

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**EFEITO RESIDUAL DE INTERVENÇÕES
MECÂNICAS PARA DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO
MANEJADO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marta Sandra Drescher

Santa Maria, RS, Brasil

2011

EFEITO RESIDUAL DE INTERVENÇÕES MECÂNICAS PARA DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO MANEJADO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

por

Marta Sandra Drescher

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Biodinâmica e Manejo do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo.**

Orientador: Flávio Luiz Foletto Eltz

Santa Maria, RS, Brasil

2011

D773p

Drescher, Marta Sandra

Efeito residual de intervenções mecânicas para descompactação do solo manejado sob sistema plantio direto / por Marta Sandra Drescher - 2011.

81 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: Flávio Luiz Foletto Eltz

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2011

1. Ciência do solo 2. Sistema plantio direto 3. Compactação do solo
4. Descompactação mecânica 5. Sistema de manejo do solo I. Eltz, Flávio Luiz Foletto II. Título.

CDU 631.4

Ficha catalográfica elaborada por Denise Barbosa dos Santos – CRB 10/1756
Biblioteca Central UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação
de Mestrado

**EFEITO RESIDUAL DE INTERVENÇÕES MECÂNICAS PARA
DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO MANEJADO SOB SISTEMA
PLANTIO DIRETO**

elaborada por
Marta Sandra Drescher

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Flávio Luiz Foletto Eitz, PhD.
(Presidente/Orientador)

Dalvan José Reinert, PhD. (UFMS)

José Eloir Denardin, Dr. (Embrapa Trigo)

Santa Maria, 03 de março de 2011

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial a meus pais Aníbal e Reni Drescher, pelo apoio, encorajamento, amor e pelos ensinamentos que formaram os alicerces de minha história, sendo meus verdadeiros Mestres e exemplos de vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, pela bênção e proteção guiando meus passos em todos os momentos de minha vida.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Solos e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela oportunidade de realização deste trabalho.

À CAPES e ao CNPq, pela concessão da bolsa e financiamento dos estudos.

À Embrapa Trigo, representada pelos pesquisadores José Eloir Denardin, Antônio Faganello e Arcenio Sattler, pela área concedida, pelo auxílio, apoio financeiro e ensinamentos repassados.

Ao professor-orientador Flávio Luiz Foletto Eltz, agradeço muito pelos ensinamentos repassados e pela orientação, apoio, amizade e confiança depositados em mim durante todos esses anos de parceria e trabalho, iniciados na graduação e reforçados durante o mestrado.

À banca examinadora desse trabalho, composta pelo pesquisador José Eloir Denardin e pelos professores Dalvan José Reinert e Flávio Luiz Foletto Eltz, pelas considerações, discussão e sugestões.

Aos demais professores do PPGCS, pelo conhecimento e pela amizade.

Aos meus pais Aníbal e Reni Drescher, por todo o ensinamento, amor, carinho e incentivo que serviram como base para que eu buscasse meus sonhos, objetivos e ideais.

À minha irmã Márcia e ao meu irmão Gerson pelo companheirismo, apoio e compreensão em todos os momentos de minha vida.

Ao meu namorado e grande amigo Marlon Wendt por todo seu amor, carinho, apoio, compreensão e companheirismo, mesmo com a distância e nos momentos mais difíceis.

À equipe de funcionários de campo e do laboratório de solos da Embrapa Trigo, pelo auxílio, apoio e instrução para a realização dos trabalhos. Em especial, aos Técnicos de campo Luiz Albery Medeiros e Darci, pelo auxílio nas atividades de campo e ao laboratorista, Assistente de Operações, Olmiro Siqueira Kellermann, pela ajuda e explicações para a realização das análises laboratoriais contempladas pelo projeto.

Agradeço de maneira especial aos bolsistas de iniciação científica e colaboradores Gerson Drescher, Volnei Rocha Porto e Pedro Pascotini, que não importando a dimensão ou a importância do trabalho, o realizaram de forma brilhante e com qualidade.

À Ana Paula Moreira Rovedder, pela parceria nos trabalhos e também pela amizade, ensinamentos e conselhos.

Aos amigos Larisse Martin, Juliana Larrosa, Giuvan Lenz, Zanandra Boff de Oliveira, Viviane Capoane, Paulo Fabrício Sachet Massoni, Juliana Lorensi, Elisandra Pocojescki, Angélica Souza, Natália Schwab, Rosmary Panno e Mônica Vanzo, que foram decisivos em todos os momentos desta etapa ofertando seu carinho, amizade, conselhos e compreensão.

Aos demais colegas do laboratório de Manejo e Conservação do Solo, pela convivência e amizade.

À todos os colegas de pós-graduação, pela companhia e convívio, por compartilhar os conhecimentos, auxiliando na execução, andamento e conclusão deste trabalho, e, principalmente, pela amizade e momentos de descontração.

Aos demais familiares e amigos, que próximos ou distantes, estiverem sempre presentes com seu afago e apoio, me incentivando, nunca deixando que eu desistisse dos meus objetivos.

Agradeço também as demais pessoas que, mesmo aqui não citadas, auxiliaram e contribuíram de alguma forma na realização desse trabalho.

À todos vocês, meus sinceros sentimentos de gratidão!

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

(José de Alencar)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

EFEITO RESIDUAL DE INTERVENÇÕES MECÂNICAS PARA DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO MANEJADO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

AUTORA: Marta Sandra Drescher

ORIENTADOR: Flávio Luiz Foletto Eltz

Local e data de defesa: Santa Maria, 03 de março de 2011

A compactação tornou-se uma das principais causas de degradação do solo em áreas agrícolas, estando diretamente relacionada ao sistema de manejo do solo adotado. Essa situação pode ser observada na região de clima subtropical úmido do Brasil, mediante verificação da degradação estrutural da camada subsuperficial do solo, perceptível, em áreas manejadas sob sistema plantio direto (SPD), por alterações de propriedades físicas do solo, alterações morfológicas de raízes e percepção, ocasional, de redução da produtividade das culturas. Nesse sentido, este trabalho objetivou gerar conhecimento sobre o efeito residual de intervenções mecânicas para descompactação do solo manejado sob sistema plantio direto, conjugadas ao mecanismo de rompimento do solo utilizado na semeadora sobre parâmetros físicos do solo, rendimento de cultura e força exercida na barra de tração de trator agrícola. Para tanto, realizou-se um estudo no município de Coxilha, na região norte do Rio Grande do Sul, sob um experimento de longa duração da Embrapa – Trigo. Este experimento foi instalado no ano de 2001, em área de lavoura com histórico de oito anos sob SPD. Nessa área foram realizadas intervenções mecânicas anuais, mediante aração e escarificação do solo, anteriores a implantação da cultura de verão. O delineamento experimental adotado foi blocos ao acaso em parcelas subdivididas, com três repetições. Compõem os tratamentos uma testemunha, representada pela manutenção ininterrupta do SPD por 16 anos e tratamentos constituídos por seis períodos de tempo de condução do SPD (7,5; 6,5; 5,5; 4,5; 3,5 e 2,5 anos) após escarificação e, os mesmo períodos de condução do SPD após aração. A semeadora equipada com discos e com facão+discos, para a colocação do adubo no sulco da semeadura, constituiu as subparcelas. Os resultados obtidos indicaram que a intervenção mecânica em solo manejado sob sistema plantio direto consolidado, mediante a prática de escarificação ou aração do solo, apresenta potencial efêmero para mitigar a compactação e promover a melhoria da estrutura do solo, com efeito residual até dois anos e meio após intervenção. Este efeito residual não promoveu alterações nos parâmetros de rendimento de grãos da cultura da soja na safra agrícola 2008/2009 e força exercida na barra de tração de trator agrícola, comparativamente à área manejada há 16 anos sob sistema plantio direto consolidado. Por outro lado, o mecanismo rompedor de solo, tipo facão+disco, que equipa semeadora para plantio direto, mostrou-se mais efetivo em alterar os parâmetros avaliados do que o efeito residual de intervenção mecânica com aração ou escarificação, em solo manejado sob SPD consolidado. Nesse sentido, o emprego de elementos rompedores de solo, tipo facão de ação profunda, projetado para atuar na camada compactada em semeadoras para plantio direto, promoveu mitigação da compactação do solo na camada de 7 a 15 cm, mediante aumento da macroporosidade do solo e redução da microporosidade, densidade do solo, resistência do solo à penetração mecânica e força exercida na barra de tração de máquina agrícola, em comparação com uso de semeadoras equipadas apenas com discos.

Palavras-chave: Sistema Plantio Direto. Compactação do Solo. Descompactação Mecânica. Sistema de Manejo do Solo.

ABSTRACT

Master Dissertation
Soil Science Graduate Program
Universidade Federal de Santa Maria

RESIDUAL EFFECT OF MECHANICAL INTERVENTIONS FOR DESCOMPACTION OF SOIL MANAGED UNDER NO-TILL

AUTHOR: Marta Sandra Drescher

ADVISOR: Flávio Luiz Foletto Eitz

Place and date of the defense: Santa Maria, 03th, March, 2011.

The compaction became one of the main causes for soil degradation in agricultural areas, being directly related to the soil management system adopted. This situation can be observed in the Brazil humid subtropical climate area, by verification of the structural degradation of the soil subsuperficial layer, perceptible, in areas managed under no-till system (NTS), by alterations of soil physical properties, morphologic alterations of roots and perception, occasional, of crop yield reduction. In this sense, this work aimed at to generate knowledge about the residual effect of mechanical interventions for descompaction of soil managed under no-till, conjugated to the mechanism of soil breaking used in drillers, about physical parameters of the soil, crop yield and force exercised on the agricultural tractor bar. For this, was carried out a study in the municipal district of Coxilha, in the northern area of Rio Grande do Sul, under a long duration experiment of Embrapa - Wheat. This experiment was installed in the year of 2001, in a farming area with eight year-old report under NTS. In that area, annual mechanical interventions were accomplished, by soil plowing and chiseling, previous the implantation of the summer crop. The adopted experimental design was random blocks with subdivided plots, with three repetitions. The treatments were a witness, which was the uninterrupted maintenance of NTS by 16 years and treatments constituted by six periods of time of NTS (7,5; 6,5; 5,5; 4,5; 3,5 and 2,5 years) after chiseling and, the same periods of NTS after plowing. The driller equipped with disks and with knife+disks, for the fertilizer placement in the sowing furrow, constituted the split-plots. The results indicated that the mechanical intervention in soil managed under consolidated no-tillage through the soil chiseling or plowing, has potential to mitigate the ephemeral compaction and promote the improvement of soil structure, with a residual effect up to two years and half after the intervention. This residual effect did not change the parameters of soybean grain yield in the crop year 2008/2009 and the force exercised on the agricultural tractor drawbar, compared to the area managed for 16 years under consolidated no-till. Moreover, the soil breaker mechanism, type knife + disk, which equips the no-till driller, was more effective in changing the evaluated parameters than the residual effect of mechanical intervention of chiseling or plowing the soil managed under consolidated no-till. In this sense, the use of elements of soil breakers, like knife of deep action, designed to work in the compacted layer by no-till drillers, promoted mitigation of soil compaction in the 7-15 cm layer, by increasing soil macroporosity and reduction of microporosity, bulk density, soil penetration resistance and mechanical force exerted on the farm machinery drawbar, compared with the use of drillers equipped only with discs.

Key words: No-till System. Soil Compaction. Mechanical Decomposition. Soil Management System.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Imagem da área experimental extraída do Google Earth (a) e área experimental no momento da coleta de dados (b).34
- Figura 2 - Localização geográfica do município de Coxilha – RS, local de condução, em escala de campo, do experimento utilizado nesse estudo. Fonte: RioGrandedoSul MesoMicroMunicip.svg35
- Figura 3 – Arado de disco (a) e grade niveladora (b) utilizados para descompactação mecânica do solo em área manejada sob sistema plantio direto.37
- Figura 4 – Escarificador com rolo destorroador utilizado para descompactação mecânica do solo em área manejada sob sistema plantio direto.38
- Figura 5 – Estratificação do solo pelo método do perfil cultural em três camadas (0 a 7, 7 a 15 e 15 a 22 cm) para coleta do solo com estrutura preservada (a) e disposição dos anéis volumétricos e obtenção das amostras com estrutura indeformada para avaliação de parâmetros físicos do solo (b).41
- Figura 6 – Penetrômetro eletrônico de bancada modelo MA 933 da marca Marconi utilizado para determinação da resistência do solo à penetração mecânica avaliada em laboratório (a) e Penetrômetro de campo da marca Falker modelo PLG 1020 utilizado para determinação da resistência do solo à penetração mecânica, avaliada no campo (b).42
- Figura 7 - Trator da marca Valmet com dupla tração, utilizado na avaliação da força exercida na barra de tração de trator agrícola (a) e detalhe da haste sulcadora tracionada pelo trator (b).43
- Figura 8 - Colhedora de parcelas da marca Wintersteiger utilizada para colheita mecânica da soja na safra agrícola 2008/2009.44
- Figura 9 - Resistência do solo à penetração mecânica em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e áreas em que o manejo sob sistema plantio direto contínuo foi interrompido por intervenção mecânica mediante aração há 7,5 anos (A7), 6,5 anos (A6), 5,5 anos

(A5), 4,5 anos (A4), 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2). As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de resistência do solo à penetração mecânica, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para cada profundidade.56

Figura 10 - Resistência do solo à penetração mecânica em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e áreas em que o manejo sob sistema plantio direto contínuo foi interrompido por intervenção mecânica mediante escarificação há 7,5 anos (E7), 6,5 anos (E6), 5,5 anos (E5), 4,5 anos (E4), 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2). As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de resistência do solo à penetração mecânica, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para cada profundidade.57

Figura 11 - Resistência do solo à penetração mecânica em parcelas manejadas sob sistema plantio direto a partir de intervenção por aração e escarificação para descompactação mecânica do solo e parcelas manejadas sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos. As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de resistência do solo à penetração mecânica, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para cada profundidade.59

Figura 12 - Resistência do solo à penetração mecânica em parcelas com semeadura realizada com semeadoras equipadas com mecanismo de rompedor do solo tipo discos e facão+discos em área manejada sob sistema plantio direto após intervenção mecânica por escarificação do solo (a) e por aração (b). As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de resistência do solo à penetração mecânica, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para cada profundidade.60

Figura 13 - Correlação linear de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração mecânica, determinada com penetrômetro eletrônico de bancada e com penetrômetro de campo.61

Figura 14 – Esforço médio exercido na barra de tração de trator agrícola em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e áreas em que o manejo sob sistema plantio direto contínuo foi

interrompido por intervenção mecânica mediante aração há 7,5 anos (A7), 6,5 anos (A6), 5,5 anos (A5), 4,5 anos (A4), 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2) e por escarificação há 7,5 anos (E7), 6,5 anos (E6), 5,5 anos (E5), 4,5 anos (E4), 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2). As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de esforço médio exercido na barra de tração de trator agrícola, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.62

Figura 15 – Esforço médio exercido na barra de tração de trator agrícola, avaliada por haste sulcadora, estabelecendo comparativo entre parcelas cuja semeadura foi realizada com semeadoras equipadas com mecanismo rompedor do solo tipo discos e facão+discos em área com intervenções no sistema plantio direto mediante a aração ou escarificação e área submetida a sistema plantio direto contínuo por 16 anos. Os resultados foram comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de erro dentro de cada sistema de manejo do solo.63

Figura 16 – Rendimento de grãos da cultura da soja (Kg ha^{-1}) no ano agrícola 2008/2009 em área submetida à aração há 7,5 anos (A7); 6,5 anos (A6); 5,5 anos (A5); 4,5 anos (A4); 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2); área submetida à escarificação há 7,5 anos (E7); 6,5 anos (E6); 5,5 anos (E5); 4,5 anos (E4); 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2) e parcela testemunha manejada a 16 anos sob sistema plantio direto (T). A barra vertical corresponde a diferença mínima significativa dos valores de rendimento de grãos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.65

Figura 17 – Rendimento de grãos da cultura da soja (Kg ha^{-1}) no ano agrícola 2008/2009, em parcelas com semeadura realizada com semeadoras equipadas com mecanismo de corte do tipo discos e facão+discos. A barra vertical corresponde a diferença mínima significativa dos valores de rendimento de grãos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica e densidade de partícula nas camadas de 0 a 7, 7 a 15, 15 a 20 e 0 a 20 do Latossolo Vermelho Distrófico húmico da área experimental situada no município de Coxilha - RS.	36
Tabela 2 - Caracterização química nas camadas de 0 a 7, 7 a 15, 15 a 20 e 0 a 20 do Latossolo Vermelho Distrófico húmico da área experimental situada no município de Coxilha - RS.	36
Tabela 3 – Caracterização temporal dos tratamentos nas parcelas principais do experimento de campo.	39
Tabela 4 - Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Microp.) e macroporosidade do solo (Macrop.) em Latossolo Vermelho Distrófico húmico, em parcelas manejadas sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e parcelas em que o manejo sob sistema plantio direto foi interrompido por intervenção mecânica mediante aração há 7,5 anos (A7), 6,5 anos (A6), 5,5 anos (A5), 4,5 anos (A4), 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2) e mediante escarificação do solo a há 7,5 anos (E7), 6,5 anos (E6), 5,5 anos (E5), 4,5 anos (E4), 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2).	50
Tabela 5 – Densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo, em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto, comparativo entre adoção de semeadora com rompedores de solo tipo discos e facão+discos.	52
Tabela 6 - Resistência do solo à penetração mecânica avaliada pelo método do penetrômetro eletrônico de bancada em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e áreas em que o manejo sob sistema plantio direto contínuo foi interrompido por intervenção mecânica mediante aração há 7,5 anos (A7); 6,5 anos (A6); 5,5 anos (A5); 4,5 anos (A4); 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2) e por escarificação há 7,5 anos (E7); 6,5 anos (E6); 5,5 anos (E5); 4,5 anos (E4); 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2) e comparativo entre adoção de semeadora com rompedores de solo tipo discos e facão+discos. .	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.2 Hipóteses	18
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo geral.....	18
1.3.2 Objetivos específicos	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Qualidade do solo e sistema de manejo	20
2.2 Compactação do solo em áreas manejadas sob sistema plantio direto...23	23
2.3 Propriedades físicas do solo associadas ao processo de compactação .25	25
2.3.1 Densidade e porosidade do solo	26
2.3.2 Resistência do solo à penetração mecânica.....	28
2.4 Práticas mecânicas de descompactação do solo	29
2.5 Compactação do solo e força exercida na barra de tração de máquinas agrícolas	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 Caracterização da área experimental	34
3.2 Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos	37
3.3 Parâmetros avaliados	40
3.3.1 Densidade e porosidade do solo	40
3.3.2 Resistência do solo à penetração mecânica.....	42
3.3.3 Força exercida na barra de tração de trator agrícola	43
3.3.4 Rendimento de grãos.....	44
3.4 Análise estatística.....	45
3.4.1 Densidade e porosidade do solo	45
3.4.2 Resistência do solo à penetração mecânica.....	46

3.4.3 Força exercida na barra de tração de trator agrícola e rendimento de grãos	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 Densidade e porosidade do solo	48
4.2 Resistência do solo à penetração mecânica	53
4.3 Força exercida na barra de tração do trator agrícola	61
4.4 Rendimento de grãos da cultura da soja	64
5 CONCLUSÕES	67
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

A compactação do solo é um problema antigo, caracterizado pelo aumento da densidade do solo (maior massa de solo por unidade de volume) proporcional ao histórico de cargas ou pressões exercidas sobre o solo. Contudo, este problema vem passando por forte intensificação com o processo de modernização da agricultura. Como fator disso pode-se destacar a utilização de máquinas agrícolas cada vez maiores e mais pesadas (REICHERT et al., 2007) em operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita.

