

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**QUALIDADE ESTRUTURAL EM LATOSSOLOS COMPACTADOS**

**CULTIVADOS COM MILHO**

**Karina de Vares Rossetti**

Engenheira Agrônoma

**2015**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**QUALIDADE ESTRUTURAL EM LATOSSOLOS  
COMPACTADOS CULTIVADOS COM MILHO**

**Karina de Vares Rossetti**

**Orientador: Prof. Dr. José Frederico Centurion**

**Coorientador: Prof. Dr. Amauri Nelson Beutler**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal).

**2015**

R829q Rossetti, Karina de Vares  
Qualidade estrutural em Latossolos compactados cultivados com  
milho / Karina de Vares Rossetti – - Jaboticabal, 2015  
ix, 81 f. ; 28 cm

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade  
de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015

Orientador: José Frederico Centurion

Coorientador: Amauri Nelson Beutler

Banca examinadora: Itamar Andrioli, Renato de Mello Prado,  
Alberto Carvalho Filho, Sandro Roberto Brancalião

Bibliografia

1. Física do Solo. 2. Sistema Radicular. 3. *Zea mays*.  
I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e  
Veterinárias.

CDU: 631.43:633.15

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação – UNESP, Câmpus de Jaboticabal



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE JABOTICABAL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: “QUALIDADE ESTRUTURAL EM LATOSSOLOS  
COMPACTADOS CULTIVADOS COM MILHO”**

**AUTORA: KARINA DE VARES ROSSETTI**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE FREDERICO CENTURION**

**CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. AMAURI NELSON BEUTLER**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE FREDERICO CENTURION

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. ITAMAR ANDRIOLI

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. ALBERTO CARVALHO FILHO

Universidade Federal de Viçosa / Rio Paranaíba/MG

Prof. Dr. SANDRO ROBERTO BRANCALIAO

Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios / Ribeirão Preto/SP

Data da realização: 30 de outubro de 2015.

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**KARINA DE VARES ROSSETTI** – Nasceu no dia 07 de junho do ano de 1984, em Santo André, SP. cursou o ensino fundamental no Colégio Casabranquense, em Casa Branca, SP e o ensino médio no Colégio São João, em São João da Boa Vista, SP. Em março de 2003, ingressou no curso de graduação em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias- campus de Jaboticabal, SP, e em fevereiro de 2008, obteve o título de Engenheira Agrônoma. Em agosto de 2008, ingressou no curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) na mesma instituição, onde foi bolsista FAPESP por 24 meses e obteve o título em 2010. Em março de 2012, ingressou no curso de Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) na mesma instituição, onde foi bolsista CAPES por 36 meses. No dia 30 de outubro de 2015, submeteu-se à banca para a defesa da tese e obteve o título de Doutora em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por me dar o dom da vida.

À minha família e especialmente aos meus pais Maria Lúcia e Luiz Antônio pelo apoio e amor incondicional.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Frederico Centurion pela tutoria e pelos grandes ensinamentos profissionais.

Aos membros da banca examinadora Dr. Itamar Andrioli, Dr. Renato de Mello Prado, Dr. Alberto Carvalho Filho e Dr. Sandro Roberto Brancalião, por suas preciosas contribuições pedagógicas.

Ao coorientador Amauri Nelson Beutler.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por ter concedido bolsa de estudos por 3 anos.

Aos professores Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho e ao Dr. Rouverson Pereira da Silva, ex e atual coordenador do Programa de Pós Graduação em Produção Vegetal por acreditarem no meu trabalho.

Aos colegas e funcionários do departamento de Solos e Adubos pelo companheirismo e contribuições para a realização do curso.

E a todos que de alguma forma contribuíram para este estudo.

**MUITO OBRIGADA**

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO .....	viii
ABSTRACT.....	ix
CAPÍTULO 1. Considerações gerais .....	01
CAPÍTULO 2. Validação do índice S como indicador da qualidade estrutural em Latossolos compactados cultivados com milho.....	07
Resumo.....	07
Introdução.....	08
Material e métodos.....	09
Resultados e discussão.....	12
Conclusões.....	21
Referências.....	22
Apêndice.....	28
CAPÍTULO 3. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de grãos de milho em Latossolos sob diferentes intensidades de tráfego.....	35
Resumo.....	35
Introdução.....	36
Material e métodos.....	37
Resultados e discussão.....	41
Conclusões.....	48
Referências.....	48
Apêndice.....	53
CAPÍTULO 4. Compactação em Latossolos e suas relações com o crescimento radicular do milho.....	58
Resumo.....	58
Introdução.....	59
Material e métodos.....	61
Resultados e discussão.....	64
Conclusões.....	71
Referências.....	71
Apêndice.....	76

## QUALIDADE ESTRUTURAL EM LATOSSOLOS COMPACTADOS CULTIVADOS COM MILHO

**RESUMO** – O objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento estrutural em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef) após a compactação induzida por tratores, por meio de atributos físicos do solo e associá-los ao crescimento radicular e à produtividade da cultura do milho. Os experimentos foram conduzidos em campo por dois anos agrícolas (anos I e II), em delineamento em blocos casualizados em parcelas subdivididas, com quatro repetições cujos tratamentos principais consistiram de cinco condições de compactação (T0, T1, T2, T3 e T4) e os secundários por camadas de solo. Foram avaliados os atributos físicos do solo como a estabilidade de agregados, densidade, macro e microporosidade, retenção de água, índice S, resistência do solo à penetração e o intervalo hídrico ótimo (IHO). Para o LVef no ano I, a maioria dos valores do índice S situaram acima de 0,035 com exceção do T4 (três passadas do trator de 10 t) com 0,026. O índice S não é considerado um atributo confiável para caracterizar a qualidade estrutural em relação à produtividade de milho (Capítulo 2). No ano II, a maior frequência de densidade do solo maior que a densidade do solo crítica ocorreu no T4 (quatro passadas do trator de 10 t) (LVd) e no T2 (quatro passadas do trator de 4 t) ao T4 (LVef) na resistência do solo à penetração crítica (RPc) de 2 MPa. Porém não correspondeu em decréscimo da produtividade de milho. Neste aspecto, pode-se verificar que a determinação do IHO foi eficiente e complementar na identificação de condições mais favoráveis no LVef para o desenvolvimento do milho em relação ao LVd (Capítulo 3). Para a condição no LVef no ano II, os índices diâmetro médio geométrico, o diâmetro médio ponderado e a porcentagem de agregados maiores que 2,0 mm de diâmetro apresentaram respostas semelhantes tanto para o T0 (preparo convencional sem compactação adicional) como para os demais tratamentos sob compactações induzidas e foram em termos de valores absolutos superiores ao LVd. A redução da macroporosidade em LVd de 0,19 para 0,15 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> influenciou positivamente o comprimento radicular do milho em análise a condição no T0 (Capítulo 4).

**Palavras chave** – Atributos físicos, sistema radicular, *Zea mays*.

## STRUCTURAL QUALITY OF COMPACTED OXISOLS CULTIVATED WITH MAIZE

**ABSTRACT** – The purpose of this study was to evaluate the structural behavior of an Haplustox (LVd) and of an Eustrtox (LVef) after tractor-induced compaction based on soil physical properties and their relations with root growth and maize yield. The field experiments were carried out in two growing seasons (years I and II), in a randomized block design with split plots and four replications. The main treatments consisted of five compaction levels (T0, T1, T2, T3 e T4) and the secondary treatments of soil layers. The soil physical properties aggregate stability, bulk density, macro-and micro porosity, water retention, S index, penetration resistance, and the least limiting water range (RLL) were evaluated. In the first year, most S values of LVef exceeded 0.035, with the exception of T4 (passing a 10-ton tractor 3x), with 0.026. This index is not considered reliable to characterize the structural quality in relation to maize yield (Chapter 2). In the second year, the highest frequency of bulk density above the critical threshold for soil density occurred from T1 (passing a 4-ton tractor twice) to T4 (passing a 10-ton tractor 4x) (LVd) and from T2 (passing a 2-ton tractor 4x) to T4 (LVef) for critical soil resistance to penetration (cPR) 2 MPa. Without however reducing maize yield. The determination of RLL was effective to identify degradation, and regardless of the cPR value, the maize yield of LVd was more limited than that of LVef, (Chapter 3). For LVef, the responses in geometric mean diameter indices, mean weight diameter and percentage of aggregate diameter > 2.0 mm were similar in T0 (no additional compaction) as well as in the other treatments with induced compaction and higher than those of the LVd in terms of absolute values. Under the conditions of T0 (conventional tillage, no additional compaction), the reduction in macroporosity in LVd from 0.19 to 0.15 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> had a positive influence on maize root length (Chapter 4).

**Keywords**– Physical attributes, root system, *Zea mays*.

## CAPÍTULO 1- CONSIDERAÇÕES GERAIS

O tráfego de máquinas em áreas agrícolas tem como finalidade facilitar o trabalho do homem no campo. Porém se essa atividade ocorre quando o solo não está na capacidade de campo, poderá haver compactação, sendo esta mais evidente na camada superficial do solo. Neste contexto, segundo ALBUQUERQUE et al. (2011) é comum a utilização de implementos e máquinas agrícolas de grande porte sem a respectiva preocupação em projetar pneus adequados para amenizar a pressão transferida ao solo.

A compactação refere-se a compressão do solo quando ocorre o aumento de sua densidade, devido ao rearranjo das partículas, assim como à expulsão de ar dos macroporos, enquanto que o de microporos permanece inalterado ou até mesmo aumenta. Sendo que esse fato ocorre, quando a pressão aplicada ao solo é superior a sua capacidade de suporte de carga e o principal efeito é refletido na perda da qualidade estrutura do solo. Já o termo adensamento é o aumento da densidade do solo devido a causas naturais de formação (ação de fatores pedogenéticos) (REICHERT et al., 2010).

De modo geral, as causas da compactação do solo devem-se principalmente: ao fato de as máquinas terem se tornado mais pesadas; ao seu tráfego intenso e às operações em conteúdo de água sem respeitar a capacidade de campo. Quando esse fato ocorre é na tentativa de se atender a um cronograma de trabalho. Pode-se citar que a compactação do solo ocorre de forma diferenciada. Uma vez que a incidência de compactação no horizonte superficial do solo é determinada pela pressão de contato entre o solo e as rodas, enquanto que em subsuperfície a carga do eixo torna-se o fator mais importante (HÅKANSSON & VOORHES, 1998). Resultados obtidos por CASTRO NETO (2001), indicaram que a camada de solo que apresenta imediatamente o efeito compactante causado pelo tráfego de um trator agrícola está situado entre a superfície e algum ponto entre 0,10-0,20 m de profundidade. No entanto, em função das oscilações climáticas que determinam a disponibilidade temporal de água no solo, nem sempre se verifica efeitos deletérios da compactação na produtividade das culturas. Além disso,

compactação depende da textura e da mineralogia do solo, do conteúdo de matéria orgânica, do conteúdo de água no solo durante as operações no campo, da frequência e intensidade com que a carga é aplicada ao solo pelas máquinas e implementos. Assim, como é inevitável a mecanização das operações agrícolas, torna-se viável estabelecer valores críticos para a estrutura do solo, com a intenção de evitar perdas de produtividade e proteger o meio ambiente.

Os atributos do solo que podem ser utilizados para essa finalidade são a densidade do solo, o sistema poroso, a resistência do solo à penetração, a agregação, o índice S, a retenção de água no solo, o grau de compactação, o intervalo hídrico ótimo entre outros. Diante disso, ainda são realizadas as análises em laboratório, apesar de serem onerosas e demoradas quando há um elevado número de amostras e de atributos avaliados. Pois, uma vez que a quantificação visual do comportamento estrutural do solo em determinado manejo é uma tarefa difícil (OMUTO, 2008).

A compactação afeta também a disponibilidade de água às plantas, devido à baixa capacidade de infiltração e conseqüentemente o volume de água proveniente da chuva que é efetivamente armazenado no solo tende a ser menor (BRANDÃO et al., 2006). Ao mesmo tempo, a compactação diminui o diâmetro dos poros o que aumenta a energia com a qual a água é retida (REICHARDT & TIMM, 2012). Em solos com baixo conteúdo de água, a coesão das partículas e a resistência do solo à penetração são elevadas e reduzem a pressão hidrostática das células das raízes e, conseqüentemente, reduz a força da coifa na região meristemática da raiz, para superar a resistência do solo (HAMZA & ANDERSON, 2005). Os valores limitantes de densidade do solo ao desenvolvimento radicular, podem ser determinados por meio do intervalo hídrico ótimo (IHO). Esse pode ser um parâmetro útil para avaliar a qualidade estrutural do solo ao desenvolvimento das plantas, pois envolve a avaliação conjunta do potencial matricial de água no solo, da resistência do solo à penetração e da porosidade de aeração do solo, considerando a variabilidade natural da densidade do solo (TORMENA et al., 1998). O IHO representa uma faixa de água, dentro da qual as plantas se desenvolvem com as mínimas limitações

impostas pelos efeitos dos atributos físicos, fora desta faixa, as plantas sofrem severas restrições (SILVA et al., 1994).

De acordo com FOLONI et al. (2003), sob condução em vaso em Latossolo, observaram que o impedimento físico, alterou a distribuição do sistema radicular das plantas de milho. Uma camada compactada com resistência à penetração da ordem de 1,4 MPa e conteúdo de água no solo com  $135 \text{ g kg}^{-1}$ , impediu que o sistema radicular do milho atravessasse essa camada e se desenvolvesse. Segundo esses autores, o diâmetro médio radicular das plantas de milho apresenta alta correlação com o desenvolvimento das raízes dentro da camada de solo compactada.

Para a compactação em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) com textura média, FREDDI et al. (2009 b) afirmaram que houve aumento da produção de matéria seca das raízes, da densidade e do diâmetro radicular na camada de 0-0,10 m. Entretanto esses autores, perceberam que mesmo tendo macroporos abaixo de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  não houve impedimento para o desenvolvimento radicular. Neste sentido, NUNES et al. (2015) observaram que a densidade radicular do milho correlacionou com os parâmetros da agregação do solo. Todavia esses autores comprovaram por causa da escarificação no solo, que o crescimento radicular foi favorecido na camada de 0,07-0,20 m e não influenciou a agregação do solo em relação ao tratamento sem escarificação. Em FREDDI et al. (2009 a) foi possível verificar que o valor de 2,15 MPa de resistência em LVd à penetração na camada de 0-0,20 m foi considerado crítico e reduziu linearmente a produtividade de milho em 23%.

Por outro lado, o solo sob condições naturais apresenta ótima qualidade estrutural ao desenvolvimento das plantas (CALONEGO et al., 2012), entretanto a conversão para sistemas de manejo causa a redução dessa qualidade (SPERA et al., 2004). Baseando-se na avaliação de TORMENA et al. (2008) a redução da qualidade estrutural do solo é proporcional a sua intensidade de mobilização. Pois para esses autores, esses resultados foram confirmados durante a avaliação da resistência dos agregados, da friabilidade, do conteúdo de carbono orgânico e da densidade em Latossolo Vermelho franco arenoso sob sistemas de uso (mata nativa, pousio e preparo convencional).

Conforme CAVALIERI et al. (2011), o IHO é considerado um índice consolidado para avaliar a qualidade de solos cultivados. Todavia para GUBIANI et al. (2013) constataram que o intervalo hídrico ótimo é impreciso para dimensionar o risco de perdas na produção de grãos por efeito da compactação do solo. Com base no exposto, o uso intensivo de tráfego de máquinas no cultivo do milho pode afetar a qualidade estrutural do solo, mas não o suficiente para prejudicar o crescimento das raízes e a produtividade do milho. Sendo essa hipótese aceita, é importante identificar os valores aceitáveis dos atributos físicos em Latossolos cultivados com a cultura do milho.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A. de; GATIBONI, L. C. & ELTZ, F. L. F. Atividades agrícolas de produção em solos frágeis no sul do Brasil. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L. & GATIBONI, L. C., ed. Tópicos em ciência do solo. 7 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2011. p.367-403.
- BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. & SILVA, D. D. Infiltração da água no solo. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.
- CALONEGO, J. C.; SANTOS, C. H.; TIRITAN, C. S. & CUNHA JÚNIOR, J. R. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. Revista Caatinga, 25: 128-135, 2012.
- CASTRO NETO, P. Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas. Botucatu, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2001. 155 p. (Tese de Doutorado).
- FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C. & LIMA, S. L. de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. Pesq. Agropec. Bras., 38: 947-953, 2003.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P. & LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I- Características de planta, solo e índice S. R. Bras. Ci. Solo, 33: 793-803, 2009a.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P. & PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II- Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. R. Bras. Ci. Solo, 33: 805-818, 2009b.

GUBIANI, P. I.; GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M. & REINERT, D. J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. R. Bras. Ci. Solo, 37: 1502-1511, 2013.

HÅKANSSON, I. & VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C. & STEWART, B. A., ed. Methods for assessment of soil degradation. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 167-179. (Advances in Soil Science).

HAMZA, M. A. & ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil Till. Res., 82: 121-145, 2005.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; PAULETTO, E. A.; FAGANELLO, A. & PINTO, L. F. S. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. Geoderma, 259-260: 149-155, 2015.

OMUTO, C. T. Assessment of soil physical degradation in Eastern Kenya by use of a sequential soil testing protocol. Agric. Ecosyst. Environ., 128:199-211, 2008.

REICHARDT, K. & TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações . 2 ed. Barueri: Manole, 2012. 524 p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S. & HORN, R. Mecânica do solo. In: DE JONG VAN LIER, Q., ed. Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.29-102.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 58: 1775-1781, 1994.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S. & TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. R. Bras. Ci. Solo, 28: 533-542, 2004.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. R. Bras. Ci. Solo, 32: 33-42, 2008.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 22: 573-581, 1998.

## **CAPÍTULO 2 – VALIDAÇÃO DO ÍNDICE S COMO INDICADOR DA QUALIDADE ESTRUTURAL EM LATOSSOLOS COMPACTADOS CULTIVADOS COM MILHO**

**RESUMO** – Uma maneira de prevenir a degradação do solo é monitorar a sua qualidade estrutural por meio de atributos físicos. O objetivo desse trabalho é avaliar a qualidade estrutural do solo por meio do índice S, após a compactação induzida por tratores em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef), cultivados com milho. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos foram: T0= preparo convencional sem compactação adicional; T1, T2 e T3= uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente; T4= três passadas do trator de 10 t. Foram avaliadas nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m a curva de retenção de água, a densidade, a porosidade e o índice S dos solos. Os valores de S no LVd foram semelhantes (0,035 a 0,037) no T0, T1 e T2. Além disso, verificou-se que os comportamentos desses valores entre os tratamentos e camadas foram influenciados pela macroporosidade no LVd. Para o LVef, a maioria dos valores do índice S situaram acima de 0,035 com exceção do T4 (0,026). Esse fato é uma consequência dos maiores valores de densidade no LVef na camada de 0-0,20 m no T4. Não foram observadas correlações significativas entre índice S no LVd e LVef com a produtividade de milho. Portanto, o índice S não foi um atributo confiável para caracterizar a qualidade estrutural em Latossolos em relação à produtividade de milho.

**Palavras chave** – Tráfego de máquinas, manejo do solo, compactação.

## INTRODUÇÃO

A crescente mecanização agrícola associada ao aumento na capacidade operacional das máquinas, e da intensidade de tráfego inadequado podem causar alterações prejudiciais à estrutura do solo e ao crescimento das plantas. A compactação do solo é mencionada como uma das principais causas da degradação de solos agrícolas, a qual implica na diminuição da capacidade produtiva devido ao seu uso intensivo e indiscriminado que conduz a mudanças adversas nas propriedades do solo. Esse comportamento contempla no aumento da densidade e resistência do solo, na redução da capacidade de aeração e da permeabilidade ao ar e água (REICHERT et al., 2007) e impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular (MARCHÃO et al., 2007). Logo, é fundamental haver qualidade estrutural do solo para manter a sustentabilidade dos sistemas agropecuários.

O índice S, introduzido no Brasil com base no trabalho de DEXTER (2004), calculado a partir da curva de retenção de água no solo (CRA), é um parâmetro que avalia a porosidade estrutural que corresponde às microfendas, fendas, bioporos e poros macroestruturais resultantes do uso e manejo. Sendo o maior valor de S equivalente a maior inclinação da CRA, indicando melhor distribuição de poros e maiores quantidades de poros com maior diâmetro. Segundo esse autor, em solos da Polônia e da Inglaterra, pode-se estabelecer que o limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural ocorre no valor aproximado de  $S = 0,035$ . Salientando ainda que valores de  $S < 0,020$  com conteúdo de argila entre 4 a 73% indicam predomínio de porosidade textural, o que está associado a piores condições físicas do solo. Porém, esses valores não se referem a solos tropicais. Assim, ANDRADE & STONE (2009) realizaram um estudo com o índice S que abrangeu solos sob cerrado das regiões centro-oeste e nordeste do Brasil. Esses autores verificaram que o valor limite de  $S = 0,045$  mostrou-se adequado à divisão entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendência a se tornar degradado, enquanto valores de  $S \leq 0,025$  indicam solos inteiramente degradados fisicamente.

Segundo CUNHA et al. (2011) o índice S mostrou-se adequado como indicador da qualidade física do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em sistema convencional e direto, pois correlacionou-se de maneira significativa e negativa com

a densidade do solo e microporosidade, e positivamente com a macroporosidade, porosidade total e teor de matéria orgânica. De acordo com ROSSETTI et al. (2013), o índice S não é recomendável como indicador absoluto de qualidade física em LVd sob diferentes tempos e manejos (plantio direto e preparo convencional) mesmo na presença de valores superiores ou próximos a 0,035. Essa constatação, também foi reportada por DE JONG VAN LIER (2014), que explicita o fato de ser questionável a dedução do comportamento do solo com base somente nos valores de S.

A hipótese desta pesquisa é que a determinação do índice S não é suficiente para caracterizar a qualidade estrutural do solo e relacioná-la a produtividade de milho.

