

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

**ESTRATÉGIAS PARA DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO  
POR ESCARIFICAÇÃO E HASTES SULCADORAS EM  
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

**TESE DE DOUTORADO**

**Marta Sandra Drescher**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**



**Estratégias para descompactação do solo por  
escarificação e hastes sulcadoras em sistema plantio  
direto**

**por**

**Marta Sandra Drescher**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos físicos e morfogenéticos do solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutora em Ciência do Solo**

**Orientador: Dalvan José Reinert**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Drescher, Marta Sandra

Estratégias para descompactação do solo por  
escarificação e hastes sulcadoras em sistema plantio  
direto / Marta Sandra Drescher.-2015.

119 f.; 30cm

Orientador: Dalvan José Reinert

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2015

1. Manejo do solo 2. Descompactação mecânica 3.  
Degradção estrutural I. Reinert, Dalvan José II. Título.

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

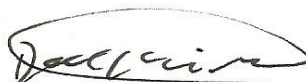
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a  
Tese de Doutorado

**ESTRATÉGIAS PARA DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO POR  
ESCARIFICAÇÃO E HASTES SULCADORAS EM SISTEMA  
PLANTIO DIRETO**

elaborada por  
**Marta Sandra Drescher**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutora em Ciência do Solo**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



**Dalvan José Reinert, PhD.**  
(Presidente/Orientador)




**Flávio Luiz Foletto Eltz, PhD.** (UFSM)



**Douglas Rodrigo Kaiser, Dr.** (UFFS)



**José Eloir Denardin, Dr.** (Embrapa Trigo)



**Paulo Ivonir Gubiani, Dr.** (UFSM)

Santa Maria, 16 de março de 2015

*Dedico a meus pais Aníbal e Reni,  
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.

À Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Solos e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realizar o curso de doutorado.

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

À Embrapa Trigo, especialmente aos pesquisadores José Eloir Denardin e Antônio Faganello pela cedência da área experimental e equipe de apoio nos trabalhos de campo, tornando possível a realização deste estudo.

Ao professor-orientador Dalvan José Reinert pelo apoio e orientação ao longo de todo o doutorado.

À banca examinadora desta tese pela colaboração para melhoria do trabalho.

À minha família, meus pais Aníbal e Reni Drescher, minha irmã Márcia e meu irmão Gerson pelo companheirismo, apoio e compreensão que serviram como base para que eu buscasse meus sonhos.

Ao meu namorado Marlon Wendt por todo seu amor e companheirismo.

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Física do Solo pela convivência e amizade, aos bolsistas de iniciação científica Bernardo e Maísa que sempre estiveram dispostos para ajudar, não importando a dificuldade da tarefa.

Sem mencionar nomes, para não cometer a injustiça de esquecer alguém, quero deixar meu profundo agradecimento aos grandes amigos que conquistei durante este período. Agradeço, pela amizade, pelos conhecimentos compartilhados, pelas horas de trabalho e também pelos inesquecíveis momentos de lazer e descontração.

À todos vocês, meus sinceros sentimentos de gratidão!

## RESUMO

Tese de Doutorado

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Universidade Federal de Santa Maria

### **ESTRATÉGIAS PARA DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO POR ESCARIFICAÇÃO E HASTES SULCADORAS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO**

AUTORA: Marta Sandra Drescher

ORIENTADOR: Dalvan José Reinert

Local e data de defesa: Santa Maria, 16 de março de 2015

Em áreas manejadas sob sistema plantio direto (SPD) na região Sul do Brasil o processo de compactação tem sido associado a degradação estrutural da camada subsuperficial do solo, perceptível, por alterações de atributos físicos do solo, alterações morfológicas de raízes e percepção, ocasional, de redução da produtividade das culturas. Como alternativa para mitigar esse processo ou para prevenir que o solo atinja níveis críticos de compactação, produtores utilizam a escarificação mecânica para promover o rompimento da camada compactada e melhorar a estrutura do solo. Contudo, os benefícios advindos dessa prática sobre propriedades físico-hídricas do solo têm apresentado duração efêmera, o que conduz a procura por métodos alternativos de mitigação do estado de compactação do solo. Nesse sentido, o presente trabalho visa estudar a duração dos benefícios da escarificação mecânica sobre propriedades físico-hídricas do solo, auxiliando na compreensão do tempo de reconsolidação do solo e no desenvolvimento de estratégias de mitigação do estado de compactação baseadas no mecanismo sulcador da semeadora. Para tanto, foi realizado um estudo no município de Coxilha, na região norte do Rio Grande do Sul sob Latossolo Vermelho Distrófico típico, para avaliar o efeito residual da escarificação. Os tratamentos foram compostos pela testemunha (27 anos sob SPD contínuo) e sete períodos (0, 6, 12, 18, 24, 30 e 36 meses) de adoção do SPD após escarificação. Para determinar o potencial de mitigação do estado de compactação dos sulcadores da semeadora foram avaliadas três estratégias de semeadura: disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m; disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m; e discos duplos defasados atuando a 0,07 m de profundidade. Os tratamentos foram comparados pelas propriedades físico-hídricas do solo: densidade, densidade relativa, porosidade total, macro e microporosidade, resistência à penetração, taxa de infiltração, retenção de água, água disponível para as plantas, condutividade hidráulica do solo saturado e solo não saturado e permeabilidade ao ar. Os resultados obtidos indicaram que o efeito residual da escarificação mecânica varia conforme a propriedade físico-hídrica avaliada sendo de apenas uma safra agrícola para a densidade, porosidade total e macroporosidade, 18 meses para resistência a penetração e de 24 meses para condutividade hidráulica e a infiltração de água no solo. Não houve efeito residual da escarificação para períodos superiores há dois anos. A utilização de semeadora com haste sulcadora, quando operando a 0,15 m de profundidade, promoveu o rompimento da camada compactada com benefícios muito similares aos obtidos com a escarificação do solo, denotando potencial de utilização para mitigação do estado de compactação do solo sob SPD.

**Palavras chave:** manejo do solo, descompactação mecânica, degradação estrutural.



## **ABSTRACT**

Doctorate Thesis  
Soil Science Graduate Program  
Federal University of Santa Maria

### **STRATEGIES FOR SOIL DECOMPACTION BY MECHANICAL CHISELING AND FURROW OPENER SHANK UNDER NO-TILLAGE**

AUTHOR: Marta Sandra Drescher

ADVISOR: Dalvan José Reinert

Place and date of the defense: Santa Maria, March 16, 2015

In areas managed under no-till in southern Brazil the soil compaction process has been associated with structural degradation of subsurface soil layer, visible by changes in soil physical properties, morphological changes of roots and casual perception of crop yield reduction. As an alternative to mitigate this process or to prevent the soil reaches critical levels of compaction, farmers use mechanical chiseling to promote the disruption of the compacted layer and improve soil structure. However, the benefits of this practice on soil physical and hydraulic properties have shows short duration making necessary to search for alternative methods to mitigate soil compaction. In this sense, this paper aims to study the duration of the benefits of mechanical chiseling on physic-hydraulic soil properties, aiding in the understanding of soil reconsolidation time and the development of strategies to mitigate compaction based on the types of fertilizer furrow in the no-till seeders. Therefore, a study was conducted in Coxilha, in northern region of the Rio Grande do Sul state on an Oxisol, to assess the residual effect of chiseling. The treatments were composed by the control treatment (27 years under continuous no-till) and seven adoption times (0, 6, 12, 18, 24, 30 and 36 months) of no-till after mechanical chiseling. To assess the potential to mitigate soil compaction of the seeder furrow were evaluated three strategies: shanks plus disc to 0.10 m; shanks plus disc to 0.15 and double disc to 0.07 m depth. The treatments were compared by the soil physical and hydraulic properties of bulk density, relative density, pore distribution, penetration resistance, infiltration rate, water retention capacity, water store for plants, saturated hydraulic conductivity, unsaturated hydraulic conductivity and air permeability. The results indicated that the residuality of mechanical chiseling varies according to the evaluated physical-hydraulic attribute lasting only for one harvest to the bulk density, total porosity and macroporosity, 18 months for penetration resistance and 24 months for hydraulic conductivity and infiltration rate. There was no residual effect of chiseling for time periods longer than two years after tillage. The use of furrow shank type to 0.15 m deep, promoted the disruption of compacted layer with very similar benefits to those obtained with soil chiseling, indicating potential to use to mitigate soil compaction under no-till systems.

