N) obtained from the relationship between K_a and ϵ_a . The hypothesis is that the revolving caused on the sowing operation imposes physical changes to the soil, with better soil quality in the position on the sowing line and that these effects are restricted to 0-0.10 m layer. Forty samples with preserved structure were taken on a transect established perpendicular to the sowing lines, in each sampling position related to the corn lines (L), to the midpoint between two lines (E) and to an intermediate position (IP) between the L and E, in two depths (0-0.10 and 0.10-0.20 m). The K_a and the ϵ_a were determined at the matric potentials of -2, -4, -6, -10, -30 e -50 kPa. The BD and the water content were determined too. The results confirmed our hypothesis. The different sampling positions were statistical differences in the K_a and pore continuity indices, with the higher values obtained in the L at the 0-0.10 m layer. The 0.10-0.20 m layer showed no differences between the sampling positions. The observed differences were not necessarily related to the differences showed by the BD and the ϵ_a .

Key words: soil aeration, spatial sampling position, pore continuity.

4.1 INTRODUÇÃO

O plantio direto (PD) é um sistema de manejo no qual as culturas são cultivadas sem qualquer revolvimento prévio do solo, com exceção daquele causado pelos componentes de abertura do solo durante a semeadura, considerado baixo e capaz de manter de 30 a 100% da superfície coberta por resíduos de plantas (Soane et al., 2012). Apesar das vantagens econômicas e agrônômicas como a redução do consumo de combustível (Fernandes et al., 2008) e o controle da erosão (Cogo et al., 2003), respectivamente, o reduzido revolvimento do solo no PD, associado com o aumento da massa dos modernos maquinários agrícolas, tem acarretado a compactação da camada superficial do solo, realidade apontada como obstáculo à sua expansão, principalmente em solos argilosos (Siqueira, 2008).

As principais alterações físicas impostas ao solo em PD ocorrem na posição da linha de semeadura, devido à ação dos discos de corte da palha e, principalmente, das hastes sulcadoras também conhecidas como facas ou facões, cuja função é cortar e penetrar o solo para a deposição do fertilizante. De acordo com Siqueira (2008), o uso de sulcadores do tipo haste nas semeadoras diretas tem se generalizado como alternativa para romper a compactação superficial dos solos em algumas regiões.

A compactação do solo pode reduzir sua aeração em níveis limitantes ao desenvolvimento das culturas (Czyz, 2004). O adequado suprimento de oxigênio ao solo é importante para a manutenção da população de microorganismos aeróbicos, para a atividade enzimática e para as reações de oxidação e redução de elementos como o Fe^{+2} e o Mn^{+2} , que podem ser tóxicos às plantas (Lal & Shulka, 2004). A compactação altera várias características do sistema poroso, como o tamanho, a distribuição, a continuidade, o volume e a geometria dos poros (Lima et al., 2005).

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) é um atributo físico que expressa a habilidade do sistema poroso em conduzir gases no solo (Dorner & Horn, 2006) e tem sido muito utilizada para caracterizar os efeitos dos sistemas de manejo sobre a estrutura do solo (Ball et al., 1988; Roseberg & McCoy, 1992) que

eventualmente não são capturados pela densidade (D_s) e/ou porosidade total do solo.

A K_a é dependente da fração do espaço poroso preenchido com ar (McQueen & Shepherd, 2002; Resurreccion et al., 2007) e, portanto, altamente dependente das modificações na distribuição dos macroporos do solo, responsáveis pelo processo de drenagem e fluxo de gases no solo. Desta forma, alterações na K_a sugerem mudanças na qualidade do ambiente físico para o crescimento de plantas e na taxa de processos dependentes da concentração de gases no solo (Silva et al., 2009a). Solos com valores de $K_a \leq 1 \mu\text{m}^2$ podem ser considerados impermeáveis, como sugerem McQueen & Shepherd (2002).

Ball (1981), Ball et al. (1988) e McCarthy & Brown (1992) descrevem uma relação direta entre a K_a e a porosidade de aeração (ϵ_a). Ball et al. (1988), Groenevelt et al. (1984), Blackwell et al. (1990) e Dorner & Horn (2006) utilizaram as relações entre K_a e ϵ_a para quantificar índices de continuidade de poros que caracterizam modificações funcionais no sistema poroso. No Brasil, Silva et al. (2009a) observaram diminuição da K_a com aumento da D_s , apresentando valores próximos de $1 \mu\text{m}^2$ em D_s próxima a $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ em solo de classe textural muito argilosa. Já Rodrigues et al. (2011) encontraram valores de aproximadamente $5 \mu\text{m}^2$ em solo de classe textural muito argilosa com alto teor de matéria orgânica.

Alguns estudos demonstram que o PD apresenta menores valores de K_a em relação ao plantio convencional (Ball et al., 1994; Rodrigues et al., 2011) embora raramente a posição espacial de obtenção das amostras seja levada em consideração. Existe uma demanda por trabalhos que façam a distinção das determinações da K_a nas posições da linha e da entrelinha em PD, uma vez que a operação de semeadura impõe mudanças físicas ao solo. A hipótese deste estudo é que as condições físicas do solo expressas pela K_a , ϵ_a e pelos índices de continuidade de poros obtidos a partir da relação destas variáveis são mais favoráveis na posição relativa à linha da cultura em comparação com as medidas feitas na entrelinha. O objetivo deste estudo foi determinar a K_a e a ϵ_a , bem como determinar relações entre essas propriedades físicas para o estabelecimento de índices de continuidade de poros para avaliação da

aeração de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado por 30 anos sob plantio direto.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido numa área de lavouras comerciais localizada no município de Maringá - PR, situada a 23° 30' S, 51° 59' W, altitude de 454 m, apresentando relevo plano a suave ondulado, declividade média de 3%, com médias anuais de temperatura e precipitação de 22 °C e 1.450 mm, respectivamente. Nesta região, o tipo climático dominante, segundo a classificação de Köppen, é o Cfa (subtropical úmido mesotérmico). O solo utilizado neste estudo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico, classe textural muito argiloso. O resultado da análise granulométrica na camada de 0-0,20 m indicou conteúdos de 750 g kg⁻¹ de argila, 50 g kg⁻¹ de silte e 200 g kg⁻¹ de areia.

A área, de 50 ha, é conduzida em sistema plantio direto (SPD) desde 1980 com rotação de culturas envolvendo milho, aveia, soja, trigo e milho de segunda safra. Durante os 30 anos de cultivo sob SPD foram feitas aplicações de calcário dolomítico, em superfície, com base nos resultados das análises de solo. Os fertilizantes foram aplicados por ocasião da semeadura com semeadora-adubadora equipada de discos de corte frontal e hastes com formato parabólico, ângulo de ataque de 20°, espessura da ponteira de 20 mm e profundidade de penetração entre 10 e 12 cm. A cobertura com fertilizantes nitrogenados na cultura do milho e trigo foi feita com base nas recomendações para o material genético utilizado e produtividade esperada. O controle de pragas, doenças e plantas daninhas foi feito de acordo com as recomendações específicas para cada cultura. Na área amostrada, o tráfego de tratores, colhedoras e pulverizadores foi feito totalmente ao acaso para evitar zonas excessivamente compactadas.