O objetivo deste estudo foi utilizar o índice S para avaliar a qualidade estrutural após a compactação induzida por tratores em Latossolos cultivados com milho.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi realizado entre as coordenadas geográficas de 21°14'05" S, 48°17'09" W, com altitude de 615 m. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação pluvial média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21°C. Os solos foram caracterizados por ANDRIOLI & CENTURION (1999) e correspondendo a EMBRAPA (2013) como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico-hipoférrico (LVd), cujo material de origem derivou-se principalmente de arenitos do Grupo Bauru nas porções mais elevadas e planas e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférrico, típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef) originado principalmente dos produtos da alteração dos basaltos (Formação Serra Geral) subjacentes aos arenitos. Os solos apresentaram, na camada de 0-0,20 m, 348 e 560 g kg<sup>-1</sup> de argila, 598 e 240 g kg<sup>-1</sup> de areia, 54 e 200 g kg<sup>-1</sup> de silte, 2,89 e 2,74 kg dm<sup>-3</sup> de densidade de partículas, respectivamente, no LVd e LVef. Antes da instalação dos experimentos, foi realizada a escarificação

até 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem leve no sentido perpendicular a área.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados em parcelas subdivididas, com cinco tratamentos e quatro repetições. Toda parcela experimental apresentou cinco linhas de milho com 6m de comprimento, considerando-se útil as três linhas centrais e desprezando-se 1,5 m de cada extremidade. A indução à compactação do solo foi realizada no dia 26 de novembro de 2012, dois dias após intensa precipitação pluvial, quando o solo possuía um conteúdo de água próximo à capacidade de campo na camada de 0-0,20 m de profundidade, determinado conforme EMBRAPA (2011). O conteúdo de água no solo foi de 0,12 e 0,22 kg kg<sup>-1</sup> para o LVd e LVef, respectivamente.

Os tratamentos foram constituídos por: T0= sem tráfego adicional de trator; T1, T2 e T3= uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente; T4= três passadas do trator de 10 t, no sentido transversal a área. A compactação foi realizada por meio da passagem dos rodados desses tratores, perfazendo toda a superfície da parcela, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram variaram conforme o tratamento; o tráfego foi sobreposto ao anterior, de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes. Sendo em parcelas subdivididas, formadas pelas camadas 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade, com quatro repetições. Como testemunha para avaliação dos atributos físicos do solo, foram utilizadas áreas de mata nativa adjacentes de ambos os solos.

Para estabelecer o tratamento T1 utilizou-se o trator Ford 5610 de 56 kW (70 cv), tração 4 x 2 e massa de 4t, com distribuição de 30% da massa total nas rodas diagonais dianteiras e 70% nas rodas radiais traseiras. O trator utilizado para o tratamento T2 foi o Massey Ferguson 620 de 77 kW (105 cv), tração 4 x 2 TDA (tração dianteira auxiliar) e massa de 7t, com distribuição de 40% da massa total nas rodas radiais dianteiras e 60% nas rodas radiais traseiras. Para os tratamentos T3 e T4 foram utilizados uma pá carregadora Caterpillar 924 F de 105 kW (143 cv), tração 4 x 4, pneus 17.5 R 25, radial (L-3), massa de 10t e com a concha vazia.

A semeadura do milho (híbrido simples Maximus) foi efetuada no dia 11 de dezembro de 2012, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto com cinco linhas, no sentido transversal a área. O mecanismo sulcador do solo da semeadora foi retirado para não eliminar os possíveis efeitos negativos da compactação, sendo utilizado somente o disco de corte do dosador de sementes. A densidade de semeadura foi de cinco a seis sementes por metro, com espaçamento entrelinhas de 0,90m. A análise química do solo foi realizada conforme RAIJ et al. (2001) (Tabela 1). A adubação na semeadura consistiu da aplicação de 340 kg ha<sup>-1</sup> da formulação N-P-K (8-28-16) para a obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 t ha<sup>-1</sup>, segundo recomendação de RAIJ et al. (1997). A adubação de cobertura foi realizada no estágio V6 da cultura com 250 kg ha<sup>-1</sup> da formulação N-P-K (20-0-20) em superfície, ao lado da linha de semeadura, com a mesma adubadora utilizada na semeadura. Para os tratos culturais utilizou-se o trator Massey Ferguson 620.

Para a determinação dos atributos físicos, foram coletadas em 21 de janeiro de 2013 em quatro pontos aleatórios em cada tratamento, amostras indeformadas na entrelinha da cultura com cilindros de 53,18 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> (0,032 m de altura e 0,046 m de diâmetro) no ponto médio de cada amostra. As amostras foram saturadas por meio de elevação gradual de uma lâmina de água em uma bandeja até dois terços de altura da amostra e, em seguida, submetidas às tensões de -0,001, -0,003, -0,006, -0,01, -0,033, -0,06, -0,1 e -0,3 MPa, em câmaras de Richards (DANE & HOPMANS, 2002). Ao atingirem o equilíbrio, foram pesadas e, na sequência, secas em estufa a 105°C durante 24 h, para a determinação do conteúdo de água em cada tensão e da densidade do solo (GROSSMAN & REINSCH, 2002). A microporosidade foi determinada por secagem na tensão de -0,01 MPa e a macroporosidade foi calculada como sendo a diferença entre a porosidade total e a microporosidade (FLINT & FLINT, 2002). A tensão de 1,5 MPa foi determinada em psicrômetro de termopar do modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter (DECAGON DEVICE, 2000). Os dados de retenção de água foram ajustados em volume (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e gravimétrico (kg kg<sup>-1</sup>) por meio do software SWRC (DOURADO NETO et al., 2001) à equação proposta por van GENUCHTEN (1980):

$$\theta = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}})[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{\text{res}} \quad \text{Eq. 1}$$

em que:  $\alpha$ ,  $h$ ,  $n$  e  $m$  são parâmetros que definem o formato da curva; e  $\theta_{sat}$  e  $\theta_{res}$ , a umidade na saturação e residual, respectivamente.

Determinou-se, com base nos parâmetros obtidos, o índice  $S$ , tangente à curva característica de água no solo no ponto de inflexão, com o uso da equação proposta por DEXTER (2004): [-1 (1 + m) = sobrescrito]

$$S = -n (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right] - (1 + m) \quad \text{Eq. 2}$$

Em 18 de abril de 2013 após o estágio de maturidade fisiológica dos grãos, foram avaliados em 20 plantas por parcela a altura das plantas e a massa de grãos. Quando a umidade dos grãos foi superior a 25%, foram colhidas manualmente as espigas de duas linhas úteis de 2,0 m (foi descartado 0,5 m em cada extremidade da linha de 3,0 m), para debulha e determinação da massa de grãos. A produtividade de grãos de milho foi obtida extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela para 1 ha, ajustando-se a umidade dos grãos para 13%.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo software ASSISTAT versão 7.5 beta; e quando significativa às médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% e também foram realizadas as correlações para as combinações duas a duas, entre o índice  $S$  com a densidade e a macroporosidade dos solos, altura de plantas e produtividade de grãos de milho.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tráfego de máquinas alterou a densidade do solo ( $D_s$ ) predominantemente com menor intensidade até 0,10 m de profundidade, uma vez que a camada subsuperficial (0,10-0,30 m) apresentou um aumento expressivo da compactação em T1, T3 (uma passada do trator de 4 e 10 t, respectivamente) e T4 (três passadas do trator de 10 t) no LVd e T0 (sem tráfego adicional) ao T3 no LVef (Tabela 2). É evidente quando se compara os mesmos tratamentos em ambos os solos, que no LVef os valores de  $D_s$  são menores. Essa justificativa, também foi constatada por

REICHERT et al. (2009) que conseguiram afirmar após analisar um banco de dados de literatura que a densidade crítica do solo decresce com o aumento do conteúdo de argila.

Alguns valores de  $D_s$  apresentados ultrapassaram 1,25 a 1,30 e de 1,30 a 1,40  $\text{Mg m}^{-3}$ , respectivamente, considerados como críticos em intervalo hídrico ótimo zero para solo de textura muito argilosa e argilosa (REICHERT et al., 2007). Além disso, há concordância com as observações de SECCO et al. (2009). Esses autores afirmaram que valores médios de  $D_s$  em Latossolo Vermelho distroférico (610  $\text{g kg}^{-1}$  de argila) de 1,54  $\text{Mg m}^{-3}$  e de resistência à penetração de 3,26 MPa foram suficientemente elevados para reduzir o rendimento de grãos da cultura de milho.

Neste aspecto BERGAMIN et al. (2010) obtiveram acréscimo da  $D_s$ , na camada de 0-0,10 m, em Latossolo Vermelho distroférico argiloso a partir de duas passadas do trator de 5 t no plantio direto em relação ao tratamento sem compactação adicional. Segundo esses autores, o acréscimo do número de passadas para quatro e seis vezes não aumentou a  $D_s$  em comparação a duas passadas. Nota-se neste estudo, que com o início da compactação adicional em T1, observou-se incremento da  $D_s$  na camada superficial a partir do T2 (uma passada do trator de 7 t) no LVd, apesar do T1 ser igual ao T2 no LVd, e apenas do T4 no LVef. Isso significa que o alto teor de matéria orgânica e de argila no LVef, são os responsáveis em suportar de forma mais eficiente a intensidade do tráfego do trator de 10 t, em comparação ao LVd. O fato da  $D_s$  do preparo convencional (T0) ter apresentado semelhança com a maioria dos tratamentos que receberam compactação adicional de tratores na camada superficial de ambos os solos, pode ser justificado devido a época de amostragem de solo, que ocorreu um mês e 10 dias após a semeadura. De acordo com SILVA et al. (2012b), o efeito benéfico da escarificação em reduzir a densidade do solo possui uma melhora temporária, pois foi observado que após 6 meses de preparo convencional, a  $D_s$  passou a ter acréscimo em 20% e que tal comportamento permaneceu estável por mais um ano, tendendo a um estado de estabilização.

Quando se compara na camada de 0-0,10 m apenas uma passada dos tratores no uso do LVd como o trator mais leve de 4 t (T1), esse conferiu menor  $D_s$  e

essa condição permaneceu em T2 (7 t), sendo o acréscimo observado somente a partir do T3 (10 t). Em comparação ao LVef nessa mesma camada, a massa dos tratores não influenciou a Ds na situação de uma passada. Já que quando foi trafegado três vezes pelo trator de 10 t (T4), a Ds foi superior em comparação aos demais tratamentos na camada superficial. Isso resultou em redução de 34,5% da macroporosidade do T4 no LVef em relação ao T0. Na camada de 0,10-0,30 m, observa-se que o volume de macroporos no LVef não foi alterado em profundidade entre os tratamentos e foi independente do número de passadas e da massa dos tratores discordando do estudo de SERVADIO et al. (2005). Para esses autores com as passadas de trator ocorre a diminuição da macroporosidade em relação às áreas sem tráfego.

O comportamento no LVef neste estudo vigente, concorda com a observação relatada por FREDDI et al. (2009) de que o tráfego de tratores modifica a macroporosidade apenas na profundidade superficial (0-0,20 m). Com exceção para o T0 e T3 na camada de 0,10-0,30 m, que apresentaram decréscimo da macroporosidade em comparação a primeira camada. No T0 esse fato deve-se às operações de preparo do solo. Segundo constatação de SCHAFER et al. (2001) o uso da grade pesada resultou em diminuição aparente da macroporosidade (mac) e em aumento do adensamento na superfície do solo. Valores inferiores de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de mac no LVef foram apresentados na camada de 0,20-0,30 m no T1 ( $0,084 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), no T3 em 0,10-0,30 m de profundidade ( $0,098$  e  $0,089 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e para o T4 em todas as camadas estudadas ( $0,067$ ;  $0,091$  e  $0,082 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Esses resultados conforme COLLARES et al. (2008) podem indicar provável limitação a aeração do solo mesmo em épocas mais úmidas.

Não houve interação entre os tratamentos e as camadas analisadas em relação à microporosidade (mic) no LVef e mac e mic no LVd (Tabela 3). Os T3 e T4 no LVd apresentaram os menores valores de mac em comparação aos demais tratamentos e observou-se decréscimo em profundidade. Em ambos os solos verifica-se que a mic não foi sensível às modificações causadas pelo tráfego dos tratores e nem no preparo convencional. No caso do LVd, houve acréscimo da mic

na camada de 0-0,10 para 0,10-0,20 m, o mesmo fato não confere para a situação no LVef.

Nas tabelas 4 e 5 estão as médias dos parâmetros de ajuste da equação 1, que contribuíram para a modelagem da curva de retenção de água (CRA), e também os valores médios da equação 2. Assim, pode-se analisar possíveis diferenças nos níveis de compactação entre os manejos estudados. Salieta-se que a umidade residual ( $\theta_{res}$ ) no LVd e LVef e a umidade de saturação ( $\theta_{sat}$ ) no LVd não apresentaram interação significativa entre os tratamentos pesquisados com as camadas avaliadas. Os valores de  $\theta_{sat}$  foram menores no T3 e T4 e os  $\theta_{res}$  foram semelhantes entre os manejos de solos estudados. A MN teve valores próximos dos demais manejos em relação a esses parâmetros, apesar de possuir elevado conteúdo de MO. O dado  $n$ , determina o formato da CRA e revelou pequena diferença estatística entre os manejos dos LVd e LVef em relação a MN (Tabela 4). O  $\alpha$  está correlacionado com o inverso da pressão de ar que entra no solo durante o secamento. Sob essas condições, alto valor de  $\alpha$  indica uma rápida troca no conteúdo de água e baixo valor de  $\alpha$  configura mínima troca de água em pressões mais negativas. Sendo, que esse último comportamento geralmente ocorre em solos com textura mais finas e desestruturados (HODNETT & TOMASELLA, 2002). Dessa maneira, comprova-se a coerência dos baixos valores de  $\alpha$  observados no LVef em relação ao LVd. Sendo assim, justifica-se as diferenças nos formatos das curvas de retenção pelos parâmetros  $n$ ,  $\theta_{sat}$ ,  $\alpha$  e  $\theta_{res}$  entre os tratamentos. Nas tensões de -0,01 MPa, as maiores retenções de água no LVd entre os manejos cultivados ocorreram para o T2 e T1 (0-0,10 m), T0 (0,10-0,20 m) e T0 e T2 (0,20-0,30 m). Todavia esses resultados não seguiram o volume de microporos, pois esses tratamentos apresentaram comportamento semelhante (Figura 1). Quando se observa a curva de retenção de água (CRA) no LVef, esse foi superior no T1 (0-0,10 e 0,20-0,30 m) e T3 (0,10-0,20 m). Dessa maneira, mais uma vez a microporosidade não conseguiu explicar tal resultado. É evidente que as CRAs seguiram a tendência LVd < LVef, e estão relacionadas diretamente à influência do teor de matéria orgânica (MO) que pode determinar alterações na quantidade e distribuição de poros. Segundo BEUTLER et al. (2002), a maior CRA em baixas tensões para o

LVef oxídico em relação ao LVd caulínítico deve-se entre outros fatores, à mineralogia oxídica da fração argila, que promove a formação de microagregados arredondados com menos de 1 mm, promovendo maior proporção de poros grandes e menor Ds. Neste estudo, a CRA não foi positivamente relacionada com a densidade do solo, ao contrário de BETIOLI et al. (2012) em Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto.

Em LVd FREDDI et al. (2009) reportaram que uma passada do trator de 4 t, que é considerado um trator leve e de pequeno porte, foi suficiente para reduzir o valor do índice S próximo ao valor de 0,035 nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Nos tratamentos estudados foram obtidos no LVd valores de S semelhantes (0,035 a 0,037) no T0, T1 e T2 (Tabela 3). Verificou-se nesse solo, que mantendo o padrão de passada e apenas promovendo o incremento da massa do trator para 10 t, já foi suficiente para reduzir o valor do índice S para 0,016 na situação do T3. Constatou-se que quando o LVd sofreu três passadas da mesma massa do trator (10 t), esse tratamento não apresentou variação para o mesmo atributo analisado. Portanto a redução do S em T3 e T4 em relação aos demais tratamentos no LVd deve estar associada segundo DEXTER (2004) à diminuição do pico da distribuição de frequência de poros, resultando em “achatamento” vertical da CRA, pela redução dos poros estruturais. Conforme esse autor, valores de  $S < 0,020$  indicam conforme relatou DEXTER (2004) estrutura física extremamente degradada. Além disso, constata-se que o comportamento dos valores de S entre os tratamentos e camadas relatados contemplam a macroporosidade deste solo, concordando com os resultados de ARGENTON et al. (2005).

Valores médios de S próximos a 0,020, também foram constatados por CAVALIERI et al. (2011) em Latossolo Vermelho de textura média até 0,40 m de profundidade após a colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Contudo, SOUZA et al. (2013) puderam observar maior valor do índice S (0,048) quando o Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa foi submetido a um tráfego do trator de 6,8 t. Sendo esse resultado igual ao T0 e próximo ao T2 no LVef deste estudo. Todavia esses autores salientam que para três e seis tráfegos os valores de S foram de

0,032 e 0,029, respectivamente e dessa maneira o S pode ser considerado sensível na redução da qualidade física do solo. Mesmo com os diversos trabalhos encontrados na literatura sobre o índice S, OLIVEIRA et al. (2014) ressaltam que ainda há dificuldade de fixar valores de referência.

Para a condição no LVef, a maioria dos valores do índice S ficaram acima de 0,035 com exceção do T4 (0,026). Esse resultado é uma consequência dos elevados valores de Ds na camada de 0-0,20 m do T4. Nota-se que o T3 encontra-se em uma situação intermediária, pois é semelhante aos demais manejos. Assim como ocorreu no LVd, o preparo convencional no LVef (T0) apresentou valores semelhante de S em relação aos manejos que receberam uma menor massa de compactação (T1 e T2) além do T3. Salienta-se que no T0 e T2 do LVef foram apresentados valores superiores a 0,045, limite considerado de acordo com ANDRADE & STONE (2009) como sendo o mais adequado para solos tropicais. Esse solo também não mostrou diferença significativa entre camadas para o índice S, porém o mesmo raciocínio não pode ser aplicado a Ds. Para esse último atributo citado, prevaleceu o seu incremento no sentido de 0-0,10 m à 0,10-0,20 m, com exceção ao T4 no LVef e aos T0 e T2 no LVd, para os quais não verificaram-se efeito da transmissão de carga dos tratores.

Comprova-se neste estudo maiores valores de S na mata nativa de 0,059 e 0,071 tanto no LVd e LVef, respectivamente em relação aos demais manejos, sendo consequência dos teores de MO. Dessa forma, pode-se afirmar que a área sem ação antrópica possui boa qualidade física do solo. O melhor desempenho do índice S (0,121 a 0,125) em Argissolo Amarelo sob mata nativa, também foi reportado por ARAÚJO et al. (2013) em comparação a áreas cultivadas. Esse fato confirma a consequência da não interferência na estrutura do solo. Comportamento semelhante foi observado por STRECK et al. (2008), em que valores do índice S foram maiores em solo sob floresta quando comparados aos solos cultivados em plantio direto. De acordo com esses autores, o maior valor de S em floresta indica a melhor configuração de poros e, portanto, menor restrição física para o crescimento radicular, seja por aeração, restrição mecânica ou por características de retenção da água. Esse resultado também corrobora a CUNHA et al. (2012), que também

observaram em solo sob mata nativa uma qualidade estrutural superior ao solo cultivado.

Quando se considera o conjunto das três camadas de solos cultivados (0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) os valores médios do índice S correlacionaram-se significativamente com a densidade, macroporosidade e altura (Alt) de milho em ambos os solos (Figuras 2 e 3). Contudo a correlação com a produtividade (Prod) de milho não foi significativa. As correlações entre  $D_s \times S$  e  $mac \times S$  ajustaram-se ao modelo linear, seguido de correlação negativa e positiva respectivamente, concordando com os resultados obtidos por CUNHA et al. (2011). Em avaliação ao índice S em Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes usos e manejos (preparo convencional, anos de adoção de plantio direto e mata nativa), ARATANI et al. (2009) também constataram correlação positiva da macroporosidade em relação ao índice S. Correlação também negativa entre a  $D_s$  e o S foi encontrado por SILVA et al. (2012a) em LVd de textura muito argilosa, de forma que quando a  $D_s$  aumenta o índice S reduz. Os autores citados ainda salientam a sensibilidade desse índice como indicador da mudança estrutural do solo, mesmo sendo esta muito pequena e concluem que o S é uma boa ferramenta.

Relacionado a esse assunto os valores de S para o T0 no LVd (0,037) e no LVef (0,048) estão bem distantes dos da MN assim como o volume de macroporos. Neste aspecto, GUEDES et al. (2012) reforçam que altos valores de índice S foram obtidos na área de floresta em Latossolo Amarelo em todas as camadas pesquisadas que incluem até 0,20 m. Esse comportamento não diferiu do preparo convencional até 0,10 m, provavelmente segundo os autores ao recente preparo do solo. Considerando-se  $S = 0,035$ , o limite de DEXTER (2004) para solos com boa qualidade estrutural, os valores limites foram:  $D_s = 1,59$  e  $1,54 \text{ kg dm}^{-3}$  para LVd e LVef, respectivamente,  $mac = 0,156$  e  $0,099 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  em LVd e LVef, respectivamente. Observou-se no LVef, que a proposta limite de S se igualou a condição mínima adequada de macroporosidade para o crescimento e desenvolvimento das raízes. Logo é um indício de fragilidade da obtenção onerosa do índice S, já que a determinação da macroporosidade nesse caso ofereceu uma resposta similar ao S. É importante ressaltar que os solos reagem diferentemente a uma mesma pressão

aplicada, apesar da  $D_s$  ter se mostrado quase similar para ambos os solos quando o  $S = 0,035$  o mesmo não ocorreu para a mac no LVef. Uma vez que o alto conteúdo de água no momento da compactação aliado a altos teores de MO e argila do LVef, potencializaram a maior retenção de água e conseqüentemente promoveu o decréscimo da macroporosidade.