**Keywords:** soil management, mechanical decompaction, structural degradation.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Concentração do sistema radicular (a) e (b) próximo à superfície do solo em área manejada sob sistema plantio direto. Fonte: Arquivo pessoal. .... 23
- Figura 2 - Principais ocorrências de Latossolos no Brasil. Fonte: IBGE, 2007. 29
- Figura 3 - Imagem da área experimental extraída do Google Earth..... 41
- Figura 4 - Representação esquemática do experimento “Práticas mecânicas para remediação da compactação do solo”, Embrapa Trigo, Passo Fundo, 2009..... 43
- Figura 5 - Escarificador com rolo destorroador utilizado para descompactação mecânica do solo na área manejada em sistema plantio direto. .... 44
- Figura 6 - Estratificação das camadas de solo pelo método do perfil cultural e posicionamento dos anéis volumétricos para coleta das amostras. .... 48
- Figura 7 - Umidade gravimétrica do solo no momento da avaliação da resistência do solo a penetração no início (20/12/12) (a) e no fim (18/04/13) (b) do ciclo da cultura da soja na safra agrícola 2012/2013. 50
- Figura 8 - Avaliação da resistência do solo a penetração na linha e na entrelinha de semeadura no início (a) e no fim do ciclo (b) da cultura da soja na safra agrícola 2012/2013..... 51
- Figura 9 - Estratificação das camadas de solo e posicionamento dos anéis volumétricos para coleta das amostras com estrutura preservada..... 56
- Figura 10 - Diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados estáveis em água e índice de estabilidade de agregados em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). Barras verticais indicam diferença

mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns = não significativo. .... 60

Figura 11 - Densidade do Solo (Ds) ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) e Densidade Relativa do solo, em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). Barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns = não significativo. 65

Figura 12 - Resistência do solo à penetração 20 dias após semeadura de soja da safra 2012/2013 em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). .... 67

Figura 13 – Resistência do solo à penetração no fim do ciclo da soja (safra 2012/2013) cultivada em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). .... 68

Figura 14 - Curvas de retenção de água no solo do Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). .... 71

Figura 15 - Água disponível entre capacidade de campo a 10 e a 33 kPa e ponto de murcha permanente (1500 kPa) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). Barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns= não significativo. .... 73

Figura 16 - Taxa de infiltração de água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo

há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36)..... 80

Figura 17 - Taxa de infiltração de água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) ao final de duas horas ( $\text{TIE}_{2\text{h}}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). \*Colunas com mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade..... 81

Figura 18 - Lâmina de água infiltrada (mm) ao final de 0,5 (a), 1 (b) e 2 (c) horas de avaliação em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). \* Em cada figura colunas com mesma letra minúscula não diferem pelo teste estatístico de Tukey ao nível de 5% de probabilidade..... 82

Figura 19 - Densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) e densidade relativa do solo em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com semeadora equipadas com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). Barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns = não significativo..... 84

Figura 20 - Resistência do solo à penetração mecânica (MPa) avaliada 20 dias pós a semeadura de soja na safra 2012/2013 em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com semeadora equipada com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D)..... 87

Figura 21 - Resistência do solo à penetração mecânica (MPa) avaliada no final do ciclo da soja na safra 2012/2013 em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com semeadora equipada com

- disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). ..... 88
- Figura 22 - Água disponível (AD) entre capacidade de campo (a 10 e a 33 kPa) e ponto de murcha permanente em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com semeadora equipada com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). ..... 90
- Figura 23 - Curva de retenção de água do Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). ..... 91
- Figura 24 - Taxa de infiltração de água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). ..... 96
- Figura 25 - Taxa de infiltração de água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) ao final de duas horas de avaliação ( $\text{TIE}_{2\text{h}}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). \*Colunas com mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. .... 96
- Figura 26 - Lâmina de água infiltrada (mm) ao final de 0,5, 1 e 2 horas de avaliação em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). \*Colunas com mesma letra minúscula no mesmo tempo de avaliação não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. .... 97

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Composição granulométrica e densidade de partícula do Latossolo Vermelho Distrófico típico da área experimental. .... 42
- Tabela 2 - Modelo de produção adotado no experimento “Práticas mecânicas para remediação da compactação do solo”, Embrapa Trigo, Passo Fundo, 2009..... 45
- Tabela 3 - Distribuição do tamanho de agregados estáveis em água (%) pelo método de Kemper e Chepil (1965), em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36)..... 59
- Tabela 4 - Porosidade total, macro e microporosidade do Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). .... 62
- Tabela 5 - Permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ,  $\mu\text{m}^2$ ) nas tensões de 10, 33 e 100 kPa em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). .... 75
- Tabela 6 - Condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36)..... 77
- Tabela 7 - Condutividade hidráulica do solo não saturado ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto

contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36), para as tensões de 10, 33, 100, 500 e 1000 kPa. ... 78

Tabela 8 - Porosidade total, macro e microporosidade ( $m^3 m^{-3}$ ) do Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com semeadora equipada com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). ..... 85

Tabela 9 - Condutividade hidráulica do solo saturado ( $mm h^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). ..... 93

Tabela 10 - Condutividade hidráulica do solo não saturado ( $mm h^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). ..... 93

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Concepções sobre plantio direto e o processo de compactação do solo.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Compactação em plantio direto e consequências sobre as propriedades físico-hídricas do solo .....</b>	<b>23</b>
2.2.1 Alteração estrutural do solo manejado sob plantio direto.....	24
2.2.2 Propriedades hídricas e disponibilidade de água em solo manejado sob plantio direto.....	26
<b>2.3 Suscetibilidade a compactação dos Latossolos da região de clima subtropical úmido do Brasil.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4 Estratégias de mitigação do estado de compactação e recuperação da qualidade estrutural do solo em sistema plantio direto .....</b>	<b>32</b>
2.4.1 Escarificação mecânica do solo .....	32
2.4.1.1 Residualidade da escarificação mecânica e reconsolidação em Latossolos argilosos manejados sob sistema plantio direto .....	34
2.4.2 Haste sulcadora como estratégia de descompactação do solo sob SPD .....	36
<b>3 HIPÓTESES.....</b>	<b>39</b>
<b>4 OBJETIVOS.....</b>	<b>40</b>
4.1 Objetivo geral .....	40
4.2 Objetivos específicos .....	40
<b>5 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
5.1 Caracterização do ensaio de campo conduzido pela Embrapa Trigo .....	42
5.2 Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos .....	45
5.3 Parâmetros avaliados .....	47