A amostragem foi realizada em setembro de 2010, após a colheita do milho de segunda safra, cultivado com espaçamento de 0,90 m. Um transecto de aproximadamente 72 m foi estabelecido perpendicularmente às linhas da cultura do milho, no qual 40 amostras com estrutura preservada foram coletadas em cada uma das três posições de amostragem relativas às linhas (L), entrelinhas (E) e posição intermediária entre as linhas e entrelinhas (PI) da cultura do milho, totalizando 120 amostras. Um espaço de 1,8 m foi

estabelecido entre cada amostra de mesma posição de amostragem, de modo que ao longo do transecto alternavam-se linhas da cultura com e sem amostragem. As amostras com estrutura preservada foram coletadas nas profundidades de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m, em cilindros metálicos com dimensões aproximadas de 7,5 cm de diâmetro por 5,0 cm de altura, introduzidos lenta e continuamente por um amostrador elétrico automatizado (Figueiredo et al., 2010) para garantir a integridade estrutural do solo na amostra. Após a coleta, os cilindros com solo foram envolvidos com papel alumínio e levados para o preparo no laboratório.

O preparo das amostras consistiu na retirada do excesso de solo das extremidades de cada cilindro, de modo que o volume do solo fosse equivalente exatamente ao volume do cilindro. No laboratório, estas amostras foram saturadas durante 48 horas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura das amostras. Em seguida, as amostras foram pesadas e submetidas aos potenciais mátricos de -2, -4, -6 e -10 kPa, utilizando uma mesa de tensão similar à descrita por Ball & Hunter (1988), e aos potenciais de -30 e -50 kPa, utilizando câmaras de pressão (Klute, 1986). Após atingir equilíbrio hidráulico em cada potencial, indicado pelo fim da drenagem de água, a amostra foi novamente pesada e a permeabilidade do solo ao ar (K_a) foi determinada utilizando-se um permeâmetro de carga constante de ar, conforme Figueiredo et al. (2010). Este permeâmetro assemelha-se ao proposto por Chief, Ferré e Nijssen (2006) e seu princípio de funcionamento consiste em submeter uma amostra de solo a incrementos sucessivos e constantes de taxas de fluxo de ar para gerar distintos gradientes de pressão (Ball & Schjønning, 2002).

Para cada potencial mátrico (Ψ_m), a K_a (μm^2) foi calculada através da equação 1.

$$K_a = \frac{Q \eta}{A_s} \left(\frac{z}{P} \right) \quad (1)$$

em que Q é a vazão mássica (m^3/s); η é a viscosidade do ar a 20 °C ($\text{N s}/\text{m}^2$); A_s é a área perpendicular ao movimento do ar (m^2); z é a coluna de solo (m) e P é a pressão diferencial de ar (Pa).

Após a determinação da K_a no Ψ_m de -50 kPa, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 105 °C por 24 h para a determinação da

densidade do solo (D_s), conforme Grossman & Reinsch (2002). O teor de água no solo (θ) foi determinado por meio da equação 2:

$$\theta = u \times \frac{D_s}{D_{a g}} \quad (2)$$

sendo D_s a densidade do solo (Mg m^{-3}), $D_{a g}$ a densidade da água (Mg m^{-3}) e u a umidade gravimétrica (kg kg^{-1}), obtida pela razão entre as massas de água e de solo seco.

A porosidade de aeração (ϵ_a) foi obtida pela diferença entre a porosidade total (PT) e o teor de água no solo após o equilíbrio hidráulico em cada potencial estabelecido. A porosidade total foi obtida pela equação 3.

$$PT = 1 - D_s/D_p \quad (3)$$

em que D_s a densidade do solo (Mg m^{-3}) e D_p é a densidade de partículas (Mg m^{-3}). A D_p foi estimada pelo método do balão volumétrico, conforme Embrapa (1997). Utilizou-se o valor médio de $2,86 \text{ Mg m}^{-3}$.

A continuidade de poros foi avaliada pela relação entre os valores de K_a e ϵ_a utilizando-se a equação de Kozeny-Carman em uma forma análoga àquela dada por Ahuja et al. (1984):

$$K_a = M \epsilon_a^N \quad (4)$$

em que M e N são parâmetros empíricos obtidos no ajuste da equação aos dados. O expoente N é tido como um índice de continuidade de poros, que reflete o aumento da K_a com o aumento da ϵ_a ou o decréscimo da tortuosidade dos poros e área superficial com o aumento da fração de poros disponíveis para o fluxo (Rodrigues et al., 2011). A relação de K_a e ϵ_a foi ajustada para uma forma logarítmica da equação 4, representada na equação 5:

$$\log(K_a) = \log(M) + N \log(\epsilon_a) \quad 5$$

na qual tem-se: a inclinação da reta (N), o intercepto com o eixo $\log K_a$ no qual $\log \epsilon_a = 0$ (M), e o intercepto com o eixo $\log \epsilon_a$ em que $\log K_a = 0$ (ϵ_b). O intercepto com o eixo $\log \epsilon_a$ é denominado de conteúdo de ar limitante e foi proposto por Ball et al. (1988) e Schjønning et al. (2002) como a quantidade de poros de aeração bloqueados no solo, que não faz parte do transporte convectivo de ar. Desse modo, 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 pela equação 6:

$$\epsilon_b = 10^{(-\log M)/N} \quad 6$$

O índice de continuidade de poros K1 também foi calculado, utilizando-se a relação K_a/ε_a , conforme Groenevelt et al. (1984). As médias de K1 foram comparadas pelo teste t para nível de significância de 5%.

Os ajustes de equações lineares entre o $\log K_a$ e $\log \varepsilon_a$ foram considerados significativos para $p < 0,05$ e os coeficientes M e N foram testados estatisticamente por meio de teste t para nível de significância de 5%.

As variáveis D_s , Θ e ε_a foram comparadas entre os tratamentos por meio do intervalo de confiança da média a 95% ($P < 0,05$), conforme Payton et al. (2000): considera-se diferença estatística quando não há sobreposição dos limites superior e inferior dos intervalos de confiança das médias comparadas. Para a correlação entre as variáveis medidas, foi utilizado o teste de correlação de Pearson, avaliando-se o coeficiente de correlação e a probabilidade do mesmo. Todos estes procedimentos foram feitos com o software SAS (SAS, 2002).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios da densidade do solo (D_s), teor de água (em base volumétrica) (Θ) e porosidade de aeração (ε_a), referentes às diferentes posições de amostragem, são apresentados no Quadro 1. Com o intuito de facilitar a visualização dos resultados apresentados no Quadro 1, os valores médios de D_s , Θ e ε_a foram plotados em gráficos com seus respectivos intervalos de confiança nas diferentes posições e profundidade de amostragem (Figura 1). A ausência de sobreposição do intervalo de confiança da média permite afirmar que a posição linha (L) apresentou D_s estatisticamente inferior à entrelinha (E) e ponto intermediário (PI) em ambas as profundidades de amostragem. Este comportamento está associado ao revolvimento proporcionado pelos sulcadores da semeadora-adubadora que é mais evidenciado até 0,10 m. A menor D_s também verificada na L na profundidade de 0,10-0,20 m pode ser resultante de uma pequena variação na profundidade de ação dos sulcadores e também do efeito do sistema radicular das plantas.