O sistema de manejo do solo empregado exerce forte influência e alterações na sua estrutura, estando assim, fortemente atrelado ao processo de compactação do solo. Dessa forma, em áreas sob plantio convencional, a camada superficial do solo é submetida à constante revolvimento, promovendo o rompimento da camada superficial compactada e transferindo a compactação para camadas mais profundas, formando o chamado pé-de-arado ou pé-de-grade. Assim, em áreas sob cultivo convencional a formação destas camadas compactadas decorre do tráfego de trator no sulco do arado, bem como a própria ação da grade ou dos discos dos arados, aliado a intensa pulverização do solo com conseqüente destruição dos agregados.

Todavia, em solos manejados sob sistema plantio direto o revolvimento do solo é minimizado, ficando restrito ao preparo do leito de semeadura. Assim, descuidos no manejo do sistema plantio direto, como elevada pressão exercida pelos rodados das máquinas e de implementos agrícolas sobre o solo, principalmente em condições de umidade inadequadas ao seu manuseio podem resultar na compactação do mesmo. Dessa forma, como o revolvimento do solo fica restrito à atividade das semeadoras (discos ou facão), a camada compactada situa-se mais próximo da superfície do solo. Essa situação faz com que as raízes fiquem confinadas em um pequeno volume de solo, dependentes dos recursos como água e nutrientes ali presentes, tornando-as mais suscetíveis às variações climáticas.

A compactação do solo promove aumento da densidade e da resistência mecânica à penetração e redução da porosidade total, especialmente pela diminuição da macroporosidade do solo (BOONE; VEEN, 1994). Para a agricultura, isso significa: possibilidade de erosão, mediante o aumento do escoamento

superficial; diminuição da disponibilidade de água para as plantas cultivadas, devido a redução da taxa de infiltração de água no solo; e, alteração do fluxo de calor e de gases em virtude da redução da aeração, o que pode promover a restrição ao crescimento radicular das culturas (LETEY, 1985; HAKANSSON; VOORHEES, 1998; REICHERT et al., 2007) e culminar com redução do crescimento da parte aérea e da produtividade das culturas (HAKANSSON; VOORHESS, 1998).

Assim, a preocupação com a perda de qualidade do solo, mediante compactação, atinge grande parte das áreas agrícolas manejadas sob sistema plantio direto. Nesse sentido, na região de clima subtropical úmido do Brasil, tem-se observado áreas com tendência à intensa degradação estrutural da camada subsuperficial do solo, perceptível por alterações de propriedades físicas do solo, alterações morfológicas de raízes de plantas e percepção, ocasional, de redução de produtividade das culturas. Em adição, tem sido observado com frequência, erosão em sulcos e em entressulcos, decorrente da baixa taxa de infiltração de água no solo.

Considerando que o sistema plantio direto abrange cerca de 75% da área cultivada com culturas anuais nessa região do País, o problema expresso assume relevância preocupante à sustentabilidade da atividade agrícola. Tal situação, tem levado diversos produtores rurais a interromper a condução contínua sob sistema plantio direto e retornar a sistemas de manejo, com mobilização de solo, para mitigação do processo de compactação. Para tanto, frequentemente têm sido empregadas técnicas como a escarificação, subsolagem e aração, as quais contrapõem-se aos fundamentos do sistema plantio direto, demandando adaptações e/ou inovações.

Nessa busca por alternativas para mitigação do processo de compactação surgem algumas questões levantadas com frequência tanto por produtores quanto por pesquisadores da área de solos, entre elas: Há necessidade de revolver o solo para eliminar a compactação? Qual o intervalo de tempo entre as intervenções? Qual mecanismo de intervenção utilizar para a descompactação? Até que profundidade o revolvimento deve ser realizado? e, entre as mais frequentes, qual o real efeito da compactação sobre o rendimento das culturas?

Diante desse cenário, percebe-se a importância do estudo de parâmetros físicos de solo, indicadores de compactação do solo como densidade, porosidade, resistência do solo à penetração mecânica e demanda de tração em solos submetidos ao sistema de cultivo vigente na região. Faz-se necessário também avaliar o efeito

residual dos diferentes mecanismos de intervenção empregados com maior frequência pelos produtores, os quais podem estender seus reflexos sobre a compactação do solo, desempenho de máquinas agrícolas e sobre o rendimento das culturas.

1.2 Hipóteses

(i) A descompactação mecânica do solo promove melhorias em atributos físicos do solo, com tendências a se anular em poucos ciclos de cultivo.

(ii) O mecanismo rompedor de solo utilizado na semeadora modifica os atributos físicos do solo na camada superficial.

(iii) O uso de semeadoras equipadas com mecanismo rompedor de solo tipo facão+disco proporciona maiores benefícios sobre atributos físicos ao solo manejado sob sistema plantio direto comparado com semeadoras equipadas apenas com discos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi gerar conhecimento sobre o efeito residual de intervenções mecânicas para descompactação do solo manejado sob sistema plantio direto, auxiliando na geração de tecnologia que contribua para o entendimento e a solução de efeitos deletérios da compactação do solo manejado sob sistema plantio direto, na região de clima subtropical úmido do Brasil.

1.3.2 Objetivos específicos

(i) determinar a duração do efeito residual de intervenção mecânica para descompactação do solo manejado sob sistema plantio direto sobre atributos físicos do solo;

(ii) verificar se a descompactação realizada com uso de arado ou de escarificador promove alterações na força exercida na barra de tração de trator agrícola e rendimento de grãos da cultura da soja;

(iii) verificar possíveis modificações de atributos físicos do solo oriundas do mecanismo rompedor do solo que equipa a semeadora;

(iv) verificar a existência de potencial de mitigação da compactação do solo oriunda de mecanismo rompedor de solo tipo facão+discos em comparação com semeadoras munidas apenas com disco.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Qualidade do solo e sistema de manejo

O solo é considerado um recurso natural de lenta renovação, que serve como base para a vida na Terra (MILLER, 2007). Representa um balanço entre os fatores físicos, químicos e biológicos, além de se caracterizar como um recurso fundamental para o funcionamento do ecossistema terrestre (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007). Sendo assim, é uma fonte vital, um recurso imprescindível e de inegável importância na escala evolutiva humana na terra (JENNY, 1980). Nesse sentido, muito se tem estudado sobre a qualidade do solo, a qual é definida por Doran e Parkin (1994) como sendo: “a capacidade de um dado solo em funcionar no ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais”. Todavia, em muitas circunstâncias essa capacidade do solo encontra-se ameaçada, o que ocorre, em grande parte, devido a adoção de modelos agrícolas inadequados ou insustentáveis (social, ecológica e economicamente), os quais promovem uma degradação desse recurso natural.

Conjuntamente com os modelos agrícolas empregados, o manejo dispensado ao solo exerce forte influência e alterações na estrutura do solo (KLEIN; CAMARA, 2007). Dessa forma, o sistema de cultivo convencional, promotor de intenso revolvimento do solo na camada superficial, possui elevado potencial de causar erosão (CASTRO FILHO et al., 1998; BERTOL et al., 2001), prejudicando a qualidade do solo. Além disso, o preparo convencional pode favorecer a decomposição da matéria orgânica, ocasionando efeito prejudicial à qualidade estrutural do solo (CASTRO FILHO et al., 1998; BERTOL et al., 2001). Essa perda de matéria orgânica pode ocorrer de duas formas, por um lado, o revolvimento do solo promove uma maior oxigenação, além de um aumento da temperatura média, contribuindo assim para uma maior taxa de decomposição da matéria orgânica. Por outro lado, as perdas de matéria orgânica ocorrem também devido à remoção das camadas superficiais do solo e do húmus pela erosão. Concomitantemente com a perda de matéria orgânica, Kamimura et al. (2009) ressaltam que o intenso

revolvimento do solo promove pulverização da camada arável e compactação da camada subsuperficial.

Diante da insustentabilidade dos sistemas agrícolas manejados sob plantio convencional, especialmente em solos tropicais e subtropicais, fez-se necessária uma modificação nos sistemas produtivos vigentes, mediante a adoção de novas tecnologias. Assim, a partir da década de 1960, nos Estados Unidos, década de 1970 no Sul do Brasil e da década de 1980, no Cerrado brasileiro, iniciou-se a adoção de um sistema conhecido como plantio direto. Este sistema fundamenta-se, de acordo com Denardin e Kochhann (2007), na mobilização mínima de solo, a qual ocorre, unicamente, na linha ou cova de semeadura, na manutenção permanente da cobertura do solo e na diversificação de espécies, que ocorre via rotação e/ou consorciação de culturas. Isto pode possibilitar a redução ou mesmo a supressão do intervalo entre colheita e semeadura, o que é obtido através da adoção de um processo denominado colher-semear.

Alguns benefícios desse sistema de cultivo, advindos da manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície do solo são apresentados por Gassen e Gassen (1996), dentre eles, ajudar no controle de plantas daninhas, dissipar a energia de impacto das gotas de chuva, proteger o solo da radiação solar e reduzir a evaporação de água. Nesse sentido, Salton e Mielniczuk (1995) enfatizam que o efeito de redução da evaporação contribui para o aumento da retenção da umidade em plantio direto, o que se torna especialmente importante em anos de déficit hídrico. Rosolem et al. (2003) destacam ainda como característica importante deste sistema, seu considerável potencial de reserva de nutrientes, cuja disponibilização pode ser rápida e intensa, dependendo, dentre outros fatores, do regime de chuvas. Paralelamente a isso, um aspecto promotor de grandes diferenças no sistema solo, entre plantio convencional e plantio direto, é a não incorporação ao solo de resíduos de plantas, fertilizantes e defensivos. Isto ocasiona um gradiente físico-químico no perfil do solo, com acúmulo de nutrientes menos solúveis e de matéria orgânica próximo a superfície do solo. O acúmulo de matéria orgânica promove benefícios como melhorias na estrutura física, com aumento na capacidade de retenção de água (CENTURION; DEMATTÊ, 1985) e estabilização dos agregados (CASTRO FILHO; LOGAN, 1991); melhoria das características químicas com aumento da Capacidade de Troca de Cátions (CTC) (CIOTTA et al., 2003) e da ciclagem de nutrientes; melhorias das características biológicas com estímulo a microfauna,

favorecida pela disponibilidade de compostos orgânicos e pela redução da amplitude térmica, entre outros (HU et al., 1997).

Diante disso, o plantio direto tem se destacado como sistema de maior sustentabilidade e importância para a agricultura brasileira, o que se reflete em sua ampla adoção, estimada em cerca de 25 milhões de hectares (Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha - FEBRAPDP, 2007). Como fatores responsáveis pela aceitação e difusão desse sistema podem ser destacados a redução da erosão hídrica; ganho de tempo para o plantio; economia de combustível; melhor estabelecimento da cultura; maior retenção de água no solo; economia de mão-de-obra e em máquinas e implementos e, a redução dos custos devido a queda do preço do herbicida dessecante. Além disso, cabe ressaltar também o aumento da taxa de infiltração de água no solo, do diâmetro dos agregados, da atividade microbiana e da produtividade de culturas (CHAN et al., 1992; ALBUQUERQUE et al., 1995; CAMPOS et al., 1995).

Todavia, no cenário atual da agricultura, o plantio direto está se defrontando com uma série de problemas, decorrentes do inadequado processo de adoção e implantação do sistema por alguns agricultores. Neste sentido, Peche Filho e Storino (2006) enfatizam que o plantio direto não pode ser simplificado ao ponto de ser considerado uma técnica com intuito único de eliminar operações de mobilização do solo ou, como controle de plantas daninhas pelo uso de herbicidas. Estes autores consideram que o sucesso de implantação deste sistema passa por uma evolução do agricultor, desenvolvendo conhecimentos aprofundados sobre a terra que se pretende explorar, as potencialidades do sistema operacional e os produtos resultantes destes processos operacionais, nos quais estariam inclusos não apenas os grãos, mas também os impactos ambientais do seu sistema de produção. Assim, para se obter o sucesso do sistema algumas premissas básicas como correção da fertilidade do solo, rotação de culturas, ausência de revolvimento de solo e uso de culturas para a formação de palhada devem ser atendidas.

Por outro lado, alguns descuidos na condução do sistema plantio direto, como manejo contemplando elevada pressão pelos rodados das máquinas e de implementos agrícolas sobre o solo, principalmente em condições de umidade inadequadas ao seu manuseio podem promover aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade, resultando na compactação do mesmo. Assim, em diversas áreas sob sistema plantio direto, a ausência de revolvimento do solo,

associada à maior intensidade de uso, expõe o solo a intenso e continuado tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade, o que contribui para alterar a qualidade estrutural do solo, acarretando aumento da compactação em muitas áreas manejadas sob esse sistema (COLLARES et al., 2006).

2.2 Compactação do solo em áreas manejadas sob sistema plantio direto

A compactação do solo pode ser definida como um processo dinâmico e gradual, em que ocorre aumento da densidade (maior massa de solo por unidade de volume) proporcional ao histórico de cargas ou pressões exercidas (HAMZA; ANDERSON, 2005). Esta definição é complementada por Dias Jr. e Pierce (1996) que salientam que o termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado, durante a qual ocorre aumento da densidade, em consequência da redução de volume pela expulsão do ar. Para Stone et al. (2002) existe uma diferença conceitual entre compactação e adensamento. Para estes autores, adensamento é o aumento da densidade do solo em razão do fenômeno de deposição de partículas menores no espaço poroso, devido à dispersão de partículas, o que causa aumento da massa e mantém constante o volume inicial do solo, sem haver participação direta da pressão. Como exemplo de adensamento do solo tem-se a compactação oriunda de processos pedogenéticos como a formação de horizonte B textural, fragipans, duripans, plintitas, petroplintitas, etc. (DIAS JÚNIOR, 2000).

A compactação ocasiona alterações no arranjo estrutural do solo, na consistência, no volume e tamanho dos poros e na difusão de gases, o que, por consequência, afeta o crescimento das raízes (TAYLOR; BRAR, 1991). Para Soane e Ouwerkerk (1994), as modificações de importância agronômica que ocorrem em solos compactados são consequência dos seguintes fatores: aumento da resistência mecânica do solo à penetração radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de água e calor e da disponibilidade de água e de nutrientes. Assim, num determinado tempo e local, um desses fatores pode restringir o desenvolvimento das plantas, a

dependem do tipo de solo, da condição climática, da espécie e do estágio de desenvolvimento da planta.

O processo de compactação do solo está fortemente atrelado aos sistemas de manejo do solo. Assim, o preparo convencional de solo promove a desagregação excessiva da camada arável, o encrostamento superficial e a formação de camadas coesas ou compactadas, denominadas pé-de-grade ou pé-de-arado (GABRIEL FILHO et al., 2000). A formação destas camadas decorre do tráfego de trator no sulco do arado, bem como a própria ação da grade ou dos discos dos arados. Para Veiga et al. (2008), no preparo convencional, a causa inicial de compactação é decorrente da intensa pulverização do solo com conseqüente destruição dos agregados.

No sistema plantio direto a pressão aplicada na superfície do solo, que se encontra mais resistente à compactação, apresenta uma dinâmica diferenciada, quando comparada com o preparo convencional (VEIGA et al., 2008). Todavia, Stone et al. (2002) citam que em várias situações já têm sido relatadas ocorrências de aumento de densidade do solo e diminuição da macroporosidade com o uso do sistema plantio direto. Este processo, diagnosticado como compactação, tem sido associado negativamente ao crescimento das raízes e ao movimento vertical de água. Dentre as causas citadas como principais condicionadoras deste processo têm-se o acúmulo das pressões provocadas pelo tráfego de máquinas agrícolas, o qual altera o arranjo do espaço poroso do solo, modificando a curva característica de água no solo (TARAWALY et al., 2004), a acomodação natural de partículas do solo (CARVALHO Jr. et al., 1998) e, o manejo do solo em condições inadequadas de umidade. Nesse sentido, Silva et al. (2002) atentam que o solo está mais suscetível à compactação pelo tráfego de máquinas quando se encontra com 60% dos poros preenchidos com água.

A compactação do solo decorrente do intenso tráfego de máquinas tem se configurado como importante processo responsável pela degradação dos solos. De modo que, se estima que no mundo, aproximadamente 68 milhões de hectares estão degradados pela compactação provocada pelo tráfego de máquinas (FLOWERS; LAL, 1998). Vale ressaltar que uma limitada compactação na superfície do solo é considerada benéfica para a semeadura porque promove um melhor contato semente-solo e rápida germinação, além de reduzir a taxa de secamento do solo. No entanto, compactação excessiva pode impedir o crescimento radicular,

limitar a absorção de nutrientes, e causar estresse de umidade, resultando em redução no rendimento das culturas (BICKI; SIEMENS, 1991).

Em linhas gerais, a camada de maior restrição ao crescimento radicular (mais compactada), em áreas de plantio direto está localizada entre 8 e 15 cm (CASTRO FILHO et al., 1991; ABREU et al., 2003; GENRO JUNIOR et al., 2004; SUZUKI et al., 2008). Isso acontece uma vez que a camada bem superficial (0 a 5 cm) apresenta-se descompactada (baixa densidade e elevada porosidade total), em virtude da maior concentração radicular e de matéria orgânica, maior atividade biológica, mais ciclos de umedecimento e de secagem. Ajudam também neste processo a ação das semeadoras-adubadoras, munidas de disco ou de facão, que promovem a mobilização do solo no momento da semeadura (SECO et al., 2009). Ao passo que a camada logo abaixo (entre 8 e 15 cm), recebe a pressão dos rodados das máquinas agrícolas, mas mantém-se compactada pela ausência de mecanismos de intervenção. Essa situação faz com que as raízes fiquem confinadas em um pequeno volume de solo, dependentes dos recursos como água e nutrientes ali presentes, o que as torna mais suscetíveis às variações climáticas (SECO et al., 2009).