5.3.1 Estudo 1 - Reconsolidação do solo após escarificação mecânica em Latossolo de textura argilosa manejado em SPD .....	47
5.3.2 Estudo 2 - Benefícios do mecanismo sulcador da semeadora sobre propriedades físico-hídricas do solo.....	55
5.6 Análise dos resultados .....	56
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
6.1 Reconsolidação do solo após escarificação mecânica em Latossolo de textura argilosa manejado em SPD .....	58
6.2 Benefícios do mecanismo sulcador da semeadora sobre propriedades físico-hídricas do solo .....	83
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>100</b>
<b>9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>102</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O entendimento da dinâmica do processo de compactação do solo e a busca por alternativas para mitigar seus efeitos tem motivado a realização de estudos em escala global, dentre os quais o fenômeno é apontado como uma das principais ameaças à manutenção da qualidade do solo em áreas agrícolas (HORN et al., 2003; ECKELMANN, 2006; SCHJØNNING et al., 2009; KELLER, et al. 2013). Como fatores que causam a compactação destacam-se a pressão exercida pelo pisoteio animal, em sistemas de integração lavoura-pecuária, o tráfego de máquinas e implementos agrícolas em condições de solo com elevada umidade e o sistema de manejo, que exerce forte influência na estrutura do solo alterando as propriedades físico-hídricas, com reflexos sobre o desenvolvimento das plantas e a produtividade das culturas.

Em sistemas de cultivo que preconizam a ausência de mobilização do solo, como o plantio direto, descuidos no manejo, como ausência de diversificação de culturas, pastoreio intensivo e aumento da frequência de tráfego de máquinas agrícolas, podem conduzir à degradação da estrutura do solo. Esta condição tem gerado preocupação no cenário agrícola brasileiro, em que do total de 48,8 milhões de hectares utilizados para a produção de grãos mais de 30 milhões são manejados sob plantio direto (FEBRAPAD, 2014). Nessas áreas há registros de aumento da compactação na camada de solo localizada entre 0,07 e 0,15 m, a qual fica sujeita ao acúmulo de pressão dos rodados das máquinas agrícolas e mantém-se compactada pela ausência de mecanismos de intervenção.

Na região Sul do país mais de 80% da área cultivada com soja, milho e trigo também é manejada sob plantio direto (COOPLANTIO, 2012). Nessas áreas, a verificação do processo de compactação do solo tem sido associada à restrição do crescimento radicular e consequente concentração das raízes das culturas na camada superficial do solo. De modo que a redução no volume de solo explorado pelas raízes pode implicar em diminuição da absorção de água e nutrientes quando da redução da disponibilidade hídrica decorrente de curtos períodos de déficit hídrico. Assim, tornam-se frequentes reportagens que associam esses períodos a verificação de frustrações de safra como: “No RS, quebra na safra de milho pode chegar a 30% com falta de chuvas” (Notícias

Agrícolas, 06 de janeiro de 2014); “Falta de chuva prejudica soja no RS” (A Granja, 10 de fevereiro de 2014); “Falta de chuva deve reduzir safra de milho no Rio Grande do Sul, mas pode valorizar preço do grão” (Canal Rural, 19 de Dezembro de 2011). Nesse contexto, a compactação do solo em plantio direto passou a ser tratada como importante fator limitante da produção agrícola na região de clima subtropical úmido do Brasil.

Como estratégia para amenizar o processo de compactação do solo, habitualmente são utilizadas operações de descompactação mecânica, com destaque para a escarificação do solo. Como benefícios imediatos dessa prática têm-se o rompimento da camada compactada, com aumento da porosidade total e redução da densidade do solo. Todavia, essa prática contrapõe-se aos fundamentos do sistema plantio direto, que preconiza a mínima mobilização do solo agrícola. Além disso, persistem dúvidas sobre o efeito residual desses benefícios, uma vez que, em sua maioria, os estudos conduzidos para investigar o mesmo são de curta duração, inferiores a um ou dois anos, não acompanhando o gradual processo de reconsolidação do solo.

Esse cenário conduz a busca por métodos alternativos de mitigação do estado de compactação do solo àqueles tradicionalmente empregados. Para tanto, um mecanismo com potencial para a descompactação do solo, na linha de semeadura, é a utilização de semeadoras equipadas com sulcadores de deposição do adubo tipo haste, em sequência ao disco de corte. Sistemas dessa natureza podem proporcionar a atenuação do estado de compactação do solo no local específico de desenvolvimento das raízes da planta cultivada. Todavia, poucos dispositivos de semeadora com tais características estão disponíveis no mercado e pouco se conhece sobre seus benefícios para as propriedades físico-hídricas do solo, indicando a necessidade de estudo do seu potencial de utilização em áreas manejadas sob plantio direto.

Assim, a busca pela determinação do tempo de reconsolidação do solo após intervenção mecânica em sistema plantio direto e o desenvolvimento de alternativas de semeadura com hastes sulcadoras que possibilitem a mitigação do estado de compactação do solo configuram-se como o problema científico que norteia o trabalho. Em decorrência, a pesquisa visa contribuir para geração de estratégias que possibilitem a melhoria da qualidade físico-hídrica do solo em áreas manejadas sob sistema plantio direto na região Sul do Brasil.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Concepções sobre plantio direto e o processo de compactação do solo

O Plantio Direto foi introduzido no Sul do Brasil no fim dos anos 1960 (BORGES, 1993) como um simples método de preparo de solo para redução da erosão, sendo implementado sob o modelo de produção trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* (L.) Merr.). A partir de meados da década de 1980, recebeu a denominação de Sistema Plantio Direto (SPD), quando passou a ser conceituado como um complexo de tecnologias destinado à exploração de sistemas agrícolas produtivos (DENARDIN et al., 2001). Aos preceitos desse complexo de tecnologias, além da restrição à mobilização do solo apenas na linha de semeadura e da manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo, já contemplados no conceito de plantio direto, passaram a ser considerados essenciais para a manutenção da qualidade estrutural do solo a diversificação de espécies, via rotação e/ou consorciação de culturas e a cobertura permanente do solo, seja por plantas vivas como por restos culturais (DENARDIN et al., 2001).

Dessa forma, o termo “sistema plantio direto” passou a ser conceituado como um complexo de processos tecnológicos que compreendem a mobilização de solo apenas na linha ou cova de semeadura, manutenção permanente da cobertura do solo e diversificação de espécies, via rotação e/ou consorciação de culturas (DENARDIN et al., 2011). Mais recentemente é adicionado a esses fundamentos também o processo colher-semear, que representa a minimização ou supressão do intervalo de tempo entre colheita e semeadura (DENARDIN et al., 2011), aumentando o número de safras por ano e o período de tempo em que o solo permanece coberto pelas culturas.

É sobre essa base conceitual que, na atualidade, o “sistema plantio direto” é interpretado como ferramenta da Conservação do Solo e da Agricultura Conservacionista, capaz de induzir caráter de sustentabilidade ao sistema agrícola (DENARDIN et al., 2011), possibilitando o aumento da

produtividade (CARDOSO et al., 2014). Aliado a isso, a expansão relativamente rápida do SPD no Brasil pode ser explicada ainda pelo menor custo de produção e facilidades de operação de práticas de campo, associadas a uma maior proteção do solo e da água (DERPSCH et al., 2010; LOPES, et al., 2010).