Quadro 1 – Resumo estatístico das propriedades físicas do solo⁽¹⁾ nas profundidades de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m para diferentes posições de amostragem.

| Profundidade | Posição | Média | IC | Máximo | Mínimo | CV |
|----------------------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|
| D_s | | | | | | |
| 0-10 cm | E | 1,35 | 0,011 | 1,51 | 1,14 | 6,40 |
| | L | 1,10 | 0,010 | 1,27 | 0,92 | 6,88 |
| | PI | 1,35 | 0,013 | 1,50 | 1,11 | 7,80 |
| 10-20 cm | E | 1,37 | 0,005 | 1,44 | 1,27 | 2,59 |
| | L | 1,35 | 0,006 | 1,46 | 1,25 | 3,36 |
| | PI | 1,38 | 0,005 | 1,48 | 1,30 | 2,99 |
| Θ | | | | | | |
| 0-10 cm | E | 0,44 | 0,006 | 0,55 | 0,31 | 11,32 |
| | L | 0,39 | 0,008 | 0,53 | 0,23 | 14,97 |
| | PI | 0,43 | 0,006 | 0,56 | 0,31 | 11,02 |
| 10-20 cm | E | 0,45 | 0,006 | 0,62 | 0,30 | 10,80 |
| | L | 0,47 | 0,007 | 0,62 | 0,34 | 11,35 |
| | PI | 0,46 | 0,007 | 0,59 | 0,25 | 11,09 |
| ε_a | | | | | | |
| 0-10 cm | E | 0,08 | 0,007 | 0,26 | 0,01 | 64,45 |
| | L | 0,21 | 0,009 | 0,41 | 0,07 | 32,20 |
| | PI | 0,09 | 0,008 | 0,30 | 0,02 | 65,89 |
| 10-20 cm | E | 0,07 | 0,005 | 0,16 | 0,01 | 50,90 |
| | L | 0,07 | 0,005 | 0,15 | 0,01 | 52,12 |
| | PI | 0,07 | 0,004 | 0,15 | 0,01 | 49,81 |

⁽¹⁾: D_s, densidade do solo (Mg m⁻³); Θ, teor de água no solo (cm³ cm⁻³); ε_a, porosidade de aeração do solo (cm³ cm⁻³); E, Entrelinha; L, Linha; PI, Ponto Intermediário.

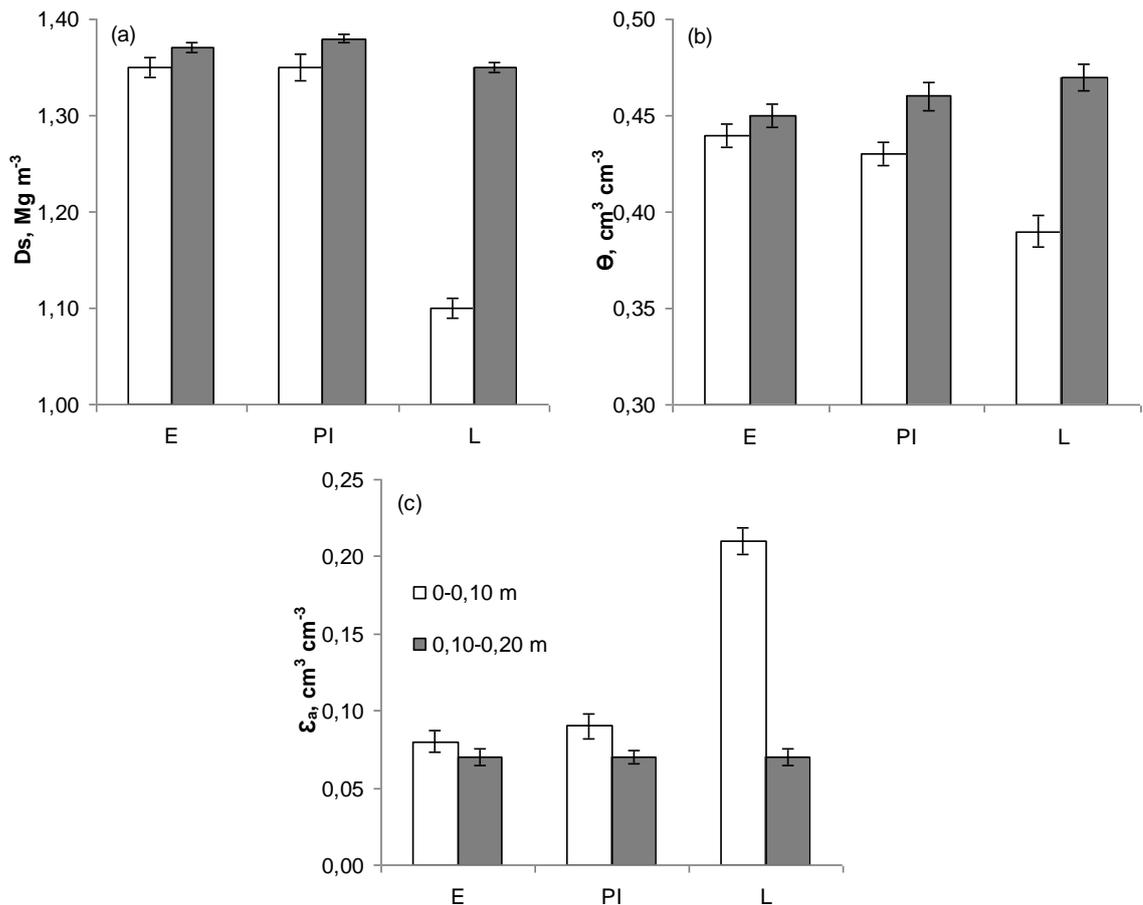


Figura 1 – Valores médios de densidade do solo (a), teor de água (base volumétrica) (b) e porosidade de aeração (c) nas diferentes posições e profundidades de amostragem. A sobreposição das barras do intervalo de confiança da média indica ausência de diferença estatística a 5% de significância.

O revolvimento do solo resulta em um aumento no volume de macroporos, responsáveis pela drenagem da água no solo, que explica o menor teor de água (Θ) e a maior porosidade de aeração (ϵ_a) verificados em L na profundidade de 0-0,10 m. Todas as posições apresentaram D_s estatisticamente superior na camada 0,10-0,20 m em relação à camada de 0-0,10 m.

Os valores de K_a para cada potencial são apresentados no Quadro 2. A normalidade da distribuição dos valores de K_a foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, que indicou ausência de normalidade. Deste modo, para que se pudesse trabalhar com testes estatísticos paramétricos, a transformação logarítmica dos valores de K_a foi realizada, ajustando os dados a distribuições mais próximas da normalidade (Blackwell et al., 1990).

Quadro 2 – Permeabilidade do solo ao ar (K_a) e índice de continuidade de poros (K_1) para o Latossolo Vermelho distroférico nas diferentes posições e profundidades de amostragem em cada potencial mátrico avaliado.

| Posição | Potencial Mátrico (kPa) | Profundidade (m) | | Profundidade (m) | |
|---------|-------------------------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
| | | 0-0,10 | 0,10-0,20 | 0-0,10 | 0,10-0,20 |
| | | $\log_{10} K_a (\mu\text{m}^2)$ | | $\log_{10} K_1 (\mu\text{m}^2)$ | |
| E | -2 | -0,238 Ba | -0,105 Aa | 1,208 Bb | 1,559 Aa |
| L | -2 | 0,813 Aa | -0,063 Ab | 1,737 Aa | 1,660 Aa |
| PI | -2 | -0,248 Ba | -0,197 Aa | 1,162 Bb | 1,484 Aa |
| E | -4 | -0,103 Bb | 0,130 Aa | 1,239 Bb | 1,487 Aa |
| L | -4 | 0,983 Aa | 0,056 Ab | 1,754 Aa | 1,473 Ab |
| PI | -4 | -0,006 Ba | 0,079 Aa | 1,267 Bb | 1,488 Aa |
| E | -6 | 0,030 Bb | 0,260 Aa | 1,238 Bb | 1,478 Aa |
| L | -6 | 1,052 Aa | 0,228 Ab | 1,766 Aa | 1,469 Ab |
| PI | -6 | 0,107 Ba | 0,225 Aa | 1,281 Bb | 1,454 Aa |
| E | -10 | 0,116 Bb | 0,348 Aa | 1,242 Bb | 1,432 Aa |
| L | -10 | 1,096 Aa | 0,328 Ab | 1,754 Aa | 1,435 Ab |
| PI | -10 | 0,202 Ba | 0,298 Aa | 1,247 Bb | 1,427 Aa |
| E | -30 | 0,332 Ba | 0,439 Aa | 1,252 Bb | 1,403 Aa |
| L | -30 | 1,147 Aa | 0,391 Ab | 1,750 Aa | 1,400 Ab |
| PI | -30 | 0,345 Ba | 0,367 Aa | 1,254 Bb | 1,382 Aa |
| E | -50 | 0,435 Ba | 0,502 Aa | 1,288 Bb | 1,426 Aa |
| L | -50 | 1,197 Aa | 0,428 Ab | 1,771 Aa | 1,404 Ab |
| PI | -50 | 0,392 Ba | 0,408 Aa | 1,268 Ba | 1,369 Aa |