2.3 Propriedades físicas do solo associadas ao processo de compactação

As propriedades físicas do solo têm influência direta no desenvolvimento radicular das culturas e, conseqüentemente, na produtividade (SANTOS et al., 2006). Existe uma estreita relação entre algumas propriedades físicas e mecânicas do solo com a compactação, em especial aquelas que representam maior relação massa/volume. Isso acontece, porque a compactação é um aumento da massa ou redução do espaço poroso do solo, para um determinado volume de solo. Dentre essas propriedades merecem destaque a densidade do solo, a porosidade e a resistência do solo à penetração mecânica.

2.3.1 Densidade e porosidade do solo

A densidade e a porosidade do solo são propriedades relacionadas com alterações no volume do solo e, dessa forma, altamente relacionadas com a compactação do solo (REICHERT et al., 2007). São de fácil determinação, recebem pequena influência do teor de água no momento da coleta da amostra de solo e possibilitam a verificação do efeito de sistemas de manejo sobre a estrutura do solo.

A densidade do solo expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco por unidade de volume do solo. No volume do solo é incluído o volume de sólidos e o de poros do solo. Assim, sempre que houver modificação do espaço poroso haverá alteração da densidade do solo. Dessa forma, a densidade fornece indicações a respeito do estado de conservação de um solo, sobretudo em sua influência em propriedades como infiltração e retenção de água no solo, desenvolvimento de raízes, trocas gasosas e suscetibilidade do solo aos processos erosivos, sendo largamente utilizada na avaliação da compactação e/ou adensamento dos solos (GUARIZ et al., 2009).

A adoção de sistemas conservacionistas de solo, como o cultivo mínimo e o plantio direto levaram a uma alteração no comportamento da densidade do solo em comparação com o sistema convencional. Assim, o manejo conservacionista geralmente promove um aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade em relação ao preparo convencional. Esse aumento na densidade é atribuído ao adensamento natural da estrutura do solo, decorrente da ausência total ou parcial do revolvimento (CARVALHO Jr., 1998; TORMENA et al., 1998; BERTOL et al., 2000; VEIGA et al., 2008), além da compactação promovida pelo manejo, como a ocasionada pelo tráfego de máquinas (FERNANDES et al., 1983; CAMPOS et al., 1995; TARAVALY et al., 2004) ou pisoteio animal (ALBUQUERQUE et al., 2001; LANZANOVA et al., 2007).

Todavia, independente do processo responsável pela compactação, o aumento da densidade do solo pode resultar em efeito deletério sobre o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, o crescimento e rendimento das culturas. Assim, para desenvolver estratégias de ação e identificação de camadas compactadas, mostra-se interessante a determinação de valores de densidade limitantes ou restritivos ao desenvolvimento das culturas. Todavia, esta não é uma

tarefa fácil, uma vez que esse atributo apresenta ampla variação de solo para solo, dificultando o estabelecimento de valores limitantes similares para diferentes tipos e classes de solo. Gerard et al. (1982) afirmam que o valor da densidade do solo considerada crítica ao crescimento das raízes diminui com o aumento no teor de argila do solo. Dessa forma, para um mesmo valor de densidade, um solo argiloso pode estar muito compactado, enquanto para um solo de textura mais arenosa, esse valor pode indicar solo solto e descompactado (BEUTLER et al., 2008). Nesse sentido, uma primeira aproximação para a definição de limites críticos para identificar camadas e solos compactados aplicados para as condições do sul do Brasil, considera como limitante a densidade do solo de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos com mais de 55% de argila, $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos entre 20 e 55% de argila e, $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos com menos de 20% de argila (REINERT et al., 2001).

A densidade do solo apresenta uma relação inversa com a porosidade, assim, considerando-se um mesmo solo, um aumento na densidade reflete a diminuição do espaço poroso do solo. A porosidade total do solo representa o volume total de poros, todavia, não fornece informações sobre a distribuição dessa porosidade (HILLEL, 1980). Dessa forma, visando uma melhor caracterização da porosidade, costuma-se fazer uma divisão em classes conforme o tamanho dos poros, sendo a mais frequente a classificação em macroporos e microporos. Por essa classificação, a classe dos macroporos corresponde aos poros esvaziados à tensão de 6 kPa, e com diâmetro maior que 0,05 mm (RICHARDS, 1965). Os poros dessa classe estão situados nos espaços interagregados e são responsáveis pela infiltração de água, trocas gasosas com a atmosfera e é onde ocorre o desenvolvimento radicular das plantas. Os microporos por sua vez, são capilares intra-agregados com diâmetro menor que 0,05 mm, responsáveis pela retenção da água no solo, onde quanto menor o diâmetro dos poros, maior a força de retenção da água (HILLEL, 1980).

Durante o processo de compactação a estrutura do solo é modificada, sendo que os macro-agregados são destruídos (TAVARES FILHO et al., 1999). Assim, ocorre uma redução do tamanho de poros e, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo diminuem e são substituídos por poros menores, principalmente pelos que retêm água (REICHERT et al., 2007). Isso acontece porque os poros de maior diâmetro (macroporos) são menos resistentes e se deformam, formando poros de menor diâmetro, os quais são mais resistentes suportando pressões maiores.

Como reflexo disso, o decréscimo da porosidade de aeração pode ser 1,5 a 2 vezes maior que o decréscimo no espaço poroso total (BOONE; VEEN, 1994).

Em síntese, solos com camadas compactadas apresentam redução da porosidade total e da macroporosidade e aumento da microporosidade e da densidade do solo (KLEIN; LIBARDI, 2002). Como consequência, o aumento da microporosidade favorece a retenção de água no solo (REICHERT et al., 2007), ao mesmo tempo em que compromete o transporte de ar e água (TORMENA et al., 1998; CAVENAGE et al., 1999).

2.3.2 Resistência do solo à penetração mecânica

A resistência à penetração é um dos atributos físicos do solo que influencia o crescimento de raízes e serve como base à avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (TORMENA; ROLOFF, 1996). Assim, o aumento da resistência do solo à penetração de raízes resulta em deformações e restrições ao crescimento normal destas, induzindo à deficiência hídrica, devido à limitação que apresentam para explorar camadas mais profundas de solo com maior disponibilidade de água, mesmo em períodos curtos de estiagem (KEMPER; DERPSCH, 1981; KLEIN; BOLLER, 1995).

A determinação da resistência do solo à penetração é realizada mediante a resistência que o solo oferece à penetração de um instrumento de sondagem (penetrômetro), chamado de “índice de cone” (BORGES et al., 2004). Este índice é definido como a resistência do solo à penetração de uma ponta cônica, e expressa como força por unidade de área da base do cone até uma determinada profundidade. Reflete o comportamento do solo quanto à compactação, conteúdo de água, granulometria e tipo de argila. O índice de cone depende de atributos do solo como: textura, porosidade, estrutura, estabilidade de agregados e teor de água (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Com o uso do penetrômetro, é possível identificar a presença ou não de compactação do solo, o grau da compactação e a profundidade da camada compactada no perfil do solo e, com estas informações, optar pela tecnologia mais adequada para a descompactação.

A resistência à penetração está estreitamente associada à densidade do solo e, para o mesmo teor de água, é tanto maior quanto maior a densidade do solo, mostrando ser um bom indicador da compactação quando corretamente utilizado. Tormena et al. (1998), ao analisar a resistência à penetração de um Latossolo Roxo sob plantio direto e convencional, verificaram que, quanto menor a umidade volumétrica do solo, maior a resistência à penetração, cujo fato eles atribuíram ao menor efeito lubrificante da água ao redor das partículas em solos com menor teor de umidade. Nesse sentido, Mendes (1989) verificou que a compactação reduz a penetração de raízes de soja e milho em mais de 15% quando a umidade do solo diminuiu em 30% do potencial de saturação. Verificou ainda, reduções na densidade e comprimento de raízes de soja e milho em 70% do valor máximo, quando a resistência à penetração do solo passou de 1,6 para 1,8 MPa.

Diversas tentativas tem sido realizadas para determinar valores críticos de resistência do solo à penetração mecânica, assim, diversos autores verificaram que a resistência à penetração crítica ao desenvolvimento de raízes de diversas plantas situa-se entre 1 MPa e 3,5 MPa (GERARD et al., 1982; MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999). A variação desses valores críticos está associada ao tipo de planta, teor de argila do solo, sistema de condução do experimento e ao sistema de manejo do solo. Contudo, o valor de 2 MPa tem sido, geralmente, utilizado como um valor de resistência à penetração limitante (HAKANSON et al., 1988; SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998, 1999). Todavia, para assumir esse valor como referência, a determinação deve ser realizada quando o conteúdo de água no solo for equivalente à capacidade de campo (SMITH et al., 1997).

2.4 Práticas mecânicas de descompactação do solo

A intensa mecanização na agricultura tem ocasionado compactação do solo. Dessa forma, quando a compactação do solo começa a limitar o desenvolvimento das culturas, tornam-se necessárias medidas curativas com o objetivo de quebrar a camada de solo compactada. Todavia, vale ressaltar que a restauração das condições físicas iniciais do solo, se possível, é de alto custo e consome muito tempo. Assim, a intervenção deve ser realizada somente quando for realmente

necessário, em condições adequadas de umidade e nas profundidades adequadas, uma vez que se trata de uma operação de alto consumo energético (MACHADO et al., 1997).

A descompactação do solo utilizando implementos de hastes, como escarificadores, que produzem superfícies mais rugosas que os implementos de discos, como grades pesadas, tem por objetivo aumentar a porosidade, reduzir a densidade e, ao mesmo tempo, romper as camadas superficiais encrostadas e camadas subsuperficiais compactadas (KOCHHANN; DENARDIN, 2000). O tipo e a época das operações de preparo influenciam o seu resultado, afetando a taxa de infiltração, a velocidade da enxurrada, a capacidade de armazenamento de água no solo e, por conseqüência, os riscos de erosão (LEVIEN et al., 1990). De maneira geral, o objetivo da escarificação mecânica do solo é reduzir a densidade do solo e a resistência à penetração de raízes, aumentar a permeabilidade e reduzir o encharcamento em terrenos planos.

Para atenuação da compactação subsuperficial do solo, como a remanescente do sistema convencional de cultivo (pé-de-arado ou pé-de-grade), faz-se necessário o uso de equipamento descompactador do solo que atue em profundidade. Frequentemente, esse instrumento é o subsolador. O subsolador caracteriza-se como um equipamento de hastes com ponteiros estreitas, reguladas para operar imediatamente abaixo da camada compactada. Dessa forma, promove o rompimento da camada compactada que restringe e confina o crescimento e a distribuição do sistema radicular, limita a infiltração de água e as trocas gasosas. Todavia, Canarache et al. (2000) atentam que a subsolagem provoca a deterioração da resistência dos agregados, o que, especialmente em solos muito compactados, resulta em solo mais fraco e menos estável, sendo mais suscetível a uma subsequente compactação mais intensa. Outra alternativa para mitigar a compactação do solo, empregada por alguns produtores, tem sido a utilização eventual de arado e grade aradora em áreas até então manejadas sob plantio direto, promovendo a descompactação do solo, além de redistribuir melhor os nutrientes no perfil do solo. Segundo Silveira et al. (1998) tal procedimento não diminui o aspecto conservacionista do solo, já que a semeadura direta volta a ser empregada nos cultivos subsequentes.

Contudo, as práticas tradicionalmente utilizadas para descompactação do solo, possuem potencial para melhorar as condições de infiltração e de drenagem,

mas não necessariamente a produtividade das culturas, por vezes até mesmo ocasionando a sua redução (VEIGA et al., 2008). Vários estudos apontam a escarificação como benéfica para a redução da densidade e da resistência do solo à penetração. O efeito, entretanto, da operação de descompactação nos atributos físicos do solo depende da textura do solo, da profundidade de operação, da espessura da camada compactada e da umidade do solo no momento da operação (MACHADO et al., 1997). Além do que, seus benefícios podem ser de curta duração (BUSSCHER et al., 2002).

A efemeridade da duração da escarificação no solo é atribuída ao processo natural de reconsolidação do solo, o qual é resultante da chuva e dos ciclos de umedecimento e secagem (HILLEL, 1998), mesmo na ausência de tráfego. Diante disso, Veiga et al. (2008) e Stone et al. (2002) refutam a utilização desta prática em sistema plantio direto, salientando que a mesma interrompe o ciclo de melhorias nas propriedades biológicas, físicas e químicas, alterando a atividade biológica, acelerando a mineralização da matéria orgânica e destruindo a estrutura do solo. Como alternativa para prolongar os benefícios da descompactação mecânica do solo, recomenda-se que a mesma deve ser realizada em condições de solo com baixa umidade. Em seqüência às operações de descompactação do solo, é indicada a semeadura de culturas que apresentem grande produção de massa vegetal em elevada densidade de plantas e de sistema radicular abundante e agressivo (KOCHHANN; DENARDIN, 2000), como por exemplo, aveia, azevém e milho. Essas espécies promovem ainda melhorias na agregação, na distribuição de tamanho de poros e na infiltração e retenção de água, redução nas variações da temperatura e nas perdas de água por evaporação (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990).

Atualmente, um mecanismo para a descompactação da camada superficial de solo, é a utilização de semeadoras dotadas de facões próximos aos discos de corte, que fazem a descompactação do solo na linha de semeadura ou cortam a camada compactada, permitindo a passagem das raízes. Deve-se garantir, no entanto, que as operações de semeadura e de descompactação do solo proporcionem que as sementes sejam distribuídas na quantidade e profundidade adequadas, sob o risco de se ter problemas de emergência e de uniformidade de plantas nas lavouras. Para isso, o formato e as características dos facões são muito importantes. Facões mais largos mobilizam mais a superfície do solo, retiram os restos de cultivo da linha de

plantio e podem prejudicar a operação de plantio ou semeadura, em relação aos facões mais estreitos e com ângulo de ataque mais adequado. Em razão da semeadura da maioria das culturas ser feita com o solo úmido, o trabalho de descompactação com facão ficará restrito apenas à linha de semeadura, podendo, além disso, provocar o aparecimento de uma superfície espelhada nas paredes do sulco de semeadura, que poderá prejudicar a passagem de raízes. Cabe lembrar, que a maioria dos modelos de facões possibilita o corte do solo a profundidades que não ultrapassam 12 a 15 cm. O trabalho em maior profundidade exige facões mais robustos e um grande esforço de tração por linha de plantio. A importância de se escolher adequadamente o mecanismo rompedor das semeadoras é ressaltado por Koakoski et al. (2007), os quais, comparando semeadoras equipadas com facão e semeadoras equipadas com discos, verificaram que quando foi usado o mecanismo rompedor do tipo facão, obteve-se, em média, maior porosidade do solo, 24,3% superior à alcançada quando foi usado o disco. Os mesmos autores verificaram ainda que o uso do facão proporcionou menores valores de resistência à penetração do que o disco duplo, especialmente na faixa de 10 a 15 cm de profundidade.

2.5 Compactação do solo e força exercida na barra de tração de máquinas agrícolas

A habilidade das plantas em explorar o solo, em busca de fatores de crescimento está fortemente atrelada à distribuição de seu sistema radicular no perfil do solo, a qual, por sua vez, depende das condições físicas e químicas do solo, sendo estas passíveis de alterações em função do manejo aplicado. Neste sentido, Flowers e Lal (1998) afirmam que a compactação do solo constitui-se em uma das principais causas da degradação da qualidade física dos solos agrícolas, comprometendo o desenvolvimento das plantas.

Concomitantemente com os prejuízos causados ao desenvolvimento das plantas o processo de compactação do solo interfere, ainda, diretamente no desempenho das máquinas agrícolas. Tal fato é destacado por Araújo et al. (1999) os quais observaram que a compactação superficial dos solos constitui forte restrição ao processo de semeadura direta. Tais autores relatam que o uso de

sulcadores do tipo haste ou facão tem se generalizado como alternativa para romper a camada compactada do solo. Todavia, enfatizam que essa alternativa exige maior esforço de tração e maior consumo de combustível quando comparado ao mecanismo sulcador de discos duplos. Cabe lembrar, que a maioria dos modelos de facões possibilita o corte do solo a profundidades que não ultrapassam 12 a 15 cm, trabalhos em maior profundidade exigem facões mais robustos, resultando em grande esforço de tração por linha de plantio (CEPIK et al., 2005; CONTE et al., 2009).

Com relação à necessidade de força para tração, Fornstron e Becker (1977) verificaram grande variação na demanda para os mesmos implementos em um mesmo solo. Segundo esses autores, a tração requerida é muito variável com o estado do solo e particularmente com o teor de água do mesmo, tal relação também foi observada por Machado et al. (1996). Ainda no tangente a demanda por tração, Tullberg (2000) comenta que elevadas demandas por tração de ferramentas mobilizadoras de solo podem prejudicar a qualidade das atividades realizadas.

Em estudo sobre desempenho de máquinas agrícolas na atividade de subsolagem, Lanças e Benez (1988) avaliaram os efeitos da velocidade de avanço na operação de subsolagem, e concluíram que o aumento da velocidade proporcionou maiores rendimentos operacionais com menor consumo de combustível. Porém, concluiu também, que a força de tração foi maior para velocidades operacionais maiores, independentemente do tipo de haste e de ponteira. Tal resultado foi encontrado também em estudo realizado por Machado et al. (1996) ao avaliar o desempenho de escarificador em Planossolos. Com relação à atividade de subsolagem, Kichler et al. (2007) observaram que a profundidade de trabalho interfere no consumo energético. Estes autores encontraram um aumento no consumo de combustível de 20% e incremento na força de 120% quando se aumentou a profundidade de 23 cm para 35 cm.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em um experimento de longa duração, conduzido por pesquisadores da Embrapa Trigo, uma unidade descentralizada da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, situada na cidade de Passo Fundo, estado do Rio Grande do Sul. O experimento foi instalado no ano de 2001, em um solo com histórico de oito anos sob sistema plantio direto, sendo que o mesmo apresentava tendência ao adensamento (densidade de 1,37 e 1,35 Mg m⁻³ nas camadas 0-5 e 10-15 cm, respectivamente).

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento, em escala de campo (Figura 1a e 1b), para avaliar a recuperação estrutural da camada subsuperficial do solo situa-se no município de Coxilha, na região Norte do estado do Rio Grande do Sul (Figura 2). Esse município está localizado sob as coordenadas geográficas de 28°07'38" de latitude Sul e 52°17'46" de longitude Oeste, a uma altitude de 721 metros acima do nível do mar.