Por esses motivos esse sistema de manejo vem se destacando no cenário agrícola nacional havendo indicativos de que do total de 48,8 milhões de hectares utilizados para a produção de grãos, mais de 30 milhões são manejados sob plantio direto (FEBRAPAD, 2014). Regionalmente, o plantio direto já vem sendo adotado de modo sistemático nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (3,8; 0,8 e 4,5 milhões de hectares, respectivamente) havendo, nos anos recentes, uma maior adoção em outros estados brasileiros, principalmente em Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso (LOPES, et al., 2010). Contudo, informações de pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa revelam que, deste total de mais de 30 milhões de hectares, em apenas 2,7 milhões deles são seguidos corretamente os preceitos preconizados pelos pesquisadores (DIAS, 2014). Sendo que a monocultura de soja/pousio ou sucessões contínuas do tipo soja/milho safrinha ou soja/milheto ocupam a esmagadora maioria da área total com plantio direto no Brasil (DIAS, 2014).

Como fatores para esse cenário destaca-se que a adoção correta do SPD passa necessariamente por adequada capacitação, por questões de infraestrutura e de disponibilização de insumos e, sobretudo, por motivação econômica. Assim, a inexistência de políticas públicas e a dependência de interesses comerciais podem ser citadas também como fatores de desestímulo a adoção de práticas agrícolas integradoras do complexo de processos tecnológicos do SPD como rotação de culturas e diversificação de espécies. Nesse contexto, atualmente, as políticas de incentivo a adoção desse sistema de manejo estão mais direcionadas a previsão de créditos ao Programa para Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa na Agricultura (MAPA, 2013) do que para estratégias que permitam a correta implementação de todos fundamentos do SPD.

Na região Sul do país, em que mais de 80% da área cultivada com soja, milho e trigo é manejada sob plantio direto (COOPLANTIO, 2012), também é possível observar a existência de descuidos na condução do sistema, ou seja,

o descumprimento de preceitos fundamentais do SPD, implicando na adoção simplista do plantio direto como prática de conservação do solo. Nesse sentido, normalmente se observa nas lavouras o manejo do solo sujeito a elevada pressão pelos rodados das máquinas e de implementos agrícolas, principalmente em condições de elevada umidade. Além disso, verifica-se a incipiente rotação de culturas, com produção de resíduos em quantidade, qualidade e frequência aquém da demanda biológica do solo (DENARDIN et al., 2008).

Aliado a isso, a ausência de revolvimento do solo associada ao intenso e continuado tráfego de máquinas, em condições elevadas de umidade contribuem para alterar a qualidade estrutural do solo, conduzindo ao aumento do estado de compactação em muitas áreas manejadas sob plantio direto. Nesses casos, a compactação acontecerá quando a pressão imposta pelo tráfego causa prejuízos a porosidade do solo que incluem tanto a compressão quanto o cisalhamento da estrutura do solo (O'SULLIVAN et al., 1999).

Desse modo, na região de clima subtropical úmido do Brasil tem-se verificado acentuada estratificação do solo na camada de 0 a 20 cm, seja em relação à compactação do solo (Figura 1) como em relação à distribuição dos nutrientes (CAVALCANTE et al., 2007). Nesse sentido, diversos estudos indicam que a camada de maior restrição ao crescimento radicular (mais compactada), em áreas de plantio direto está localizada entre 0,07 e 0,15 m (GENRO JUNIOR et al., 2004; SUZUKI et al., 2008; SECCO et al., 2009; DRESCHER et al., 2011). Assim, a camada superficial (0 a 0,07 m) 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 e da descompactação promovida pelas semeadoras-adubadoras. Ao passo que na camada logo abaixo (entre 0,07 e 0,15 m) a taxa de compactação causada pelas pressões sucessivas aplicadas pelo rodado das máquinas é maior que a taxa de descompactação promovida pelos agentes que atuam mais efetivamente na superfície do solo, implicando, assim, em aumento do grau de compactação nessa camada de solo.

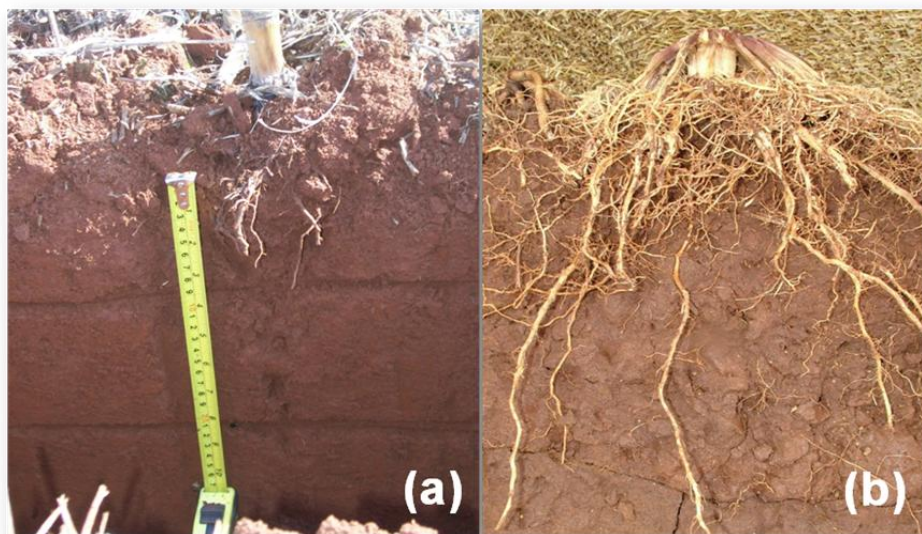


Figura 1 - Concentração do sistema radicular (a) e (b) próximo à superfície do solo em área manejada sob sistema plantio direto. Fonte: Arquivo pessoal.

Como consequências da presença de camada compactada no solo sob plantio direto têm-se a possibilidade de erosão, mediante aumento do escoamento superficial, diminuição da disponibilidade de água para as plantas cultivadas e alteração do fluxo de gases em virtude da redução da aeração (BATEY; MCKENZIE, 2006; BIRKAS, 2008). Também pode haver restrição ao crescimento radicular das culturas (REICHERT et al., 2007), com confinamento das raízes em um pequeno volume de solo implicando na redução do crescimento da parte aérea e da produtividade das culturas (KLEIN et al., 2009). Em decorrência disso, processos de compactação do solo se destacam como problemas recorrentes e demandantes de soluções tecnológicas.

## **2.2 Compactação em plantio direto e consequências sobre as propriedades físico-hídricas do solo**

A compactação representa o aumento da massa ou redução do espaço poroso do solo, para um determinado volume de solo, o qual se relaciona com

o histórico de cargas ou pressões exercidas em sua superfície (HAMZA; ANDERSON, 2005). Dessa forma, com incremento do processo de compactação do solo ocorrem alterações no arranjo das partículas do solo, no volume e tamanho dos poros e na difusão de gases (TAYLOR; BRAR, 1991; ALAOUI et al., 2011), influenciando os fatores físicos do solo que afetam o crescimento das plantas. Esses fatores foram classificados por Letey (1985) como fatores diretos e fatores indiretos. De acordo com essa classificação, água, oxigênio, temperatura e resistência do solo à penetração, estão diretamente relacionados com o crescimento das culturas, enquanto densidade, agregação e porosidade do solo influenciam indiretamente o seu crescimento.

Em outras palavras, as modificações de importância agronômica de crescimento e rendimento de culturas que ocorrem em solos compactados são consequência do 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 (SOANE; OUWERKERK, 1994; MIRANSARI et al., 2009). Desse modo, o estudo dos atributos físico-hídricos ao longo do tempo permite quantificar não só a magnitude, mas também a duração das alterações causadas pelos diferentes sistemas de manejo (REICHERT et al., 2009).

### 2.2.1 Alteração estrutural do solo manejado sob plantio direto

A adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo, como o cultivo mínimo e o plantio direto, levaram a uma alteração no comportamento da estrutura do solo em comparação com o sistema convencional. Assim, nos preparos conservacionistas, especialmente no sistema plantio direto, o não revolvimento do solo contribui para a estruturação do solo, a qual varia com o tipo de solo e cultivo e com o tempo de condução do sistema (ELTZ et al., 1989).