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

Os valores médios de $\log K_a$ na posição L foram estatisticamente superiores à PI e E na camada de 0-0,10 m, em todos os potenciais mátricos avaliados (Quadro 2). Na profundidade de 0,10-0,20 m não foram encontradas diferenças entre as posições, demonstrando que os mecanismos que influenciaram a menor D_s na L não tiveram equivalente influência sobre $\log K_a$, que permite afirmar que o efeito do revolvimento na L sobre $\log K_a$ restringiu-se até 0,10 m de profundidade.

Os valores de $\log K_a$ na posição L da camada de 0-0,10 m foram significativamente superiores aos da camada subsequente em todos os potenciais mátricos (Ψ_m) avaliados, enquanto que PI não diferiu entre as duas camadas. Já na posição E, os valores de $\log K_a$ na camada de 0,10-0,20 m foram superiores aos obtidos em 0-0,10 m nos Ψ_m de -4, -6 e -10 kPa, apesar

da maior D_s observada em 0,10-0,20 m (Quadro 1). Isto demonstra que, para esta posição, a ausência de revolvimento da superfície permitiu que o efeito da estrutura da segunda camada fosse evidenciado, apresentando maior K_a . Uma observação que merece ser relatada é que 10% das amostras coletadas na E visivelmente coincidiram com a linha do cultivo que antecedeu a cultura do milho de segunda safra. Tal fato sugere que os efeitos residuais do revolvimento ocasionado na linha de cultivo sobre a K_a podem ter se estendido da sementeira da safra de verão até a colheita da safra de inverno, o que totaliza aproximadamente 180 dias.

A constatação do incremento na D_s na profundidade de 0,10-0,20 m associado ao aumento no valor de $\log K_a$ da posição E nos Ψ_m de -4, -6 e -10 kPa, demonstra que existem outros fatores do solo que determinam esta variável, como, por exemplo, a presença de um sistema poroso estável e contínuo. Ao contrário da camada superficial, a de 0,10-0,20 m está menos sujeita às perturbações decorrentes do tráfego de máquinas, que contribui para que a rede de poros apresente menor quantidade de poros bloqueados.

Ressureccion et al. (2007) indicam que a K_a no potencial equivalente à capacidade de campo é um excelente indicador das condições de aeração para o sistema radicular das plantas. Os valores de K_a (sem transformação log) obtidos no potencial equivalente à capacidade de campo (-10 kPa) foram 13,50, 2,12 e 2,87 μm^2 para as posições L, entrelinha (E) e ponto intermediário (PI) da profundidade de 0-0,10 m, respectivamente. Para a profundidade de 0,10-0,20 m, esses valores foram 2,73, 2,39 e 2,70 μm^2 para as posições L, PI e E, respectivamente. Estes valores de K_a são inferiores aos encontrados por Cavalieri et al. (2009), em solo com 40% de argila, e Rodrigues et al. (2011), em solo com 65% de argila, no potencial mátrico (Ψ_m) de -10 kPa, que se deve ao maior teor de argila do solo deste estudo.

O teste de Shapiro-Wilk também foi aplicado para o índice de continuidade de poros K_1 , demonstrando ausência de normalidade. Deste modo, assim como para K_a , procedeu-se a transformação logarítmica dos dados. De um modo geral, a comparação entre as posições de amostragem demonstrou que a maior continuidade de poros esteve associada aos maiores valores de $\log K_a$ ou à redução do potencial da água no solo (Quadro 2), comportamento também observado por Roseberg & McCoy (1992). Contudo,

na comparação entre as mesmas posições nas diferentes profundidades, alguns casos revelaram maiores $\log K_1$ na profundidade de 0,10-0,20 m mesmo não havendo diferenças em $\log K_a$, como, por exemplo, a posição E nos Ψ_m de -2, -30 e -50 kPa e PI nos Ψ_m de -2, -4, -6, -10 e -30 kPa. Nestes casos, de acordo com Groenevelt et al. (1984), os aspectos do sistema poroso como a distribuição do tamanho, tortuosidade e continuidade de poros são determinantes para as diferenças observadas. O comportamento oposto também foi verificado na L no Ψ_m -2 kPa, onde $\log K_1$ não diferiu apesar do maior $\log K_a$ observado na camada de 0-0,10 m. Tal situação pode ser explicada pela redução proporcional de K_a e ε_a da primeira para a segunda camada. Uma vez que K_1 resulta de uma fração (K_a/ε_a), diferenças seriam encontradas caso o numerador tivesse mantido valor semelhante nas duas camadas enquanto o denominador apresentasse variação, ou vice-versa. Desta forma, o maior $\log K_a$ na camada de 0-0,10 m não pode ser atribuído a uma maior continuidade de poros, mas sim à maior ε_a .

Considerando o valor crítico de $K_a \leq 1 \mu\text{m}^2$ (McQueen & Shepherd, 2002), como condição em que a aeração do solo é mínima a ponto de afetar o crescimento das plantas, verifica-se no Quadro 3 que, na profundidade de 0-0,10 m, com exceção da posição L, grande parte das amostras apresentou o valor de K_a menor que o valor crítico até o Ψ_m de -10 kPa. Na profundidade de 0,10-0,20 m, evidencia-se o grande aumento na porcentagem de amostras da L que apresentam valor de K_a inferior ao crítico, além da padronização do comportamento das diferentes posições de amostragem em relação à redução do Ψ_m . Os resultados apresentados nos Quadro 3 destacam a importância de se distinguir a posição espacial de amostragem em estudos de permeabilidade do solo ao ar, com destaque para o grande efeito da L sobre o aumento da K_a .

Quadro 3 – Porcentagem das amostras com permeabilidade ao ar crítica nas diferentes posições e profundidades de amostragem para cada potencial mátrico avaliado.

| Profundidade (m) | Posição | Potencial Mátrico (kPa) | | | | | |
|------------------|---------|--------------------------------|------|------|------|------|-----|
| | | -2 | -4 | -6 | -10 | -30 | -50 |
| | | $K_a \leq 1 \mu\text{m}^2$ (%) | | | | | |
| 0-0,10 | E | 85 | 70 | 47,5 | 42,5 | 17,5 | 10 |
| | L | 7,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | PI | 80 | 60 | 42,5 | 30 | 20 | 20 |
| 0,10-0,20 | E | 77,5 | 40 | 17,5 | 10 | 5 | 2,5 |
| | L | 75 | 52,5 | 32,5 | 7,5 | 5 | 2,5 |
| | PI | 77,5 | 42,5 | 20 | 5 | 5 | 2,5 |

A redução da porcentagem de amostras com $K_a \leq 1 \mu\text{m}^2$ por consequência da redução no Ψ_m é reflexo do aumento nos valores de K_a obtidos à medida em que o solo seca, demonstrando nitidamente o efeito do conteúdo de água no solo sobre a K_a , conforme já reportado por Ball et al. (1988).