Por outro lado CAVALIERI et al. (2009) em condição sob Latossolo Vermelho com  $470 \text{ g kg}^{-1}$  de argila observaram que a densidade crítica foi de  $1,27 \text{ g cm}^{-3}$  após 14 anos de plantio direto com base em  $S = 0,035$  de DEXTER (2004). Nesse caso, comparando com o resultado deste estudo a contribuição do longo tempo de duração de um sistema conservacionista, não foi eficiente em postergar o limite crítico da  $D_s$ . Com base, na equação de correlação do índice  $S$  com a  $D_s$  e a mac para solos argilosos apresentada por ANDRADE & STONE (2009) com o valor de  $S = 0,045$ , pode-se estabelecer algumas estimativas neste estudo. Os valores de  $D_s$  de  $1,37 \text{ kg dm}^{-3}$  e mac de  $0,135 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para o LVef, deveriam corresponder de acordo com esses valores estimados em  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Portanto os valores de  $S$  deste estudo estão muito próximos do determinado pela equação e serve para validar a mesma.

A máxima produtividade é atingida em  $8,74 \text{ t ha}^{-1}$  quando o  $S$  é de  $0,03$  (Figura 3) no LVd. Sendo assim, pode-se afirmar que valores de  $S$  superiores ou inferiores a  $0,03$  provavelmente indicam redução da produtividade de milho. Destaca-se que apesar do comportamento ser não significativo, trata-se de um resultado. Em  $S < 0,03$  observa-se uma queda na produtividade de  $1,98$  e  $1,46 \text{ t ha}^{-1}$  para o T3 e T4, respectivamente, numa variação de apenas  $0,014$  em  $S$ . Verifica-se que o dado referente a  $9,23 \text{ t ha}^{-1}$  de Prod do T0 encontra-se distante da curva polinomial representativa para os demais tratamentos e por isso é descartado dessa explicação. Quando há um pequeno acréscimo da ordem de  $0,01$  e  $0,005$  de  $S$  a Prod passa a ser de  $7,57$  e  $7,93 \text{ t ha}^{-1}$  para o T1 e T2, respectivamente. Justificando-se assim o resultado contraditório de FREDDI et al. (2009), em que notaram somente abaixo de  $0,035$  de  $S$  uma queda acentuada na produtividade de milho em manejos de compactações induzidas por tratores. Todavia, há divergência de valor restritivo uma vez que para BEUTLER et al. (2008) a partir de  $S = 0,062$  também em

LVd a produtividade de milho decresceu em condições que priorizam tráfegos intensivos de máquinas agrícolas. Logo neste estudo o índice S no LVd não correspondeu em uma coerência as alterações impostas à estrutura do solo pelo tráfego de máquinas, pois valores de  $S < 0,035$  e de  $S \geq 0,035$  corresponderam em decréscimo da produtividade de milho.

Pode-se por meio de correlações positivas e significativas observar, que no valor de  $S = 0,035$  a altura do milho no LVd (2,01 m) foi superior ao do LVef (1,60 m). Comportamento similar também foi verificado para a produtividade quando se fixa esse valor de índice. Mesmo com maiores valores de  $D_s$  no LVd, por causa da mineralogia predominante, do maior teor de areia ( $598 \text{ g kg}^{-1}$  de areia total) e de densidade de partícula ( $2,89 \text{ kg dm}^{-3}$ ) em comparação ao LVef.

Como o índice S é desprovido de significado físico e é sempre apresentado sem unidade física, para assegurar a sua veracidade é necessário compará-lo a outro atributo físico. Partindo desse pressuposto, como já foi constatado o índice S no LVd apresentou comportamento idêntico a macroporosidade para todos os tratamentos. Portanto, esse fato evidencia que se pode substituir a determinação do índice S pela porosidade do solo. Assim, sugere-se um caminho mais simples ao invés de quantificar a curva de umidade do solo, fazer o ajuste a equação de van Genuchten e obter a derivada segunda. Entretanto, no LVef não houve similaridade entre índice S e macroporosidade devido ao tratamento T4. Conforme MONCADA et al. (2015) relataram, não ocorreu uma tendência clara entre altos valores de S de solos temperados e tropicais de textura média com boa condição para produção de grãos e nem baixos valores de S corresponderam a condições limitantes. Segundo os autores, a proposta de apresentar um valor crítico de referência de S não é geralmente válido e nem aplicável igualmente para todas as classes de solo.

Desta maneira, reafirma-se a constatação de DE JONG VAN LIER (2012) de que o uso do índice S necessita cautela. Pois, segundo esse autor o valor desse índice como indicador, em termos absolutos, não determina a qualidade física de um solo. Esse fato também foi verificado posteriormente por ROSSETTI et al. (2013). Neste sentido, ANGHINONI et al. (2013) constataram que as ferramentas utilizadas atualmente para avaliar a qualidade física do solo são insuficientes diante dos

processos atuantes. Além disso, valores restritivos de S para a estrutura do solo não devem ser considerados como limites universais. Pois como foi reportado neste estudo as correlações de  $D_s$ ,  $mac$ ,  $Prod$  e  $Alt$  com o índice S sofreram alterações para cada classe de solo. Diante desta situação, LIMA et al. (2014) enfatizam que o valor do S pode ser usado como parâmetro complementar para a descrição morfológica do solo no campo.

A constatação de SILVA et al. (2012a), de que o índice S é uma boa ferramenta de diagnóstico da qualidade estrutural do solo, deve ser analisada com critério. Assim, como a afirmação de CAVALIERI et al. (2011) que justificam a indicação do índice S na avaliação da qualidade física do solo. Esses autores baseiam no simples fato do comportamento de S ter sido similar a um outro índice consolidado nesse tipo de avaliação, que é o intervalo hídrico ótimo. Do ponto de vista de DE JONG VAN LIER (2014) os esforços de pesquisa em física do solo deveriam se deslocar na direção da física do solo mecânica, em detrimento da busca por correlações empíricas como S, que atualmente, representa muito mais do que deveria na física do solo no Brasil.

## **CONCLUSÕES**

É dispensável a correlação entre índice S e produtividade de milho no LVd e LVef.

A determinação do índice S correspondeu ao comportamento da macroporosidade no LVd, sendo portanto um parâmetro desnecessário para ser avaliado nesse solo.

O índice S não é um atributo confiável para caracterizar a qualidade estrutural em Latossolos, mesmo apresentando em sua minoria valores  $\leq 0,026$  nos tratamentos submetidos ao tráfego intensivo.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, R. S. & STONE, L. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 13: 382-388, 2009.

ANDRIOLI, I. & CENTURION, J. F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: Anais da 27<sup>ª</sup>. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo [CD-ROM]; Brasília. Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; VALADÃO, S. E. & COSTA, G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. In: ARAÚJO, A. P. & ALVES, B. J. R., eds. Tópicos em Ciência do solo. 8. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 325-380.

ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F. & ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 33: 677-687, 2009.

ARAÚJO, E. M.; GONZAGA, M. I. S. & SILVA, T. L. da. Estudo da qualidade do solo tendo como parâmetro o índice S de um Argissolo Amarelo submetido a diferentes manejos no perímetro irrigado Platô de Neópolis-SE. In: Anais da 34<sup>ª</sup>. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Florianópolis [internet]. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. [acesso em 03 jan 2015]. Disponível em: <http://www.eventosolos.org.br/cbcs2013/>.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A. & BAYER, C. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. R. Bras. Ci. Solo, 29: 425-435, 2005.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A. de & SOUZA, F. R. de. Compactação de um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. R. Bras. Ci. Solo, 34: 681-691, 2010.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W.H.; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C.B.; SILVA, A.P. & GIAROLA, N.F.B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 36:971-982, 2012.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M. de; ANDRIOLI, I. & ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. R. Bras. Ci. Solo. 26: 829-834, 2002.

BEUTLER, A. N.; FREDDI, O. S.; LEONEL, C. L. & CENTURION, J. F. Densidade do solo relativa e parâmetro "S" como indicadores da qualidade física para culturas anuais. Rev. Biol. Ci. Terra, 8: 27-36, 2008.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A. de; SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L. & TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. R. Bras. Ci. Solo, 35: 1541-1549, 2011.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R. & HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamics soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. Soil Till. Res., 103: 158-164, 2009.

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. R. Bras. Ci. Solo, 32: 933-942, 2008.

CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N.; PIMENTA, W. A.; PATROCÍNIO FILHO, A. P.; SOUZA, E. B. de & NAGAHAMA, H. J. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 38: 1000-1010, 2014.

CUNHA, E. de Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. de B.; DIDONET, A. D. & MOREIRA, J. A. A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 6: 56-63, 2012.

CUNHA, E. de Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D. & LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I-Atributos físicos do solo. R. Bras. Ci. Solo, 35: 589-602, 2011.

DANE, J. H. & HOPMANS, J. W. Pressure plate extractor. In: DANE, J. H. & TOPP, C., ed. Methods of soil analysis: physical methods. Madison: Soil Science Society America, 2002. p. 688-690.

DECAGON, Devices, INC. Operator's manual version 1.3 WP4-T dewpoint-meter. USA: Decagon Devices, 2000.

DE JONG VAN LIER, Q. de. Índice "S": um indicador da qualidade física do solo? Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 37: 24-27, 2012.

DE JONG VAN LIER, Q. de. Revisiting the S-index for soil physical quality and its use in Brazil. R. Bras. Ci. Solo, 38: 1-10, 2014.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory. Effects of soil texture, density, and organic matter, effects on root growth. Geoderma, 120: 201-214, 2004.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. & LOPES, P. P. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo van Genuchten. Soil water retention curve, SWRC (version 3.0 beta) [internet]. Piracicaba: Universidade de São Paulo; 2001 [acesso em 05 jul 2012]. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/lpv/soft.htm>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análises de solo. 2ª edição revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/>>. Acesso em 03 mar. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

FLINT, L. E. & FLINT, A. L. Porosity. In: DANE, J. H. & TOPP, G. C., ed. Methods of soil analysis: Physical methods. Madison: Soil Science Society America, 2002. Part. 4, p. 241-253.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P. & LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I- Características de planta, solo e índice S. R. Bras. Ci. Solo, 33: 793-803, 2009.

GROSSMAN, R. B. & REINSCH, T. G. The solid phase, bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H. & TOPP, G. C., ed. Methods of soil analysis: Physical methods. Madison: Soil Science Society America, 2002. Part. 4, p. 201-228.

GUEDES, E. M. S.; FERNANDES, A. R.; LIMA, H. V. DE; SERRA, A. P.; COSTA, J. B. & GUEDES, R. F. Impacts of different management systems on the physical quality of an Amazonian Oxisol. R. Bras. Ci. Solo, 36: 1269-1277, 2012.

HODNETT, M. G. & TOMASSELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. Geoderma, 108: 155-180, 2002.

LIMA, H. V DE, SILVA, A. O. DA; GIAROLA, N. F. B. & IMHOFF, S. Index of soil physical quality of hardsetting soils on the Brazilian coast. R. Bras. Ci. Solo, 38: 1722-1730, 2014.

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G.; SÁ, M. A. C.; VILELA, L. & BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no cerrado. Pesq. Agropec. Bras., 42: 873-882, 2007.

MONCADA, M. P.; BALL, B. C.; GABRIELS, D.; LOBO, D. & CORNELIS, W. M. Evaluation of soil physical quality index S for some Tropical and Temperate medium-textured soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 79: 9-19, 2015.

OLIVEIRA, T. C.; SILVA, L. F. S. DA & COOPER, M. Evaluation of physical quality indices of a soil under a seasonal semideciduous forest. *R. Bras. Ci. Solo*, 38: 444-453, 2014.

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; O. C.; QUAGGIO, J. H. & FURLANI, A. M. C. A. Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. & REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S. & REICHERT, J.M., eds. Tópicos em ciência do solo. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; RAINER, H. & HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102: 242-254, 2009.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. & SOUSA NETO, E. L. de. Physical quality of an Oxisol after different periods of management systems. *R. Bras. Ci. Solo*, 37: 1522-1534, 2013.

SCHAFER, M. J.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. & CASSOL, E. A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25: 431-411, 2001.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. & SILVA, V. R. da. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ci. Rural*, 39: 58-64, 2009.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. & PAGLIAI, M. Effects on some soil qualities in Central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. *Soil Till. Res.*, 84: 87-100, 2005.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A. DE & OLIVEIRA, L. M. de. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. *Biosci. J.*, 28: 338-345, 2012a.

SILVA, S. G. C.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A. & SÁ, J. C. M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. *R. Bras. Ci. Solo*, 36: 547-555, 2012b.

SOUZA, F. R. DE, ROSA JÚNIOR, E. J.; FIETZ, C. R.; BERGAMIN, A. C.; MELO, J. S. DE & SANTANA, D. R. S. Índice S de um Latossolo Vermelho distroférrico submetido ao tráfego de trator agrícola e sistemas de manejo. In: *Anais da 34<sup>o</sup>. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, Florianópolis [internet]. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. [acesso em 03 jan 2015]. Disponível em: <http://www.eventosolos.org.br/cbcs2013/> /.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. & HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 32: 2603-2612, 2008.

VAN GENUCHTEN, M. T. A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-897, 1980.

**Tabela 1. Características químicas do LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e do LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef) na camada de 0-0,20m, antes da adubação**

Tratamento	pH	CaCl <sub>2</sub>	MO g dm <sup>-3</sup>	P <sub>resina</sub> mg dm <sup>-3</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H + Al	SB	CTC	V
					-----mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						%
LVd											
Cultivado	5,6		16	40	2,0	21	17	20	40	60	67
Mata nativa	5,6		30	9	1,6	53	15	22	70	92	76
LVef											
Cultivado	4,9		24	61	2,7	30	12	27	45	72	62
Mata nativa	5,9		56	20	3,3	57	25	15	85	100	85

**Tabela 2. Densidade (Ds) em LVd, macroporosidade (mac) e Ds em LVef sob diferentes manejos e mata nativa em camadas**

Camada (m)	T0	T1	T2	T3	T4	MN
LVd						
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )						
0-0,10	1,58 Aa	1,37 Bb	1,44 ABa	1,59 Ab	1,58 Ab	1,21
0,10-0,20	1,65 BCa	1,66 BCa	1,52 Ca	1,73 ABa	1,84 Aa	1,38
0,20-0,30	1,55 Ca	1,62 BCa	1,55 Ca	1,78 ABa	1,85 Aa	1,44
CV (%) <sup>1</sup> =6,58			CV (%) <sup>2</sup> =4,54			
LVef						
Ds (Mg m <sup>-3</sup> )						
0-0,10	1,35 Bb	1,30 Bb	1,24 Bb	1,21 Bb	1,69 Aa	0,98
0,10-0,20	1,47 BCa	1,51 Ba	1,36 Ca	1,51 Ba	1,66 Aa	1,05
0,20-0,30	1,37 Cab	1,47 BCa	1,34 Ca	1,58 ABa	1,64 Aa	1,14
CV (%) <sup>1</sup> =5,92			CV (%) <sup>2</sup> =3,92			
mac (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )						
0-0,10	0,194 Aa	0,132 Aa	0,139 Aa	0,188 Aa	0,067 Ba	0,338
0,10-0,20	0,136 Ab	0,115 Aa	0,103 Aa	0,098 Ab	0,091 Aa	0,300
0,20-0,30	0,131 Ab	0,084 Aa	0,129 Aa	0,089 Ab	0,082 Aa	0,299
CV (%) <sup>1</sup> =30,41			CV (%) <sup>2</sup> =23,84			

T0: sem compactação, T1, T2 e T3: uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, T4: três passadas do trator de 10 t e MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas) <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Letras maiúsculas referem-se à comparação de atributos do solo entre os tratamentos numa mesma camada (comparação na horizontal) e as minúsculas comparam médias de atributos do solo em camadas para um mesmo tratamento (comparação na vertical).

**Tabela 3. Macroporosidade (mac), microporosidade (mic) e índice S (S) em LVd e Mic e S em LVef sob diferentes manejos e mata nativa em camadas**

Tratamento	LVd			LVef	
	mac	mic	S	mic	S
		$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$		$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	
T0	0,156 a	0,220 a	0,037 a	0,349 a	0,048 a
T1	0,144 a	0,222 a	0,037 a	0,367 a	0,041 a
T2	0,176 a	0,219 a	0,035 a	0,354 a	0,046 a
T3	0,106 b	0,221 a	0,016 b	0,372 a	0,038 ab
T4	0,093 b	0,227 a	0,016 b	0,365 a	0,026 b
MN	0,220	0,228	0,059	0,339	0,071
CV (%) <sup>1</sup>	20,28	6,17	37,13	11,12	25,62
Camada					
0-0,10 m	0,168 a	0,217 b	0,036 a	0,343 a	0,045 a
MN	0,292	0,240	0,079	0,334	0,082
0,10-0,20 m	0,131 b	0,228 a	0,025 b	0,365 a	0,037 a
MN	0,188	0,215	0,037	0,330	0,077
0,20-0,30 m	0,106 c	0,219 ab	0,024 b	0,376 a	0,039 a
MN	0,181	0,229	0,049	0,353	0,052
CV (%) <sup>2</sup>	23,24	5,80	26,48	12,18	27,36

T0: sem compactação, T1, T2 e T3: uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, T4: três passadas do trator de 10 t e MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas). <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Médias seguidas da mesma letra, no sentido vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

**Tabela 4. Valores médios de umidade de saturação ( $\theta_{sat}$ ) e parâmetros da equação de van Genuchten (1980) em Latossolos sob diferentes tratamentos e camadas**

Tratamento	-----LVd-----		-----LVef-----		
	$\alpha$ ( $kPa^{-1}$ )	n	$\alpha$ ( $kPa^{-1}$ )	$\theta_{sat}$ ( $m^3 m^{-3}$ )	n
			0-0,10 m		
T0	0,15 Ba	1,26 Aa	0,04 Ba	0,56 Aab	1,27 Aa
T1	0,10 Ba	1,27 Aa	0,03 Ba	0,56 Aab	1,21 Ba
T2	0,12 Ba	1,26 Aa	0,04 Ba	0,258 Aa	1,28 Aa
T3	0,49 Aa	1,18 Ba	0,05 Ba	0,56 Aa	1,21 Ba
T4	0,19 Ba	1,17 Ba	0,15 Aa	0,52 Ba	1,15 Bb
MN	0,28	1,22	0,14	0,68	1,22
			0,10-0,20 m		
T0	0,15 Aa	1,18 Ab	0,05 Aa	0,58 Aa	1,25 Aab
T1	0,08 Aa	1,21 Ab	0,03 Aa	0,54 BCb	1,22 Aa
T2	0,16 Aa	1,18 Ab	0,05 Aa	0,55 ABab	1,20 ABb
T3	0,06 Ab	1,17 Aa	0,02 Aa	0,54 BCab	1,22 ABa
T4	0,07 Aa	1,17 Aa	0,03 Ab	0,51 Ca	1,16 Bb
MN	0,20	1,19	0,26	0,64	1,20
			0,20-0,30 m		
T0	0,18 ABa	1,20 Ab	0,04 Ba	0,54 Bb	1,22 ABb
T1	0,16 ABa	1,20 Ab	0,02 Aa	0,58 Aa	1,25 Aa
T2	0,21 Aa	1,19 Ab	0,03 Aa	0,55 Bb	1,25 Aab
T3	0,07 Bb	1,16 Aa	0,03 Aa	0,53 Bb	1,18 Ba
T4	0,10 ABa	1,16 Aa	0,04 Ab	0,35 Cb	1,23 ABa
MN	0,11	1,24	0,11	0,58	1,19
CV (%) <sup>1</sup>	23,53	2,23	41,93	1,99	1,48
CV (%) <sup>2</sup>	31,14	1,33	36,31	1,90	1,57

T0: sem compactação, T1, T2 e T3: uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, T4: três passadas do trator de 10 t e MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas). <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Letras maiúsculas referem-se à comparação de parâmetros da curva de retenção de água entre os tratamentos numa mesma camada e as minúsculas comparam médias de parâmetros da curva de retenção de água, em camadas para um mesmo tratamento.