Dessa forma, a adoção do plantio direto geralmente promove um aumento da densidade na camada subsuperficial do solo em relação ao preparo convencional. Esse aumento é atribuído, em menor proporção, 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), sendo intensificado pela compactação promovida pelo tráfego de máquinas (FERNANDES et al., 1983; CAMPOS et al., 1995; TARAWALY et al., 2004) ou pisoteio animal (ALBUQUERQUE et al., 2001; LANZANOVA et al., 2007).

Durante o processo de compactação a estrutura do solo é modificada, com destruição dos macroagregados (TAVARES FILHO et al., 1999), e consequente redução do diâmetro de poros. Assim, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo podem ser convertidos em poros menores, principalmente pelos que retém água (REICHERT et al., 2007). Isso acontece porque os agentes que condicionam a força de ligação formadora dos poros de maior diâmetro (macroporos) são menos resistentes do que aquela que promove a união entre partículas e a formação de microagregados. Esta generalização é condizente com o modelo de formação e estabilização de agregados proposto por Tisdall e Oades (1982), que sugere que os macroagregados estáveis em água são estabilizados por agentes ligantes orgânicos transientes e relativamente não decompostos, ao passo que os microagregados seriam estabilizados por matéria orgânica mais estável no solo, conferindo, portanto, maior estabilidade. Além disso, a própria existência de espaços vazios (poros) no momento da aplicação de forças, torna o solo menos resistente e mais suscetível a deformação, formando poros de menor diâmetro, os quais são mais resistentes ao suporte de pressões. 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, áreas manejadas sob sistema plantio direto, com presença de camada compactada, apresentam redução da macroporosidade e aumento da microporosidade e da densidade do solo (KLEIN; LIBARDI, 2002; GUARIZ et al., 2009; REICHERT et al., 2009). Como consequência, o aumento da microporosidade favorece a retenção de água no solo (REICHERT et al.,

2007), ao mesmo tempo em que pode comprometer o transporte de ar e água (TORMENA et al., 1998; CAVENAGE et al., 1999).

Outro atributo físico condicionado pela estrutura do solo é a resistência mecânica imposta pelo solo, a qual está diretamente relacionada com o estado de compactação do solo (BUSSCHER et al., 1997) e pode ser uma medida mais sensível que a densidade e a porosidade para identificar a presença de camadas compactadas no perfil do solo (ABREU et al., 2004). A resistência mecânica é um dos fatores físicos do solo que influencia diretamente o crescimento de raízes (LETEY, 1985) sendo frequentemente inferida através resistência mecânica a penetração avaliada a partir de leituras realizadas com equipamentos conhecidos como penetrômetros. Essa medida serve como base à avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (FREDDI et al. 2006; TAVARES FILHO; RIBON, 2008; KAISER et al., 2009).

Em condições de solo compactado, o sistema radicular se concentra na camada superficial do solo (COLLARES et al., 2006) (Figura 1b), limitando o acesso à água e nutrientes (UNGER; KASPAR 1994), e ainda favorece a ocorrência de processos erosivos (REICHERT et al., 2007). Esse cenário tem sido verificado em muitas áreas manejadas sob sistema plantio direto (DE MARIA et al., 1999), nas quais a restrição ao crescimento radicular pode conduzir a frustrações de safra mesmo quando da ocorrência de curtos períodos de déficit hídrico (DENARDIN et al., 2008).

### 2.2.2 Propriedades hídricas e disponibilidade de água em solo manejado sob plantio direto

As alterações na densidade do solo e distribuição do tamanho de poros em áreas manejadas sob plantio direto influenciam diretamente a infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo. Isso acontece pelo fato do movimento da água no solo depender, além do gradiente de potencial matricial de água no solo, da condutividade hidráulica do solo não saturado que, por sua

vez, depende da estrutura porosa do meio, definida pela variação da densidade e da porosidade.

A medida da infiltração de água é considerada uma avaliação adequada para estimar a qualidade física e estrutural do solo (LEONARDO, 2003), uma vez que integra vários fatores como distribuição do tamanho e continuidade de poros, poros biológicos e cobertura de solo. Em áreas manejadas sob plantio direto o surgimento de camadas compactadas determina a diminuição do espaço poroso que pode implicar em diminuição da taxa de infiltração de água no solo, com conseqüente aumento das taxas de escoamento superficial e de erosão (BERTOL et al., 2001).

As diferenças na densidade e no arranjo das partículas do solo promovidas pelo plantio direto afetam também a retenção de água no solo (BESCANS et al., 2006), principalmente pelo efeito sobre o fenômeno da capilaridade. A capilaridade está ligada à afinidade das partículas do solo com a água e depende da geometria porosa do meio (forma, tamanho, orientação e distribuição dos poros), que é afetada pelo sistema de manejo adotado (RASIAH; AYLMORE, 1998). A adsorção, outro fenômeno ligado à retenção de água corresponde à atração da água pela parte sólida do solo (argilas e matéria orgânica), formando um filme de água. A adsorção está fortemente relacionada à textura do solo (HILLEL, 1998), não sendo afetada significativamente por diferentes sistemas de manejo em um mesmo solo.

A relação entre a energia com que a água está retida nos constituintes do solo e o seu conteúdo no solo, é expressa pela curva característica de retenção de água no solo, a qual é influenciada pelo sistema de manejo, sendo a retenção de água frequentemente maior em sistema plantio direto do que sob preparo convencional. Isso se dá pela maior ocorrência de poros de menor diâmetro (meso e microporos), responsáveis pela retenção de água (ROJAS; LIER, 1999) e pelo teor de matéria orgânica (CHAN et al., 1992), que tem alta capacidade de retenção de água e contribui para a melhoria da estrutura do solo.

Contudo, o aumento na retenção de água pelo solo não implica, necessariamente, em maior disponibilidade às plantas (TOLLNER et al., 1984). A disponibilidade está relacionada aos limites de capacidade de campo (CC) e do ponto de murcha permanente (PMP) (REICHARDT, 1985), em que a

umidade na capacidade de campo é facilmente modificada pelo manejo do solo e, portanto, variável no tempo e no espaço. Assim, a quantidade de água disponível será representada pela diferença do conteúdo de água entre as tensões de 6, 10 ou 33 kPa (CC) e 1500 kPa (PMP), considerados como o limite superior e inferior, respectivamente, de disponibilidade de água à maioria das plantas. A tensão a que são submetidas as amostras de solo para a estimativa da umidade na CC ainda é um assunto em debate na literatura. Em solos tropicais, onde há maior quantidade de macroporos, a umidade na CC tem sido determinada entre tensões de 6 e 10 kPa (REICHARDT, 1988; MELLO et al., 2002), enquanto para solos de clima temperado, o valor de 33 kPa é considerado padrão (HAISE et. al., 1955).

De modo geral, as alterações físico-hídricas decorrentes do estado de compactação do solo em plantio direto, como redução na taxa de infiltração de água no solo, condutividade hidráulica e disponibilidade de água podem interferir negativamente na produtividade das culturas, especialmente em regiões onde são comuns a escassez e a má distribuição das chuvas (veranicos). Nessas áreas a compactação pode causar um impacto combinado da diminuição do armazenamento de água, através da perda de porosidade do solo e diminuição do crescimento e desenvolvimento radicular através de um aumento na resistência do solo à penetração mecânica (WHITMORE et al., 2010). Dessa forma, a utilização de diferentes práticas de manejo do solo tem a finalidade de reduzir ou prevenir essas restrições, propiciando condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas.