A partir da comparação entre a porcentagem de amostras com valores críticos de K_a e a porcentagem de amostras com valores críticos de ε_a ($\leq 10\%$) (Quadros 3 e 4), é possível visualizar um aumento de até 16 vezes na porcentagem de amostras que apresentam ε_a crítica em relação às amostras que apresentam K_a crítica. O confronto entre estes resultados reforça a afirmação de Silva et al. (2009a) de que a ε_a pode não refletir em medidas precisas do comportamento dos gases no solo, visto que a aeração do solo é um processo dinâmico codependente de outras características do solo e do ambiente.

Quadro 4 – Porcentagem das amostras com porosidade de aeração crítica nas diferentes posições e profundidades de amostragem para cada potencial mátrico avaliado.

| Profundidade (m) | Posição | Potencial Mátrico (kPa) | | | | | |
|---------------------|---------|-------------------------------|------|------|------|------|-----|
| | | -2 | -4 | -6 | -10 | -30 | -50 |
| | | $\varepsilon_a \leq 10\%$ (%) | | | | | |
| 0-0,10 | E | 100 | 92,5 | 82,5 | 70 | 27,5 | 7,5 |
| | L | 30 | 2,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | PI | 95 | 82,5 | 80 | 62,5 | 25 | 15 |
| 0,10-0,20 | E | 100 | 100 | 100 | 87,5 | 60 | 40 |
| | L | 100 | 100 | 100 | 82,5 | 60 | 40 |
| | PI | 100 | 100 | 100 | 90 | 55 | 20 |

A continuidade de poros também foi avaliada pela relação entre K_a e ε_a estabelecida pela equação $\log(K_a) = \log(M) + N \log(\varepsilon_a)$, na qual N é tido como um índice de continuidade de poros, que reflete o aumento da K_a com o aumento da ε_a ou o decréscimo da tortuosidade dos poros e área superficial com o aumento da fração de poros disponíveis para o fluxo. A relação log-log entre K_a e ε_a , apresentada na Figura 1, foi estabelecida com seis pontos de K_a x ε_a , cada um resultante da média de 40 amostras, relativas a cada posição de amostragem nos Ψ_m correspondentes de -2, -4, -6, -10, -30 e -50 kPa.

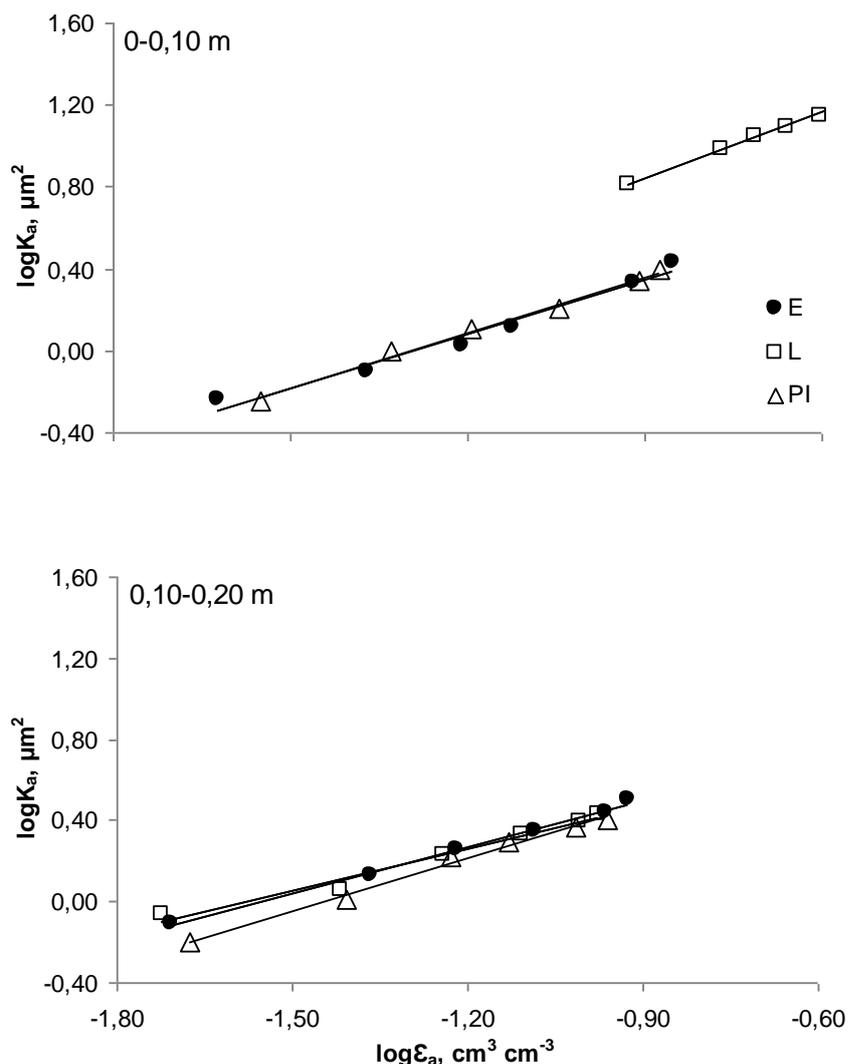


Figura 2 – Relação logarítmica entre K_a e ϵ_a de um Latossolo Vermelho distroférrico para as posições Linha (L), Entrelinha (E) e Ponto Intermediário (PI), nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

A maior continuidade de poros avaliada pelo índice N ocorreu na posição L na profundidade de 0-0,10 m e PI na profundidade de 0,10-0,20 m (Quadro 5). Com exceção da L, constata-se uma divergência entre os resultados dos diferentes índices de continuidade de poros utilizados neste trabalho. Os valores de log K1 demonstraram não haver diferenças estatísticas entre as posições de amostragem na profundidade de 0,10-0,20 m, enquanto que N revelou PI como superior às demais. Na comparação entre as mesmas posições nas diferentes profundidades, log K1 foi maior em 0,10-0,20 m para E e PI em grande parte dos Ψ_m , enquanto que N não demonstrou diferenças estatísticas para estas posições nas diferentes profundidades. Rodrigues et al. (2011) também encontraram comportamento inverso entre a continuidade de

poros determinada pela relação logarítmica entre K_a e ε_a (N) e pela relação K_a/ε_a (K1). No referido estudo, N revelou poros supostamente mais contínuos na profundidade de 0-0,10 m, enquanto que log K1 demonstrou maior continuidade em 0,10-0,20 m. Os valores de N do presente estudo são inferiores aos reportados em outros trabalhos com sistema plantio direto que variaram de 1,83 a 9,97 (Ball et al., 1988; Roseberg & McCoy, 1992; Rodrigues et al., 2011; Figueiredo, 2010).