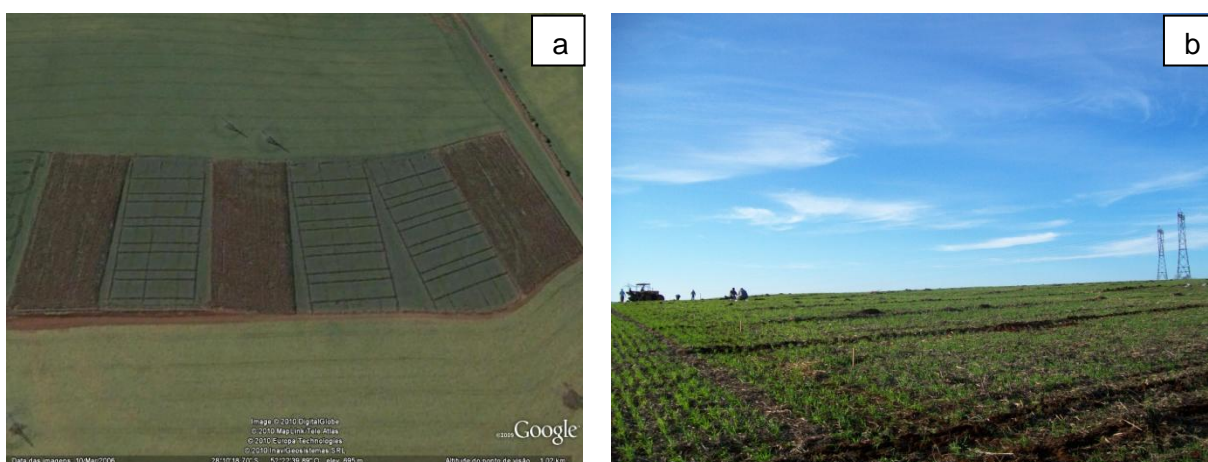


Figura 1 – Imagem da área experimental extraída do Google Earth (a) e área experimental no momento da coleta de dados (b).



Figura 2 - Localização geográfica do município de Coxilha – RS, local de condução, em escala de campo, do experimento utilizado nesse estudo. Fonte: RioGrandedoSul MesoMicroMunicip.svg

O clima da região de estudo conforme a classificação de Köppen, é o Cfa – Clima subtropical úmido. Este clima é constituído por quatro estações razoavelmente bem definidas, com invernos moderadamente frios e verões quentes, com temperaturas superiores a 22 °C, separados por estações intermediárias com aproximadamente, três meses de duração, e chuvas bem distribuídas ao longo do ano, com média mensal superior aos 60 mm (NIMER, 1989), totalizando índices pluviométricos anuais de 1.500 a 1.750 mm.

O solo da área de estudo é basicamente de origem basáltica, da Formação Serra Geral, classificado como Latossolo Vermelho Distrófico húmico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2006). São solos de textura argilosa (Tabela 1), profundos, bem drenados, com baixo teor de argila dispersa em água e distribuídos em relevos ondulado a suavemente ondulado. Naturalmente apresentam baixa fertilidade química, mas uma vez corrigidas as deficiências químicas, constituem-se em solos de elevada fertilidade, conforme pode ser observado na Tabela 2, que apresenta a caracterização química da área.

Tabela 1 - Composição granulométrica e densidade de partícula nas camadas de 0 a 7, 7 a 15, 15 a 20 e 0 a 20 do Latossolo Vermelho Distrófico húmico da área experimental situada no município de Coxilha - RS.

Camada (cm)	Areia	Silte	Argila	Classe textural	Densidade de partícula
	-----g kg ⁻¹ -----				Mg m ⁻³
0 a 7	317,4	209,0	473,6	2	2,70
7 a 15	303,5	202,2	494,3	2	2,68
15 a 20	307,5	202,7	489,8	2	2,70
0 a 20	306,4	193,0	500,6	2	2,68

Tabela 2 - Caracterização química nas camadas de 0 a 7, 7 a 15, 15 a 20 e 0 a 20 do Latossolo Vermelho Distrófico húmico da área experimental situada no município de Coxilha - RS.

	Profundidade amostrada (cm)			
	0 a 7	7 a 15	15 a 20	0 a 20
pH em H ₂ O	5,2	5,5	6,0	5,7
Índice SMP	5,6	5,9	6,2	5,9
P, mg dm ⁻³	27,1	9,9	7,7	11,2
K, mg dm ⁻³	225	113	82	115
M.O., g dm ⁻³	38	32	28	29
Al, mmol _c dm ⁻³	5,2	2,3	0,3	1,7
Ca, mmol _c dm ⁻³	58,6	66,7	74,1	65,7
Mg, mmol _c dm ⁻³	22,9	26,5	30,5	27,9
H+Al, mmol _c /l	72,4	51,8	36,4	51,8
CTC efetiva	92,4	98,4	107,0	98,1
CTC pH7, cmol _c dm ⁻³	159,7	147,8	143,1	148,2
Saturação Al, %	5,7	2,5	0,3	1,8
Saturação Bases (V), %	54,7	65,0	74,6	65,1

3.2 Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos

O delineamento experimental empregado neste estudo foi o Blocos ao Acaso, em parcelas subdivididas com três repetições.

Para composição dos tratamentos avaliados foi tomado como base uma área de lavoura que, no ano de 2001 (início da condução do experimento), encontrava-se há oito anos sob sistema de manejo plantio direto. Nessa área, foi mantida uma parcela testemunha, manejada permanentemente sob sistema plantio direto. Ao passo em que, nas demais parcelas foram realizadas intervenções mecânicas mediante aração (A) e escarificação (E) do solo no intuito de promover a descompactação mecânica do solo.

Assim, anualmente, antes da implantação da cultura de verão duas novas parcelas eram submetidas ao revolvimento do solo. Em uma delas, a mobilização do solo era realizada com uso de arado de discos (Figura 3a), seguida por uma gradagem, com grade niveladora (Figura 3b). Enquanto na outra parcela, o revolvimento do solo era realizado por escarificação, utilizando-se um escarificador de cinco hastes, operando a uma profundidade de 25 cm, munido com rolo destorroador (Figura 4), dispensando, portanto, a operação de gradagem.

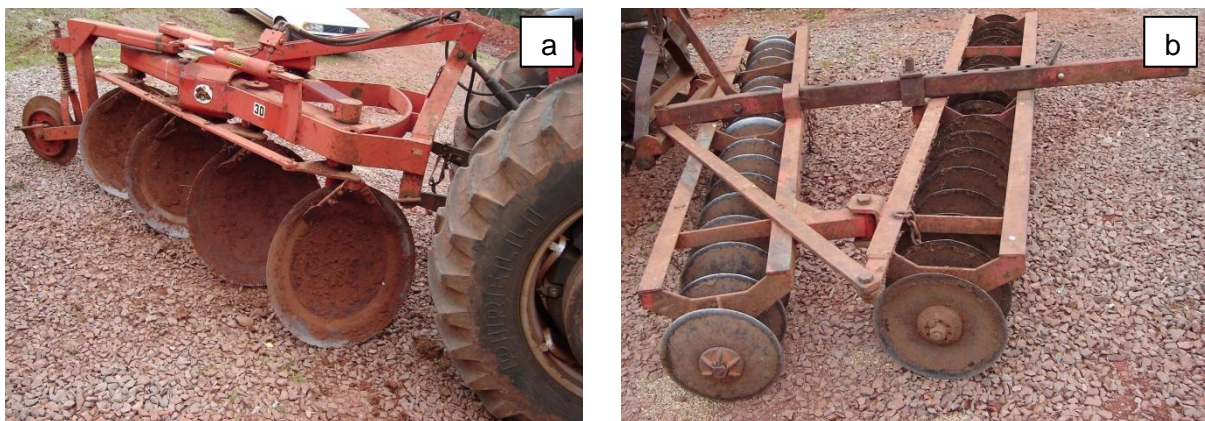


Figura 3 – Arado de disco (a) e grade niveladora (b) utilizados para descompactação mecânica do solo em área manejada sob sistema plantio direto.



Figura 4 – Escarificador com rolo destorroador utilizado para descompactação mecânica do solo em área manejada sob sistema plantio direto.

Após a realização da intervenção mecânica mediante o uso do arado ou escarificador, o solo passava a ser manejado, novamente, sob sistema plantio direto. Assim, no inverno de 2009, quando foi realizada a avaliação dos parâmetros contemplados por este estudo o ensaio possuía: 16 anos continuamente sob sistema plantio direto; e 7,5; 6,5; 5,5; 4,5; 3,5 e 2,5 anos sob sistema plantio direto a partir de interrupções por aração ou escarificação, conforme Tabela 3.

Dessa forma, o ensaio contava com 13 condições de manejo, ou seja, seis períodos de condução (7,5; 6,5; 5,5; 4,5; 3,5 e 2,5 anos) do sistema plantio direto após aração, seis períodos (7,5; 6,5; 5,5; 4,5; 3,5 e 2,5 anos) de manejo do solo sob sistema plantio direto após intervenção mecânica por escarificação e o manejo do solo sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T). As referidas condições de manejo constituíram os tratamentos casualizados nas parcelas principais, com dimensões de 12x8 metros.

Conjugado aos períodos de manejo do solo sob sistema plantio direto realizou-se a avaliação do uso de semeadora equipada rompedor do solo tipo facão+disco (F) ou discos duplos (D), o que constituiu as subparcelas, com dimensões de 6 m x 8 m. Para tanto, em uma das subparcelas a semeadura foi realizada com rompedor de solo facão+disco (F), em que o disco era responsável pelo corte da palha e o facão pela abertura do sulco para deposição do adubo, com profundidade de 10 a 13 cm. Na outra subparcela, a semeadura foi realizada com

mecanismo de discos duplos, no qual tanto o corte da palha quanto a abertura do sulco (5 a 7 cm de profundidade), era realizada por discos.

Tabela 3 – Caracterização temporal dos tratamentos nas parcelas principais do experimento de campo.

Tratamento	Safras sob SPD ¹	Anos sob SPD ²
T - Testemunha - SPD contínuo	16 safras + 16 safras ²	8 anos + 8 anos
A7 - aração do solo - verão 2001/02	15 safras sob SPD	7,5 anos sob SPD
E7 - escarificação do solo - verão 2001/02	15 safras sob SPD	7,5 anos sob SPD
A6 - aração do solo - verão 2002/03	13 safras sob SPD	6,5 anos sob SPD
E6 - escarificação do solo - verão 2002/03	13 safras sob SPD	6,5 anos sob SPD
A5 - aração do solo - verão 2003/04	11 safras sob SPD	5,5 anos sob SPD
E5 - escarificação do solo - verão 2003/04	11 safras sob SPD	5,5 anos sob SPD
A4 - aração do solo - verão 2004/05	9 safras sob SPD	4,5 anos sob SPD
E4 - escarificação do solo - verão 2004/05	9 safras sob SPD	4,5 anos sob SPD
A3 - aração do solo - verão 2005/06	7 safras sob SPD	3,5 anos sob SPD
E3 - escarificação do solo - verão 2005/06	7 safras sob SPD	3,5 anos sob SPD
A2 - aração do solo - verão 2006/07	5 safras sob SPD	2,5 anos sob SPD
E2 - escarificação do solo - verão 2006/07	5 safras sob SPD	2,5 anos sob SPD

¹ SPD: Sistema Plantio Direto.

² O tratamento testemunha manteve-se sob SPD por 8 anos antes do ensaio e por 8 anos durante o ensaio

O modelo de produção adotado compreendeu: trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* (L.) Merr.); ervilhaca (*Vicia sativa* L.)/milho (*Zea mays* L.); e aveia branca (*Avena sativa* L.)/soja. A adubação de base, em cada safra agrícola e com especificidade para cada espécie cultivada, foi realizada na linha de semeadura, em conformidade com os resultados das análises de fertilidade do solo processadas em amostras de solo coletadas na camada de 0 a 10 cm (SBCS-CQFS, 2004). O manejo de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado de acordo com as indicações técnicas específicas para cada cultura.

3.3 Parâmetros avaliados

3.3.1 Densidade e porosidade do solo

Para a análise dos parâmetros densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo, adotou-se o método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997) e mesa de tensão. Para tanto, no mês de junho de 2009 foram realizadas coletas a campo utilizando cilindros de aço inoxidável, com $61,58 \text{ cm}^3$ (2,5 cm de altura e 5,6 cm de diâmetro), os quais possibilitaram a coleta de amostras com estrutura indeformada. As amostras de solo foram coletadas em três profundidades (Figura 5a e 5b), adotando-se para a estratificação o método do perfil cultural (BLANCANEUX et al., 1995; TAVARES FILHO, et al., 1999), buscando-se a homogeneidade estrutural do solo por camada. Por esse método, admite-se como: primeira profundidade, a camada superficial, de estrutura granular e com elevada concentração de raízes (0-7 cm aproximadamente); segunda profundidade a camada subsuperficial, percebida como de estrutura maciça e com menor concentração de raízes (7-15 cm aproximadamente); e terceira profundidade a camada com estrutura maciça praticamente sem a presença de raízes (abaixo de 15 cm). A amostragem foi efetuada em dois pontos de cada parcela, os quais correspondem as duas subparcelas (facção+disco e disco).

Após a coleta, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de análise de solos da Embrapa Trigo. No laboratório, as amostras foram submetidas ao processo de toaleta, sendo posteriormente saturadas por capilaridade por um período de 48 horas, pesadas e levadas à mesa de tensão onde foram submetidas à tensão de sucção de 6 KPa. As amostras de solo permaneceram nessa tensão até que se estabeleceu o equilíbrio entre a água retida na amostra e a sucção aplicada. Depois disso, pesou-se novamente a amostra, a qual foi encaminhada a estufa a 105-110°C, onde permaneceu até obtenção de peso constante.

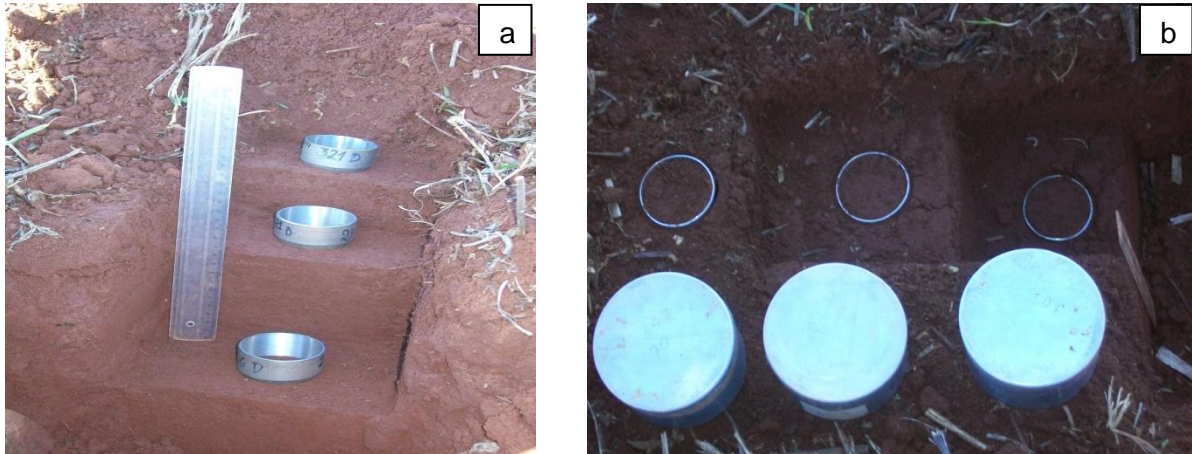


Figura 5 – Estratificação do solo pelo método do perfil cultural em três camadas (0 a 7, 7 a 15 e 15 a 22 cm) para coleta do solo com estrutura preservada (a) e disposição dos anéis volumétricos e obtenção das amostras com estrutura indeformada para avaliação de parâmetros físicos do solo (b).

A determinação dos parâmetros de densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total foi calculada com base nas equações:

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_c} \quad (1)$$

$$P_t = \frac{(P_1 - M_{ss})}{V_c} \quad (2)$$

$$M_i = \frac{(P_2 - M_{ss})}{V_c} \quad (3)$$

$$M_a = P_t - M_i \quad (4)$$

Onde: D_s = Densidade do solo (Mg m^{-3}); P_t = Porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); M_i = Microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); M_a = Macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); M_{ss} = massa do solo seco (Mg); V_c = Volume do cilindro (m^3); P_1 = Massa do solo saturado (Mg); P_2 = Massa do solo a 6 KPa.

3.3.2 Resistência do solo à penetração mecânica

Para a análise de resistência do solo à penetração mecânica, foram adotados dois métodos. O primeiro deles foi realizado em amostras com umidade equivalente a tensão de 6 KPa e, o outro foi realizado no campo, para o qual foram coletadas amostras de solo para determinação da umidade.

Para realizar a avaliação da resistência do solo à penetração mecânica pelo primeiro método, adotou-se o método do penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA 933 da marca MARCONI (Figura 6a), dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados (TORMENA et al., 2007). Na determinação da resistência à penetração foram utilizadas as mesmas amostras coletadas para a avaliação de densidade e de porosidade do solo. Assim, quando as amostras eram retiradas da mesa de tensão eram pesadas e, logo na sequência, encaminhadas ao penetrômetro para efetuar a medida de resistência à penetração.

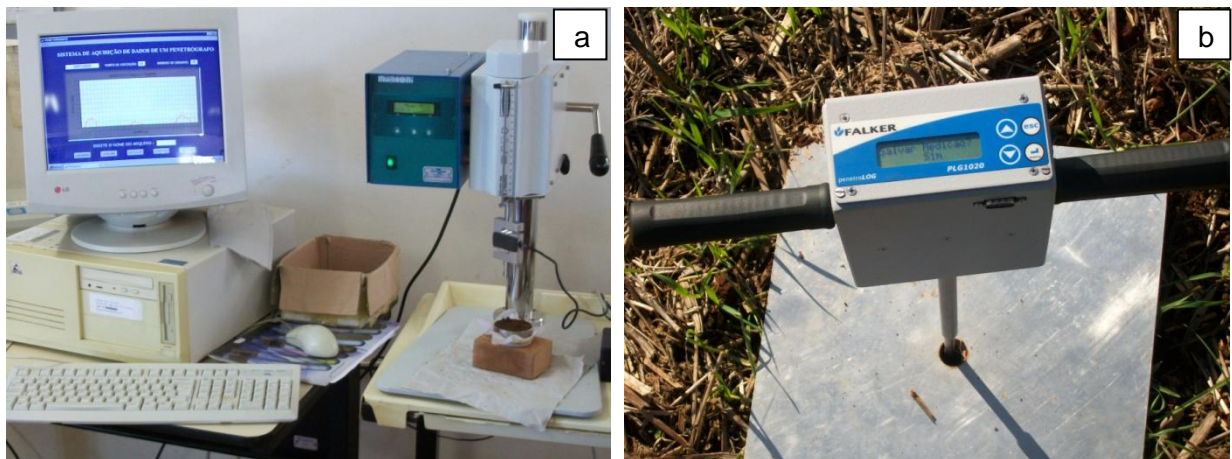


Figura 6 – Penetrômetro eletrônico de bancada modelo MA 933 da marca Marconi utilizado para determinação da resistência do solo à penetração mecânica avaliada em laboratório (a) e Penetrômetro de campo da marca Falker modelo PLG 1020 utilizado para determinação da resistência do solo à penetração mecânica, avaliada no campo (b).