### **2.3 Suscetibilidade a compactação dos Latossolos da região de clima subtropical úmido do Brasil**

Os Latossolos representam a classe de solo de maior expressão geográfica no território brasileiro (Figura 2). Isso se expressa pela presença generalizada de solos altamente intemperizados e homogêneos, desenvolvidos a partir de litologias muito distintas, o que de certa forma induziu à noção geral de que os solos brasileiros são mineralogicamente simples, invariavelmente

constituídos por caulinita, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e quartzo, por causa do clima quente e úmido. Embora esses minerais tenham ampla ocorrência no Brasil, observa-se a existência de grandes diferenças em propriedades físicas do solo em razão das variações nas proporções entre caulinita e óxidos (FERREIRA et al., 1999a).

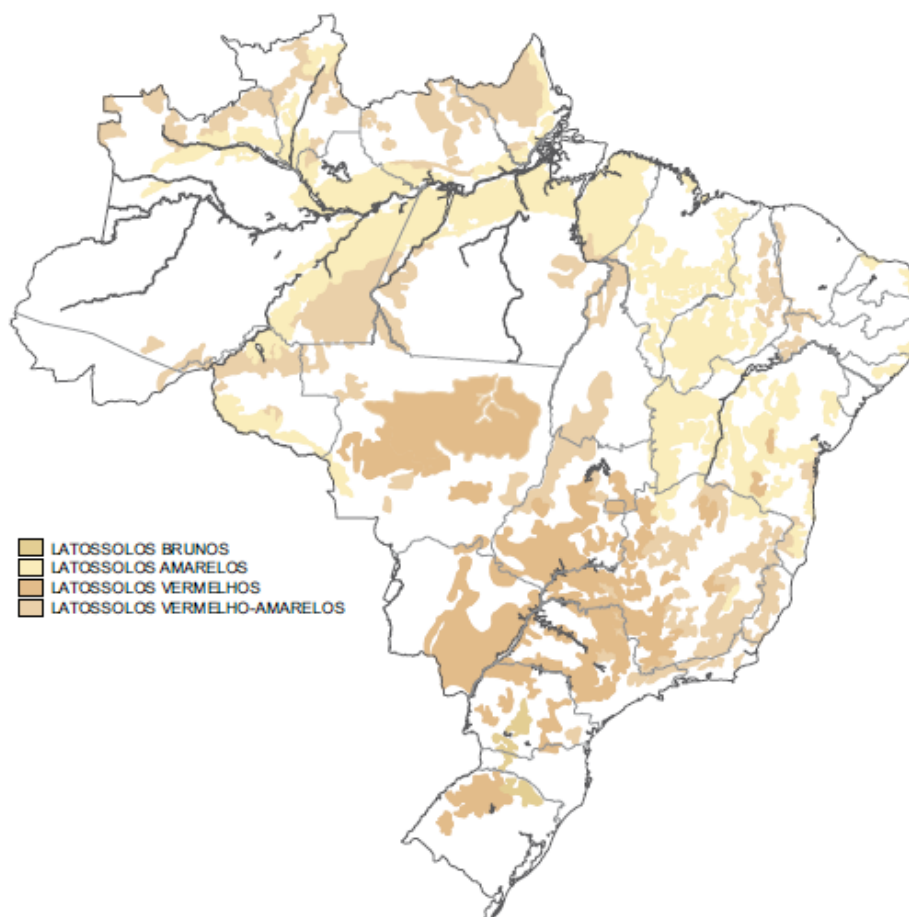


Figura 2 - Principais ocorrências de Latossolos no Brasil. Fonte: IBGE, 2007.

No Rio Grande do Sul, os Latossolos foram diferenciados em Latossolos Brunos e Latossolos Vermelhos, conforme a cor predominante no horizonte B (STRECK et al., 2008). Entre os Latossolos Brunos foram identificados os aluminoférricos, aluminicos, câmbicos e típicos e entre os Latossolos Vermelhos os distroférricos, aluminoférricos, distróficos, eutroférricos, húmicos e típicos (STRECK et al., 2008). Há ainda grande similaridade entre a classe

dos Latossolos e dos Nitossolos no estado gaúcho, dificultando a sua distinção no campo.

Com relação a mineralogia desses solos Kämpf e Curi (2003) trabalhando com Latossolos e Nitossolos do Planalto gaúcho, sugerem a ocorrência de um processo de dessilicação parcial, evidenciado pela presença de argilo-minerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas, promovendo a caulinitização dos solos. Esse processo é resultante da inconstância das condições climáticas desde o início da formação desses solos. Já nos Campos de Cima da Serra, região de ocorrência dos Latossolos Brunos, as condições de intemperismo são mais intensas, promovendo uma maior dessilicação do perfil de solo, reduzindo a quantidade de minerais 2:1 e aumentando os óxidos, principalmente a goethita. Nos Latossolos do Brasil Central, onde o grau de intemperismo é ainda mais intenso, predominam a gibbsita, goethita, hematita e caulinita.

Devido a diferenciação mineralógica dos Latossolos e Nitossolos encontrados sob condições de clima subtropical úmido dos planaltos alto-montanos do Sul do Brasil foi inserido na edição de 2013 do Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS) o atributo diagnóstico denominado de caráter retrátil. Esse caráter é usado para caracterizar classes de Latossolos e Nitossolos, ambos Brunos e Vermelhos, de textura argilosa e muito argilosa, que apresentam retração acentuada da massa do solo após a exposição dos perfis ao efeito de secamento por algumas semanas, resultando na formação de fendas verticais pronunciadas e estruturas prismáticas grandes e muito grandes, que se desfazem em blocos quando manuseadas (SANTOS, 2013). Embora nesses solos predomine a caulinita, o caráter retrátil decorre possivelmente da presença de argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (VHE e EHE), interestratificados, e/ou da pequena dimensão dos argilominerais presentes na fração argila (SANTOS, 2013).

Essas características mineralógicas influenciam o desenvolvimento da estrutura do solo e, com isso, sua resistência aos processos de degradação estrutural. Uma tentativa de proposição de um modelo de estruturação para os Latossolos brasileiros foi apresentada por Ferreira et al. (1999a), para Latossolos gibbsíticos e Latossolos cauliniticos. Os autores observaram que nos solos em que havia predomínio de gibbsita na fração argila ocorria o

desenvolvimento de macroestrutura do tipo granular, com pequenos grãos soltos, com aspecto de maciça porosa. Já nos solos em que havia predomínio de caulinita o que se verificava era uma estrutura com aspecto maciça coesa, levando ao desenvolvimento de uma macroestrutura em blocos.

Associando os modelos propostos por Ferreira et al. (1999a) a resultados de caracterização de alguns atributos físicos do solo, Ferreira et al. (1999b) demonstraram que os Latossolos cauliniticos, quando comparados aos Latossolos gibbsíticos, apresentam maior densidade do solo, menor estabilidade de agregados em água, menor macroporosidade e menor permeabilidade. Isso acontece porque a estabilidade dos agregados se correlaciona positivamente com os teores de  $Al_2O_3$  e com os teores de gibbsita, e negativamente com os teores de caulinita (FERREIRA et al., 1999a).

Assim, solos ricos em caulinita são duros e coesos quando secos, apresentam baixa estabilidade de agregados em água, são plásticos e pegajosos quando molhados e a permeabilidade está inversamente relacionada com a quantidade de argila (FERREIRA, 2010). Nesses solos, a baixa estabilidade dos agregados em água indica que o solo perde o caráter coeso quando úmido, constituindo importante indicativo para as operações de manejo dos mesmos. Por outro lado, os Latossolos gibbsíticos são macios quando secos e friáveis quando úmidos, os agregados são bastante estáveis em água, resistentes a erosão e muito permeáveis até mesmo quando muito argilosos (FERREIRA, 2010).