Quadro 5 – Médias dos parâmetros da regressão entre log K_a e log ε_a e porosidade bloqueada (ε_b) para as diferentes posições Linha (L), Entrelinha (E) e Ponto Intermediário (PI) nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

| | Profundidade (m) | Posição | | |
|-----------------|------------------|----------|---------|---------|
| | | E | L | PI |
| log M | 0-0,10 | 1,13 Ab | 1,80 Aa | 1,18 Ab |
| | 0,10-0,20 | 1,18 Aab | 1,07 Bb | 1,29 Aa |
| N | 0-0,10 | 0,88 Ab | 1,06 Aa | 0,91 Ab |
| | 0,10-0,20 | 0,76 Ab | 0,68 Bb | 0,87 Aa |
| R^2 | 0-0,10 | 0,97 | 0,99 | 0,99 |
| | 0,10-0,20 | 0,99 | 0,97 | 0,99 |
| ε_b | 0-0,10 | 5,20 | 2,00 | 5,05 |
| | 0,10-0,20 | 2,80 | 2,67 | 3,29 |

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

De acordo com Ball et al. (1988), a porosidade bloqueada (ε_b) pode ser considerada como a porcentagem da porosidade de aeração das amostras que apresenta-se impermeável ao fluxo de gases. Observa-se que a profundidade de 0-0,10 m apresentou maior volume de poros bloqueados nas posições E e PI, enquanto que a profundidade de 0,10-0,20 m apresentou comportamento semelhante nas três posições de amostragem (Quadro 3). Os valores de ε_b encontrados neste estudo assemelham-se aos obtidos por Ball et al. (1988) em solo sob plantio direto, porém o comportamento observado de ε_b , em relação a continuidade de poros avaliada pelo índice N, é diferente do obtido por estes autores que em geral encontraram maiores valores de ε_b associados aos maiores valores de N.

O grau de associação entre $\log K_a$ e as demais propriedades físicas do solo foi avaliado através do coeficiente de correlação de Pearson (Quadro 6). Observa-se que a D_s foi negativa e significativamente correlacionada com $\log K_a$ na camada de 0-0,10 m. Já na segunda camada de amostragem, não se verificou correlação significativa entre as variáveis. As correlações de $\log K_a$ com Θ e com $\log \varepsilon_a$ foram altamente significativas nas duas profundidades de amostragem, com valores de correlação (r) ligeiramente superiores em 0-0,10 m. Estes resultados concordam com os encontrados por Figueiredo (2010).

Quadro 6 – Coeficientes de correlação de Pearson entre $\log K_a$ e as demais propriedades físicas do solo⁽¹⁾ nas diferentes posições e profundidades de amostragem.

| Profundidade (m) | Posição | D_s | Θ | $\log \varepsilon_a$ |
|------------------|---------|---------------------|----------|----------------------|
| 0-0,10 | E | -0,58* | -0,64* | 0,85* |
| | L | -0,51* | -0,60* | 0,72* |
| | PI | -0,66* | -0,44* | 0,85* |
| 0,10-0,20 | E | -0,04 ^{ns} | -0,45* | 0,66* |
| | L | -0,13 ^{ns} | -0,47* | 0,61* |
| | PI | -0,12 ^{ns} | -0,40* | 0,65* |

(*): $p < 0,0001$; (ns): $p > 0,05$.

(1): D_s , densidade do solo; Θ , teor de água no solo (base volumétrica); $\log \varepsilon_a$, logaritmo da porosidade de aeração do solo.

4.4 CONCLUSÕES

A K_a e os índices de continuidade de poros apresentaram diferenças estatísticas entre as diferentes posições de amostragem que não refletiram necessariamente diferenças da densidade ou da porosidade de aeração do solo, evidenciando a habilidade dessa variável em detectar alterações no sistema poroso e demonstrando sua eficiência na avaliação da qualidade física do solo do presente estudo.

A hipótese estabelecida foi confirmada e a grande diferença observada nos valores de K_a comprovou a importância de se considerar a posição espacial de obtenção das amostras. Isto permite uma interpretação mais precisa e pontual sobre a condição estrutural do solo.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Independentemente dos limites críticos de resistência à penetração (RP) adotados, verificou-se uma redução do IHO com o aumento da Ds. Os maiores valores do IHO foram verificados na posição de amostragem linha (L) e a utilização de RP crítica maior que 2,0 MPa resultou em IHO condizente com a qualidade física deste solo sob SPD de longo tempo. A Dmax foi de 1,52 kg dm⁻³ e o GC variou de 64 a 87%, sendo os maiores valores obtidos nas posições entrelinha (E) e ponto intermediário (PI).

Os valores de IHO e GC obtidos neste estudo indicam que a qualidade física deste solo não é limitante à produção das culturas após 30 anos de condução do SPD.

As diferentes posições de amostragem apresentaram diferenças estatísticas na K_a e nos índices de continuidade de poros, com destaque para os maiores valores observados na L na camada de 0-0,10 m. Contudo, tais diferenças não estiveram necessariamente relacionadas com as diferenças observadas na Ds e na ϵ_a .

A K_a comprovou sua habilidade na detecção das alterações no sistema poroso e demonstrou ser eficiente na avaliação da qualidade física do solo do presente estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, n.3, p.519-531, 2004.

AHUJA, L.R.; NANEY, J.W.; GREEN, R.E. & NIELSEN, D.R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.48 n.4, p.699-702, 1984.

ALVAREZ, R. & STEINBACH, H.S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.104 p.1-15, 2009.

BALL, B.C. & HUNTER, R. The determination of water release characteristics of soil cores at low suctions. **Geoderma**, Amsterdam, v.43, p.195-212, 1988.

BALL, B.C. & SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C. (Co-Ed). **Methods of soil analysis**. 3.ed. Soil Science Society of America, Madison, Soil Science Society of America. 2002. pt. 4, p.1141-1158.

BALL, B.C. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and air permeabilities and air-filled porosities. **Journal of Soil Science**, London, v.32 p.483-498, 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.

BENGOUGH, A.G.; MCKENZIE, B.M.; HALLETT, P.D. & VALENTINE, T.A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Landcaster, v.62, p.59-68, 2011.

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; MCKENNA, S.J.; ROBERTS, T. & VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Landcaster, v.57, n.2, p.437-447, 2006.

BESCANSA, P.; IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; ENRIQUE, A.; HOOGMOED W.B. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.87, n.1, p.19-27, 2006.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p.843-849, 2005.

BITTELLI, M. & FLURY, M. Erros in water retention curves determined with pressure plates. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.73, n.5, p.1453-1460, 2009.

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 characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Journal of Soil Science**, London, v.41, p.215-228, 1990.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V. & GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.273-281, 2009.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R.; SCHLEGEL, A.J.; LYON, D.J.; VIGIL, M.F.; MIKHA, M.M.; STAHLMAN, P.W. & RICE, C. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.73, p.1871-1879. 2009.

BURCH, G.J., MASON, I.B., FISCHER, R.A., MOORE, I.D. Tillage effects on soils: physical and hydraulic responses to direct drilling at Lockhart. N.S.W. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.24, p.377-391, 1986.

BUSSCHER, W.J., & SOJKA, R.E. Enhancement of subsoiling effect on soil strength by conservation tillage. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.30, p.888-892. 1987.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.3, p.519-524, 1990.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.759-771, 2011.

CAMARA, R.K. & KLEIN, V.A. Escarificaçãp 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.

CARDOSO, E.G., L. ZOTARELLI, J.L. PICCININ, E. TORRES, O.F. SARAIVA & M.F. GUIMARÃES, M.F. Soybean root system in function of soil compaction under no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, p.493-501, 2007.

CARTER, M.R. Characterizing of soil physical condition in reduced tillage systems for winter wheat on a fine sandy loam using small cores. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.72, p.395-402. 1992.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.70, p.425-433, 1990.

CASSEL, D.K.; NELSON, L.A. Spatial and temporal variability of soil physical properties of norfolk loamy sand as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.5 p.5-17, 1985.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.103, p.158-164, 2009.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A.; COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30 p.137-147, 2006.