**Tabela 5. Valores médios de umidade de saturação ( $\theta_{sat}$ ) e umidade residual ( $\theta_{res}$ ) em Latossolos sob diferentes tratamentos e camadas**

Tratamento	-----LVd-----			-----LVef-----	
	$\theta_{res}$ $m^3 m^{-3}$	$\theta_{sat}$ $m^3 m^{-3}$	m	$\theta_{res}$ $m^3 m^{-3}$	m
T0	0,01 a	0,46 a	0,20 a	0,02 a	0,22 ab
T1	0,01 a	0,42 a	0,18 a	0,02 a	0,19 b
T2	0,01 a	0,41 a	0,17 a	0,03 a	0,20 b
T3	0,01 a	0,35 b	0,18 a	0,02 a	0,17 b
T4	0,01 a	0,34 b	0,14 a	0,02 a	0,32 a
MN	0,03	0,50	0,19	0,03	0,16
CV (%) <sup>1</sup>	46,53	4,71	18,79	26,08	20,19
Camada					
0-0,10 m	0,01 a	0,43 a	0,19 a	0,02 b	0,22 a
MN	0,01	0,59	0,19	0,03	0,16
0,10-0,20 m	0,01 a	0,36 b	0,17 a	0,03 a	0,25 a
MN	0,01	0,44	0,17	0,03	0,16
0,20-0,30 m	0,01 a	0,37 b	0,16 a	0,02 b	0,20 a
MN	0,01	0,45	0,20	0,04	0,23
CV (%) <sup>2</sup>	21,94	3,67	24,04	21,30	22,02

T0: sem compactação, T1, T2 e T3: uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, T4: três passadas do trator de 10 t e MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas). <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Médias seguidas da mesma letra, no sentido vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

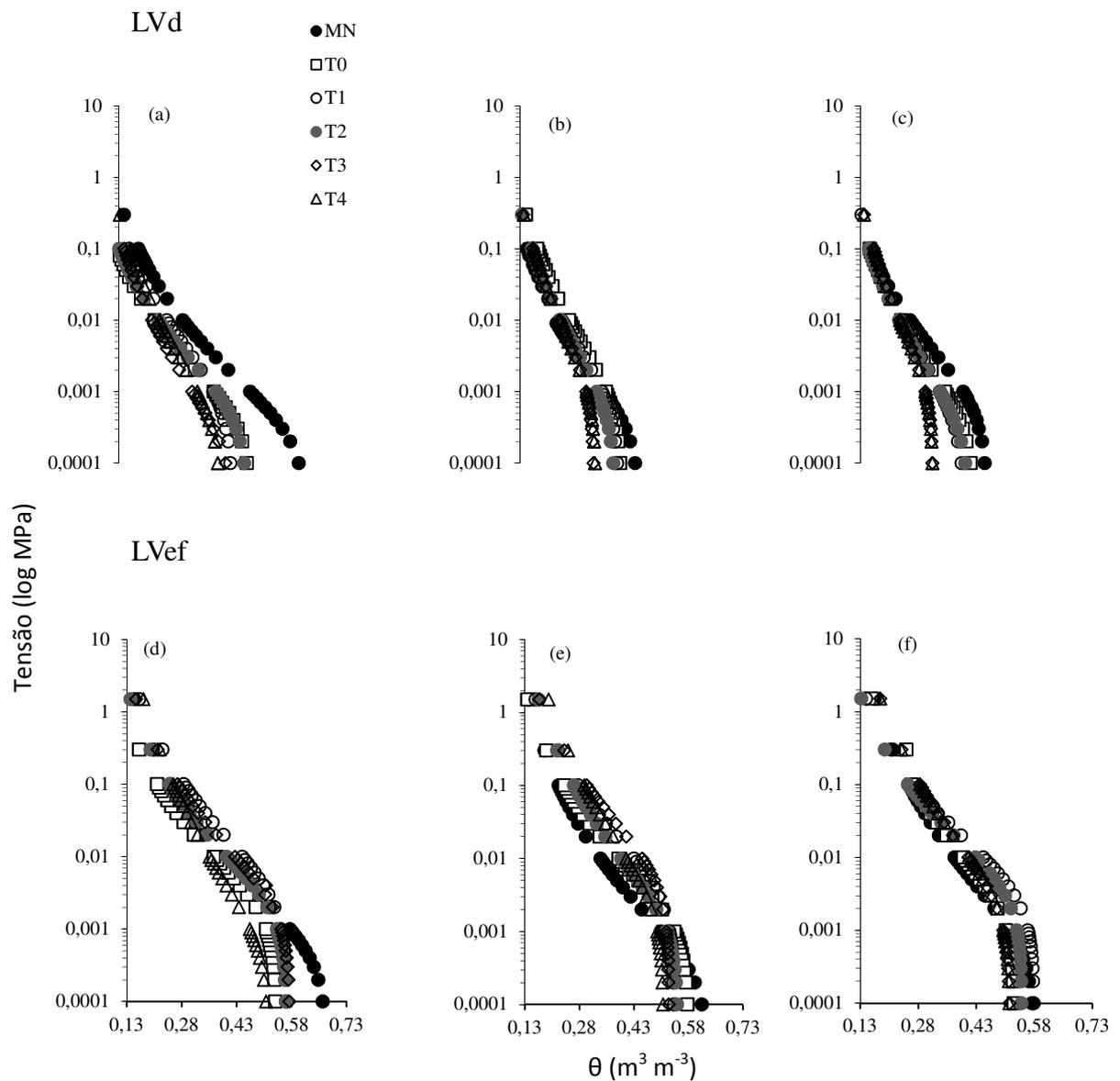
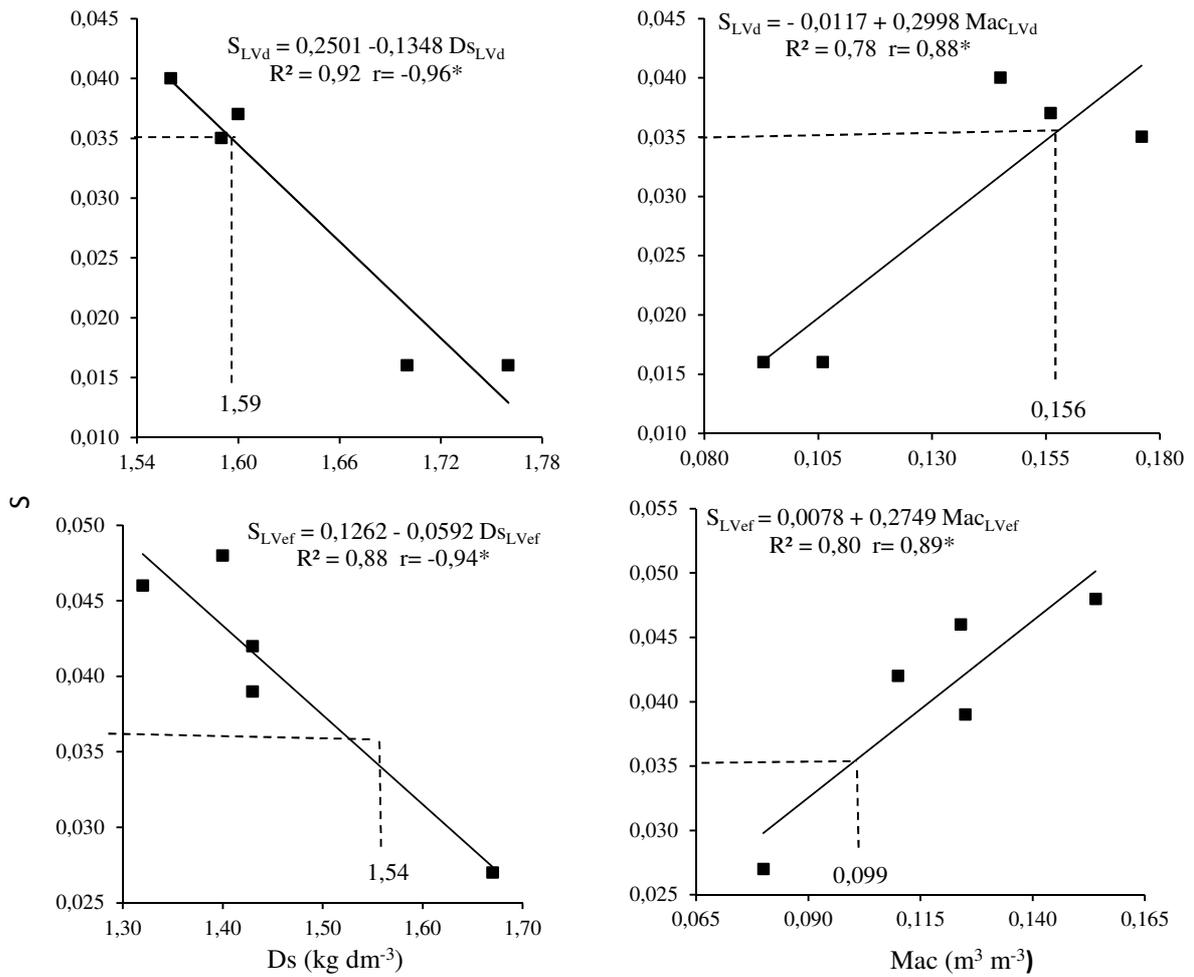
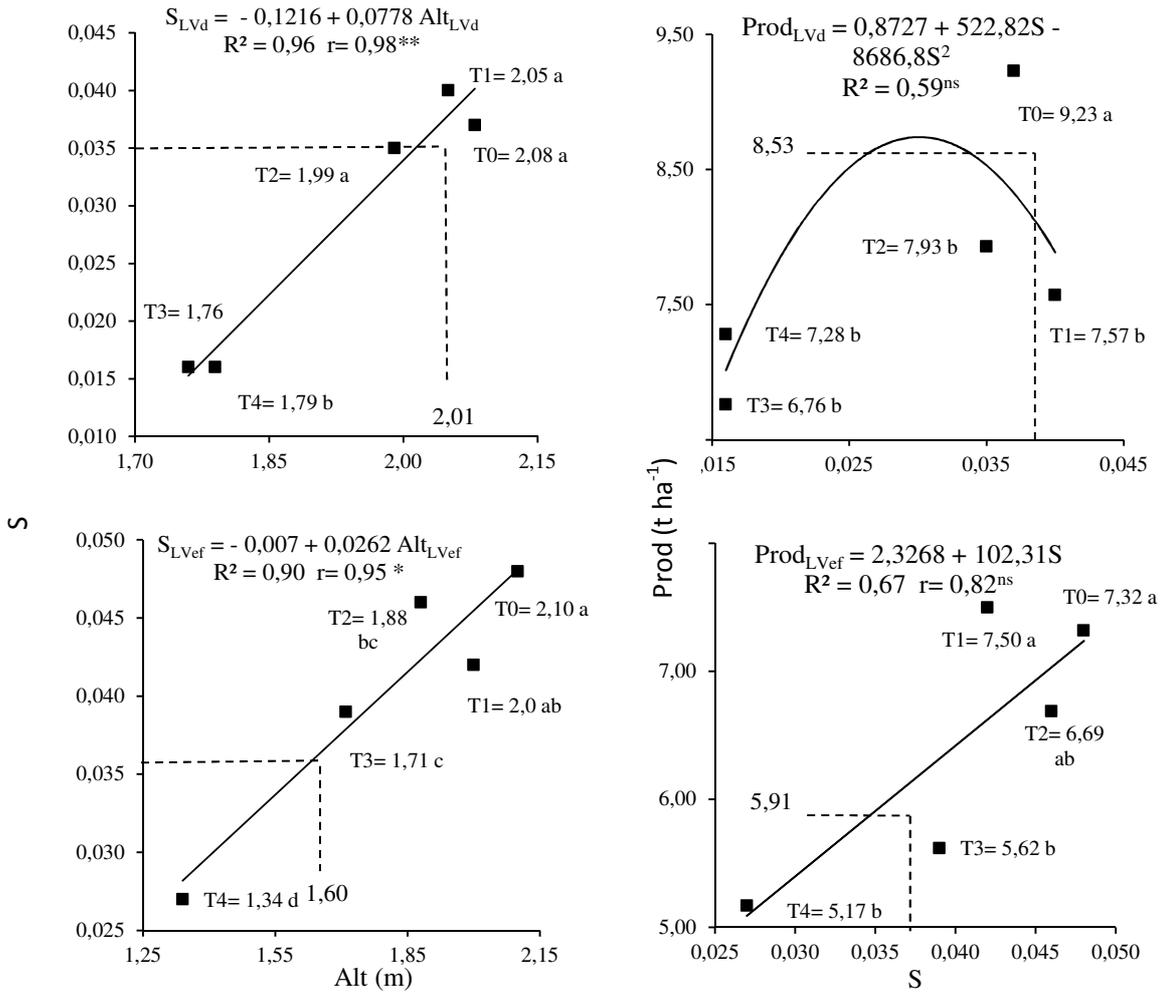


Figura 1. Curvas de retenção de água no LVd e LVef, em diferentes tratamentos nas camadas (a e d) 0-0,10 m; (b e e) 0,10-0,20 m; (c e f) 0,20-0,30. T0: sem compactação, T1, T2 e T3: uma passada do trator de 4, 7 e 10 t, respectivamente, T4: três passadas do trator de 10 t e MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef).



**Figura 2. Correlações entre índice S (S) e densidade (Ds) e macroporosidade (Mac) em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). \*: Significativo a 5 %.**



**Figura 3. Correlações entre índice S (S) e altura (Alt) e produtividade de milho (Prod) em LVd e LVeF. \* e \*\*: Significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente, <sup>ns</sup>: não significativo.**

### **CAPÍTULO 3 – INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE MILHO EM LATOSSOLOS SOB DIFERENTES INTENSIDADES DE TRÁFEGO**

**RESUMO** – Atividades agrícolas com tráfego intenso e aumento da massa das máquinas, podem causar a compactação e degradação física dos solos. O objetivo deste estudo foi avaliar a compactação em Latossolos por meio do intervalo hídrico ótimo (IHO) e estabelecer relações com a cultura do milho. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef), utilizando-se amostras da camada de 0-0,20 m. Os tratamentos foram: T0= sem compactação adicional; T1 e T2= duas e quatro passadas do trator de 4 t, respectivamente, T3 e T4= duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. A amplitude do IHO no LVd foi menor e variou de 0,01 a 0,04 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>, para o LVef oscilou de 0,03 a 0,13 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>, para a resistência à penetração crítica (RPc) de 2 MPa, respectivamente. Observou-se a densidade do solo crítica (Dsc) de 1,76 e 1,40 kg dm<sup>-3</sup> (RPc= 2 MPa) para o LVd e LVef, nesta ordem. A maior frequência de densidade do solo (Ds) ≥ Dsc ocorreu no T4 (LVd) e no T2 ao T4 (LVef) na RPc= 2 MPa, porém não correspondeu em decréscimo da produtividade de milho. A determinação do IHO foi eficiente e complementar na identificação de condições mais favoráveis no LVef para o desenvolvimento do milho em relação ao LVd.

**Palavras chave** – Compactação do solo, tráfego de máquinas, estrutura do solo.

## INTRODUÇÃO

À medida que os ecossistemas naturais vão sendo substituídos por intensas e contínuas atividades agrícolas, as propriedades físicas do solo podem sofrer mudanças temporárias ou permanentes e conseqüentemente podem originar condições desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas. Segundo GUIMARÃES et al. (2013), instaura-se a degradação física do solo, sendo geralmente associado às perdas de matéria orgânica e da integridade estrutural dos solos.

Os atributos do solo mais utilizados para avaliar essa degradação do solo são a densidade do solo, o sistema poroso, a resistência do solo à penetração, a agregação, o índice S, a retenção de água no solo, o grau de compactação, infiltração de água, intervalo hídrico ótimo (IHO) entre outros. Diante disso, ainda são realizadas as análises em laboratório, apesar de serem onerosas e demoradas quando há um elevado número de amostras e de atributos avaliados. Pois, uma vez que a quantificação visual do comportamento estrutural do solo em determinado manejo é uma tarefa difícil (OMUTO, 2008).

O IHO, proposto por SILVA et al. (1994), é um índice de qualidade do solo que integra em uma única variável (densidade do solo) os fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas. O decréscimo do IHO reduz a faixa em que a umidade do solo pode variar sem oferecer restrições ao crescimento de plantas, relacionada à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração. Conforme CAVALIERI et al. (2011), o IHO é considerado um índice consolidado para avaliar a qualidade de solos cultivados. Todavia, para GUBIANI et al. (2013) o uso do IHO é impreciso para dimensionar o risco de perdas na produção de grãos por efeito da compactação do solo.

Outra forma de avaliar a utilização do IHO é por meio da densidade do solo crítica (Dsc) que ocorre quando o IHO é nulo, ou seja, aquela na qual o limite inferior cruza com o limite superior do intervalo. A partir dessa condição ocorrem restrições severas ao crescimento das plantas. Em Latossolo Vermelho de textura média, FREDDI et al. (2009) constataram que a Dsc foi de  $1,46 \text{ kg dm}^{-3}$  na profundidade de 0-0,30 m em diferentes compactações induzidas por tratores. Já CAVALIERI et al.

(2011) na mesma classe de solo após o terceiro ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, verificaram que a Dsc foi de 1,76 e 1,77 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente, para as camadas de 0-0,20 (292 g kg<sup>-1</sup> de argila) e 0,20-0,40 m (365 g kg<sup>-1</sup> de argila). Essas diferenças existem, pois o estimador do IHO é a densidade do solo que varia de acordo com o manejo do solo.

A hipótese deste trabalho é que o IHO é eficiente em detectar degradação física do solo sob cultivo mecanizado de milho.

O objetivo deste estudo foi avaliar a compactação em Latossolos por meio do intervalo hídrico ótimo (IHO) e estabelecer relações com a cultura do milho.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado entre as coordenadas geográficas de 21°14'05" S, 48°17'09" W, com altitude de 615 m. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação pluvial média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21°C (Figura 1).

Os solos foram caracterizados por ANDRIOLI & CENTURION (1999) e correspondendo a EMBRAPA (2013) como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico-hipoférrico (LVd) cujo material de origem derivou-se principalmente de arenitos do Grupo Bauru nas porções mais elevadas e planas e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférrico, típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef) originado principalmente dos produtos da alteração dos basaltos (Formação Serra Geral) subjacentes aos arenitos. Os solos apresentaram, na camada de 0-0,20 m, 348 e 560 g kg<sup>-1</sup> de argila, 598 e 240 g kg<sup>-1</sup> de areia, 54 e 200 g kg<sup>-1</sup> de silte, 2,89 e 2,74 kg dm<sup>-3</sup> de densidade de partículas, 14 e 24 g kg<sup>-1</sup> de matéria orgânica, respectivamente, no LVd e LVef. Antes da instalação dos experimentos, foi realizada a escarificação até 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem leve no sentido perpendicular a área.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados em parcelas subdivididas com cinco tratamentos. As parcelas foram constituídas por cinco linhas de milho com 6 m de comprimento, considerando-se útil as três linhas centrais e desprezando-se 1,5 m de cada extremidade. A indução à compactação do solo foi realizada no dia 26 de novembro de 2013, dois dias após intensa precipitação pluvial, quando o solo possuía um conteúdo de água próximo à capacidade de campo na camada de 0-0,20 m de profundidade, determinado conforme EMBRAPA (2011).

Os tratamentos foram constituídos por: T0= solo preparado no sistema convencional e sem tráfego adicional de trator; T1 e T2= duas e quatro passadas do trator de 4 t, respectivamente; T3 e T4= duas e quatro passadas do trator de 10 t, no sentido transversal a área. A compactação foi realizada por meio da passagem dos rodados desses tratores, perfazendo toda a superfície da parcela, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram variaram conforme o tratamento; o tráfego foi sobreposto ao anterior, de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes.

Para estabelecer os tratamentos T1 e T2 utilizou-se o trator Ford 5610 de 56 kW (70 cv), tração 4 x 2 e massa de 4t, com distribuição de 30% da massa total nas rodas diagonais dianteiras e 70% nas rodas radiais traseiras. Para os tratamentos T3 e T4 foram utilizados uma pá carregadora Caterpillar 924 F de 105 kW (143 cv), tração 4 x 4, pneus 17.5 R 25, radial (L-3), massa de 10t e com a concha vazia.

A semeadura do milho (híbrido simples Maximus) foi efetuada no dia 03 de dezembro de 2013, utilizando-se de uma semeadora-adubadora de plantio direto com cinco linhas, no sentido transversal a área. O mecanismo sulcador do solo da semeadora foi retirado para não eliminar os possíveis efeitos negativos da compactação, sendo utilizado somente o disco de corte do dosador de sementes. A densidade de semeadura foi de cinco a seis sementes por metro, com espaçamento entrelinhas de 0,90m. A adubação na semeadura consistiu da aplicação de 250 kg ha<sup>-1</sup> da formulação N-P-K (8-28-16) e 30 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de zinco para a obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 t ha<sup>-1</sup>, segundo recomendação de RAIJ et al. (1997). A adubação de cobertura foi realizada no estágio V6 da cultura com

230 kg ha<sup>-1</sup> da formulação N-P-K (30-0-10) em superfície, ao lado da linha de semeadura, com a mesma adubadora utilizada na semeadura. Para os tratamentos culturais utilizou-se o trator Massey Ferguson 620 de 77 kW (105 cv), tração 4 x 2 TDA (tração dianteira auxiliar) e massa de 7t, com distribuição de 40% da massa total nas rodas radiais dianteiras e 60% nas rodas radiais traseiras.

Nos dias 17 e 18 de dezembro de 2013, foram coletados dois grupos de seis amostras por tratamento em cada solo na entrelinha do milho, com cilindros de 53,16 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> (0,032 m de altura e 0,046 m de diâmetro), nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, totalizando 360 amostras no experimento. Em seguida, uma amostra de cada grupo e camada foi saturada durante 24 h e submetida a uma das tensões de -60, -100, -330, -600, -1.000 e -3.000 hPa, em câmaras de Richards. Ao atingirem o equilíbrio, foram pesadas e determinou-se a resistência do solo à penetração (RP). Sendo essa com duas subdeterminações por amostra, na camada intermediária do cilindro, perfazendo 100 leituras por determinação, utilizadas para obtenção da RP média. A RP foi determinada por meio de um penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de 1 cm min<sup>-1</sup>, cone com ângulo de 30° e com área da base de 4,909 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para aquisição dos dados. Os resultados foram obtidos em kgf e transformados em MPa a partir da equação: média das leituras /0,046\*0,098. Na sequência, as amostras foram secas em estufa a 105°C, durante 24 h, para determinação do conteúdo de água em cada tensão e densidade do solo (Ds) (GROSSMAN & REINSCH, 2002). A microporosidade foi obtida no conteúdo de água retido na tensão de -100 hPa (FLINT & FLINT, 2002), e a macroporosidade pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

Para determinação do IHO, a curva de retenção de água no solo foi ajustada pelo modelo não linear empregado por SILVA et al. (1994) e a curva de resistência do solo à penetração (RP) foi ajustada utilizando o modelo de BUSSCHER (1990), na forma log-transformada, empregando o SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, VERSION 9.2):

$$\ln \theta = a + b D_s + c \ln \psi \quad \text{Eq. 1}$$

$$\ln RP = \ln d + e \ln + f \ln D_s \quad \text{Eq. 2}$$

em que  $\theta$ : conteúdo volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\psi$ : tensão de água no solo (hPa); a, b, c, d, e, f: parâmetros dos ajustes dos modelos.

O conteúdo de água na capacidade de campo equivalente à tensão de -100 hPa e o ponto de murcha permanente de -15000 hPa,  $\theta_{cc}$  e  $\theta_{PMP}$ , foram estimados pelas equações (3) e (4), respectivamente, obtidas da equação (1):

$$\theta_{cc} = \exp(a + b D_s) * 100^c \quad \text{Eq. 3}$$

$$\theta_{PMP} = \exp(a + b D_s) * 15.000^c \quad \text{Eq. 4}$$

O conteúdo de água a partir do qual a RP é limitante foi estimada pela equação (5), obtida da equação (2):

$$\theta_{RP} = ((RP_c)/(\exp^d * (D_s^e)))^{1/f} \quad \text{Eq. 5}$$

em que  $RP_c$  é o valor de RP crítica de 2 e 3 MPa.

O conteúdo de água em que a porosidade de aeração é de 10% foi calculado pela equação:

$$\theta_{PA} = [(1 - (D_s/D_p))^{-0,10}] \quad \text{Eq. 6}$$

em que  $D_p$  é a densidade de partículas ( $\text{g dm}^{-3}$ ).

O  $\theta_{PA}$ ,  $\theta_{cc}$ ,  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{RP}$  foram plotados em função da  $D_s$ , formando o IHO, representativo das três camadas (0-0,20 m), visto que ele foi equivalente em todas as camadas e utilizou-se o valor médio.