Na Região Subtropical Brasileira o predomínio de Latossolos com textura argilosa e muito argilosa e fração argila com predomínio de caulinita e hematita (KER, 1997; MELO et al., 2004) tem motivado preocupações com a manutenção da qualidade física do solo. Nessa região tem-se verificado intenso processo de degradação da estrutura do solo decorrente da compactação condicionada pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas e pelo pisoteio animal, principalmente em condições de elevada umidade do solo. Em muitas áreas, a camada arável destes solos foi transformada em duas fases distintas: uma superficial com estrutura de grãos simples (0 a 8 cm) e outra subsuperficial degradada, com estrutura maciça (8 a 20 cm) (DENARDIN et al., 2005). Esse processo é intensificado pelo sistema agrícola, onde predomina a sucessão do cultivo de soja na safra de verão e trigo ou azevém,

associado à integração lavoura pecuária na safra de inverno (DENARDIN et al., 2008). Neste modelo de produção há geração de resíduos em quantidade, qualidade e frequência aquém da demanda biológica do solo (DENARDIN et al., 2008), motivando preocupação com a sustentabilidade da qualidade estrutural do solo.

No Rio Grande do Sul os efeitos desse processo de degradação da estrutura do solo têm sido percebidos mais significativamente nas regiões norte e noroeste, onde ocorrem Latossolos de textura muito argilosa, manejados sob sistema plantio direto. Nesses solos, frequentemente a existência de perdas de produção agrícola, quando da ocorrência de déficits hídricos durante o verão, tem sido associada ao processo de compactação (DENARDIN et al., 2008) conduzindo a necessidade de investigação de estratégias para recuperação do potencial agrícola desses solos.

## **2.4 Estratégias de mitigação do estado de compactação e recuperação da qualidade estrutural do solo em sistema plantio direto**

### **2.4.1 Escarificação mecânica do solo**

A presença de camadas de solo compactado em áreas manejadas sob sistema plantio direto tem conduzido produtores a adotar medidas que aliviem o estado de compactação do solo (DEFRA, 2005). Para tanto, a prática corriqueira tem sido a escarificação mecânica (SPOOR, 2006; JIN et al., 2007) que rompe o solo nas zonas de maior friabilidade, sem causar grandes danos à sua estrutura e com demanda de tração 40 a 50% menor do que a aração, para uma mesma largura de trabalho (ORTIZ-CAÑAVATE, 1995). Assim, ao romper a camada superficial encrostada e a camada subsuperficial compactada, possibilita melhor distribuição dos poros, aumento da porosidade total, da rugosidade superficial e da capacidade de infiltração de água e redução da densidade do solo.



Esses benefícios imediatos da escarificação foram observados por Collares et al. (2008) que verificaram diminuição do estado de compactação do solo sob plantio direto, dois meses após a escarificação de um Latossolo Vermelho, principalmente na redução da resistência do solo à penetração mecânica. Câmara e Klein (2005) observaram que seis meses após a descompactação mecânica houve redução da densidade do solo e aumento da rugosidade superficial, da condutividade hidráulica e da taxa de infiltração de água no solo. Com isso, os autores concluíram que a escarificação é uma técnica eficaz em melhorar a conservação do solo e da água.

Todavia, a escarificação deve ser realizada somente quando o estado de compactação estiver limitando o desenvolvimento das plantas ou quando se deseja prevenir que o grau de compactação do solo atinja níveis limitantes. Isso porque se trata de uma operação de alto custo, devido ao consumo energético, investimento em equipamentos e necessidade de mudanças no sistema de cultivo (CHAMEN, 2015) cujos custos aumentam com a profundidade da camada compactada (MANUWA, 2009) e os benefícios dependem da textura do solo, profundidade e frequência da operação (COOKSON et al, 2008).

Além disso, os benefícios da escarificação do solo sobre o rendimento de culturas nem sempre são verificados (VEIGA et al., 2008). Nesse sentido, diversos trabalhos com culturas como feijão (COLLARES et al., 2006), soja (CAMARA; KLEIN, 2005; KLEIN; CAMARA, 2007; DRESCHER et al., 2012) e milho (MAHL et. al, 2008; GUBIANI et al., 2013; NUNES et al., 2014) têm indicado que o crescimento radicular e/ou rendimento não foram maiores em SPD escarificado do que em SPD contínuo, sendo obtidos, inclusive, valores negativos de incremento após a escarificação (OLESEN; MUNKHOLM, 2007).

Por outro lado, Ferreras et al., 2001 obtiveram rendimento de soja sob SPD contínuo 47,88% inferior ao SPD escarificado, provavelmente, devido aos altos níveis de compactação no SPD avaliado, os quais reduziram o desenvolvimento radicular em função do aumento da resistência mecânica a penetração. Em outro trabalho comparando o uso de diferentes escarificadores em relação ao SPD sem intervenção, Secco e Reinert (1997) também observaram aumento de rendimento em milho no solo escarificado. Dessa forma, o que se verifica é que os trabalhos disponíveis na literatura divergem

sobre os benefícios da escarificação no rendimento de culturas, carecendo, portanto, de estudos que forneçam mais informações sobre a real necessidade de escarificação dos solos sob SPD.

Além disso, o uso corriqueiro da escarificação como estratégia de descompactação mecânica deve ser evitado, uma vez que o revolvimento do solo pode deixá-lo mais suscetível a uma subsequente compactação mais intensa (CANARACHE et al., 2000). Isso acontece porque o aumento do tempo sem revolvimento do solo sob SPD altera a força de ligação das partículas de agregados do solo, podendo aumentar a resistência da estrutura do solo (MORAES, 2013). Da mesma forma, a ausência de revolvimento contribui para a formação de poros mais estáveis, originados da ação biológica (planta de cobertura, raízes, fauna edáfica, etc.) que podem resistir mais às forças aplicadas ao solo (REICHERT et al., 2010).

#### 2.4.1.1 Residualidade da escarificação mecânica e reconsolidação em Latossolos argilosos manejados sob sistema plantio direto

Entre as limitações do uso da escarificação como estratégia de descompactação mecânica e de recuperação da estrutura do solo destaca-se a curta duração dos benefícios sobre os atributos do solo. Nesse sentido, a maioria dos trabalhos publicados aponta efemeridade para os benefícios proporcionados pela técnica mecânica (ROSA, 2007; VEIGA et al., 2008, COLONEGO e ROSOLEM, 2008; SILVA et al., 2012; DRESCHER et al., 2012), com residualidade muitas vezes inferior a um ano (HAMILTON-MANNNS et al., 2002; ÁLVAREZ, et al., 2009). Enquanto outros trabalhos indicam que a duração do efeito da escarificação pode se estender por período superior a dois anos (BOTTA et al., 2006; DRESCHER et al., 2011), conforme as características do solo e das práticas de manejo.

Esses resultados podem estar associados à resiliência do solo, ou seja, à habilidade intrínseca do solo em recuperar-se de degradação ou do estresse aplicado e retornar a um novo equilíbrio, semelhante ao estado antecedente

(BLANCO; LAL, 2010). Assim, em áreas de plantio direto a capacidade de recuperação natural da estrutura do solo, que sucede os processos de degradação por compactação pode estar contribuindo para que o solo retorne ao estado anterior à intervenção mecânica em pouco tempo. Logo, processos naturais como a contração e expansão podem contribuir para dissipar a compactação causada pelo tráfego de máquinas e dispensar o consumo de tempo e energia com operações mecanizadas de descompactação, como a escarificação.