O outro método de avaliação da resistência do solo à penetração foi realizado a campo, em solo com 22% de umidade gravimétrica, mediante uso de um penetrômetro da marca Falker modelo PLG 1020 (Figura 6b), o qual atinge uma profundidade de 40 cm. Os dados obtidos pelos dois métodos de determinação da

resistência do solo à penetração foram expressos em MPa. Efetuou-se também a comparação dos resultados obtidos em cada método mediante teste de correlação linear de Pearson.

3.3.3 Força exercida na barra de tração de trator agrícola

A força exercida na barra de tração de trator agrícola, expressa em kN, foi avaliada através de uma haste sulcadora (Figura 7b), semelhante ao facão utilizado para abertura do sulco na semeadora, com auxílio de um anel octogonal acoplado a um módulo de aquisição de dados, equipado com pontes extensiométricas, acoplado ao terceiro ponto de um trator agrícola. Esse equipamento dinamométrico, instalado entre o carro porta-ferramenta e a haste sulcadora, foi configurado para a taxa de aquisição de 22 dados por segundo (20 Hz). A haste sulcadora, com 1,2 cm de espessura, foi ajustada para atuar de 10 a 13 cm de profundidade e o trator motriz, marca Valmet com dupla tração (Figura 7a), à velocidade de $3,2 \text{ km h}^{-1}$. A avaliação do esforço de tração pelo conjunto, trator, carro porta-ferramenta e dinamômetro, foi processada perpendicularmente às linhas de semeadura das unidades experimentais, obtendo assim, dados resultantes dos tratamentos da parcela principal e da subparcela.



Figura 7 - Trator da marca Valmet com dupla tração, utilizado na avaliação da força exercida na barra de tração de trator agrícola (a) e detalhe da haste sulcadora tracionada pelo trator (b).

3.3.4 Rendimento de grãos

A avaliação do rendimento de grãos foi realizada na safra agrícola 2008/2009, na cultura da soja, cultura antecessora à avaliação dos atributos físicos do solo. Para a determinação, foi realizada a colheita mecânica, no mês de abril, sendo empregada colhedora automotriz para parcelas, marca Wintersteiger (Figura 8). A avaliação foi efetuada em toda a área útil da unidade experimental (6X8 m) e os resultados foram expressos em Kg ha^{-1} .



Figura 8 - Colhedora de parcelas da marca Wintersteiger utilizada para colheita mecânica da soja na safra agrícola 2008/2009.

3.4 Análise estatística

3.4.1 Densidade e porosidade do solo

Para análise dos resultados obtidos para densidade e porosidade do solo realizou-se a análise de variância e teste de hipóteses para a interação entre os fatores alocados na parcela principal (períodos de adoção do sistema plantio direto) e na subparcela (mecanismos sulcadores da semeadora) e para os efeitos principais dos fatores da parcela principal e da subparcela, nas três camadas avaliadas (0 a 7, 7 a 15 e 15 a 22) separadamente. Assim, no teste de hipóteses, a hipótese de interação nula, ou seja, $H_0: \varphi(AD)=0$, com 5% de probabilidade de erro, não foi rejeitada, para nenhuma das camadas avaliadas concluindo-se que a interação observada não é significativa e pode ser atribuída ao acaso. Assim, como tanto os fatores casualizados na parcela principal quanto na subparcela, eram qualitativos, sua interpretação foi realizada por teste de hipóteses e comparação múltipla de médias.

Dessa forma, realizou-se o teste de hipóteses (5% de probabilidade de erro) sobre os efeitos principais dos fatores da parcela principal e da subparcela em cada uma das três camadas avaliadas (0 a 7, 7 a 15 e 15 a 22 cm), separadamente. Constatou-se que nas camadas de 0 a 7 e 15 a 22 cm, tanto para os efeitos principais dos fatores da parcela principal quanto da subparcela, a hipótese nula ($H_0: \varphi(A)=0$ e $H_0: \varphi(D)=0$) não foi rejeitada, indicando que, para as profundidades citadas, os fatores da parcela principal e os da subparcela não diferem entre si.

Contudo, para a camada de 7 a 15 cm a hipótese nula foi rejeitada, tanto para efeitos principais dos fatores da parcela principal quanto da subparcela, indicando que os níveis de cada um dos fatores (parcela principal e subparcela) diferem entre si. Com isso, para indicar quais níveis diferem entre si foi efetuado o teste Tukey de comparação múltipla de médias, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

3.4.2 Resistência do solo à penetração mecânica

A análise dos resultados obtidos para a resistência do solo à penetração mecânica foi realizada de maneira diferenciada para cada uma das formas de avaliação, ou seja, para o método do penetrômetro eletrônico de bancada e para o método do penetrômetro de campo.

Para os resultados oriundos do método do penetrômetro eletrônico de bancada, o procedimento de análise ocorreu a exemplo daquele descrito para os parâmetros de densidade e porosidade do solo. Sendo, portanto, realizada análise de variância e teste de hipóteses para cada uma das três camadas avaliadas (0 a 7, 7 a 15 e 15 a 22) separadamente. Neste teste, a hipótese de interação nula, ou seja, $H_0: \varphi(AD)=0$, com 5% de probabilidade de erro, não foi rejeitada para nenhuma das camadas avaliadas, indicando ausência de interação. Assim, efetuou-se teste de hipóteses (5% de probabilidade de erro) sobre os efeitos principais dos fatores da parcela principal e da subparcela em cada uma das três camadas avaliadas (0 a 7, 7 a 15 e 15 a 22), separadamente. Posteriormente, foi realizado teste de Tukey para comparação múltipla de médias, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Pelo método do penetrômetro de campo (Penetrolog) procedeu-se a avaliação da resistência do solo à penetração mecânica até a profundidade de 40 cm. Com isso, para análise dos resultados optou-se por fazer análise de variância e teste de médias a cada camada de três centímetros, ou seja, foi realizada análise de variância e teste de hipóteses aos 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36 e 40 cm, separadamente. Pelo teste de hipóteses para a significância da interação, a hipótese nula, ou seja, $H_0: \varphi(AD)=0$, com 5% de probabilidade de erro, não foi rejeitada para nenhuma das profundidades avaliadas, indicando ausência de interação. Assim, efetuou-se teste de hipóteses (5% de probabilidade de erro) sobre os efeitos principais dos fatores da parcela principal e da subparcela, para cada uma das profundidades citadas. Posteriormente, foi realizado teste de Tukey para comparação múltipla de médias, ao nível de 5% de probabilidade de erro, para os níveis da parcela principal e da subparcela.

3.4.3 Força exercida na barra de tração de trator agrícola e rendimento de grãos

Os resultados obtidos para os parâmetros de força exercida na barra de tração de trator agrícola e rendimento de grãos da cultura da soja na safra agrícola 2008/2009 foram analisados mediante análise de variância e teste de hipóteses. Efetuou-se inicialmente o teste de hipóteses para verificação da significância da interação entre os fatores da parcela principal (períodos de adoção do sistema plantio direto) e da subparcela (rompedores do solo da semeadora). Neste teste de hipóteses, a hipótese de interação nula, ou seja, $H_0: \varphi(AD)=0$, com 5% de probabilidade de erro, não foi rejeitada concluindo-se que a interação observada não é significativa e pode ser atribuída ao acaso. Como os fatores, tanto na parcela principal quanto na subparcela, foram qualitativos sua interpretação foi realizada por teste de hipóteses e comparação múltipla de médias, para cada um dos parâmetros citados. Dessa forma, foi realizado teste de hipóteses (5% de probabilidade de erro) sobre os efeitos principais dos fatores da parcela principal e da subparcela. Posteriormente, realizou-se teste de Tukey para comparação múltipla de médias, ao nível de 5% de probabilidade de erro, para verificação de quais níveis de cada fator diferiam entre si.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade e porosidade do solo

Os parâmetros físicos de densidade e porosidade do solo encontrados nas condições deste estudo indicam tendência à manutenção da compactação da camada subsuperficial do solo, situada entre 7 e 15 cm de profundidade, corroborando os resultados obtidos por Abreu et al. (2003); Genro Junior et al. (2004); Suzuki et al. (2008), os quais apontam esta compactação como frequente em áreas submetidas a sistema plantio direto. Tal situação pode ser evidenciada pelos incrementos nos valores de densidade do solo e redução da porosidade total e da macroporosidade (Tabela 4), na camada de 7 a 15, comparativamente à camada superficial (0 a 7 cm). Este comportamento diferenciado entre as camadas de solo pode ser atribuído à existência, na camada superficial, de maior concentração de matéria orgânica, maior atividade biológica e mais intensos ciclos de umedecimento e secagem. Além disso, a ação dos mecanismos rompedores de solo que equipam as semeadoras também deve ser enfatizada, pois para culturas de inverno, o espaçamento médio usado é de 17 cm e, na semeadura, ocorre a mobilização de uma camada de 5 cm ou mais, pelos mecanismos sulcadores para colocação de semente e adubo (GENRO JUNIOR et al., 2004), o que mobiliza, aproximadamente, 30 % da área em uma única operação. Considerando o efeito das culturas de verão e o cultivo sucessivo, em pouco tempo, toda a camada superficial dos solos sob plantio direto é mobilizada. Dessa forma, não houve expressão do efeito dos tratamentos na camada superficial, os quais não diferiram estatisticamente entre si para nenhum dos parâmetros avaliados.

Em contrapartida, a camada subsuperficial do solo (7 a 15 cm), caracterizada pela ausência de revolvimento, fica sujeita a concentração das cargas exercidas na camada superficial, o que se deve ao efeito cumulativo do tráfego e, conforme Voorhees (1983), a ineficiência das forças naturais (ciclos de secagem e umedecimento) em reduzir a densidade do solo. Dessa forma, práticas de manejo que englobem algum grau de revolvimento do solo ou de intervenção nessa camada subsuperficial mais compactada, como a ocasional escarificação ou aração, promoverão maiores efeitos sobre essa

camada do que sobre a camada superficial. Isso pode ser observado na Tabela 4, onde a expressão dos tratamentos (intervenções no sistema plantio direto) foi perceptível apenas na segunda camada do solo (7 a 15 cm). Resultados semelhantes foram obtidos por Abreu et al. (2004), os quais observaram um estado de compactação maior a partir dos 7,5 cm de profundidade nos tratamentos sem mobilização do solo, o que foi atribuído ao efeito cumulativo de pressões de máquinas e implementos recebidos pelo solo e, ainda, à acomodação natural das partículas. A terceira camada amostrada apresentou comportamento similar a camada de 7 a 15 cm para os parâmetros físicos avaliados sem, contudo, apresentar diferenças estatísticas entre os valores encontrados.

O estudo do efeito dos diferentes períodos de adoção de sistema plantio direto, obtidos tanto pela intervenção mediante aração quanto por escarificação, sobre os parâmetros físicos do solo, apresentou um caráter efêmero, sendo seu efeito residual minimizado em poucos ciclos de cultivo. Assim, na camada de 7 a 15 cm, para o parâmetro de densidade do solo houve diferença apenas entre a área submetida à aração há dois anos e meio (A2) e a área escarificada há quatro anos e meio (E4). Os demais tratamentos, inclusive a testemunha, com solo manejado há 16 anos sob sistema plantio direto contínuo, apresentaram comportamento intermediário. Esse comportamento pode ser atribuído ao processo natural de reconsolidação do solo, resultante da chuva e dos ciclos de umedecimento e secagem (HILLEL, 1998), além do efeito promovido pelo manejo, como o ocasionado pelo tráfego de máquinas (FERNANDES et al., 1983; CAMPOS et al., 1995; TARAWALY et al., 2004). Conjuntamente a isso, a intervenção no sistema plantio direto mediante revolvimento do solo, pode promover a deterioração da resistência dos agregados, o que, especialmente em solos muito compactados, resulta em solo mais fraco e menos estável, sendo mais suscetível a uma subsequente compactação mais intensa.

Tabela 4 - Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Microp.) e macroporosidade do solo (Macrop.) em Latossolo Vermelho Distrófico húmico, em parcelas manejadas sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e parcelas em que o manejo sob sistema plantio direto foi interrompido por intervenção mecânica mediante aração há 7,5 anos (A7), 6,5 anos (A6), 5,5 anos (A5), 4,5 anos (A4), 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2) e mediante escarificação do solo a há 7,5 anos (E7), 6,5 anos (E6), 5,5 anos (E5), 4,5 anos (E4), 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2).

Tratamentos	Parâmetros avaliados			
	Ds Mg m ⁻³	Pt	Microp. m ³ m ⁻³	Macrop.
Camada de 0 a 7 cm				
T	1,15 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,13 ^{ns}
A7	1,14	0,47	0,33	0,14
A6	1,04	0,52	0,32	0,20
A5	1,14	0,48	0,34	0,14
A4	1,23	0,46	0,35	0,11
A3	1,20	0,47	0,36	0,11
A2	1,16	0,47	0,35	0,12
E7	1,16	0,49	0,35	0,14
E6	1,16	0,50	0,35	0,15
E5	1,05	0,51	0,34	0,17
E4	1,16	0,50	0,36	0,14
E3	1,15	0,52	0,35	0,17
E2	1,12	0,52	0,36	0,16
CV(%)	13,68	9,27	10,70	41,99
Camada de 7 a 15 cm				
T	1,31 ab*	0,40 b	0,33 ^{ns}	0,07 b
A7	1,39 ab	0,42 ab	0,35	0,06 b
A6	1,34 ab	0,43 ab	0,35	0,08 ab
A5	1,30 ab	0,44 ab	0,35	0,09 ab
A4	1,32 ab	0,44 ab	0,34	0,09 ab
A3	1,33 ab	0,43 ab	0,36	0,06 ab
A2	1,20 b	0,44 ab	0,34	0,10 ab
E7	1,30 ab	0,45 ab	0,35	0,10 ab
E6	1,37 ab	0,42 ab	0,35	0,06 b
E5	1,34 ab	0,44 ab	0,34	0,10 ab
E4	1,42 a	0,43 ab	0,36	0,07 b
E3	1,37 ab	0,44 ab	0,35	0,09 ab
E2	1,27 ab	0,48 a	0,35	0,13 a
CV (%)	6,68	7,14	6,25	27,90
Camada de 15 a 22 cm				
T	1,39 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,05 ^{ns}
A7	1,31	0,43	0,35	0,07
A6	1,38	0,44	0,38	0,05
A5	1,30	0,43	0,36	0,07
A4	1,32	0,44	0,36	0,08
A3	1,31	0,43	0,36	0,07
A2	1,30	0,41	0,35	0,06
E7	1,31	0,45	0,37	0,07
E6	1,35	0,42	0,37	0,06
E5	1,35	0,44	0,36	0,08
E4	1,38	0,44	0,36	0,08
E3	1,29	0,45	0,36	0,09
E2	1,34	0,45	0,36	0,09
CV (%)	5,79	6,46	6,41	26,81

^{ns} Médias na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

*Médias na coluna seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Com relação à porosidade total do solo na camada de 7 a 15 cm (Tabela 4), houve diferença apenas entre a testemunha, com histórico de 16 anos de manejo do solo sob sistema plantio direto (T) e a área escarificada há dois anos e meio (E2). Os demais tratamentos, contemplando diferentes períodos de adoção do sistema plantio direto, apresentaram comportamento similar à testemunha. Esse mesmo padrão de comportamento foi observado para a macroporosidade. Porém, para este parâmetro, as áreas escarificadas há quatro anos e meio (E4) e há seis anos e meio (E6), bem como a área submetida à aração há sete anos e meio (A7), se igualaram à testemunha e diferiram do tratamento escarificado há dois anos e meio (E2). Resultado semelhante foi obtido por Tavares-Filho et al. (2006), os quais analisaram o efeito da escarificação em um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto por mais de 20 anos e também verificaram que após um ano de cultivo a área escarificada não mais diferia da área testemunha com 20 anos de plantio direto. Por outro lado, Pierce et al. (1992) relatam que o efeito da escarificação pode persistir por período de tempo maior em solo de textura franco-arenosa. Isto indica que a durabilidade da escarificação do solo está intimamente relacionada à textura e classe de solos avaliada.

A microporosidade do solo não respondeu às alterações das práticas de manejo do solo, não havendo, portanto, diferença significativa em nenhuma camada amostrada para o referido parâmetro. Este comportamento de baixa responsividade aos sistemas de manejo também foi observado por Pagliai (1994) e Ferreira et al. (1999). Tal fato é atribuído a microporosidade do solo ser fortemente influenciada pela textura e pelo teor de C orgânico e muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo, originada do tráfego de máquinas, implementos, etc. (SILVA; KAY, 1997).

Os subtratamentos, semeadora equipada com discos (D) e com facão+discos (F), apresentaram diferenças estatísticas, na camada de 7-15 cm, para os atributos densidade, macroporosidade e microporosidade do solo (Tabela 5). A expressão dos subtratamentos sobre as propriedades físicas apenas na segunda camada amostrada pode ser explicada, uma vez que na camada mais superficial (0 a 5 cm), tem-se a atuação dos dois mecanismos de rompimento do solo. Já na segunda camada (7 a 15 cm), tem-se apenas a atuação do mecanismo facão+disco de corte, uma vez que o disco de corte isolado atua a profundidades não superiores a 7 cm. Da mesma forma,

não se poderia esperar melhoria dos atributos físicos do solo abaixo de 15 cm, uma vez que a atuação do mecanismo tipo facão+disco se encerra aproximadamente em 12 cm.

Tabela 5 – Densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo, em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto, comparativo entre adoção de semeadora com rompedores de solo tipo discos e facão+discos.