Em 29 de abril de 2014, após o estágio de maturidade fisiológica dos grãos, foram avaliados em 20 plantas por parcela a altura das plantas e a massa de grãos. Quando a umidade dos grãos foi superior a 25%, foram colhidas as espigas de duas linhas úteis de 2,0 m (foi descartado 0,5 m em cada extremidade da linha de 3,0 m),

para debulha e determinação da massa de grãos. A produtividade de grãos de milho foi obtida extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela para 1 ha, ajustando-se a umidade dos grãos para 13%.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e quando significativa às médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%; realizou-se correlações entre a Ds e altura e produtividade de milho.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Não houve interação dos tratamentos de compactação em função das camadas de solo, no LVd e LVef, para os atributos físicos densidade (Ds), macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração (RP) (Tabela 1). O menor valor médio de Ds foi somente no T0 (sem tráfego adicional de máquinas) em comparação ao T4 (quatro passadas do trator de 10 t), no LVd (Tabela 2), pois não ocorreu tráfego após o preparo convencional e descompactação do solo. Mesmo assim, a macroporosidade foi semelhante para todos os tratamentos.

Verificou-se que o incremento no número de passadas e da massa do trator não causou alteração na Ds de T1 (duas passadas do trator de 4 t), T2 (quatro passadas do trator de 4 t), T3 (duas passadas do trator de 10 t) e T4, concordando com BEUTLER et al. (2008). Esses autores verificaram, no mesmo solo, que o incremento de passadas do trator de 11 t não provocaram alterações na densidade e macroporosidade do solo na camada de 0-0,20 m, em dois anos agrícolas. Isto porque a primeira passada do trator sobre a camada superficial do solo promove uma maior compactação em comparação às demais passadas, em razão de que os poros maiores sofrem uma maior degradação com o tráfego inicial e depois há a presença de maior número de poros menores e mais resistentes a deformação do solo (HORN et al., 1995).

Valores de macroporosidade no LVd e no LVef próximo ou superiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  foram verificados após o tráfego dos tratores. Considera-se esse valor como

o mínimo necessário para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, e crítico para o crescimento das raízes da maioria das culturas (REICHERT et al., 2007).

Os valores de  $D_s$  foram maiores no T2 e a menor macroporosidade no T3, no LVef, comparado ao T0 sem tráfego (Tabela 3). No caso do LVd, os valores absolutos médios de  $D_s$  em todos os tratamentos foram superiores em relação ao LVef. Pois esse resultado deve-se a mineralogia, ao maior teor de areia e de densidade de partícula ( $2,89 \text{ kg dm}^{-3}$ ) no LVd em comparação ao LVef. Segundo FERREIRA et al. (1999), isso ocorre porque em LVd predominam quartzo e caulinita com estrutura maciça, que confere menor porosidade. Apesar do aumento da  $D_s$  no LVd na camada de 0 – 0,20 m, pelo tráfego de tratores no T4 em comparação ao T0, isso não reduziu a produtividade de grãos de milho (Figura 2a). Sendo que essa produtividade nesse solo teve um comportamento quadrático em função da  $D_s$ , porém não significativo. Sendo que a partir da densidade de  $1,73 \text{ kg dm}^{-3}$  a produtividade máxima de  $5,30 \text{ t ha}^{-1}$  decresceu em 21,32% para o T4 com aumento da  $D_s$ . Nota-se na Figura 1, que o desenvolvimento da cultura manifestou alterações agrônômicas devido à escassez de chuva durante a safra 2013/14. As precipitações pluviais foram de apenas 291 mm durante os meses de janeiro a março de 2014 e resultaram provavelmente em estresse hídrico.

Assim como ocorreu no LVd, as alterações na  $D_s$  e na RP no LVef não foram justificadas em relação a produtividade, principalmente em relação a inferioridade da densidade do T0 em comparação ao T2. Estimou-se que quando a densidade em LVef atingiu  $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$  a máxima produtividade foi de  $7,12 \text{ t ha}^{-1}$  sendo que a partir desse ponto observou-se um acréscimo em 1,97% e decréscimo de 12,78% da produtividade nos T3 e T2, respectivamente, apesar do comportamento não significativo da regressão entre esses parâmetros. Quando se observa os valores absolutos, a produtividade de milho no LVef apresentou uma maior expressão do que no LVd. Acredita-se que esse comportamento deve-se aos maiores teores de matéria orgânica e de argila no LVef que favoreceram a maior adsorção de água. Quanto à altura de milho, verificou-se resposta linear negativa com a densidade em ambos os solos. O T0 apresentou o melhor desempenho, apesar de o coeficiente de

determinação ( $R^2$ ) ter sido significativo somente para a condição do LVd. Portanto, há um indicativo de que as plantas que receberam compactações adicionais encontraram limitações para crescer em relação aos tratamentos sob preparo convencional.

Os coeficientes de determinação indicam que a curva de retenção de água explicaram 66 e 84% e da curva de resistência do solo à penetração explicaram 78 e 75% das variabilidades do conteúdo de água ( $\theta$ ) e da RP, respectivamente para o LVd e LVef e foram significativos pelo teste F ( $p < 0,01$ ) (Tabela 4). O valor do intervalo hídrico ótimo (IHO) correspondente a área hachurada no LVef foi superior ao do LVd, independente do valor crítico da RP ser considerado 2 ou 3 MPa (Figura 3). Pode-se observar redução do IHO com o aumento da  $D_s$ , conforme já estabelecido por SILVA et al. (1994) e BLAINSKI et al. (2012). O  $\theta$  e a RP (Tabela 4) foram negativamente correlacionados com o potencial matricial e positivamente com a  $D_s$ , devido ao sinal negativo dos parâmetros  $c$ ,  $e$ ; e positivo dos parâmetros  $b$  e  $f$ , de cada equação no LVef e LVd. Por outro lado o comportamento no LVd foi discordante em relação aos coeficientes  $e$ ,  $f$ .

O limite superior do IHO foi o conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) no LVd, até a partir do momento em que a RP do LVd foi limitante ( $\theta_{RP}$ ). Segundo CAVALIERI et al. (2011), o efeito da RP sobre o IHO (área hachurada) evidencia o processo de degradação física do solo, pois começa a restringir a faixa de água onde as raízes podem crescer e se desenvolver dentro da amplitude de água disponível. Com a utilização da RP crítica de 2 e 3 MPa em LVd, o limite inferior do IHO foi o  $\theta_{RP}$ . Já no LVef esse limite apresentou como o conteúdo de água no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) apenas para valores de  $D_s \leq 1,33$  e  $1,36 \text{ kg dm}^{-3}$  para 2 e 3 MPa, respectivamente. Sendo que a partir de valores superiores a esses, o  $\theta_{RP}$  tornou-se o limite inferior do IHO contrariando a afirmação de BEUTLER et al. (2007). Segundo esses autores somente quando são adotados valores de  $RP_c$  de 2 MPa, o  $\theta_{PMP}$  é limitante inicialmente, e depois o  $\theta_{RP}$  torna-se redutor do IHO em sua maior extensão, até a densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ). Logo, no LVef há uma amplitude mais restrita de  $D_s$  em comparação ao LVd. A  $D_{sc}$  é a densidade do solo em que o IHO iguala-se a zero, isto é, aquela em que o limite

inferior cruza com o limite superior do intervalo. Nesse ponto, ocorrem limitações severas ao desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 1994) e entende-se que quanto maior a Dsc, menor será a possibilidade de a planta permanecer em condições de estresse.

A restrição imposta do  $\theta_{RP}$  oferece indício de compactação do solo, ou seja, os tratamentos sob compactação induzida por tratores pode ter contribuído para um impedimento mecânico, uma vez que as médias de RP no LVd foram próximas e ou superiores a 3 MPa. A restrição do  $\theta_{RP}$  no LVd ocorre em Ds entre 1,33 a 1,57 kg dm<sup>-3</sup> (RPc= 2 MPa) e em 1,33 a 1,83 kg dm<sup>-3</sup> (RPc= 3 MPa) e coincide com o início do limite do IHO na condição de Ds= 1,83 kg dm<sup>-3</sup>. Para a condição no LVef esse impedimento aconteceu em Ds entre 1,33 a 1,40 kg dm<sup>-3</sup> (RPc= 2 MPa) e em 1,36 a 1,45 kg dm<sup>-3</sup> (RPc= 3 MPa). No T2 ao T4 no LVef apresentariam restrição à RP= 2 MPa e a limitação ocorreria no T2 para a RP= 3 MPa para o mesmo solo. Enquanto para a condição no LVd somente o T4 ofereceria restrição independente do valor da RPc (Tabelas 2 e 3).

Independentemente do tipo de solo e do valor do RPc avaliados, o conteúdo de água disponível ( $AD = \theta_{cc} - \theta_{PMP}$ ) foi sempre superior ao IHO, o que caracteriza os solos como fisicamente degradados (LETEY, 1985). Devido a tal comportamento, SILVA et al. (1994) apontam o IHO como uma ferramenta de análise da estrutura do solo mais sensível que o conceito de água disponível. Os valores potenciais na capacidade de campo (cc) e do ponto de murcha permanente (PMP) em LVd apresentaram um aumento sutil de acordo com a Ds, como observado na Figura 3 (a e c). Enquanto os valores da RP sofreram acréscimo mais explícito com a Ds em decorrência para manter a RP igual a 2 e a 3 MPa. Neste estudo foi necessário elevar o teor de água dos solos, com a finalidade de compensar a maior fricção entre as partículas resultantes do aumento da Ds.

De modo geral em solos manejados, o IHO é limitado na parte superior pelo  $\theta_{cc}$  e inferior por  $\theta_{RP}$  como constatados por KLEIN & CÂMARA (2007) em LV de textura argilosa e por GUIMARÃES et al. (2013) em LVd de textura franco-arenosa. Esses autores afirmaram que foi considerado o limite inferior do IHO para toda a

faixa de  $D_s$  estudada, com exceção da mata nativa. Neste estudo, esse comportamento não ocorreu no LVef.

A amplitude do IHO para RPC de 2 e 3 MPa, respectivamente, no LVd variou de 0,01 a 0,04 e de 0,02 a 0,06  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e para o LVef oscilou de 0,03 a 0,13 e de 0,01 a 0,14  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Quando se leva em consideração a diferença dessa amplitude, observa-se que os valores no LVd foram de 0,03 e 0,04  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e para o LVef de 0,10 e 0,13  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , para RPC de 2 e 3 MPa, respectivamente. Embora a visualização na Figura 3, demonstre um considerável aumento do IHO com o acréscimo do RPC principalmente no LVd, tal fato pode ser contestado tendo em vista que a diferença de amplitude foi irrisória em comparação às diferenças de RPC de cada solo. Os valores das amplitudes do IHO correspondem ao estudo de BLAINSKI et al. (2012), que verificaram uma variação de 0 a 0,11  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  característico da classe textural dos Latossolos Vermelhos.

Condição similar da variação do IHO no LVd neste estudo, foi verificado também por LIMA et al. (2015) em Latossolo (607  $\text{g kg}^{-1}$  de argila) com 0-0,04  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  de conteúdo de água em RPC de 2 MPa na camada de 0-0,20 m. De acordo com os resultados, pode-se considerar que as pressões induzidas por tratores aos solos conduziram a um processo de degradação da estrutura do solo. A faixa de IHO mais estreita no LVd em comparação ao LVef, neste estudo reafirma o comentário de NEVES JR.(2013) de que menor é a faixa em que o conteúdo de água no solo pode variar sem que ocorram restrições relacionadas à disponibilidade de água, porosidade de aeração e resistência do solo à penetração de raízes.

Quando se considerou a RPC de 2 e 3 MPa, respectivamente, a Dsc foi de 1,76 e 1,83  $\text{kg dm}^{-3}$  para o LVd e de 1,40 e 1,45  $\text{kg dm}^{-3}$  para o LVef. Por meio da comparação desses valores com a relação da  $D_s$  x produtividade de milho, pode-se afirmar que a Dsc do LVd está superestimada e subestimada nas RPC de 2 e 3 MPa, respectivamente. Embora essa relação tenha sido não significativa (Figura 2a). Pois a partir da  $D_s = 1,73 \text{ kg dm}^{-3}$  ocorreu decréscimo da produtividade no T3 e T4 em comparação ao T1 e T2. Já no LVef o valor da Dsc na RPC de 2 MPa coincide com o declínio dos valores da produtividade no T2 e T4, apesar de não haver diferença estatística com os demais tratamentos. Devido a esse fato, recomenda-se uma

interpretação complementar da Dsc do IHO com o gráfico da variação dos valores de Ds dos tratamentos em função da produtividade da cultura em estudo.

CAVALIERI et al. (2011) verificaram, que a Dsc foi de 1,76 e 1,77 kg dm<sup>-3</sup>, para as camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente em RPc= 3 MPa em LVd de textura média após a colheita mecânica de terceiro ciclo de cultivo de cana-de-açúcar. Para REICHERT et al. (2009), tal índice é influenciado pelo manejo do solo e tem relação inversa com o teor de argila do solo como comprovado também neste estudo. FIDALSKI et al. (2013) observaram em LVd de textura arenosa/média que os valores da Dsc foram de 1,66, 1,64 e 1,62 Mg m<sup>-3</sup> respectivamente para as camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em sistema de integração lavoura-pecuária sendo o RPc de 2,5 MPa. Segundo FREDDI et al. (2009) a Dsc foi de 1,46 kg dm<sup>-3</sup> em LVd de textura média submetido a diferentes condições de compactação a 0,30 m de profundidade, após o uso de RPc de 2,15 MPa. Situação similar foi observado por PEREIRA et al. (2010), que verificaram valores de Dsc de 1,43 Mg m<sup>-3</sup> para cultivo convencional e valores mais altos e mais baixos que esse para diferentes sistemas de semeadura direta, em LVd de textura média a 0,20 m com o uso de RPc de 2 MPa. A diferença na Dsc também pode ser atribuída à classe de solo, conforme ROMERO et al. (2014) constataram em Dsc de 1,62 e 1,38 kg dm<sup>-3</sup> para LVd de textura argilosa e Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) muito argiloso, respectivamente, a 0,40-0,60 m com RPc de 1 MPa.

Logo, a escolha do valor da RPc também influencia a determinação da Dsc. Ao passo que com o aumento do valor da RPc de 2 para 3 MPa, ocorreu o deslocamento mais para a direita do  $\theta_{RP}$  e conseqüentemente estende-se o IHO. No caso do LVef houve uma pequena extensão do IHO, já que com o RPc de 3 MPa o incremento foi de 0,05 kg dm<sup>-3</sup> para a Dsc. Então, como medida cautelar de manejo no LVef o mais adequado seria utilizar a RPc de 2 MPa. Fato, que justifica os valores médios de RP no LVef dos tratamentos ao redor de 2 MPa. Para o LVd a utilização da RPc de 2 MPa gerou um pequeno acréscimo em IHO, que indica a inviabilidade de cultivo no manejo adotado. Mas há uma contradição, pois nenhum valor médio de resistência à penetração no LVd foi menor ou igual a 2 MPa. Nesse caso, o adequado seria utilizar a RPc de 3 MPa em LVd, que mostrou a existência

de uma faixa de IHO para um possível cultivo do milho. De acordo com SILVA et al. (1997), o crescimento das plantas é menos restrito dentro dos limites do IHO e sendo assim a determinação desse parâmetro pode ser utilizada para avaliar a qualidade estrutural do solo. A restrição pela resistência do LVd à penetração ocorre a partir da  $D_s = 1,33 \text{ kg dm}^{-3}$  e coincide com o início do limite do IHO.

Fazendo-se o uso da  $RP_c$  de 2 MPa no LVd, todos os tratamentos submetidos à compactação adicional demonstrariam limitações impostas pela capacidade de campo por terem  $D_s$  acima de  $1,57 \text{ kg dm}^{-3}$ . Mas se for a  $RP_c$  de 3 MPa nesse mesmo solo, somente o T4 mostraria restrição devido a aeração por apresentar  $D_s \geq 1,83 \text{ kg dm}^{-3}$ . No LVef não seria possível verificar  $D_s \leq 1,45 \text{ kg dm}^{-3}$  em T0 e T1, que foi responsável pela restrição imposta pela aeração na  $RP_c$  de 3 MPa. Com a  $RP_c$  de 2 MPa no tratamento T0 do LVef haveria restrição pela RP independente do conteúdo de água permanecer na capacidade de campo, por causa da  $D_s$  estar abaixo de  $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$ .

Portanto a administração dos usos de máquinas no LVd ocasionaram em restrições severas ao IHO, o qual aliado a baixa precipitação pluviométrica resultaram em baixa produtividade de milho. Sendo assim, a escolha da aplicação dos tratamentos submetidos ao LVd proporcionaram a degradação física desse solo pelo aumento de sua  $D_s$  e RP. O IHO no LVd é pequeno, mas por outro lado os valores de  $D_s$  já começam em  $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$  e aumentam até valores extremos. Então na maior parte das amostras o IHO é zero, ou seja, a condição não é ideal para o crescimento das plantas. Os tratamentos T0 e T1 são considerados manejos ainda suportáveis no LVef conforme a visualização do IHO. Apesar de nenhum tratamento ter atingido a estimativa da produção média brasileira de  $7,87 \text{ t ha}^{-1}$  de milho para a safra de 2013/14 (CONAB, 2014). Os manejos aplicados no LVef apresentaram valores médios mais próximos dessa estimativa em comparação ao LVd. A utilização de manejos menos favoráveis ao crescimento e desenvolvimento da cultura do milho nessas áreas, devem ser evitados para não comprometer a estrutura do solo. Visto que a prática de subsolagem destinada à descompactação do solo, possui elevado custo operacional e elevada demanda energética (CORTEZ, 2013). Em resumo, reduzir a compactação do solo é vital para assegurar altos

valores de IHO em sistemas de manejo agrícola, porque um aumento na densidade do solo requer alto conteúdo de água no solo para manter a resistência em condições não limitantes às culturas (SOUZA et al., 2015).

Assim, os resultados deste estudo indicam que o IHO é eficiente em detectar condições desfavoráveis ao desenvolvimento das culturas e corroboram as recomendações de BLAINSKI et al. (2012). Esses autores afirmam que o IHO é indicador robusto de qualidade física dos solos agrícolas. Na visão de CAVALIERI et al. (2011), o IHO é considerado um índice consolidado para avaliar a qualidade de solos cultivados. Diante disso, diversos autores enfatizam que o IHO é um parâmetro mais sensível do que a curva de retenção de água no solo para avaliar alterações na estrutura do solo (ROQUE et al., 2011; SILVA et al., 2011 e GUEDES FILHO et al., 2013).

## **CONCLUSÕES**

Apesar da maior frequência de tratamentos com  $D_s \geq D_{sc}$  no L<sub>Vef</sub> em relação ao L<sub>Vd</sub>, esse comportamento não correspondeu totalmente em decréscimo da produtividade de milho.

A determinação do IHO foi eficiente e complementar na identificação de condições mais favoráveis no L<sub>Vef</sub> para o desenvolvimento do milho em relação ao L<sub>Vd</sub>, independente do valor crítico da resistência do solo à penetração.

## **REFERÊNCIAS**

ANDRIOLI, I. & CENTURION, J. F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 27., Brasília, 1999. Anais... Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. CD ROM.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; SÃO JOÃO, A. C. G. & FREDDI, O. S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da

compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. R. Bras. Ci. Solo, 31; 1223-1232, 2007.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. da; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L. & FREDDI, O. S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. Pesq. Agropec. Bras., 43: 1591-1600, 2008.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L. & NANNI, M. R. R. Bras. Ci. Solo, 36: 79-87, 2012.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. Am. Soc. Agric. Eng., 33: 519-524, 1990.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A. de; SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L. & TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. R. Bras. Ci. Solo, 35: 1541-1549, 2011.

CONAB. Acompanhamento da safra Brasileira-grãos (safra 2013/2014). Brasília, 2014. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_09\\_10\\_14\\_35\\_09\\_boletim\\_graos\\_setembro\\_2014.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_09_10_14_35_09_boletim_graos_setembro_2014.pdf)>. Acesso em: 4 out. 2014.

CORTEZ, L. A. Subsolagem em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico. Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, 2013. 57p. (Dissertação de Mestrado)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análises de solo. 2ª edição revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/>>. Acesso em 03 mar. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 23:515-524, 1999.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. & ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico após o primeiro período de pastejo contínuo de *Brachiaria ruziziensis*, em sistema integração lavoura-pecuária. R. Bras. Ci. Solo, 37: 775-783, 2013.

FLINT, L. E. & FLINT, A. L. Porosity. In: DANE, J. H. & TOPP, G. C., eds. Methods of soil analysis: Physical methods. Madison: Soil Science Society America, 2002. Part. 4, p. 241-253.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P. & PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II- Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. R. Bras. Ci. Solo, 33; 805-8018, 2009.

GUBIANI, P. I.; GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M. & REINERT, D. J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. R. Bras. Ci. Solo, 37: 1502-1511, 2013.

GUEDES FILHO, O.; BLANCO-CANQUI, H. & SILVA, A. P. da. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. Geoderma, 207-208: 99-110, 2013.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI, E. & FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. R. Bras. Ci. Solo, 37:1512-1521, 2013.

GROSSMAN, R. B. & REINSCH, T. G. The solid phase, bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H. & TOPP, G. C., eds. Methods of soil analysis: Physical methods. Madison: Soil Science Society America, 2002. Part. 4, p. 201-228.

HORN, R.; DOMZAL, H.; JURKIEWITZ, A. S. & OWERKERK, C. van. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. Soil Till. Res., 35: 23-36, 1995.