CNA, BRAZIL: Confederação de Agricultura. In: **FARMERS SINCE RIO**. The contribution of farmers organisations towards sustainable development. FAP. Paris, France. April, 1997 (redigido pela APDC).

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.933-942, 2008.

COREY, A.T.: Air Permeability, in KLUTE, A. (ed.): **Methods of Soil Analysis**, Part 1. 2nd ed., Madison, ASA and SSSA, 1986, pt 1, p.319-330, (Agronomy Monograph 9).

CORRECHEL, V.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Influência da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.165-173, 1999.

DALAL, R.C.; ALLEN, D.E.; WANGA, W.J.; REEVES, S.; GIBSON, I. Organic carbon and total nitrogen stocks in a Vertisol following 40 years of no-tillage, crop residue retention and nitrogen fertilization. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.112, p.133-139, 2011.

DECAGON DEVICES. Disponível em: <<http://www.decagon.com/assets/Uploads/AN-Determining-15-Bar-Permanent-Wilt-Water-Content-of-Soils-with-the-WP4C.pdf>>. Acesso em 10 de mar. 2011.

DERPSCH, R., FRIEDRICH, T., 2009. Development and current status of no-till adoption in the world. In: **Proceedings 18th Conference**, ISTRO, Izmir, Turkey, Paper T1-041, p. 1-16.

DIAS JUNIOR, M.S. & MIRANDA, E.É.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.24, p.337-346, 2000.

DIAS JUNIOR, M. S.; ESTANISLAU, W. T. Grau de compactação e retenção de água de latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.45-51, 1999.

DING, X.; ZHANG, B.; ZHANG X.; YANG, X.; ZHANG, X. Effects of tillage and crop rotation on soil microbial residues in a rainfed agroecosystem of northeast China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.114, p.43-49, 2011.

DODD, I.C.; STIKIC, R. & DAVIES, W.J. Chemical regulation of gas exchange and growth of plants in drying soil in the field. **Journal of Experimental Botany**, Landcaster, v.47, p.1475-1490, 1996.

DÖRNER, J. & HORN, R. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselien moraine region in N Germany. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.169, 213-220, 2006.

EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F. & BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in the tilled an untilled loess soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.3, p.261-275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

ERIKSSON, J.; HAKANSSON, I.; DANFORS, B. 1974. The effect of soil compaction on soil structure and crop yields. Swedish Institute of Agricultural Engineering, Uppsala, Report 354, 82 pp. (in Swedish; Transl., Aase, J.K., U.S.D.A.- A.R.S., Washington, DC, USA).

FABRIZZI, K.P.; GARCIA, F.O.; COSTA, J.L. & PICONE, L.I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.81, p.57-69. 2005.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA (FEBRAPDP), 2008. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br>. Acesso em 02 de maio de 2011.

FERRERAS, L.A.; COSTA, J.L.; GARCIA, F.O. & PECORARI, C. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern “Pampa” of Argentina. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.54, p.31-19. 2000.

FIGUEIREDO, G.C.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Improvement of a testing apparatus for dynamometry: precedures for penetrometry and influence of strain rate to quantify the tensile strength of soil aggregates. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.35, 2011 (in press).

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

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S. & FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24 p.487-493, 2000.

- FISH, A.N. & KOPI, A.J. The use of a simple field air permeability as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, Amsterdam, v.63, p.255-264, 1994.
- GÁL, A.; VYN, T.J.; MICHÉLI, E.; KLADIVKO, E.J.; MCFEE, W.W. Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.96, p.42-51. 2007.
- GLINSKI, J. & LIPIEC, J. Soil physical conditions and plant roots. Boca Raton: CRC Press, 1990. 250p.
- 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 American Journal**, Madison, v.32, p.180-186, 1968.
- GRANTZ, S.A. & SLINKER, B.K. Primer of applied regression and analysis of variance. New York, McGraw Hill, 1990. p777.
- GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D. & GRANT, C.D. Physical assessment of soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v.34, p.101-114, 1984.
- HADAS, A. Soil tilth - the desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation processes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.43, p.7-40, 1997.
- HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.105-120, 1990.
- HAKANSSON, I. The sensitivity of different crops to soil compaction. In: **Sixth International Conference on Soil Tillage**, Wageningen, The Netherlands, 24±29 September 1973. Summaries, pp. 14:1-4, 1973.
- HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.71-85, 2000.
- HAMBLIN, A.P. The effect of tillage on soil surface properties and the water balance of a xeralfic alfisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.4, p.543-559, 1984.
- HELGASON, B.L.; WALLEY, F.L.; GERMIDA, J.J. No-till soil management increases microbial biomass and alters community profiles in soil aggregates. **Applied Soil Ecology**, v.46, p.390-397. 2010.
- HERNANZ, J.L.; LÓPEZ, R.; NAVARRETE, L.; SÁNCHEZ-GIRÓN, V. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.66, p.129-141. 2002.
- HOBBS, P.R. Conservation agriculture: What is it and why is it important for future sustainable food production?. **Journal of Agricultural Science**. v.145, p.127-137. 2007.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JR, M.S. & TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, p.1493-1500, 2000.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25 p.11-18, 2001.

JIN, H.; HONGWEN, L.; RABI G. RASAILY, R. G.; QINGJIE, W.; GUOHUA, C.; YANBO, S.; XIAODONG, Q. & LIJIN, L. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat–maize cropping system in North China Plain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.113, p.48-54, 2011.

KADŽIENĖ, G.; MUNKHOLM, L.J.; MUTEGI, J.K. Root growth conditions in the topsoil as affected by tillage intensity. **Geoderma**, Amsterdam, v.166, p.66-73, 2011.

KASPAR, T.C.; BROWN, H.J. & KASSMEYER, E.M. Corn root distribution as affected by tillage, wheel traffic, and fertilizer placement. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.55, p.1390-1394, 1991.

KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v.12, n.1, p.1-51, 1990.

KAY, B.D.; SILVA, A.P. & BALDOCK, J.A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: Predictions using pedotransfer functions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.77, n.5, p.655-667, 1997.

KIRKHAM, D., M. De BRODT & L. De LEIHEER (1958). Air permeability at Field capacity as related to soil structure and yield. *Overdruk Uit Mededelingen van de Landbouwhogeschool en de Opzoekingsstations van de staat te Gent deel XXXIV. No. 1. Int. Symp. Soil Moisture, Gent Belgium p 337-391.*

KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M. & MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.9, p.2475-2481, 2009.

KLEIN, V.A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um latossolo vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, n.1, v.5, p.26-32, 2006.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.221-227. 2007.

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

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: America Society of Agronomy, 1986. cap. 26, p. 635-660.

KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Elsevier Science, p.23- 44,1994.

LAL, R.; SHUKLA, M.K. 2004. **Principles of Soil Physics**. Marcel Dekker Inc., New York.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.2, p.151-170, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28 p.415-423, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E. & TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, n.4, p.1210-1215, 2005.

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

LINDSTROM, M.J.; ONSTAD, C.A. Influence of tillage systems on soil physical parameters and infiltration after planting. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.39, p.149-152, 1984.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.87-94, 2000.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I. TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.307-317, 1991.

LÓPEZ-FANDO, C.; PARDO, M.T. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.111, p.224–230, 2011.

MASLE, J. Growth and stomatal responses of wheat seedlings to spatial and temporal variations in soil strength of bi-layered soils. **Journal of Experimental Botany**, Landcaster, v.49, p.1245-1257, 1998.

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

McQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.25, p.217-230, 2002.