Parâmetros avaliados	Profundidade (cm)	Tratamentos		CV (%)
		Disco	Facão+Disco	
Densidade do solo (Mg m ⁻³)	0-7	1,15 ^{ns}	1,14	10,2
	7-15	1,36 a	1,30 b	7,1
	15-20	1,34 ^{ns}	1,33	5,8
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0-7	0,49 ^{ns}	0,49	6,1
	7-15	0,43 ^{ns}	0,44	5,7
	15-20	0,43 ^{ns}	0,43	6,0
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0-7	0,34 ^{ns}	0,34	10,4
	7-15	0,35 a	0,34 b	6,6
	15-20	0,36 ^{ns}	0,36	5,8
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0-7	0,15 ^{ns}	0,15	35,5
	7-15	0,08 b	0,09 a	37,3
	15-20	0,07 ^{ns}	0,07	37,9

^{ns} Médias na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

*Médias na linha seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Assim, ao observar os dados da Tabela 5, percebe-se que, para a camada de 7 a 15 cm, a semeadora equipada com mecanismo de rompimento do solo do tipo facão+discos promoveu diminuição da densidade e da microporosidade do solo e um aumento na macroporosidade, comparativamente à semeadora equipada com discos. Isso pode ser atribuído a maior profundidade de atuação do facão em relação aos discos. Esses resultados são corroborados por aqueles gerados por Koakoski et al. (2007), que, ao compararem semeadoras equipadas com facão com semeadoras equipadas com discos, verificaram que o mecanismo rompedor de solo tipo facão gerou, em média, porosidade total do solo 24,3% superior à alcançada pelo mecanismo rompedor de solo tipo discos.

4.2 Resistência do solo à penetração mecânica

A resistência à penetração, avaliada pelo método do penetrômetro eletrônico de bancada (Tabela 6), não diferiu entre os diferentes períodos de adoção do sistema plantio direto, em nenhuma das camadas avaliadas. Um dos fatores que pode ter contribuído para a ausência de diferença estatística foi o elevado coeficiente de variação dos dados de 57, 31 e 32 % para as camadas de 0 a 7, 7 a 15 e 15 a 22, respectivamente. Coeficiente de variação elevado (41%), para a resistência do solo à penetração na camada superficial, também foi encontrado por Castro (1995) em Latossolo Roxo, para cultura anual, o qual não encontrou diferença significativa entre os dados para a camada avaliada, apesar do preparo com escarificador ter apresentado maior valor de resistência do solo à penetração ($2,21 \text{ kgf cm}^{-2}$) em relação ao plantio direto ($2,05 \text{ kgf cm}^{-2}$) e plantio convencional ($1,26 \text{ kgf cm}^{-2}$), semelhante aos resultados obtidos neste trabalho. Da mesma forma, Ribon et al. (2003) também encontraram coeficiente de variação elevado (43%) para a resistência à penetração na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto, prejudicando a detecção de diferenças estatísticas entre os dados.

Porém, outra hipótese, para a ausência de diferença entre os tratamentos, em todas as camadas avaliadas, é de que o efeito residual da intervenção mecânica mediante aração ou escarificação em área manejado sob sistema plantio direto contínuo, tenha realmente sido minimizado em período inferior a dois anos e meio. Estes resultados corroboram aqueles obtidos por Mahl et al (2008) em estudo em um Nitossolo Vermelho Distrófico comparando sistema plantio direto com plantio direto escarificado também observaram redução dos benefícios da escarificação ao longo do tempo, ao verificar que a resistência mecânica do solo à penetração, respectivamente aos quatro e 18 meses após a operação de escarificação, foi reduzida em 54 e 18% na camada superficial (0,05 m), em relação às parcelas em plantio direto nestes períodos. Outros estudos indicam que a duração pode ser muito variável indo desde alguns meses (EVANS et al., 1996; HAMILTON-MANNNS et al., 2002) até alguns anos (TWOLOW et al., 1994), o que pode estar associado com a textura do solo (PIERCE et al., 1992).

Tabela 6 - Resistência do solo à penetração mecânica avaliada pelo método do penetrômetro eletrônico de bancada em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e áreas em que o manejo sob sistema plantio direto contínuo foi interrompido por intervenção mecânica mediante aração há 7,5 anos (A7); 6,5 anos (A6); 5,5 anos (A5); 4,5 anos (A4); 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2) e por escarificação há 7,5 anos (E7); 6,5 anos (E6); 5,5 anos (E5); 4,5 anos (E4); 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2) e comparativo entre adoção de semeadora com rompedores de solo tipo discos e facão+discos.

Tratamentos	Resistência à Penetração (MPa)		
	Camada amostrada (cm)		
	0 a 7	7 a 15	15 a 22
T	1,17 ^{ns}	1,97 ^{ns}	1,82 ^{ns}
A7	1,09	1,77	1,40
A6	0,61	1,80	1,57
A5	0,92	1,48	1,41
A4	1,17	1,64	1,71
A3	1,14	1,46	1,40
A2	1,00	1,27	1,50
E7	1,14	1,43	1,32
E6	0,90	1,59	1,28
E5	0,74	1,61	1,48
E4	1,07	1,74	1,61
E3	0,91	1,72	1,22
E2	0,75	1,11	1,29
CV (%)	57,15	30,85	31,72
Disco	1,02 ^{ns}	1,69 ^{*a}	1,48 ^{ns}
Facão+Disco	0,92	1,48 ^b	1,45
CV (%)	34,0	27,0	30,0

*Médias na coluna seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

^{ns} Médias na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A utilização de haste (facão) aliada a disco de corte promoveu a redução da resistência à penetração, especialmente na camada de 7 a 15 cm. Estes resultados corroboram o trabalho de Koakoski et al. (2007), os quais verificaram que o facão proporcionou menores valores de resistência do solo à penetração mecânica do que o disco, especialmente na faixa de 10 a 15 cm de profundidade. Isto revela que o mecanismo rompedor de solo, tipo facão, apresenta potencial de mitigar a compactação do solo, a ser explorado em áreas manejadas sob SPD. Nesse sentido, Reis et al. (2004) comentam que em solos com alto teor de argila, deve-se utilizar o mecanismo tipo facão para abertura de sulco, uma vez que além de proporcionar benefícios aos

parâmetros físicos do solo, o mesmo promove maior percentagem de emergência de plantas, em comparação com o mecanismo de discos duplos.

A avaliação da resistência do solo à penetração mecânica pelo método do penetrômetro de campo, para as áreas onde a intervenção no sistema plantio direto foi realizada mediante aração (Figura 9), apresentou comportamento similar àquela avaliada pelo método do penetrômetro eletrônico de bancada. Assim, ocorre um incremento nos valores de resistência à penetração até aproximadamente 15 cm de profundidade, abaixo dessa camada os resultados se mantiveram aproximadamente constantes, apresentando uma redução a partir dos 36 cm. Esses resultados encontram-se em consonância com o trabalho de Beutler et al. (2001), o qual verificou um gradiente crescente de resistência à penetração com o aumento da profundidade, atingindo a máxima resistência a 15-20 e 20-30 cm para os sistemas de plantio direto com cultivo contínuo com milho e plantio direto e cultivo em rotação com milho e feijão, respectivamente.

Contudo, a análise comparativa entre os diferentes períodos de adoção do sistema plantio direto, a partir de uma aração (Figura 9), indicou a ausência de diferenças estatísticas nas camadas mais superficiais do solo. Ocorreram diferenças apenas para as profundidades de 36 e 40 cm. Nestas camadas, a testemunha, manejada há 16 anos sob sistema plantio direto contínuo, diferiu das áreas submetidas à aração há dois anos e meio (A2) e há quatro anos e meio (A4). Estes resultados não eram esperados, uma vez que a intervenção no sistema plantio direto mediante aração, não ultrapassou os 25 cm de profundidade. Dessa forma, esperava-se o maior valor de resistência à penetração, com diferença entre os tratamentos, até a profundidade de 25 cm, caracterizando a ação do arado de discos e o tráfego de máquinas, conforme observado por Castro (1995) em Latossolo Roxo cultivado com milho. Contudo, Pierce et al. (1992), estudando os efeitos do modo de preparo do solo em propriedades físicas de um solo franco-arenoso, encontraram resultados que corroboram aqueles obtidos nesse estudo. Estes autores observaram a redução da densidade após a operação de escarificação, a uma profundidade de 35 cm. Efeitos residuais na densidade e porosidade total do solo foram constatados dois anos após ter sido desenvolvido o estudo, indicando que diferenças entre os tratamentos em profundidades superiores a 30 cm podem estar, ainda, associados ao processo de revolvimento do solo.

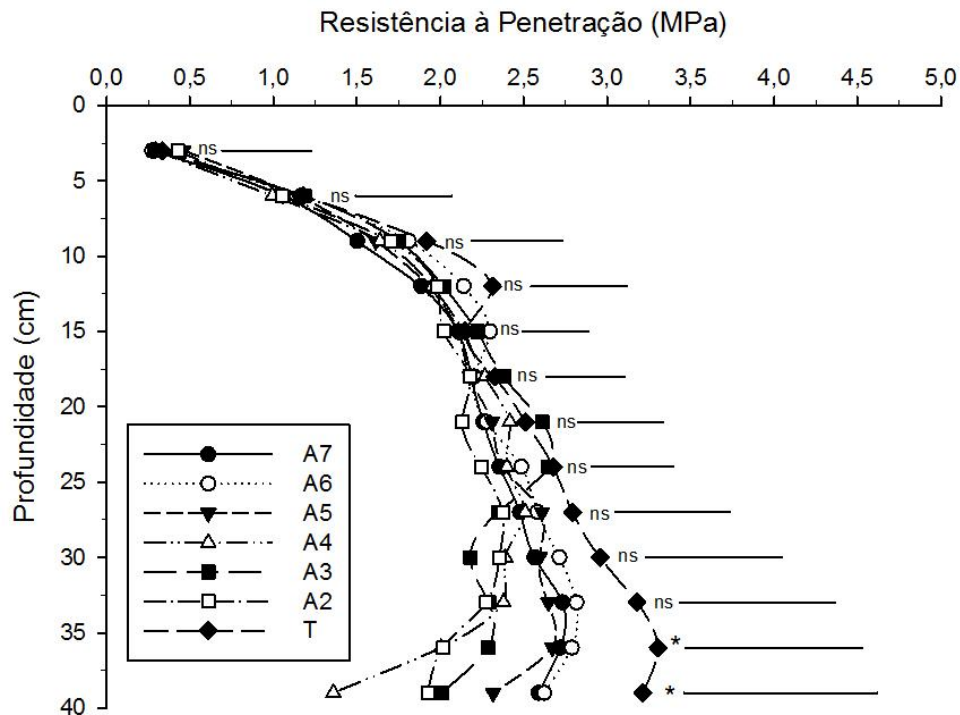


Figura 9 - Resistência do solo à penetração mecânica em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e áreas em que o manejo sob sistema plantio direto contínuo foi interrompido por intervenção mecânica mediante aração há 7,5 anos (A7), 6,5 anos (A6), 5,5 anos (A5), 4,5 anos (A4), 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2). As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de resistência do solo à penetração mecânica, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para cada profundidade.

Contrariamente, nas parcelas cuja intervenção no sistema plantio direto foi realizada mediante escarificação (Figura 10), a diferença entre os sistemas de manejo do solo pode ser percebida mais claramente. Assim, na camada situada de 0 a 12 cm, não houve diferenças entre os tratamentos. Esse aspecto pode ser atribuído a ação dos sulcadores da semeadora, corroborando o trabalho de Beutler et al. (2001). Todavia, abaixo dessa camada, as intervenções mecânicas são devidas, exclusivamente, à escarificação, ocasionando, portanto, diferenças entre os tratamentos.

Dessa forma, na camada de 12 cm, observa-se que o tratamento E2 (área escarificada há dois anos e meio) difere da testemunha (16 anos sob sistema plantio direto contínuo). Os demais tratamentos (períodos de adoção do sistema plantio direto a partir de escarificação) apresentam um comportamento intermediário. Esses resultados indicam que os efeitos oriundos da escarificação do solo permaneceram

dois anos e meio após a intervenção. Tais resultados contradizem diversos trabalhos como Ralisch et al. (2001), que concluíram que a escarificação tem efeitos somente para uma safra de cultura, não tendo efeito residual para outras culturas; ou Secco e Reinert (1997), de acordo com os quais a duração dos benefícios da escarificação, em Latossolo Vermelho sob semeadura direta, chega até a 10 meses após o preparo, e proporciona melhor porosidade total e maior rugosidade superficial. Por outro lado, Pierce et al. (1992) encontraram efeitos residuais na densidade e porosidade total do solo dois anos após ter sido desenvolvido o estudo, corroborando os resultados deste trabalho. Assim, fica evidente que a duração dos efeitos da escarificação no solo ainda não é claramente conhecida e que deve variar de solo para solo.

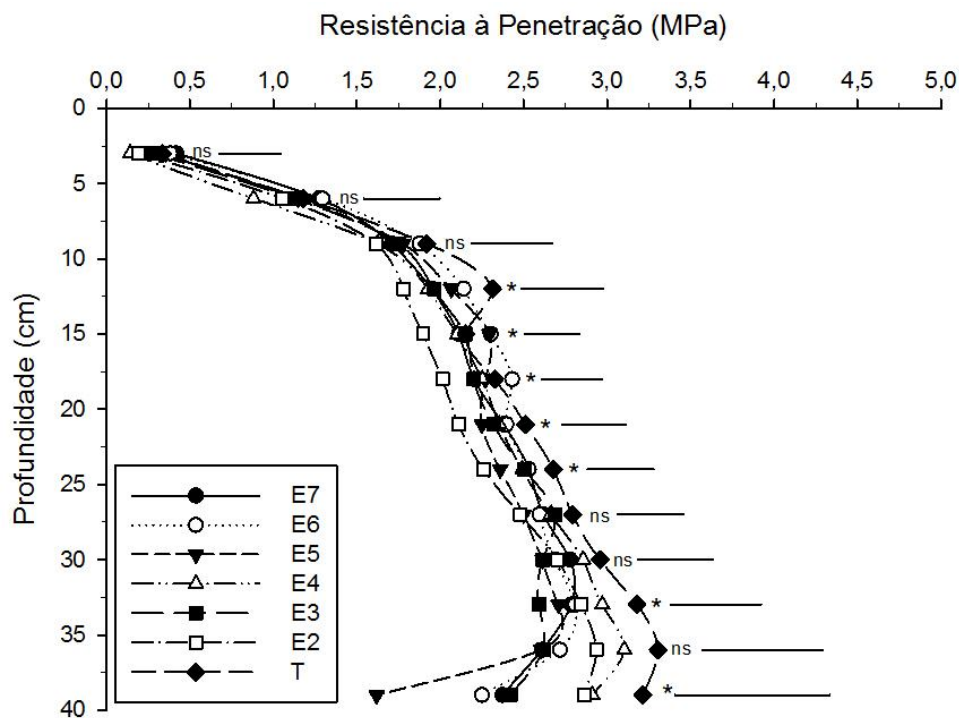


Figura 10 - Resistência do solo à penetração mecânica em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e áreas em que o manejo sob sistema plantio direto contínuo foi interrompido por intervenção mecânica mediante escarificação há 7,5 anos (E7), 6,5 anos (E6), 5,5 anos (E5), 4,5 anos (E4), 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2). As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de resistência do solo à penetração mecânica, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para cada profundidade.

Para as profundidades de 15 e 18 cm, a resistência à penetração da área escarificada há seis anos e meio (E6), chega a ser, numericamente, igual e superior respectivamente, a testemunha. Isso pode indicar que intervenções que envolvam mobilização do solo, em áreas sob sistema plantio direto contínuo, podem contribuir para deterioração de sua estrutura. Isto é atribuído por Canarache et al. (2000) a deterioração da resistência dos agregados que, especialmente em solos muito compactados, resulta em solo mais fraco e menos estável, sendo mais suscetível a uma subsequente compactação mais intensa. Ou ainda, de acordo com Kay e Angers (1999), ao aumento na taxa de dispersão de argila, a qual pode resultar em aumento na resistência do solo pelo fato de a argila dispersa funcionar como material cimentante com o secamento do solo. Conjuntamente, o revolvimento do solo, além de provocar perdas na sua qualidade estrutural, afeta a atividade da fauna do solo (MAHBOUBI; LAL, 1998).

Com base na análise da Figura 10 é possível perceber ainda, a existência de valores de resistência à penetração superiores a 2 MPa, especialmente na camada situada entre 10 e 12 cm. Essa informação mostra-se como de grande relevância uma vez que o referido valor é frequentemente assumido como valor crítico de resistência à penetração, a partir do qual, o desenvolvimento radicular das culturas pode ser grandemente prejudicado (HAKANSON et al., 1988; SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; 1999). Contudo, vale lembrar que este limite ainda não está completamente estabelecido e aceito, sendo que diversos autores verificaram que a resistência à penetração crítica ao desenvolvimento de raízes de diversas plantas situa-se entre 1 MPa e 3,5 MPa (GERARD et al., 1982; MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999). Como motivos para a variação desses valores críticos pode-se ressaltar fatores associados ao tipo de planta, teor de argila do solo, sistema de condução do experimento e ao sistema de manejo do solo.

A comparação dos três sistemas de cultivo, arado, escarificador e sistema plantio direto contínuo entre si (Figura 11), por sua vez, indicou diferença apenas para a profundidade de 9 cm, na qual a testemunha apresentou maior resistência à penetração do que os sistemas que envolvem mobilização do solo. No entanto, para as demais profundidades os três sistemas de manejo não diferiram entre si. Esse comportamento foi atribuído às condições de manejo do solo realizadas neste estudo, no qual, preconizou-se a rotação de culturas, englobando trigo/soja/ervilhaca/milho/aveia/soja/trigo. Tal sistema de rotação, por preconizar

elevado aporte de fitomassa, tanto em qualidade quanto quantidade do resíduo, pode ter possibilitado uma melhor agregação e estruturação do solo, conforme constatado em outros trabalhos de avaliação do efeito da rotação de culturas sobre a qualidade estrutural do solo, como Albuquerque et al. (1995) e Campos et al. (1995).