- KLEIN, V. A. & CÂMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. R. Bras. Ci. Solo, 31: 221-227, 2007.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. Adv. Soil Sci., 1: 277-294, 1985.
- LIMA, C. L. R. de; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. & REICHERT, J. M. Least limiting water range and degree of compactness of soils under no-tillage. Biosci. J., 31: 1071-1080, 2015.
- NEVES Jr, A. F.; SILVA, A. P. da; NORONHA, N. C. & CERRI, C. C. Sistemas de manejo do solo na recuperação de uma pastagem degradada em Rondônia. R. Bras. Ci. Solo, 37: 232-241, 2013.
- OMUTO, C. T. Assessment of soil physical degradation in Eastern Kenya by use of a sequential soil testing protocol. Agric. Ecosyst. Environ., 128: 199-211, 2008.
- PEREIRA, F. S.; ANDRIOLI, I.; BEUTLER, A. N.; ALMEIDA, C. X. de & PEREIRA, F. S. Physical quality of an Oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the pre-cropping period. R. Bras. Ci. Solo, 34: 211-218, 2010.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; O. C.; QUAGGIO, J. H. & FURLANI, A. M. C. A. Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2 ed. Campinas, Instituto Agrônômico, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100)
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. & REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S. & REICHERT, J.M. (Eds.) Tópicos em ciência do solo. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. & REINERT, D. J.; HORN, R. & HAAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. Soil Till. Res., 102: 242-254, 2009.

ROMERO, E. M. R.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A. & COSTA, L. M. da. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolo artificialmente compactados. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 18: 1003-1009, 2014.

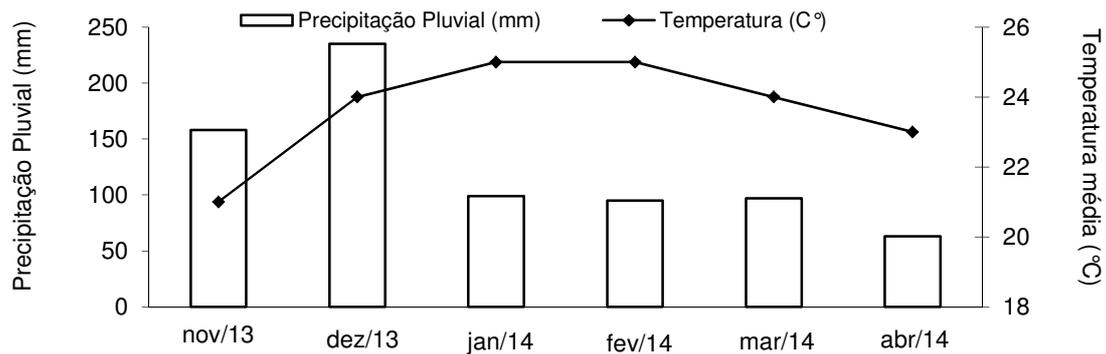
ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; ARAÚJO, F. S. & SILVA, G. R. V. da. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle agrícola. *Ci. Rural*, 41: 1536-1542, 2011.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Am. J.*, 58: 1775-1781, 1994.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. & PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil Till. Res.*, 44: 81-93, 1997.

SILVA, G. L.; LIMA, H. V.; CAMPANHA, M. M.; GILKES, R. J. & OLIVEIRA, T. S. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167-168: 61-70, 2011.

SOUZA, G. S. de; SOUZA, Z. M. de; COOPER, M. & TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. *Sci. Agric.*, 72: 270-277, 2015.



**Figura 1. Precipitação pluvial acumulada e temperatura média mensal durante o período de desenvolvimento da cultura de milho (2013/14).**

**Tabela 1. Valores de F calculados pela análise de variância para os atributos físicos do LVd e LVef em diferentes camadas e níveis de compactação**

Causa de variação			densidade	resistência
	macroporosidade	microporosidade	do solo	à penetração
LVd				
Tratamento (T)	2,61 <sup>ns</sup>	4,32 <sup>ns</sup>	4,54 <sup>ns</sup>	1,73 <sup>ns</sup>
Camada (C)	1,24 <sup>ns</sup>	0,72 <sup>ns</sup>	1,75 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>
T x C	0,48 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	0,77 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>
CV (%) <sup>1</sup>	27,18	12,85	8,24	22,05
CV (%) <sup>2</sup>	26,47	10,57	4,64	24,99
LVef				
Tratamento (T)	6,54 <sup>*</sup>	7,30 <sup>*</sup>	5,31 <sup>*</sup>	2,42 <sup>ns</sup>
Camada (C)	1,40 <sup>ns</sup>	0,64 <sup>ns</sup>	0,27 <sup>ns</sup>	1,17 <sup>ns</sup>
T x C	0,98 <sup>ns</sup>	0,66 <sup>ns</sup>	0,89 <sup>ns</sup>	1,38 <sup>ns</sup>
CV (%) <sup>1</sup>	18,53	2,74	3,61	21,98
CV (%) <sup>2</sup>	24,66	3,36	4,43	24,58

CV (%)<sup>1</sup>: coeficiente de variação referente aos tratamentos; CV (%)<sup>2</sup>: coeficiente de variação referente as camadas. \* significativo a 5%, <sup>ns</sup> não significativo.

**Tabela 2. Valores médios e erros-padrão de atributos físicos do LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) em diferentes camadas e níveis de compactação**

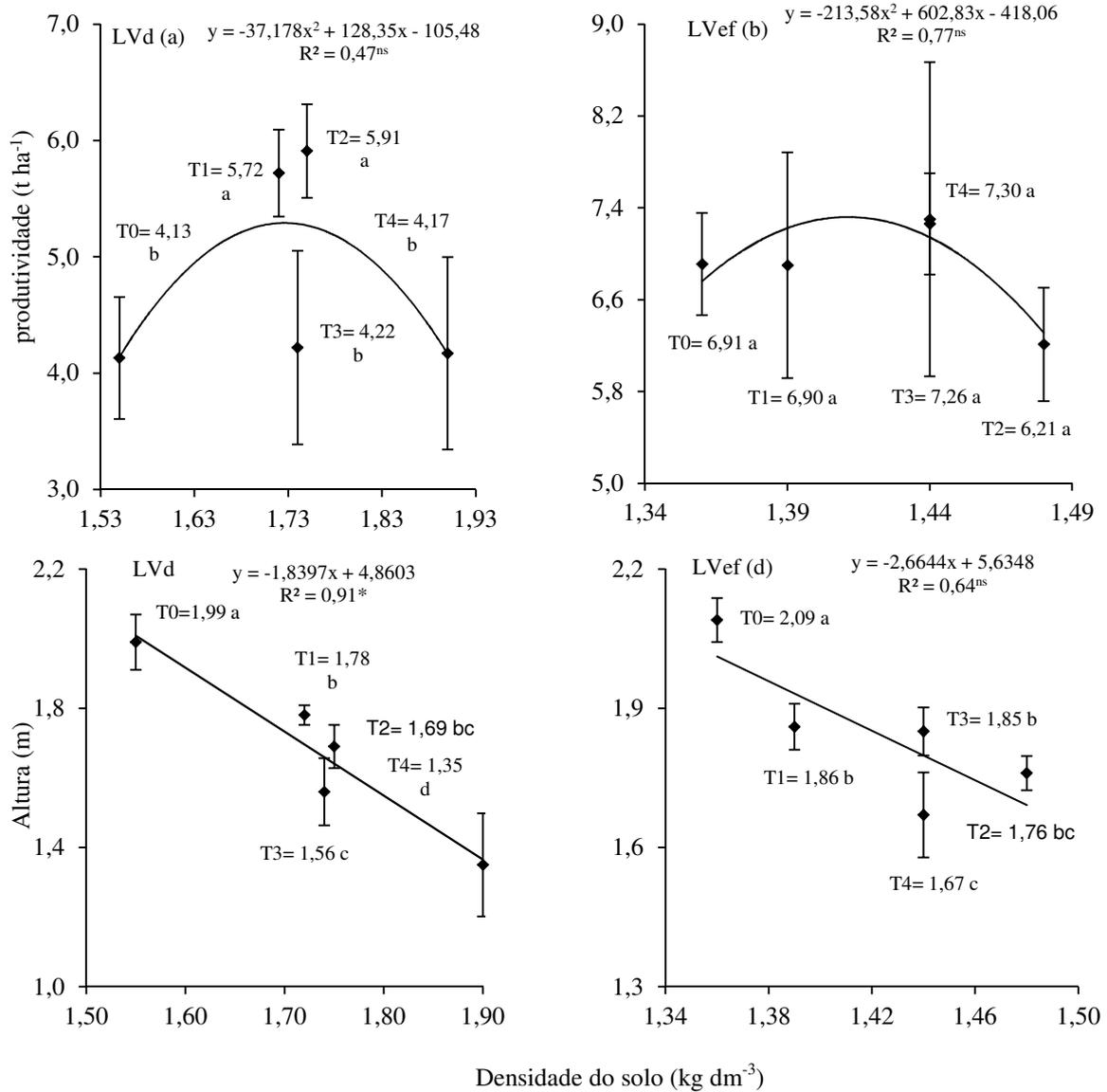
Camada	LVd				
	T0	T1	T2	T3	T4
m	macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )				
0-0,05	0,239 ± 0,10 <sup>(1)</sup>	0,138 ± 0,02	0,129 ± 0,02	0,163 ± 0,01	0,144 ± 0,05
0,05-0,10	0,227 ± 0,03	0,133 ± 0,02	0,114 ± 0,00	0,090 ± 0,04	0,122 ± 0,02
0,10-0,20	0,217 ± 0,05	0,143 ± 0,02	0,145 ± 0,00	0,100 ± 0,00	0,103 ± 0,01
Média	0,228 ± 0,06 a	0,138 ± 0,02 a	0,129 ± 0,00 a	0,118 ± 0,02 a	0,123 ± 0,03 a
	microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )				
0-0,05	0,176 ± 0,05	0,195 ± 0,02	0,219 ± 0,02	0,210 ± 0,01	0,204 ± 0,02
0,05-0,10	0,163 ± 0,01	0,193 ± 0,00	0,228 ± 0,00	0,254 ± 0,02	0,213 ± 0,02
0,10-0,20	0,177 ± 0,02	0,209 ± 0,02	0,220 ± 0,00	0,222 ± 0,00	0,229 ± 0,00
Média	0,172 ± 0,03 a	0,199 ± 0,02 a	0,222 ± 0,00 a	0,229 ± 0,01 a	0,215 ± 0,01 a
	densidade do solo (kg dm <sup>-3</sup> )				
0-0,05	1,54 ± 0,13	1,72 ± 0,01	1,73 ± 0,09	1,67 ± 0,02	1,91 ± 0,04
0,05-0,10	1,55 ± 0,08	1,78 ± 0,06	1,84 ± 0,06	1,75 ± 0,06	1,92 ± 0,08
0,10-0,20	1,56 ± 0,18	1,65 ± 0,00	1,68 ± 0,02	1,79 ± 0,02	1,87 ± 0,03
Média	1,55 ± 0,13 b	1,72 ± 0,02 ab	1,75 ± 0,06 ab	1,74 ± 0,03 ab	1,90 ± 0,05 a
	resistência à penetração (MPa)				
0-0,05	2,90 ± 0,73	4,29 ± 0,87	4,04 ± 0,47	1,95 ± 0,20	4,52 ± 1,01
0,05-0,10	3,19 ± 0,79	3,93 ± 0,02	3,60 ± 0,14	2,12 ± 0,29	3,78 ± 0,22
0,10-0,20	2,55 ± 1,03	3,85 ± 1,86	3,32 ± 1,23	4,10 ± 0,13	3,31 ± 0,93
Média	2,88 ± 0,85 a	4,02 ± 0,92 a	3,65 ± 0,61 a	2,72 ± 0,21 a	3,87 ± 0,72 a

<sup>(1)</sup> Determinação realizada no conteúdo de água retida na capacidade de campo (-100 hPa). Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. T0= preparo convencional; T1 e duas e quatro passadas do trator de 4t, respectivamente; T3 e T4= duas e quatro passadas do trator de 10 t.

**Tabela 3. Valores médios e erros-padrão de atributos físicos do LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef) em diferentes camadas e níveis de compactação**

Camada	LVef				
	T0	T1	T2	T3	T4
m	macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )				
0-0,05	0,179 ± 0,03 <sup>(1)</sup>	0,137 ± 0,00	0,095 ± 0,01	0,079 ± 0,01	0,077 ± 0,03
0,05-0,10	0,118 ± 0,03	0,118 ± 0,00	0,089 ± 0,01	0,095 ± 0,01	0,098 ± 0,00
0,10-0,20	0,141 ± 0,03	0,128 ± 0,02	0,124 ± 0,02	0,113 ± 0,00	0,118 ± 0,02
Média	0,146 ± 0,03 a	0,128 ± 0,00 ab	0,103 ± 0,01 ab	0,096 ± 0,00 b	0,098 ± 0,02 ab
	microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )				
0-0,05	0,373 ± 0,02	0,382 ± 0,01	0,408 ± 0,01	0,405 ± 0,03	0,410 ± 0,01
0,05-0,10	0,388 ± 0,02	0,388 ± 0,00	0,410 ± 0,01	0,373 ± 0,02	0,404 ± 0,00
0,10-0,20	0,378 ± 0,00	0,382 ± 0,00	0,404 ± 0,00	0,403 ± 0,01	0,385 ± 0,01
Média	0,380 ± 0,01 b	0,384 ± 0,00 ab	0,407 ± 0,00 a	0,394 ± 0,02 ab	0,400 ± 0,00 ab
	densidade do solo (kg dm <sup>-3</sup> )				
0-0,05	1,32 ± 0,08	1,36 ± 0,01	1,51 ± 0,08	1,45 ± 0,03	1,51 ± 0,07
0,05-0,10	1,42 ± 0,08	1,41 ± 0,01	1,49 ± 0,05	1,43 ± 0,02	1,40 ± 0,01
0,10-0,20	1,35 ± 0,02	1,40 ± 0,03	1,45 ± 0,02	1,45 ± 0,00	1,40 ± 0,01
Média	1,36 ± 0,06 b	1,39 ± 0,02 ab	1,48 ± 0,05 a	1,44 ± 0,02 ab	1,44 ± 0,03 ab
	resistência à penetração (MPa)				
0-0,05	0,83 ± 0,53	0,99 ± 0,03	2,11 ± 0,44	2,39 ± 0,53	2,99 ± 1,13
0,05-0,10	1,66 ± 0,19	1,49 ± 0,04	1,76 ± 0,53	1,91 ± 0,17	1,51 ± 0,09
0,10-0,20	1,14 ± 0,40	1,19 ± 0,45	1,23 ± 0,35	1,80 ± 0,06	1,99 ± 0,09
Média	1,21 ± 0,37 a	1,22 ± 0,17 a	1,70 ± 0,44 a	2,03 ± 0,25 a	2,16 ± 0,44 a

<sup>(1)</sup> Determinação realizada no conteúdo de água retida na capacidade de campo (-100 hPa). Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%. T0= preparo convencional; T1 e duas e quatro passadas do trator de 4t, respectivamente; T3 e T4= duas e quatro passadas do trator de 10 t.

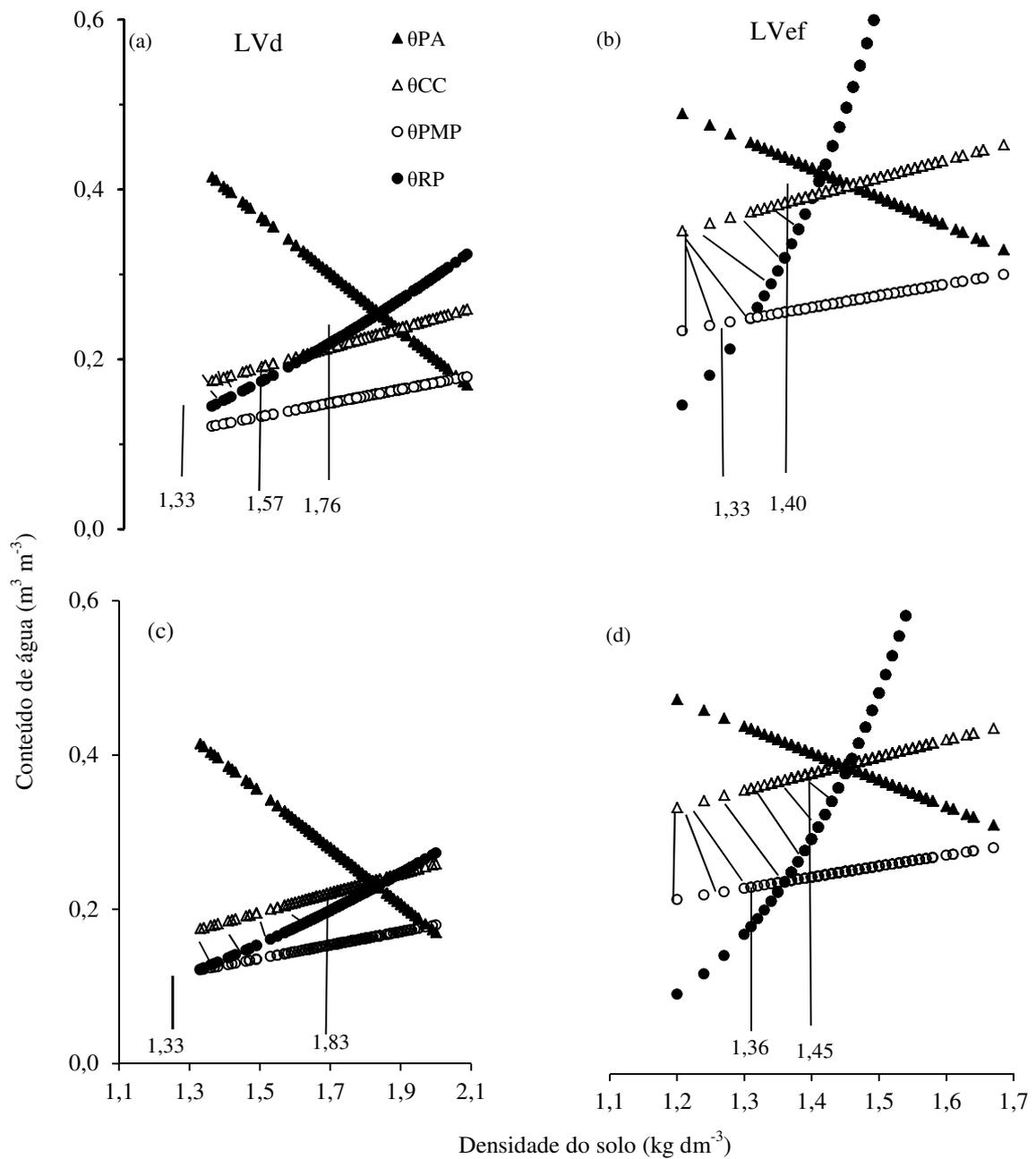


**Figura 2. Correlação entre a densidade em LVd e LVef em função da altura e produtividade de milho (a, b, c e d). As barras referem-se aos erros-padrão das médias. \* significativo a 5% e <sup>ns</sup>: não significativo.**

**Tabela 4. Curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em LVd e LVef na camada de 0-0,20 m para diferentes sistemas de manejo**

Solo	curva de retenção de água	curva de resistência à penetração
LVd	$\theta = -2,18591Ds^{0,96151}\psi^{-0,07325}$ $R^2=0,66^{**}$	$RP = -5,27041\theta^{4,71292}Ds^{-2,39073}$ $R^2=0,78^{**}$
LVef	$\theta = -1,40337Ds^{0,78836}\psi^{-0,08478}$ $R^2= 0,84^{**}$	$RP = -3,98142\theta^{-1,42965}Ds^{10,03552}$ $R^2=0,75^{**}$

<sup>\*\*</sup> significativo a 1%.



**Figura 3.** Conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) em função da densidade do solo no LVd (a e c), no LVef (b e d), para limites críticos da porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e resistência do solo à penetração ( $\theta_{RP}$ ). Em  $R_{Pc}$  de 2 MPa (a e b) e 3 MPa (c e d) na camada de 0-0,20m. A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

## **CAPÍTULO 4 – COMPACTAÇÃO EM LATOSSOLOS E SUAS RELAÇÕES COM O CRESCIMENTO RADICULAR DO MILHO**

**RESUMO** –A intensificação do tráfego de máquinas nas atividades agrícolas pode predispor o solo a uma condição de fragilidade, quando se considera o nível de tensão aplicada em cada sistema de manejo. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar sob diferentes estados de compactação em Latossolos a viabilidade de utilização de atributos físicos como indicadores de qualidade do solo e suas consequências sobre o sistema radicular do milho. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef) em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos foram: T0= preparo convencional, sem tráfego adicional; T1 e T2= duas e quatro passadas do trator de 4 t, respectivamente, T3 e T4= duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. Foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, para determinação da estabilidade de agregados, densidade (Ds), porosidade, resistência do solo à penetração (RP) e parâmetros radiculares do milho. Para a condição no LVef, os índices diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e a porcentagem de agregados maiores que 2,0 mm de diâmetro ( $Ag > 2$ ) apresentaram respostas semelhantes tanto para o T0 como para os demais tratamentos sob compactações induzidas e foram em termos de valores absolutos superiores ao LVd. A RP elevou-se em 80 e 81% respectivamente para o LVd e LVef, em comparação ao T0 e ao T4. Enquanto o incremento no T0 para o T2 no LVef foi de 72%. Os atributos RP, Ds, macroporosidade do solo, podem ser utilizados como identificadores de possíveis compactações em LVd e LVef. A redução da mac em LVd de 0,19 para 0,15  $m^3 m^{-3}$  influenciou positivamente o comprimento radicular (comp) do milho em análise a condição sem tráfego adicional de trator. Somente o comp e a densidade do comprimento radicular do milho em LVd foram mais sensíveis em identificar alterações provocadas pelo tráfego de tratores.

**Palavras chave** –Sistema radicular, atributos físicos, *Zea mays*.

## INTRODUÇÃO

A compactação pode ser decorrente do tráfego de máquinas e implementos sobre o solo, principalmente quando este não se encontra na capacidade de campo e a pressão aplicada é superior à capacidade de suporte do solo. Durante esse processo, ocorrem alterações nos atributos físicos do solo como a reorganização das partículas e de seus agregados aliado a redução irreversível de parte do seu volume. As modificações podem ser permanentes ou temporárias, demonstrando variações cíclicas provocadas por práticas de manejo de solo e culturas. Por sua vez SORACCO et al. (2015), ressaltam que a compactação do solo tem sido reconhecida como um problema grave na agricultura mecanizada, influenciando em várias propriedades e processos do solo. Diante deste fato, busca-se avaliar indicadores de qualidade do solo como estabilidade de agregados, porosidade do solo, infiltração da água, resistência do solo à penetração (RP), desenvolvimento radicular e da parte aérea das culturas com a intenção de evitar a subsolagem do solo. Prática usada apenas em condição extrema e segundo CORTEZ (2013) visa à descompactação da camada subsuperficial do solo, todavia possui elevado custo operacional e elevada demanda energética.