MELERO, S.; LÓPEZ-BELLIDO R.J.; LÓPEZ-BELLIDO, L.; MUNÓZ-ROMERO, V.; MORENO, F.; MURILLO, J.M. Long-term effect of tillage, rotation and

nitrogen fertiliser on soil quality in a Mediterranean Vertisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.114, p.97-107, 2011.

MODOLO, A.J.; SILVA, S.L.; SILVEIRA, J.C.M.; MERCANTE, E. Avaliação do desempenho de duas semeadoras-adubadoras de precisão em diferentes velocidades. **Engenharia na Agricultura**, v.12, p.56-73, 2004.

MOHANTY, B.P.; HORTON, R. & ANKENY, M.D. Infiltration and macroporosity under a row crop agricultural field in a glacial till soil. **Soil Science**, Baltimore, v.161, p.205-213. 1996.

NETO, P.H.W.; ROSA, A.L.T. & GOMES, J.A. Suscetibilidade de dois tipos de solo à compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, p.349-353, 2002.

NOGUEIRA, J.B. Mecânica dos solos. Ensaio de Laboratório. São Carlos, EESC-USP, 1998. 248p.

OLIVEIRA, V.S., ROLIM, M.M., VASCONCELOS, R.F.B., COSTA, Y.D.J. & PEDROSA, E. M. R. Compactação de um argissolo amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p.914-920, 2010.

ONOFIOK, O.E. Spatial and temporal variability of some soil physical properties following tillage of a nigerian paleustult. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.12, p.285-298, 1988.

PAGLIAI, M.; LA MARCA, M.; LUCAMANTE, G.; GENOVESE, L. Effects of zero and conventional tillage on the length and irregularity of elongated pores in a clay loam soil under viticulture. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, 4:433-444, 1984.

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

PETEAN, L.P.; TORMENA, C.A.; ALVES, S.J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.1515-1526, 2010.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.12, p.211-16, 1988.

REICOSKY, D.C., SAXTON, K. The benefits of no-tillage. In: Baker, C.J., Saxton, K.E., Ritchie, W.R., Chamen, W.C.T., Reicosky, D.C., Ribeiro, M.F.S., Justice, S.E., Hobbs (Eds.), No-Tillage Seeding in Conservation Agriculture. 2nd Edition. UK, pp. 11–20, 2007.

REIS, E.F.; FERNANDES, H.C.; SHAEFER, C.E.G.R.; ARAÚJO, E.F. Avaliação de mecanismos rompedores e compactadores em semeadura direta. **Engenharia na Agricultura**, v.12, n.3, p.212-21, 2004.

RESSURECCION, A.C.; KAWAMOTO, K.; KOMATSU, T.; MOLDRUP, P.; OZAKI, N. & ROLSTON, D.E. Gas transport parameters along field transects of a volcanic soils. **Soil Science**, Blatimore, v.172, p.3-16, 2007.

RODRIGUES, S.; SILVA, A.P.S.; GIAROLA, N.F.B. & ROSA, J.A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.105-114, 2011.

ROQUE, A.A.O.; SOUZA, Z.M.; ARAÚJO, F.S.; SILVA, G.R.V. Soil physical attributes and least limiting water range of a Distrofic Red Latossol under agricultural traffic control. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p.1536-1542, 2011.

SALVO, L.; HERNÁNDEZ, J.; ERNST, O. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.109, p.116-122, 2010.

SAS Institute. SAS/STAT procedure guide for personal computer. 5.ed. Cary, 1999.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.844-851, 1996.

SECCO, D.; REINERT, D.; REICHERT, J.M. & DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.797-804. 2004.

SEIXAS, J.; ROLOFF, G. & RALISCH, R. Tráfego de máquinas e enraizamento do milho em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, p.794-798. 2005.

SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.184, p.323-329, 1996.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.44, p.81-93, 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.61, p.884-888, 1997.

SILVA, A.P.; LEO, T.P.; TORMENA, C.A. & GONÇALVES, A.C.A. Determination of air permeability in undisturbed soil samples by the decreasing pressure method. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.1535-1545, 2009a.

SILVA, A.P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S.C.; FIDALSKI, J. & NEVES JÚNIOR, A. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.6. p.1-30, 2009b.

SIQUEIRA, R. Milho: semeadoras-adubadoras para sistema plantio direto com qualidade. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Molin/leb432/Semeadoras/semeadora-adubadora%20para%20sistema%20de%20plantio%20direto%20com%20qualidade.pdf>. 2007. Acesso em 20 de maio de 2011.

SIQUEIRA, R.; CASÃO JUNIOR, R. Trabalhador no cultivo de grãos e oleaginosas: Máquinas para manejo de coberturas e semeadura no sistema de plantio direto. Curitiba: SENAR-PR, 2004. 88 p.

SO, H.B., GRABSKI, A. & DESBOROUGH, P. The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.104, p.180-184, 2009.

SOJKA, R.E.; STOLZY, L.H. Soil oxygen effects on stomatal response. **Soil Science**, Madison, v.130, p.350-358. 1980.

STARR, J.L., TIMLIN, D.J. Using high-resolution soil moisture data to assess soil water dynamics in the vadose zone. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.3, p.926-935, 2004.

STIRZAKER, R.J. Processing tomato response to soil compaction and fumigation. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v.37, p.477-483, 1997.

STRUDLEY, M.W.; GREEN, T.R. & ASCOUGH II, J.C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.99, p.4-48, 2008.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.1159-1167, 2007.

SWEENEY, D.W.; KIRKHAM, M.B. & SISSON, J.B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, p.637-643, 2006.

TABAGLIO, V.; GAVAZZI, C.; MENTA, C. Physico-chemical indicators and microarthropod communities as influenced by no-till, conventional tillage and nitrogen fertilisation after four years of continuous maize. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.105, p.135-142, 2009.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER JR, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, Madison, v.102, p.18-22, 1966.

TOPP, G.C., REYNOLDS, W.D., COOK, F.J., KIRBY, J.M., CARTER, M.R., 1997. Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), **Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health**, Developments in Soil Science. Elsevier, Amsterdam, v.25, p.21-58.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure. **Technical report no 2 - Soil Quality Evaluation Program**. Agriculture and Agri-Food Canada. 36p, 1994.

TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; SILVA, A.P.; JÚNIOR, R.S.O. Qualidade física do solo e produtividade da cultura de mandioca num Latossolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de preparo. In: **Congresso brasileiro de ciência do solo**, Ribeirão Preto. Solo: alicerce dos sistemas de produção. Anais... Botucatu: UNESP, 2003. CD-ROM.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

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, 1998a.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998b.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.52.n.2, p.223-232, 1999.

TORRES, E. & SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: **Embrapa Soja, 1999**. 58p. (Embrapa soja. Circular Técnica, 23).

TULI, A.; HOPMANS, J.W. & ROLSTON, D.E. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.69, p.1361-1371, 2005.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.92, p.104-113, 2007.

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.48, n.6, p.1220-1225, 1984.

VIEIRA, L.M.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1271-1280, 2007.

WEAICH, K.; CASS, A. & BRISTOW, K.L. Pre-emergent shoot growth of maize (*Zea mays*, L.) as a function of soil strength. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.40. p.3-23, 1996.

WELLS, T.; FITYUS, S.; SMITH, D.W. & MOE, H. The indirect estimation of saturated hydraulic conductivity of soils, using measurements of gas permeability. I. Laboratory testing with dry granular soils. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.44, p.719-725, 2006.

WHELAN, B.M.; KOPPI, A.J.; McBRATNEY, A.B. & DOUGHERTY, W.J. An instrument for the in situ characterization of soil structural stability based on the relative intrinsic permeability to air and water. **Geoderma**, Amsterdam, v.65, p.209-222, 1995.