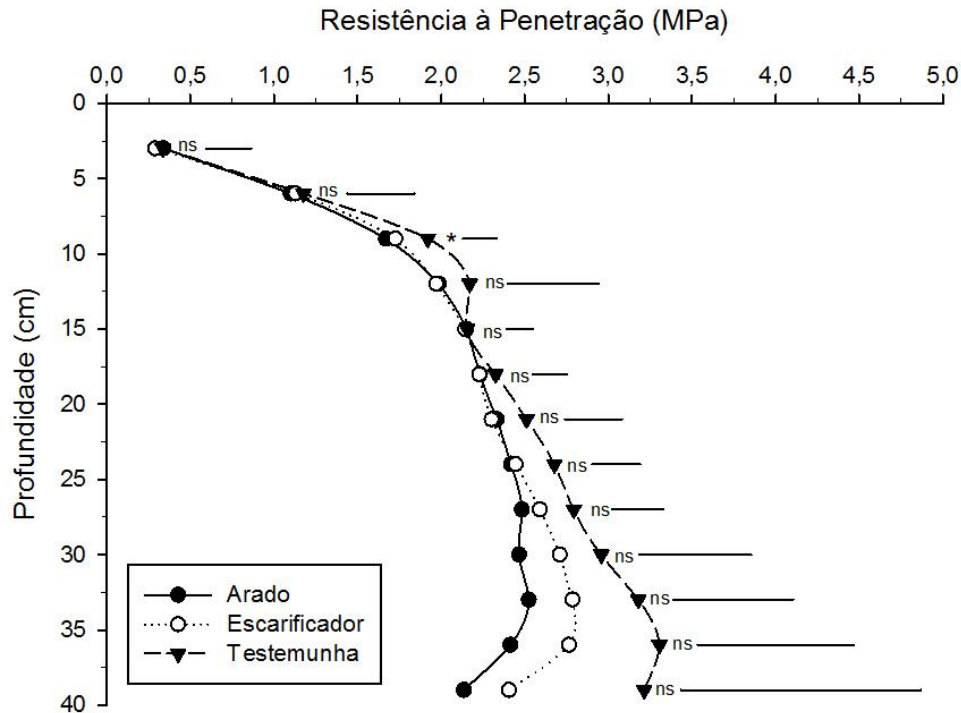


Figura 11 - Resistência do solo à penetração mecânica em parcelas manejadas sob sistema plantio direto a partir de intervenção por aração e escarificação para descompactação mecânica do solo e parcelas manejadas sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos. As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de resistência do solo à penetração mecânica, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para cada profundidade.

A utilização de semeadoras equipadas com sulcadores do tipo facão promoveu a redução da resistência mecânica à penetração em área submetida à escarificação na profundidade de 9 cm, em comparação com o mecanismo de discos duplos (Figura 12a). Tal comportamento pode ser considerado benéfico para a melhoria da estrutura do solo, uma vez que esta camada coincide com a camada de maior restrição ao crescimento radicular em áreas de sistema plantio direto apontada por Castro Filho et al. (1991); Abreu et al. (2003); Genro Junior et al. (2004) e Suzuki et al. (2008), como sendo aquela situada entre 8 e 15 cm de

profundidade. Essa observação sustenta a hipótese de que o emprego de elementos rompedores de solo, tipo facão de ação profunda, projetado para atuar junto à camada compactada, em semeadoras de plantio direto, promove mitigação da compactação do solo.

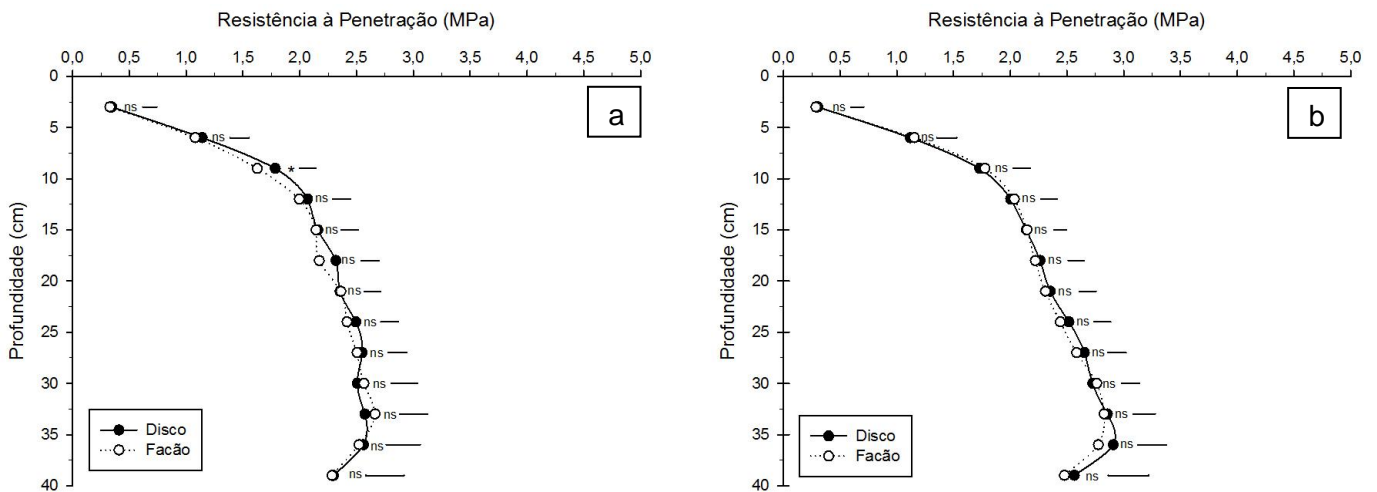


Figura 12 - Resistência do solo à penetração mecânica em parcelas com semeadura realizada com semeadoras equipadas com mecanismo de rompedor do solo tipo discos e facão+discos em área manejada sob sistema plantio direto após intervenção mecânica por escarificação do solo (a) e por aração (b). As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de resistência do solo à penetração mecânica, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para cada profundidade.

No entanto, este comportamento não foi observado para as áreas submetidas à intervenção mediante o uso do arado (Figura 12b), nas quais os mecanismos de rompimento do solo que equipam as semeadoras não apresentaram diferenças na resistência à penetração para nenhuma das camadas avaliadas. Um dos fatores para isso pode ter sido o maior revolvimento do solo realizado quando da utilização do arado do que na utilização do escarificador. Nesse sentido, o solo submetido à aração pode ter apresentado uma menor reconsolidação do que aquele submetido à escarificação, reduzindo o efeito dos mecanismos de rompimento do solo tipo facão e discos.

Ao estabelecer um comparativo entre os valores de resistência à penetração determinados em laboratório, pelo método do penetrômetro eletrônico de bancada e a avaliação da resistência à penetração realizada diretamente a campo, observou-se

a existência de uma correlação significativa a 5% de probabilidade ($r = 0,60$) (Figura 13). Estes resultados sugerem que os dois penetrômetros conduzem a valores relativos semelhantes e que ambos poderiam ser utilizados. Para tanto, faz-se necessário considerar que, em linhas gerais, o penetrômetro de campo conduz a valores absolutos superiores àqueles obtidos no laboratório, em função do teor de umidade ser, em geral, inferior nas avaliações realizadas a campo, acarretando em incremento na resistência do solo à penetração mecânica.

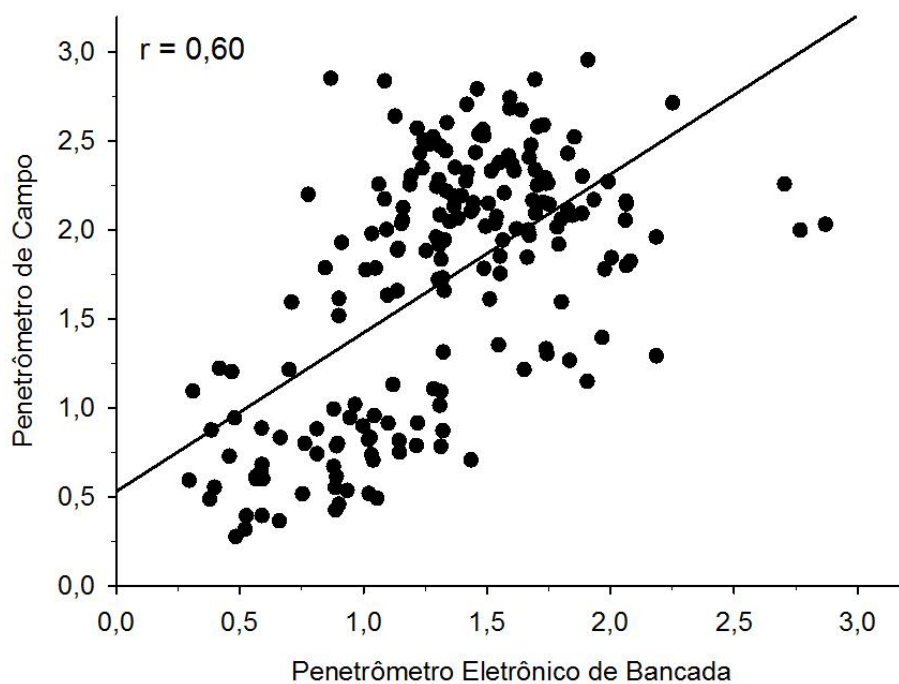


Figura 13 - Correlação linear de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração mecânica, determinada com penetrômetro eletrônico de bancada e com penetrômetro de campo.

4.3 Força exercida na barra de tração do trator agrícola

Os valores de força exercida na barra de tração de trator agrícola obtidos nesse estudo (Figura 14) situaram-se na mesma faixa de amplitude daqueles observados na literatura (CEPIK et al., 2005; BORTOLOTTI et al., 2006). Contudo, os diferentes períodos de adoção do sistema plantio direto, a partir de escarificação ou aração não apresentaram diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível

de 5%. Isso indica que o efeito residual da intervenção mecânica mediante aração ou escarificação do solo sobre a força exercida na barra de tração de máquina agrícola perdurou por tempo inferior a dois anos e meio. Estes resultados corroboram aqueles obtidos por Mahl et al. (2004), os quais, em estudo realizado em Nitossolo Vermelho, observaram que 18 meses após a escarificação, não havia mais benefícios sobre os parâmetros de força de tração, potência na barra de tração, consumo de combustível e capacidade de campo efetiva. Por outro lado, contradizem os resultados obtidos por Da Rosa et al. (2008), de acordo com os quais a demanda de esforços solicitados pela haste sulcadora aumentou com o tempo transcorrido desde a realização da escarificação até quatro anos após, quando não era mais possível observar o efeito residual da escarificação, em Latossolo Vermelho Distrófico.

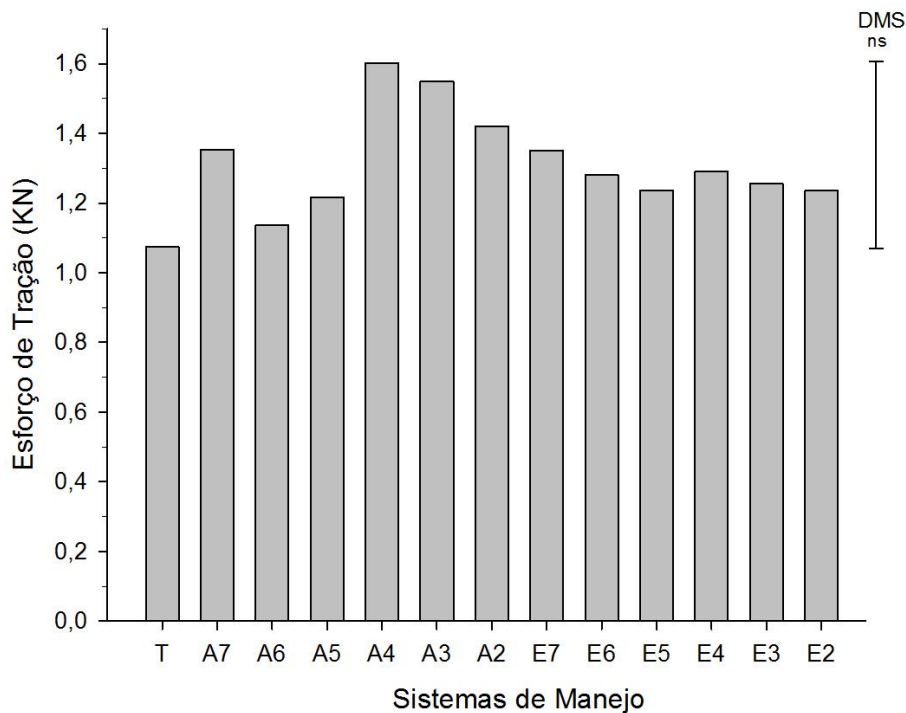


Figura 14 – Esforço médio exercido na barra de tração de trator agrícola em Latossolo Vermelho Distrófico húmico manejado sob sistema plantio direto contínuo por 16 anos (T) e áreas em que o manejo sob sistema plantio direto contínuo foi interrompido por intervenção mecânica mediante aração há 7,5 anos (A7), 6,5 anos (A6), 5,5 anos (A5), 4,5 anos (A4), 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2) e por escarificação há 7,5 anos (E7), 6,5 anos (E6), 5,5 anos (E5), 4,5 anos (E4), 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2). As barras horizontais correspondem a diferença mínima significativa dos valores de esforço médio exercido na barra de tração de trator agrícola, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No presente estudo, a testemunha manejada há 16 anos sob sistema plantio direto contínuo apresentou, em termos numéricos e não estatísticos, tendência à redução da demanda de tração, comparativamente às áreas submetidas à intervenção no sistema plantio direto consolidado mediante revolvimento do solo, tanto com uso de arado quanto com uso de escarificador. Esses resultados podem indicar que intervenções esporádicas em áreas manejadas sob sistema plantio direto consolidado podem promover rupturas no ciclo de melhorias nas propriedades biológicas, físicas e químicas, alterando a atividade biológica, acelerando a mineralização da matéria orgânica e destruindo a estrutura do solo (VEIGA et al., 2008; STONE et al., 2002).

Os menores valores de esforço de tração (Figura 15) obtidos nas parcelas cuja semeadura era realizada com semeadora equipada com facão sustentam a hipótese de que o emprego de elementos rompedores de solo, tipo facão de ação profunda, projetado para atuar junto a camada compactada, em semeadoras para plantio direto, promove mitigação da compactação do solo.

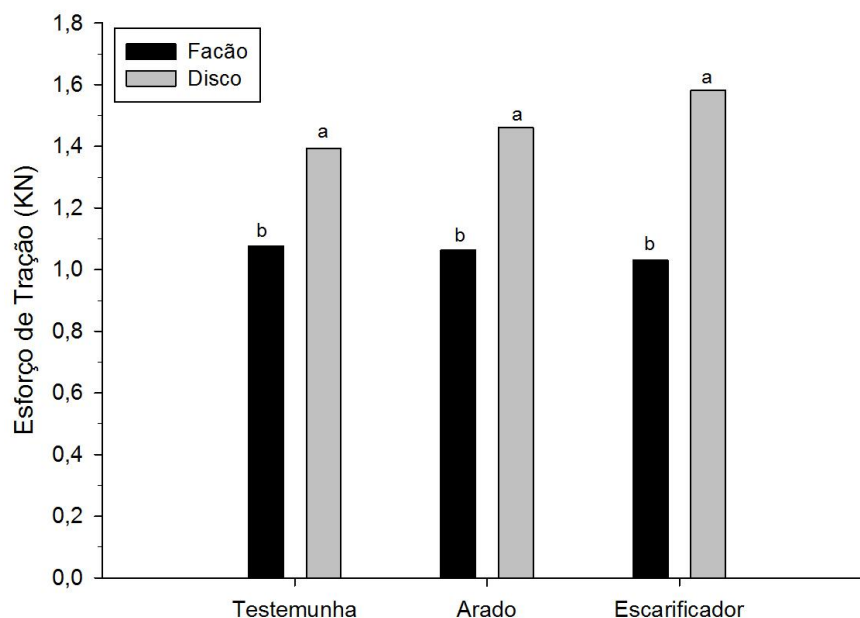


Figura 15 – Esforço médio exercido na barra de tração de trator agrícola, avaliada por haste sulcadora, estabelecendo comparativo entre parcelas cuja semeadura foi realizada com semeadoras equipadas com mecanismo rompedor do solo tipo discos e facão+discos em área com intervenções no sistema plantio direto mediante a aração ou escarificação e área submetida a sistema plantio direto contínuo por 16 anos. Os resultados foram comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de erro dentro de cada sistema de manejo do solo.

Dessa forma, em todos os sistemas de manejo do solo empregados, sistema plantio direto contínuo, e sistema plantio direto com intervenções mediante aração e escarificação, obteve-se menores esforços de tração, comparativamente ao mecanismo de discos duplos defasados. Estes resultados estão em concordância com o trabalho de Casão Júnior et al. (2000), os quais verificaram que os sulcadores do tipo facão providos com adequados ângulos de ataque nas hastes e nas ponteiros têm maior facilidade de penetração no solo e, com isso, maior potencial para rompimento da camada compactada, repercutindo assim, posteriormente, em menor exigência de tração.

4.4 Rendimento de grãos da cultura da soja

Os distintos períodos de adoção do sistema plantio direto, obtidos mediante intervenção mecânica em área de plantio direto consolidado, não alteraram o rendimento da cultura da soja no ano agrícola 2008/2009 (Figura 16). Este resultado pode ter ocorrido em função do rendimento das culturas ser dependente de diversos fatores como propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e manejo dado à cultura, além do fator climático. Assim, a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos deste estudo pode ser relacionada ao regime pluviométrico apresentado na região, ou seja, às chuvas que se apresentaram bem distribuídas durante todo o ciclo de cultivo da cultura. Em outras palavras, uma boa condição climática e boa condição de precipitação podem ter minimizado os efeitos de um solo com tendência à compactação (LIPIEC; SIMOTA, 1994). Com isso, o sistema radicular da cultura pode ter obtido água e nutrientes em quantidades satisfatórias na camada superficial do solo, descompactada, proporcionando bons rendimentos, mesmo em locais com presença de camadas subsuperficiais compactadas.

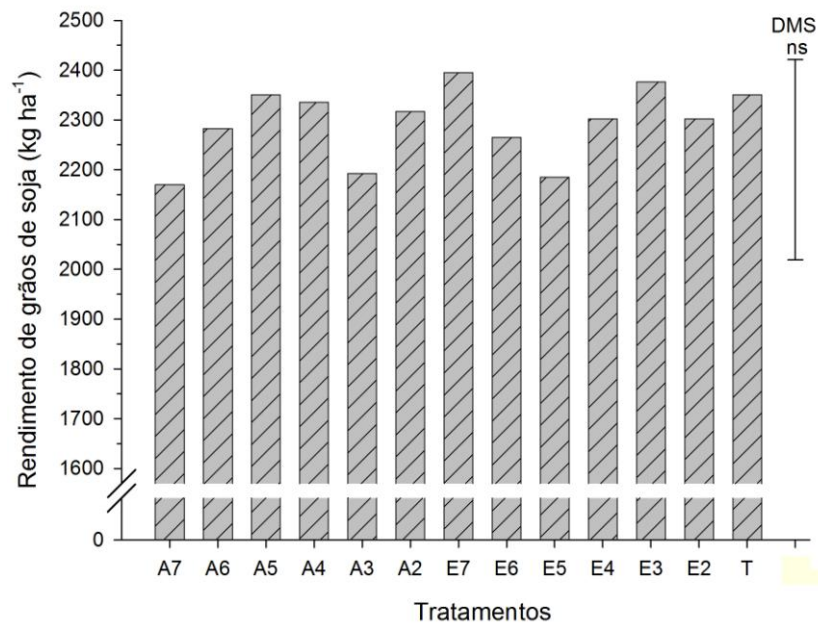


Figura 16 – Rendimento de grãos da cultura da soja (Kg ha^{-1}) no ano agrícola 2008/2009 em área submetida à aração há 7,5 anos (A7); 6,5 anos (A6); 5,5 anos (A5); 4,5 anos (A4); 3,5 anos (A3) e 2,5 anos (A2); área submetida à escarificação há 7,5 anos (E7); 6,5 anos (E6); 5,5 anos (E5); 4,5 anos (E4); 3,5 anos (E3) e 2,5 anos (E2) e parcela testemunha manejada a 16 anos sob sistema plantio direto (T). A barra vertical corresponde a diferença mínima significativa dos valores de rendimento de grãos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

De forma similar aos diferentes períodos de adoção do sistema plantio direto obtidos a partir de aração ou escarificação, a utilização de mecanismos sulcadores do tipo discos e facão+disco equipando as semeadoras, também não promoveu alterações significativas no rendimento da cultura da soja no ano agrícola 2008/2009 (Figura 17). Esta observação foi igualmente creditada a distribuição regular dos índices pluviométricos durante o ciclo da cultura.