É de conhecimento que a prática da escarificação mecânica aumenta a porosidade do solo, conseqüentemente promove o decréscimo da densidade do solo e favorece o desenvolvimento radicular na camada superficial. Entretanto esse benefício pode desaparecer em dois anos, dependendo da textura, do clima e do manejo da cultura (NUNES et al., 2014). Por outro lado, a adoção desse preparo do solo acelera a mineralização da matéria orgânica e dessa forma influencia o estado de agregação do solo (FABRIZZI et al., 2009). Neste aspecto, RACZKOWSKI et al. (2012) conseguiram afirmar que o preparo do solo após três anos, promoveu o decréscimo em 40% na estabilidade de agregados. Conforme, esses autores comprovam o quanto esse manejo destrói e desestabiliza os agregados como também não permite o acréscimo da concentração desses compostos na superfície do solo. Complementando esse assunto, ASSIS & LANÇAS (2010) verificaram que o preparo do Nitossolo em sistema convencional no período de 20 anos fracionou os agregados maiores em unidades menores que 1 mm. Sendo essas modificações

significativas com relação às características originais, à medida que ocorre incremento da intensidade de preparo do solo tornando-o mais suscetível à erosão.

A relação entre a estabilidade de agregados e a intensidade de mobilização do solo também foi pesquisada por NIERO et al. (2010), que encontraram em Latossolo Vermelho maiores valores de diâmetro médio ponderado (DMP) em manejos com menor mobilização da superfície do solo e maiores valores para porcentagem de agregados menores que 2,0 mm nos manejos de maior revolvimento do solo. Analisando a influência da compactação induzida pelo tráfego do trator de 5 t em Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso sob o cultivo de plantio direto (PD), BERGAMIN et al. (2010) verificaram maior valor de DMP em PD com seis passadas (2,82 mm) não diferindo do PD com quatro passadas (2,81 mm). Enquanto nesse caso, os menores valores de DMP foram encontrados no PD sem compactação adicional (2,78 mm) e no PD com uma passada (2,79 mm). É imprescindível destacar que a falsa agregação mecânica pode ocorrer devido à união de partículas do solo sob alto conteúdo de água no momento da compactação do solo.

Na compactação em LVd de textura média FREDDI et al. (2009) afirmaram, que houve aumento da produção de matéria seca das raízes, da densidade e do diâmetro radicular na camada de 0-0,10 m. Entretanto esses autores, observaram que mesmo tendo macroporos abaixo de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  não houve impedimento para o desenvolvimento radicular. Neste sentido, NUNES et al. (2015) observaram que a densidade radicular do milho correlacionou com os parâmetros da agregação do solo argiloso em plantio direto. Porém esses autores comprovaram por causa da escarificação, que o crescimento radicular foi favorecido na camada de 0,07-0,20 m e não influenciou a agregação do solo em relação ao tratamento sem escarificação.

A persistência da prática inadequada de manejo no solo pode possibilitar o surgimento de camadas compactadas e condições desfavoráveis ao desenvolvimento das culturas. No entanto, é necessário conhecer qual o limite aceitável de alterações nos atributos físicos no solo ao desenvolvimento radicular das culturas.

O objetivo deste estudo foi avaliar sob diferentes estados de compactação em Latossolos a viabilidade de utilizar atributos físicos como indicadores de qualidade do solo e suas consequências sobre o sistema radicular do milho.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado entre as coordenadas geográficas de 21°14'05" S, 48°17'09" W, com altitude de 615 m. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação pluvial média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21°C.

Os solos foram caracterizados por ANDRIOLI & CENTURION (1999) e correspondendo a EMBRAPA (2013) como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico-hipoférrico (LVd) cujo material de origem derivou-se principalmente de arenitos do Grupo Bauru nas porções mais elevadas e planas e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférrico, típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef) originado principalmente dos produtos da alteração dos basaltos (Formação Serra Geral) subjacentes aos arenitos. Os solos apresentaram, na camada de 0-0,20 m, 348 e 560 g kg<sup>-1</sup> de argila, 598 e 240 g kg<sup>-1</sup> de areia, 54 e 200 g kg<sup>-1</sup> de silte, 2,89 e 2,74 kg dm<sup>-3</sup> de densidade de partículas, 14 e 24 g kg<sup>-1</sup> de matéria orgânica e teores compilados de BEUTLER et al. (2005), de 54 e 205 g kg<sup>-1</sup> de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> respectivamente, no LVd e LVef. Antes da instalação dos experimentos, foi realizada a escarificação até 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem leve no sentido perpendicular a área.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados em parcelas subdivididas com cinco tratamentos e quatro repetições. Toda parcela experimental apresentou cinco linhas de milho com 6 m de comprimento, considerando-se útil as três linhas centrais e desprezando-se 1,5 m de cada extremidade. A indução à compactação do solo foi realizada no dia 26 de novembro de 2013, dois dias após intensa precipitação pluvial, quando o solo possuía um conteúdo de água próximo à capacidade de campo na camada de 0-0,20 m de profundidade, determinado conforme EMBRAPA (2011).

Os tratamentos foram constituídos por: T0= solo preparado no sistema convencional e sem tráfego adicional de trator; T1 e T2= duas e quatro passadas do trator de 4 t, respectivamente; T3 e T4= duas e quatro passadas do trator de 10 t, no sentido transversal a área. A compactação foi realizada por meio da passagem dos rodados desses tratores, perfazendo toda a superfície da parcela, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram variaram conforme o tratamento; o tráfego foi sobreposto ao anterior, de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes. Sendo os tratamentos constituídos como as parcelas e as camadas 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m como parcelas subdivididas. Como testemunha para avaliação dos atributos físicos do solo, foram utilizadas áreas de mata nativa adjacentes de ambos os solos.

Para estabelecer os tratamentos T1 e T2 utilizou-se o trator Ford 5610 de 56 kW (70 cv), tração 4 x 2 e massa de 4t, com distribuição de 30% da massa total nas rodas diagonais dianteiras e 70% nas rodas radiais traseiras. Para os tratamentos T3 e T4 foram utilizados uma pá carregadora Caterpillar 924 F de 105 kW (143 cv), tração 4 x 4, pneus 17.5 R 25, radial (L-3), massa de 10t e com a concha vazia.

A semeadura do milho (híbrido simples Maximus) foi efetuada no dia 03 de dezembro de 2013, utilizando-se de uma semeadora-adubadora de plantio direto com cinco linhas, no sentido transversal a área. O mecanismo sulcador do solo da semeadora foi retirado para não eliminar os possíveis efeitos negativos da compactação, sendo utilizado somente o disco de corte do dosador de sementes. A densidade de semeadura foi de cinco a seis sementes por metro, com espaçamento entrelinhas de 0,90m. A adubação na semeadura consistiu da aplicação de 250 kg ha<sup>-1</sup> da formulação N-P-K (8-28-16) e 30 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de zinco para a obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 t ha<sup>-1</sup>, segundo recomendação de RAIJ et al. (1997). A adubação de cobertura foi realizada no estágio V6 da cultura com 230 kg ha<sup>-1</sup> da formulação N-P-K (30-0-10) em superfície, ao lado da linha de semeadura, com a mesma adubadora utilizada na semeadura. Para os trator culturais utilizou-se o trator Massey Ferguson 620 de 77 kW (105 cv), tração 4 x 2 TDA (tração dianteira

auxiliar) e massa de 7t, com distribuição de 40% da massa total nas rodas radiais dianteiras e 60% nas rodas radiais traseiras.

Em 18 de dezembro de 2013, foram coletadas amostras indeformadas nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, utilizando cilindros de  $53,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  (0,032 m de altura e 0,046 m de diâmetro) em seguida foram saturadas durante 24 h e submetidas à tensão de -0,006 MPa em mesa de tensão. Ao atingirem o equilíbrio, foram pesadas e foi determinada a resistência do solo à penetração (RP), com duas subdeterminações por amostra, na camada intermediária do cilindro, perfazendo 100 leituras por determinação, utilizadas para obtenção da RP média. A RP foi determinada por meio de um penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de  $1 \text{ cm min}^{-1}$ , cone com ângulo de  $30^\circ$  e com área da base de  $4,909 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ , equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para aquisição dos dados. Os resultados foram transformados em MPa a partir da equação: média das leituras  $/0,046 \cdot 0,098$ . Na sequência, as amostras foram secas em estufa a  $105^\circ\text{C}$ , durante 24 h, para determinação da densidade do solo. A macroporosidade foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 2011).

Para a análise de agregados via úmida, as amostras coletadas em 6 de março de 2013 foram secas ao ar e desmanchadas manualmente. Posteriormente utilizou-se 50 g de solo passados em peneira de 7,93 mm e retidas em peneira de 4,0 mm, os quais foram pré-umedecidos, conforme o princípio de KEMPER & CHEPIL (1965). Em seguida, as mostras foram colocadas no aparelho de oscilação vertical sobre um conjunto de peneiras de 4,00; 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 mm de diâmetro de abertura de malha, conforme descrito por YODER (1936). Transcorridos 15 min, as porções retidas em cada peneira foram transferidas para latas de alumínio com o auxílio de jatos de água e secas em estufa a  $105^\circ\text{C}$ , por 24 h, para posterior pesagem. A partir dos valores dessas massas, foram calculados a porcentagem de agregados estáveis em água com diâmetro maior que 2,0 mm ( $A_g > 2$ ), o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP), conforme KEMPER & CHEPIL (1965).

No estágio de pendoamento do milho foram retiradas três amostras por parcela e camada, utilizando-se de um trado de caneco, distanciados de 20 cm do eixo principal das plantas de milho. As imagens das raízes foram digitalizadas em um scanner de leitura ótica, na resolução de 400 dpi, que forneceram a área ( $\text{mm}^2$ ), o diâmetro médio (mm) e o comprimento das raízes (mm) pelo software Delta-T Scan. A densidade do comprimento radicular ( $\text{cm cm}^{-3}$ ) foi determinada por meio da divisão do comprimento radicular pelo volume de solo coletado ( $481,06 \text{ cm}^{-3}$ ). Na sequência, as amostras foram secas em estufa a  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  até massa constante, para determinação da massa de matéria seca das raízes por amostra (mg), que foi dividida pelo volume de solo coletado, obtendo-se a densidade da massa de matéria seca das raízes por volume de solo ( $\text{mg cm}^{-3}$ ).

Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro Wilk e Levene, ambos a 5%, para verificação da normalidade dos resíduos e homocedasticidade das variâncias, respectivamente. Somente as variações radiculares do trabalho não apresentaram distribuição normal e homocedasticidade, havendo portanto a necessidade de transformar os dados em  $\sqrt{x + 0,5}$ .

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo software Assistat versão 7.5 beta; e quando significativa às médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%. Realizou-se análise de correlação entre os parâmetros da cultura com os atributos físicos do solo, adotando-se como critérios a maior significância de 5% dos coeficientes da equação de pelo menos em um dos Latossolos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estabilidade de agregados verificada por meio de agregados  $> 2 \text{ mm}$  ( $\text{Ag} > 2$ ) e do diâmetro médio ponderado (DMP) no LVd (Tabela 1), demonstraram a maior redução desses índices no T4 (quatro passadas com o trator de 10 t) ( $\text{DMP} = 0,81 \text{ mm}$  e  $\text{Ag} > 2 = 5,59\%$ ) em comparação aos demais tratamentos na camada de 0-0,10 m. Constata-se que o tratamento T4, proporcionou um indício de degradação estrutural nesse solo e camada, uma vez que esse manejo não foi eficiente em

manter agregados maiores e com valores mais próximos como os que ocorreram na mata nativa (MN). Vale ressaltar, que o índice DMP será maior quanto for a proporção da classe de agregados de maior tamanho, ao passo que o diâmetro médio geométrico (DMG) representa apenas uma estimativa das classes de maior ocorrência. No LVd esses índices foram superiores para a maioria dos tratamentos sob compactações induzidas na camada de 0,10-0,20 m e ao T1 (duas passadas do trator de 4 t) na camada de 0,20-0,30 m. Esse aumento na estabilidade de agregados, pode ser atribuído à possível agregação mecânica que ocorre por efeito da tensão exercida pela compactação, levando à união de partículas sob alto conteúdo de água no solo e não por processos de natureza biológica, portanto sem aumento crescente da agregação.

No LVd o preparo convencional sem tráfego adicional de trator (T0) também apresentou valores elevados de  $Ag > 2$ , DMG e DMP em todas as camadas avaliadas. Nesse caso, o manejo no T0 não foi eficiente em destruir e desestabilizar os agregados e, portanto contrariando as observações de RACZKOWSKI et al. (2012) e NASCENTE et al. (2015). Para esses últimos autores, área com vegetação espontânea de cultura seguida com preparo convencional em LVd exibiu o maior número de agregados menores do que 2 mm e o menor número de agregados maiores do que 8 mm até para 0,20 m, em comparação sob plantas de cobertura no sistema plantio direto.

O valor do DMG no LVd seguiu comportamento semelhante ao DMP, com exceção no T4 (0,10-0,20 m) e para T2 (quatro passadas do trator de 4 t) e T3 (duas passadas do trator de 10 t) (0,20-0,30 m). Para a condição do LVef, os índices  $Ag > 2$  mm, DMG e DMP apresentaram respostas semelhantes tanto para o T0 como para os demais tratamentos sob compactações induzidas. A explicação do comportamento da agregação em ambos os solos, consiste na presença de óxidos de Fe e Al em Latossolos, que são responsáveis em exercer papel preponderante à matéria orgânica (MO) na estabilização dos agregados de solo (SIX et al., 2002). Como o LVd neste estudo foi caracterizado como hipoférrico ( $54 \text{ g kg}^{-1}$  de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), já era previsto uma menor estabilidade de agregados nesse caso em comparação aos manejos cultivados sob LVef ( $205 \text{ g kg}^{-1}$  de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Em ambos os solos, pode-se

constatar maiores valores de  $A_g > 2$  mm, DMG e DMP na MN concordando com o estudo de ROSSETTI et al. (2013) em LVd. Apesar da menor dependência da MO na estabilidade de microagregados em solos tropicais esse atributo também influenciou na agregação da MN. Este padrão é decorrente do maior aporte de material vegetal na MN, propiciando aumento dos teores de MO e, conseqüentemente, aumento da agregação do solo.

No que se refere à resistência do solo à penetração (RP), à densidade (Ds), à macro (mac) e microporosidade (mic) dos solos, não houve interação entre as camadas avaliadas e os tratamentos utilizados, tendo ocorrido diferenças significativas apenas entre os tratamentos principais. Exceção averiguada somente para a mac no LVd e Ds no LVef (Tabelas 2 e 3).

A mac nos tratamentos T1 ao T4 sob compactações induzidas no LVd na camada de 0-0,10 m foram semelhantes entre si, sendo apenas o T3 inferior ao T0 (Tabela 3). Além disso, a partir da profundidade de 0,10 m todos os tratamentos neste solo foram semelhantes entre si. Reforçando o fato de que a massa de 4 ou 10 t aliada a duas e quatro passadas de tratores não influenciou na mac do LVd. Resultado semelhante foi reportado por SORACCO et al. (2015) para a macroporosidade, porosidade total e densidade do Argissolo (0-0,15 m) em comparação aos tratamentos sem tráfego de máquinas agrícola, com três e cinco passadas do trator de 3,8 t. Conforme esses autores, o efeito do tráfego de máquinas não proporcionou uma energia de compactação muito extrema e por isso as alterações dessas variáveis não persistiram depois de dois anos.

Já no LVef, a mac no T1 ao T4 foi inferior ao T0. Constatou-se em ambos os solos, valores de  $mac > 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , que é o mínimo necessário para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, e crítico para o crescimento das raízes da maioria das culturas (REICHERT et al., 2007). Para a condição no LVef verifica-se que a microporosidade (mic) não foi sensível às modificações causadas pelo tráfego dos tratores e nem ao preparo convencional. Esse comportamento pode ser justificado por causa da forte influência da mic do solo com a textura e o teor de carbono orgânico, em contrapartida há baixa influência do

aumento da Ds originada do tráfego de máquinas. Em LVd a mic no T4 foi menor somente em relação ao T0.

A Ds do T0 no LVd foi significativamente menor em relação aos demais tratamentos com compactações induzidas por tratores. Segundo, VOGELMANN et al. (2012) o tráfego adicional com uma pá carregadora (10 t) em semeadura direta por 13 anos elevou a densidade do Argissolo Vermelho-Amarelo em relação ao sistema de semeadura direta na camada de 0-0,10 m (respectivamente 1,68 e 1,56  $\text{Mg m}^{-3}$ ). No entanto para esses autores, os valores da Ds permaneceram abaixo de 1,74  $\text{Mg m}^{-3}$ , valor crítico ao crescimento de plantas para solos com teor de argila de aproximadamente 20% (REICHERT et al., 2009). No LVd a Ds sofreu um acréscimo da camada superficial (0-0,10 m) para 0,10-0,30 m. Nota-se também que no LVef, a Ds no T0 foi inferior aos demais tratamentos até 0,20 m. Essas alterações observadas nas camadas em ambos os solos, devem-se segundo SILVA et al. (2012) ao efeito benéfico temporário da escarificação em reduzir a Ds no solo. Pois foi observado que após seis meses de preparo convencional, a Ds passou a ter um acréscimo de 20%, em que tal comportamento permaneceu estável por mais um ano, tendendo a um estado de estabilização.

Resultado similar também foi constatado por SEKI et al. (2015). Esses autores verificaram que 11 meses após o preparo do Nitossolo Vermelho distroférico sob dez anos cultivado no sistema plantio direto, não havia a persistência do efeito da escarificação. Neste estudo devido provavelmente ao alto teor de argila, os valores da Ds no LVef estão abaixo do valor crítico de 1,44  $\text{Mg m}^{-3}$  mencionado em REICHERT et al. (2009). Porém para o LVd a Ds situou acima do crítico de 1,63  $\text{Mg m}^{-3}$  nos tratamentos com compactação induzida. Em ambos os solos, os valores da Ds na MN foram inferiores em comparação aos tratamentos cultivados concordando dessa maneira com os resultados similares de TORRES et al. (2011) em Latossolo Vermelho. Segundo esses autores, também foi possível confirmar que os manejos cultivados como o preparo convencional, a pastagem e a semeadura direta apresentaram valores médios de Ds superiores ao do campo nativo. Pode-se considerar em razão da vegetação existente na MN e sem ação

antrópica, que esse fato contribui para uma grande quantidade de raízes superficiais e profundas, que provavelmente justificam os baixos valores de Ds observados.

Os resultados de Ds e mac no LVef indicam piores condições nos manejos sob compactação induzida por tratores, apesar de apresentarem a ocorrência de grandes agregados estáveis ( $Ag > 2$ ). Aparentemente conflitantes, os dados revelam neste caso que o tamanho de agregados provavelmente não se formaram devido a uma melhora estrutural no solo e sim por causa da sua compressão. Essa afirmação revela a importância da análise integrada de diferentes indicadores na avaliação da qualidade estrutural do solo.

Pode-se constatar na camada de 0-0,10 m que a Ds teve um acréscimo a partir do T2 em comparação somente ao T1 no LVef. Dessa forma, FREDDI et al. (2007) também notaram que essa camada foi a que apresentou o maior grau de compactação em tratamentos trafegados com tratores de 4 e 11 t em LVd. Conforme esses autores, os atributos físicos do solo foram afetados principalmente pela massa do maquinário e pelo número de passadas do trator, sendo todos favorecidos pelo conteúdo de água próximo a capacidade de campo. Outro resultado em que o número de passadas do trator interferiu nessa variável foi o de BERGAMIN et al. (2010). Para esses autores, a Ds nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m aumentou a partir da pressão aplicada em LV de textura muito argilosa pelo tráfego em duas passadas com um trator de 5 t em plantio direto, em relação ao tratamento sem tráfego, no qual o tráfego em quatro e seis vezes não aumentou a Ds, comparando-os com as duas passadas.

A RP no LVd e no LVef aumentou com o tráfego dos tratores concordando dessa maneira com os resultados de BERGAMIN et al. (2010). OLIVEIRA et al. (2012) também observaram em LVef, que a RP elevou-se com o tráfego do trator de 11 t em relação a condição sem tráfego na camada de 0-0,10 m. Os tratamentos T4 no LVd, T2 e T4 no LVef apresentaram os maiores valores (Tabela 2). A RP em T1, T2 e T3 no LVd não diferiram entre si e mostraram situação intermediária em comparação aos demais tratamentos. Comportamento semelhante se estendeu no LVef para esses mesmos tratamentos com exceção do T2. Observou-se incremento da RP em profundidade apenas no LVd em comparação ao LVef. A RP elevou-se

em 80 e 81% respectivamente para o LVd e LVef, em comparação do T0 ao T4, enquanto o incremento no T0 para o T2 no LVef foi de 77%. Nos tratamentos T1 e T3 no LVd e T2 e T4 no LVef a RP foi superior a 2MPa, não existindo diferença entre as médias desses tratamentos dentro de cada solo. Já FREDDI et al. (2007) afirmaram que a partir do valor de RP de 1,65 MPa em LVd, a produtividade do milho começou a decrescer. Com base nos resultados apresentados neste estudo sobre as variáveis resistência do solo à penetração, densidade e macroporosidade do solo, pode-se afirmar as suas utilizações como identificadores de possíveis compactações em LVd e LVef.