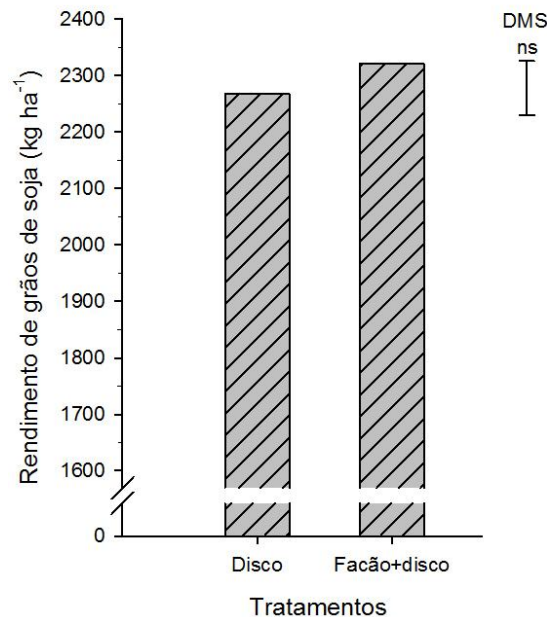


Figura 17 – Rendimento de grãos da cultura da soja (Kg ha⁻¹) no ano agrícola 2008/2009, em parcelas com semeadura realizada com semeadoras equipadas com mecanismo de corte do tipo discos e facão+discos. A barra vertical corresponde a diferença mínima significativa dos valores de rendimento de grãos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Com isso, os resultados obtidos indicam que a existência de condições climáticas, especialmente umidade, favoráveis podem beneficiar o desenvolvimento da cultura, amenizando as perdas de rendimento que poderiam ocorrer em decorrência da presença de compactação ou adensamento da camada subsuperficial do solo. Como justificativa Unguer e Kaspar (1994) sugerem que o efeito prejudicial da compactação sobre o crescimento de raízes pode ser atenuado ao se coincidir o período de crescimento das culturas com boas condições de umidade do solo, uma vez que possibilita que as raízes penetrem na camada compactada, facilitando a obtenção de água e nutrientes. Além desse benefício imediato, a cultura subsequente pode ser também menos prejudicada, pois encontrará caminhos preferenciais para o crescimento radicular (MARTINO; SHAYKEWICH, 1994).

5 CONCLUSÕES

1. A intervenção mecânica em solo manejado sob sistema plantio direto consolidado, mediante a prática de escarificação ou aração do solo, apresenta potencial efêmero para mitigar a compactação e promover a melhoria da estrutura do solo, com efeito residual até dois anos e meio após intervenção.
2. O efeito residual de intervenção mecânica para descompactação do solo manejado sob sistema plantio direto não alterou os parâmetros de rendimento de grãos da cultura da soja na safra agrícola 2008/2009 e força exercida na barra de tração de trator agrícola, comparativamente à área manejada há 16 anos sob sistema plantio direto consolidado.
3. O mecanismo rompedor de solo, tipo facão+disco, que equipa semeadora para plantio direto, mostrou-se mais efetivo em alterar os parâmetros avaliados do que o efeito residual de intervenção mecânica com aração ou escarificação, em solo manejado sob SPD consolidado, mitigando a compactação ou adensamento do solo na camada de 7 a 15 cm.
4. O emprego de elementos rompedores de solo, tipo facão de ação profunda, projetado para atuar junto a camada compactada em semeadoras para plantio direto, promoveu mitigação da compactação do solo, mediante aumento da macroporosidade do solo e redução da microporosidade, densidade do solo, resistência do solo à penetração mecânica e força exercida na barra de tração de máquina agrícola, em comparação com uso de semeadoras equipadas apenas com discos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos realizados neste trabalho e, considerando que atividades de intervenção mecânica em áreas de plantio direto consolidado, tais como aração e escarificação, caracterizam-se como operações de custo relativamente alto em função da potência requerida, recomenda-se fazer um estudo minucioso de custo/benefício antes de se pensar nestas operações para resolver supostos problemas de compactação do solo em áreas manejadas sob plantio direto. Nessa análise de verificação da necessidade de intervenção mecânica para descompactação do solo deve ser levada em conta também a capacidade de infiltração de água no solo, uma vez que sua manutenção em níveis adequados possui potencial de promover redução da perda de solo por erosão hídrica e incremento do armazenamento de água no solo. Paralelamente, a utilização de sistemas de produção que incluam rotação de culturas e adoção de culturas de cobertura deve ser a primeira opção em áreas manejadas sob plantio direto.

Aliado a isso, o presente trabalho indicou que o emprego de semeadoras equipadas com elementos rompedores de solo, tipo facão de ação profunda, projetado para atuar junto à camada compactada, apresenta potencial para mitigar a compactação do solo, podendo ser utilizado como alternativa à solução do referido problema em áreas manejadas sob sistema plantio direto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L. de et al. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 275-282, mar./abr., 2003.

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, mar./abr., 2004.

ALBUQUERQUE, J. A et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 115-119, jan./fev., 1995.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 717-723, jul./set., 2001.

ARAÚJO, A. G. et al. Mobilização de solo e emergência de plantas na semeadura direta de soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) em solos argilosos. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.19, n.2, p. 226-237, mai./ago., 1999.

ARAÚJO, A. S. F. de; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66-75, jul./set., 2007.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 91-95, jan./mar., 2000.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.3, p.555-560, jul./set., 2001.

BEUTLER, A. N. et al. Densidade do solo relativa e parâmetro “S” como indicadores da qualidade física para culturas anuais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, João Pessoa, PB, v. 8, n. 2, p. 27-36, jul./dez., 2008.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-177, jan./fev., 2001.

BICKI, T.J.; SIEMENS, J.C. Crop responses to wheel traffic soil compaction. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph v.34, n.3, p.909-913, 1991.

BLANCANEUX, P.; FREITAS, P.L.; AMÁBILE, R.F. Sistematização e adaptação da metodologia para caracterização do perfil cultural. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE A METODOLOGIA DO PERFIL CULTURAL, Londrina, 1991. **Trabalhos apresentados**. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 2a. ver. 28p. 1995.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OURWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amnsterdan: Elsevier, 1994. p.237-264.

BORGES, J. R. et al. Resistência à penetração de um gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 10, n. 1, p. 83-86, jan./mar., 2004.

BORTOLOTTTO, V. C.; PINHEIRO NETO, R.; BORTOLOTTTO, M. C. Demanda energética de uma semeadora-adubadora para soja sob diferentes velocidades de deslocamento e coberturas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 122-130, jan./abr. 2006.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n.1, p. 49-57, oct., 2002.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

CAMPOS, B. C. et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n.1, p. 121-126, jan./fev.,1995.

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 56, n. 3-4, p. 185-196, aug., 2000.

CARVALHO JÚNIOR, I.A.; FONTES, L.E.F.; COSTA, L.M. Modificações causadas pelo uso e formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, na região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n.3, p. 505-514, mai./jun., 1998.

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

CASÃO JÚNIOR, R.; ARAÚJO, A.G.; RALISH, R. Desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 em plantio direto no basalto paranaense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.3, p. 523-32, mar., 2000.

CASTRO, O. M. **Comportamento físico e químico de um latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (*Zea mays L.*)**. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

CASTRO FILHO, C. et al., Tillage methods and soil and water conservation in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam v. 20, ns. 2-4, p. 271-283, jun., 1991.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T.J. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n.5, p.1407-1413, sep./oct., 1991.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n. 3, p.527-538. jul./set., 1998.

CAVENAGE, A. et al. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 997-1003, out./dez., 1999.

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, n.3, p.263-266, 1985.

CEPIK, C. T. C.; TREIN, C. T.; LEVIEN, R. Força de tração e volume de solo mobilizado por haste sulcadora em semeadura direta sobre campo nativo, em função do teor de água no solo, profundidade e velocidade de operação. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 447-457, maio/ago., 2005.

CHAN, K. Y.; ROBERTS, W. P.; HEENAN, D. P. Organic carbon and associated soil properties of a red earth after 10 years of rotation under different stubble and tillage practices. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 30, n. 1, p. 71-83, feb., 1992.

CIOTTA, M.N. et al. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, vol.33, n.6, p. 1161-1164. nov./dez., 2003.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Revista Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 11 p. 1663-1674. nov., 2006.

CONTE, O. et al. Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.10, p.1254-1261, out., 2009.

DA ROSA, D. P. et al. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.43, n.3, p.395-400, mar., 2008.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R.A. Desafios à caracterização de solo fértil em manejo e conservação do solo e da água. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, Ed. 98, mar./abr., de 2007.

DIAS JUNIOR, M. de S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. P. 55-94.

DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.2, p.175-182, mar./abr., 1996.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. et al. (ed). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, p. 03-21, 1994.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. **Revista atual**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EVANS, S.D. et al. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture and corn yield. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, l. 1-2, p. 35-46, aug., 1996.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP. **Área de plantio direto no Brasil**. Disponível em <[http://www.febrapdp.org.br/port/plantio direto](http://www.febrapdp.org.br/port/plantio_direto)>. Acesso maio de 2007.

FERNANDES, B et al. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 329-333, mai./jun., 1983.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.515-524, 1999.

FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, n. 3, p. 21-35, sep., 1998.

FORNSTRON, K.J.; BECKER, C.G. Comparison of energy requirements and machinery for four summer fallow methods. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 20, n. 4, p. 640, 1977.

GABRIEL FILHO, A. et al. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.6, p. 953-957, nov./dez., 2000.

GASSEN, D.N.; GASSEN, F.R. **Plantio direto**. Passo Fundo, Aldeia Sul, 1996. 207p.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p.477-484, mai./jun., 2004.

GERARD, C.J.; SEXTON, P.; SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, p.875-879, 1982.

GUARIZ, H. R. et al. Variação da Umidade e da Densidade do Solo sob Diferentes Coberturas Vegetais. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Cruz Alta, RS, v. 4, n. 2, p. 3293-3296, nov., 2009.

HAKANSSON, I; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11. p. 239-282, jun., 1988.

HAKANSSON, I.; VOORHESS, W.B. Soil compactation. In: LAL,R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. & STEWART, B.A., eds. **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton, Lewis Publishers, p.167-179, 1998.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, june, 2005.

HAMILTON-MANNS, M. et al. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degrade soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, i. 2, p. 109-119, dec., 2002.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. New York, Academic Press, 1998. 770p.

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

HU, F.; LI, H.X.; WU, S.M. Differentiation of soil fauna populations in conventional tillage and no-tillage red soil ecosystems. **Pedosphere**, v.7, p.339-348,1997.

JENNY, H. **The soil resource: origin and behavior.** New York: Springer Verlag, 1980. 377 p. v. 37.

KAMIMURA, K.M. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho sob cultivo do arroz de terras altas em diferentes manejos do solo e água. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.723-731, set., 2009

KEMPER, B.; DERPSCH, R. In: RUSSEL, R.S. et al. (ed.). *The soil/root system in relation to Brazilian agriculture.* Londrina: IAPAR, p. 81-101. 1981.

KAY, B.D.; ANGERS, D.A. **Soil structure.** In: A. SUMNER, M.E., ed. *Handbook of Soil Science.* Boca Raton, CRC Press, 1999. p.229-276.

KICHLER, C.M et al. Spatially monitoring tractor performance to evaluate energy requirements of variable depth tillage and implement selection. In: ASABE Annual International Meeting, Minneapolis, 2007. Proceedings... St. Joseph: ASABE, 2007. Paper Number: 071028. 2007

KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes métodos de manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, p.395-398, set./dez., 1995.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, mar./abr., 2007.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, out./dez., 2002.

KOAKOSKI, A. et al. Desempenho de semeadora-adubadora utilizando-se dois mecanismos rompedores e três pressões da roda compactadora. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.42, n.5, p.725-731, maio, 2007.

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

LANÇAS, K. P.; BENEZ, S.H. Influência da velocidade de subsolagem no consumo de combustível e área mobilizada do solo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 3, n. 1, p. 25-33, jan./mar., 1988.

LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, set./out., 2007.

LEVIEN, R.; COGO, N.P.; ROCKENBACH, C.A. Erosão na cultura do milho em diferentes sistemas de cultivo anterior e métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, p. 73-80, 1990.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in soil science**, v.1, n. 1, p. 277-294, 1985.

LIPIEC, J.; SIMOTA, C. Role of soil and climate factors in influencing crop responses to soil compaction in Central and Eastern Europe. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.365-390.

MACHADO, R.L.T. et al. Efeito da escarificação sobre alguns parâmetros físicos de um planossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.3, p.519-523, jul./set., 1997.

MACHADO, R. L. T. Avaliação do desempenho de escarificador em Planossolo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 2, nº 3, p. 151-154, set./dez.,1996.

MAHL, D. et al. Demanda energética e eficiência da distribuição de sementes de milho sob variação de velocidade e condição de solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n. 1, p.150-157, jan./abr., 2004.

MAHL, D. et al. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto escarificado. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, , p. 741-747, supl., 2008.

MAHBOUBI, A. A.; LAL, R. Long-term tillage effects on changes in structural properties of two soils in central Ohio. **Soil and Tillage Research**, Elsevier, v. 45, p.107-118, may, 1998.

MARTINO, D.; SHAYKEWICH, C. F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, Canada, v. 74, n. 2, p. 193-200, may, 1994.

MENDES, R.C.A. **Restrições físicas ao crescimento radicular num Latossolo muito argiloso**. 1989. 81f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nacional de Brasília, Brasília, DF.

MEROTTO Jr. A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n.2, p. 197-202, mar./abr., 1999.

MILLER, G. T. **Ciência ambiental**. Tradução all Tasks; revisão técnica Wellington Braz Carvalho Deliti. 11 ed. São Paulo: Thomson Learnig, 2007.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 442 p.

PAGLIAI, M. Micromorphology and soil management. **Development in Soil Science**, Amsterdam , v. 22, p. 623-640, 1994.

PECHE FILHO, A.; STORINO, M. **Elementos para avaliar o solos em sistema plantio direto**. 2006. Artigo m Hypertexto. Disponível em <http://www.infobios.com/artigos/2006_2/PlantioDireto/Index.htm>. Acesso em 25 de agosto 2008.

PIERCE, F.J.; FORTIN, M.C.; STATON, M.J. Immediate and residual effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil physical properties and corn performance. **Soil and Tillage Research**, Elsevier, v. 24, n. 2, p.149-165, July, 1992.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J.; ALMEIDA, M.V.P. Avaliação de um solo argiloso sob plantio direto de uma escarificação na evolução da resistência do solo a penetração. **Anais...** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., Foz do Iguaçu, 2001. Resumo expandido. Foz do Iguaçu, CONBEA, 2001. CD-ROM.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.; 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. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. v.5, p.49-134.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. **Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado**. In: CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; ROSA, G.M. &

CERETTA, C.A. eds. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2001, 165 p.

REIS, E.F. dos et al. Avaliação de mecanismos rompedores e compactadores em semeadura direta. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.12, n.3, p. 212-221, jul./set., 2004.

RIBON, A. A. et al. Densidade e resistência a penetração de solos cultivados com seringueira sob diferentes manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 13-17, jan./jul., 2003.

RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis**. Part 1. Madison, American Society for Testing and Materials, 1965. 770p. (Agronomy, 9).

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI J. S. S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, mar./abr., 2003.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico vermelho-escuro de Eldorado de Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.2, p.313-319, 1995.

SANTOS, H. P. dos, et al. Atributos químicos e físicos de solo em sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 12, n. 1-2, p. 73-81, nov., 2006.

SECCO, D.; REINERT, D.J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal v.16, n. 3, p.52-61, set./dez., 1997.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.1, p.58-64, jan./fev., 2009.

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

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 877-883, 1997.

SILVA, V.R. et al. Fatores controladores da compressibilidade do solo de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.1-8, 2002.

SILVEIRA, P. M. da; ZIMMERMANN, F. J. P.; AMARAL, A. M. do. Efeito da sucessão de cultura e do preparo do solo sobre o rendimento do arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 6, p. 885-890, jun., 1998.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, v.78, p.93-111, jul., 1997.

SOANE, B.D., OUWERKERK, C. van. **Soil compaction problems in world agriculture**. In: SOANE, B.D., OUWERKERK, C. van, eds. Soil compaction in crop production. Netherlands: Elsevier, 1994. p.1-21.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO RS/SC (CQFS-RS/SC). **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS/Núcleo Regional Sul: UFRGS, 2004. 400p.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, maio/ago., 2002.

SUZUKI, L.E.A.S. et al. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do rio grande do sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, mai./jun., 2008.

TARAWALY, M. A. et al. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 95-103, apr., 2004.

TAVARES-FILHO, J. et al. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 996-999, maio/jun., 2006.

TAVARES FILHO, et al. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, p.393-399, 1999.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2, p. 111-119, feb., 1991.

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

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n. 2, p.333-339, mar./abr., 1996.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p.301-309, mar./abr., 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. da; LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, n. 4, p. 223-232, oct. 1999.

TULLBERG, J. N., Wheel traffic effects on tillage draught. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 75, n. 4, p. 375-382, Apr., 2000.

TWONLOW, S.J.; PARKINSON, R.J.; REID, I. Temporal changes in soil physical conditions after deep loosening of a silty clay loam in SW England. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, n. 1, p. 31-47, jul., 1994.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: A review. **Agronomy Journal**, v. 86, p. 759-766, 1994.

VEIGA, M. da et al. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a Southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1437-1446, jul./aug., 2008.

VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.129-133, 1983.