Em relação ao LVd, somente o comprimento (comp) e a densidade do comprimento radicular (Ds comp) apresentaram alterações em comparação aos tratamentos aplicados (Tabela 4 ). O comp foi maior no nível de compactação T4 somente em comparação ao T0. Comportamento similar ocorreu para a Ds comp no LVd. Discordando do resultado de BERGAMIN et al. (2010), que também notaram a influência negativa da compactação adicional no plantio direto sobre o comp em milho. Nesse caso, o resultado na Ds comp está em concordância com as observações de FOLONI et al. (2003). Já todas as variáveis do sistema radicular do milho no LVef não sofreram interferência das compactações (Tabela 5). Para a área, massa seca (MS), densidade da massa seca radicular (Ds MS) no LVef e diâmetro (di) em ambos os solos, não verificou-se diferença estatística entre todas as camadas. O caminho inverso para MS, di e Ds comp foi afirmado por FREDDI et al. (2009) em LVd em toda a profundidade de 0-0,30 m, de acordo com o nível de compactação empregado.

Em ambos os solos mesmo diante do aumento da Ds e da RP aliado a redução na mac nos tratamentos compactados, o crescimento radicular não foi prejudicado quando verificou-se o comprimento e a área radicular. Esse comportamento, embora contraditório também foi comprovado por FREDDI et al. (2007) na camada de 0-0,10 m. Vale ressaltar que o impedimento físico estimado em ambos os solos pela RP, não comprometeu o desenvolvimento radicular do milho. Apesar da constatação da superioridade da RP no T4 (3,91 MPa) em comparação ao T1 (2,10 MPa), T2 (1,95 MPa) e T3 (2,44 MPa) no LVd, esse fato

não interferiu na área, di, comp, MS e densidade da massa seca (Ds MS). Para a condição no LVef a elevada RP em T4 (2,68 MPa) em relação ao T1 (1,78 MPa) e do T3 (1,77 MPa) também não influenciou negativamente o sistema radicular assim como observado no LVd. Deve-se levar em consideração o comentário de DEXTER (1987), o qual afirmou que o crescimento de raízes pode ser inibido com valores de RP inferiores a 1 MPa em solos secos, contudo, com umidade suficiente, pode haver crescimento com RP variando entre 4 e 5 MPa. Para o período correspondente a este estudo durante o crescimento vegetativo, a precipitação pluviométrica acumulada foi de apenas 291 mm (durante os meses de janeiro a março de 2014) e com alguns dias de estiagem. Mesmo assim, não houve impedimento ao enraizamento.

Outro resultado contraditório a este é o de LIPIEC et al. (2012) em Luvisolo. Nesse caso, mesmo com teor de argila de  $70 \text{ g kg}^{-1}$  aliado ao tráfego de tratores com massas de 3, 5, 7 e 10 t ocorreu efeitos significativos da compactação no comprimento radicular e alterações na anatomia radicular de cereais. Pode-se observar que a área, o comprimento e a massa seca da raiz correlacionaram-se negativamente com a macroporosidade em ambos os solos e com a microporosidade no LVd (Figura 1). Sendo que em alguns casos no LVef, as correlações foram não significativas (comp x mac; comp x mic e MS x mac). Nesse caso, constata-se divergência com o estudo de BERGAMIN et al. (2010), os quais observaram correlação positiva e significativa ( $r = 0,72^{**}$ ) no comprimento radicular do milho com a macroporosidade. As variáveis radiculares sofreram menor amplitude com a macro e a microporosidade no LVef, uma vez que no LVd conforme FERREIRA et al. (1999) a menor concentração de óxidos de Fe e o elevado teor de mineral caulinita conferem maior compactação do solo. Ressalta-se que os menores valores de macroporos no LVd influenciaram de forma mais intensa os parâmetros radiculares, pois tal fato pode ser atribuído a uma alteração das plantas às condições restritivas impostas pela compactação em relação a condição no LVef. Verifica-se correlação linear positiva entre a área e o comprimento radicular com a microporosidade no LVef, provavelmente devido ao elevado conteúdo de argila nesse solo.

## CONCLUSÕES

Por meio da estabilidade de agregados, constatou-se a sua fragilidade como indicador da qualidade do solo em manejos que utilizam a compactação induzida pelo tráfego de máquinas.

A redução da macroporosidade em LVd de 0,19 para 0,15 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> influenciou positivamente o comprimento radicular do milho em comparação a condição sem tráfego adicional.

Os atributos resistência do solo à penetração, densidade e macroporosidade do solo, podem ser utilizados como identificadores de possíveis compactações em LVd e LVef.

Somente o comprimento e a densidade de comprimento radicular do milho em LVd foram mais sensíveis em identificar alterações provocadas pelo tráfego de tratores.

## REFERÊNCIAS

ANDRIOLI, I. & CENTURION, J. F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 27., Brasília, 1999. Anais... Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. CD ROM.

ASSIS, R. L. de & LANÇAS, K. P. Agregação de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa. Eng. Agríc., 30: 58-66, 2010.

BERGAMIN, A. C., VITORINO, A. C. T., FRANCHINI, J. C., SOUZA, C. M. A. de & SOUZA F. R. de. Compactação de um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. R. Bras. Ci. Solo. 34: 681-691, 2010.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G. & FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. R. Bras. Ci. Solo. 29: 843-849, 2005.

CORTEZ, L. A. Subsolação em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013. 57p. (Tese de Mestrado).

DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. Plant soil, 98: 303-312, 1987.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análises de solo. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/>>. Acesso em 03 mar. 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

FABRIZZI, K.P.; RICE, C.W.; AMADO, T.J.C.; FIORIN, J.; BARBAGELATA, P. & MELCHIORI, R. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. Biogeochemistry, 92:129-143, 2009.

FERREIRA, M. M., FERNANDES, B. & CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 23: 515-524, 1999.

FOLONI, J. S.; CALONEGO, J. C. & LIMA, S. L. de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. Pesq. Agropec. Bras., 38: 947-953, 2003.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G. & LEONEL, C. L. Compactação do solo e no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. R. Bras. Ci. Solo, 31: 627-636, 2007.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P. & PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II-Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. R. Bras. Ci. Solo, 33: 805-818, 2009.

KEMPER, W. D. & CHEPIL, W. S. Size distributions of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy, 1965. Part 1, p. 449-510.

LIPIEC, J.; HORN, R.; PIETRUSIEWICZ, J. & SICZEK, A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. Soil Till. Res., 121: 74-81, 2012.

NASCENTE, A. S.; LI, Y. & CRUSCIOL, C. A. C. Soil aggregation, organic carbon concentration, and soil bulk density as affected by cover crop species in a no-tillage system. R. Bras. Ci. Solo, 39: 871-879, 2015.

NIERO, L. A. C.; DECHEN, S. C. F.; COELHO, R. M. & DE MARIA, I. C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho distroférico com usos e manejos distintos. R. Bras. Ci. Solo, 34: 1271-1282, 2010.

NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S. & SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. Pesq. Agropec. Bras., 49: 531-539, 2014.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; PAULETTO, E. A.; FAGANELLO, A. & PINTO, L. F. S. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. Geoderma, 259-260: 149-155, 2015.

OLIVEIRA, P. R. de; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; BÁRBARO JÚNIOR, L. S. & ROSSETTI, K. V. Qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido à níveis de compactação e de irrigação. R. Bras. Ci. Solo, 36: 587-597, 2012.

RACZKOWSKI, C. W.; MUELLER, J. P.; BUSSCHER, W. J.; BELL, M. C. & MC GRAW, M. L. Soil physical properties of agricultural systems in a large scale study. *Soil Till. Res.*, 119: 50-59, 2012.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; O. C.; QUAGGIO, J. H. & FURLANI, A. M. C. A. Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. & REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S. & REICHERT, J.M., ed. Tópicos em ciência do solo. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. & REINERT, D. J.; HORN, R. & HAAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102: 242-254, 2009.

ROSSETTI, K. V., CENTURION, J. F. & SOUSA NETO, E. L. de. Physical quality of an Oxisol after different periods of management systems. *R. Bras. Ci. Solo*, 37: 1522-1534, 2013.

SEKI, A. S.; SEKI, F. G.; JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A. & BENEZ, S. H. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. *Ver. Ciênc. Agron.*, 46: 460-468, 2015.

SILVA, S. G. C.; SILVA, A. P. da; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A. & SÁ, J. C. M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage . *R. Bras. Ci. Solo*, 36: 547-555, 2012.

SIX, J.; CALLEWAERT, P.; LENDERS, S.; DE GRYZE, S.; MORRIS, S. J.; GREGORICH, E. G.; PAUL, E. A. & PAUSTIAN, K. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 1981-1987, 2002.

SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; VILLARREAL, R.; PALANCAR, T. C.; COLLAZO, D. J.; SARLI, G. O. & FILGUEIRA, R. R. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. *R. Bras. Ci. Solo*, 39: 408-415, 2015.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J. & PEREIRA, M. G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Ciênc. Agrotec.*, 35: 437-445, 2011.

VOGELMANN, E. S.; MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P. da; BARROS, C. A. P. de & REINERT, D. J. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. *Ci. Rural*, 42: 291-297, 2012.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agric.*, 28:337-351, 1936.

**Tabela 1. Porcentagem de agregados > 2 mm estáveis em água (Ag > 2), diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) em Latossolos sob diferentes tratamentos e camadas**

Tratamento	LVd			LVef		
	DMG -----mm-----	DMP	Ag > 2 %	DMG -----mm-----	DMP	Ag > 2 %
0-0,10 m						
T0	2,04 Aa	3,44 Aa	58,21 Aa	3,04 Aa	4,12 ABa	72,47 Aa
T1	1,04 BCa	2,13 Ba	33,71 Ba	3,37 Aa	4,42 Aa	75,45 Aa
T2	1,03 BCab	1,93 Ba	29,44 Ba	2,32 Ab	3,27 Bb	60,15 Ab
T3	1,26 Ba	2,03 Ba	33,54 Ba	2,74 Aa	3,54 ABa	65,03 Aa
T4	0,61 Ca	0,81 Cb	5,59 Cb	2,55 Aa	3,54 ABa	61,96 Aab
MN	5,37	5,64	97,35	5,74	5,85	98,92
0,10-0,20 m						
T0	1,32 Ab	2,26 ABb	37,81 Ab	3,22 Aa	4,21 ABa	73,46 Aa
T1	1,17 Aa	2,09 ABa	35,05 ABa	3,45 Aa	4,36 ABa	76,94 Aa
T2	1,27 Aa	2,41 Aa	37,03 Aa	3,48 Aa	4,49 Aa	77,98 Aa
T3	1,03 Aa	1,77 ABa	26,21 ABab	2,46 Aa	3,33 Ba	61,71 Aa
T4	0,91 Aa	1,45 Bab	19,98 Ba	2,72 Aa	3,81 ABa	65,32 Aa
MN	4,80	5,28	93,09	5,56	5,74	98,21
0,20-0,30 m						
T0	1,42 Ab	2,40 ABb	40,53 ABb	2,60 Aa	3,55 ABa	64,85 Aa
T1	1,49 Aa	2,77 Aa	44,83 Aa	2,21 Ab	3,16 ABb	57,81 Ab
T2	0,66 Bb	1,04 Cb	12,21 Cb	2,67 Ab	3,76 Ab	64,53 Ab
T3	0,82 Ba	1,31 Ca	17,80 Cb	2,42 Aa	3,40 ABa	62,31 Aa
T4	1,0 ABa	1,79 BCa	25,37 BCa	1,78 Ab	2,62 Bb	51,43 Ab
MN	3,45	4,43	77,03	5,18	5,49	96,65
CV(%) <sup>1</sup>	23,49	20,59	24,84	25,64	19,91	19,06
CV(%) <sup>2</sup>	24,36	22,77	25,90	16,03	11,31	10,11

T0: sem compactação, T1 e T2: duas e quatro passadas do trator de 4t, respectivamente, T3 e T4: duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas) <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Letras maiúsculas referem-se à comparação de atributos do solo entre os tratamentos numa mesma camada e as minúsculas comparam médias de atributos do solo em camadas para um mesmo tratamento.

**Tabela 2. Densidade (Ds), microporosidade (mic) e resistência do solo à penetração (RP) em LVd; mic, macroporosidade (mac) e RP em LVef sob diferentes tratamentos e camadas**

Tratamento	LVd			LVef		
	Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	mic (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	RP (MPa)	mic (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	mac (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	RP (MPa)
T0	1,57 b	0,218 a	0,77 c	0,313 a	0,278 a	0,52 c
T1	1,78 a	0,197 ab	2,10 b	0,344 a	0,186 b	1,78 b
T2	1,72 a	0,201 ab	1,95 b	0,332 a	0,195 b	2,22 ab
T3	1,76 a	0,187 ab	2,44 b	0,339 a	0,200 b	1,77 b
T4	1,73 a	0,165 b	3,91 a	0,348 a	0,187 b	2,68 a
MN	1,50	0,21	0,94	0,244	0,398	1,58
CV (%)	3,66	21,18	26,54	18,45	28,87	20,89
<b>Camada</b>						
0-0,10 m	1,65 b	0,194 a	1,88 b	0,328 a	0,219 a	1,90 a
MN	1,32	0,216	0,80	0,247	0,45	0,41
0,10-0,20 m	1,75 a	0,192 a	2,57 a	0,345 a	0,202 a	1,64 a
MN	1,62	0,204	1,05	0,205	0,385	1,36
0,20-0,30 m	1,74 a	0,195 a	2,26 ab	0,331 a	0,207 a	1,84 a
MN	1,58	0,209	0,97	0,279	0,359	1,26
CV (%)	5,91	20,14	25,79	16,35	28,31	28,18

T0: sem compactação, T1 e T2: duas e quatro passadas do trator de 4t, respectivamente, T3 e T4: duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). Médias seguidas da mesma letra, no sentido vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

**Tabela 3. Macroporosidade (Mac) em LVd e densidade do solo (Ds) em LVef sob diferentes tratamentos e camadas**

Camada (m)	T0	T1	T2	T3	T4	MN
	LVd					
	mac ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )					
0-0,10	0,246 Aa	0,192 ABa	0,213 ABa	0,138 Ba	0,168 ABa	0,299
0,10-0,20	0,178 Aab	0,137 Aa	0,156 Aab	0,133 Aa	0,179 Aa	0,238
0,20-0,30	0,136 Ab	0,198 Aa	0,129 Ab	0,207 Aa	0,185 Aa	0,219
CV (%) <sup>1</sup> = 29,48						
CV (%) <sup>2</sup> = 26,88						
	LVef					
	Ds ( $\text{Mg m}^{-3}$ )					
0-0,10	1,15 Cb	1,33 Ba	1,50 Aa	1,40 Aba	1,41 ABa	0,77
0,10-0,20	1,23 Bb	1,39 Aa	1,44 Aab	1,39 Aa	1,36 Aa	1,06
0,20-0,30	1,32 Aa	1,36 Aa	1,40 Ab	1,43 Aa	1,43 Aa	1,13
CV (%) <sup>1</sup> = 5,79						
CV (%) <sup>2</sup> = 3,61						

T0: sem compactação, T1 e T2: duas e quatro passadas do trator de 4t, respectivamente, T3 e T4: duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas). <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Letras maiúsculas referem-se à comparação de atributos do solo entre os tratamentos numa mesma camada (comparação na horizontal) e as minúsculas comparam médias de atributos do solo em camadas para um mesmo tratamento (comparação na vertical).

**Tabela 4. Área, diâmetro (di), comprimento (comp) e densidade de comprimento das raízes (Ds comp), massa seca de raízes (MS) e densidade de massa seca de raiz (Ds MS) em LVd sob diferentes tratamentos e camadas**

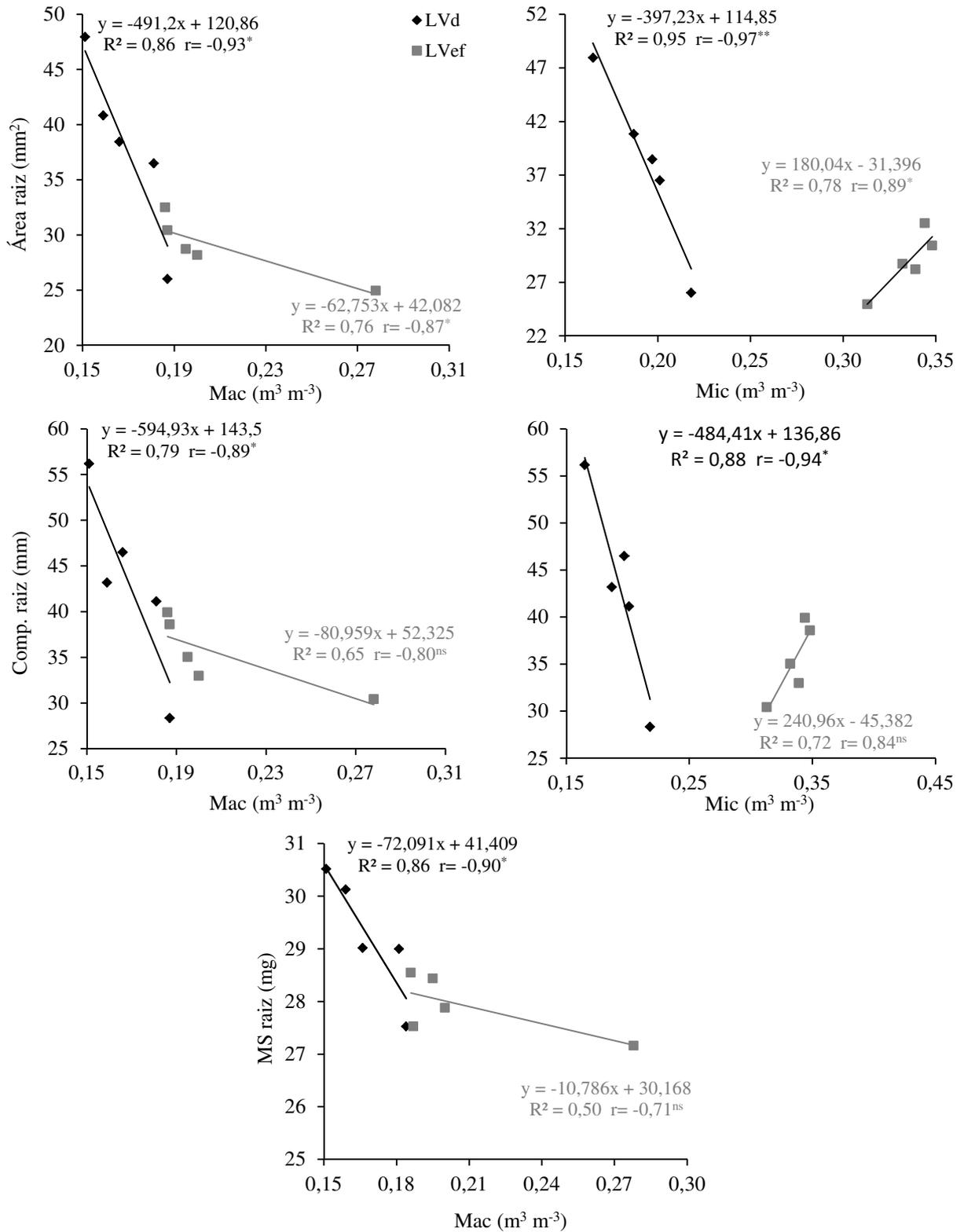
Tratamento	área	di	comp	Ds comp LVd	MS	Ds MS
	mm <sup>2</sup>	mm	mm	cm cm <sup>-3</sup>	mg	mg cm <sup>-3</sup>
T0	26,01 a	1,15 a	28,35 b	1,48 b	27,53 a	1,44 a
T1	38,46 a	1,06 a	46,51 ab	2,25 ab	29,02 a	1,50 a
T2	36,50 a	1,13 a	41,13 ab	2,01 ab	29,00 a	1,50 a
T3	40,83 a	1,18 a	43,19 ab	2,11 ab	30,13 a	1,55 a
T4	47,94 a	1,10 a	56,19 a	2,67 a	30,52 a	1,56 a
Camada (m)						
0-0,10	46,70 a	1,13 a	51,56 a	2,47 a	31,14 a	1,59 a
0,10-0,20	41,56 a	1,14 a	47,30 a	2,28 a	29,52 ab	1,52 ab
0,20-0,30	25,59 b	1,10 a	30,63 b	1,56 b	27,06 b	1,42 b
CV (%) <sup>1</sup>	39,61	7,79	31,52	27,54	10,11	8,08
CV (%) <sup>2</sup>	33,77	8,23	28,88	25,56	9,72	7,67

T0: sem compactação, T1 e T2: duas e quatro passadas do trator de 4t, respectivamente, T3 e T4: duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas). <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Médias seguidas da mesma letra, no sentido vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

**Tabela 5. Área, diâmetro (di), comprimento (comp) e densidade de comprimento das raízes (Ds comp), massa seca de raízes (MS) e densidade de massa seca de raiz (Ds MS) em LVef sob diferentes tratamentos e camadas**

Tratamento	área	di	comp	Ds comp LVef	MS	Ds MS
	mm <sup>2</sup>	mm	mm	cm cm <sup>-3</sup>	mg	mg cm <sup>-3</sup>
T0	24,95 a	1,08 a	30,43 a	1,57 a	27,16 a	1,43 a
T1	32,49 a	1,07 a	39,91 a	1,96 a	28,55 a	1,48 a
T2	28,72 a	1,08 a	35,03 a	1,75 a	28,44 a	1,47 a
T3	28,19 a	1,09 a	32,98 a	1,68 a	27,88 a	1,45 a
T4	30,42 a	1,04 a	38,59 a	1,91 a	27,53 a	1,44 a
Camada (m)						
0-0,10	33,50 a	1,07 a	41,48 a	2,03 a	28,04 a	1,46 a
0,10-0,20	28,79 a	1,09 a	34,22 ab	1,72 ab	28,45 a	1,48 a
0,20-0,30	24,57 a	1,06 a	30,45 b	1,57 b	27,25 a	1,43 a
CV (%) <sup>1</sup>	37,93	5,35	33,76	27,68	5,10	3,85
CV (%) <sup>2</sup>	37,29	7,93	28,57	23,83	6,31	4,77

T0: sem compactação, T1 e T2: duas e quatro passadas do trator de 4t, respectivamente, T3 e T4: duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. MN: mata nativa em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd) e LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef). <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas). <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Médias seguidas da mesma letra, no sentido vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.



**Figura 1. Correlação da área raiz entre a macro (Mac) e microporosidade (Mic); comprimento radicular (Comp raiz) entre a Mac e Mic; massa seca radicular (MS raiz) com a Mac.**