As características climáticas da região Sul do Brasil, com distribuição regular de chuvas durante o ano (NIMER, 1989), contribuem para a existência de constantes ciclos de umedecimento e secagem que levam a expansão e contração do solo e permitem, muitas vezes, a recuperação natural da estrutura do solo. Assim, diversos trabalhos observaram que em anos chuvosos o solo tende a se readaptar rapidamente diminuindo a persistência dos efeitos da escarificação (BUSSCHER et al., 2002, NICOLOSO et al., 2008; VEIGA et al., 2008; SILVA et al., 2012).

Outro fator que contribui para a capacidade de recuperação do solo e para a efemeridade dos benefícios da escarificação é o cultivo de Latossolos com elevado teor de argila. Embora, reconhecidamente, a resiliência seja mais intensa em solos com quantidades expressivas de argilominerais expansivos, como os Vertissolos, Luvisolos e Cambissolos (KAMPF; CURI, 2003), solos com elevado teor de caulinita, como os Latossolos da região sul do Brasil, também manifestam contração e expansão. Nesse caso, o fenômeno é atribuído à variação das forças associadas aos meniscos de água nas interfaces sólido-líquido-ar e ao arranjo flexível de cristalitos de caulinita de pequena dimensão (KAMPF; CURI, 2003).

Assim, em diversas áreas manejadas sob SPD na região sul do Brasil a escarificação pode não ser a melhor alternativa de intervenção mecânica do solo, nem como prática de mitigação do estado de compactação nem como estratégia para prevenir que o solo atinja níveis críticos de compactação, motivando à procura por métodos alternativos de descompactação do solo àqueles tradicionalmente empregados.

#### 2.4.2 Haste sulcadora como estratégia de descompactação do solo sob SPD

A necessidade de repetição periódica da escarificação do solo para manter os benefícios da descompactação sobre a estrutura do solo consome tempo e energia com operações mecanizadas e contrapõem-se aos fundamentos do sistema plantio direto por promover constantes mobilizações do solo. Esse cenário tem levado a investigações sobre métodos alternativos de mitigação do estado de compactação do solo, entre os quais merecem destaque aqueles que avaliam a descompactação promovida pela ação de semeadoras-adubadoras (ROSA, 2007).

Durante a implantação de culturas de inverno, em fileiras espaçadas 0,17 m, ocorre mobilização de aproximadamente 30% do solo na camada 0,0-0,07 m, o que, somado ao revolvimento realizado durante a implantação das culturas de verão, resulta em grande volume de solo mobilizado em seu estrato superficial (GENRO Jr. et al., 2004). Com isso, normalmente a camada de 0 a 0,07 m mantém-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 (HORN; PETH, 2009; BAVOSO et al., 2012) e da ação das semeadoras-adubadoras (SECCO et al., 2009). Ao passo que a camada logo abaixo (entre 0,07 e 0,15 m) fica sujeita ao acúmulo de pressão dos rodados das máquinas agrícolas e mantém-se compactada pela ausência de mecanismos de intervenção.

Dessa forma, estratégias de descompactação do solo que promovam a intervenção na camada de maior restrição ao crescimento radicular em SPD (0,07 a 0,15 m), sem promover intenso revolvimento do solo apresentam potencial para melhorar a qualidade estrutural do solo. Assim, semeadoras com hastes de ação profunda associadas ao disco de corte podem auxiliar na mitigação do estado de compactação, propiciando a descompactação do solo, exclusivamente, na linha de semeadura.

A utilização de semeadora equipada com mecanismo de abertura do sulco tipo disco duplo pode compactar a região onde será colocada a semente,

o que associado ao espelhamento lateral causado pelo disco ao ser introduzido no solo, pode dificultar o fluxo de água à semente e reduzir o percentual de emergência de plantas. Além disso, em solos com textura muito argilosa, a implantação de uma lavoura com semeadora com discos duplos pode ser prejudicada devido à grande resistência destes solos, uma vez que os discos não conseguem se aprofundar e as sementes são depositadas à baixa profundidade e muito próximas do fertilizante (SIQUEIRA, 2008).

Semeadoras equipadas com hastes sulcadoras, por sua vez, promovem o rompimento do solo (REIS et al., 2006) quando reguladas para atingir maiores profundidades, o que possibilita o rompimento da camada compactada, beneficiando o crescimento radicular. Apresentam ainda maior capacidade de penetração e maior variabilidade da profundidade dos sulcos em relação aos discos duplos, no entanto, necessitam da colocação de um disco de corte frontal para um desempenho satisfatório, que possibilite o corte da palha, melhorando as condições para semeadura (SIQUEIRA, 2008).

Ao realizar um comparativo entre sistemas de abertura de sulco com discos duplos e com hastes, Reis et al. (2004) verificaram maior percentagem de emergência de plantas quando da utilização de hastes sulcadoras levando-os a recomendar esse sistema de abertura de sulcos em solos com alto teor de argila. Da mesma forma, Modolo et al. (2004) sugerem que a utilização do sistema de abertura de sulcos através de hastes sulcadoras pode apresentar menor variação na profundidade média de deposição das sementes em relação à utilização de discos duplos.

Diante disso, percebe-se que sistemas que utilizam semeadoras com hastes sulcadoras podem proporcionar a mitigação do estado de compactação, mediante aumento da porosidade e redução da densidade e da resistência mecânica do solo à penetração, no local específico onde se desenvolverão as raízes da planta cultivada. Assim, proporcionam melhores condições para o desenvolvimento das raízes das plantas em profundidade e diminuição dos riscos de frustrações de safra por déficit hídrico, o qual é influenciado tanto pela capacidade do solo para capturar água (taxa de infiltração) quanto de armazenar água em seus poros (água disponível). Todavia, poucos dispositivos de semeadora com tais características estão disponíveis no mercado e há poucas avaliações sobre a melhor profundidade de ação dos mesmos,

suscitando a necessidade de estudo detalhado de seu potencial de utilização em áreas manejadas sob plantio direto.

Com base no contexto abordado nessa revisão, justifica-se a realização de estudo para conhecer o tempo de reconsolidação do solo após escarificação sobre atributos físico-hídricos do solo, bem como a avaliação do potencial de descompactação do solo de diferentes mecanismos sulcadores da semeadora. A obtenção desses resultados pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias para mitigação do estado de compactação da camada superficial do solo em áreas manejadas sob plantio direto na região de clima subtropical úmido do Brasil.

### 3 HIPÓTESES

- I. Para sistema mecanizado de cultivo de grãos sob plantio direto, em condições normais de precipitação do clima subtropical úmido, as alterações nas propriedades físico-hídricas de um Latossolo de textura argilosa, promovidas pela descompactação por escarificação mecânica, serão dissipadas em período máximo de dois anos.
  
- II. A mobilização do solo por hastes sulcadoras de semeadoras é suficiente para prevenir a ocorrência de valores restritivos de propriedades físico-hídricas do solo, dispensando o uso da escarificação como alternativa de mitigação do estado de compactação de Latossolos argilosos em plantio direto.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo geral**

Gerar conhecimentos que permitam o aperfeiçoamento de estratégias de manejo do solo para a prevenção e mitigação do estado de compactação do solo em sistema plantio direto, na região de clima subtropical úmido do Brasil.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Conhecer o tempo de reconsolidação do solo e recuperação dos valores iniciais de propriedades físico-hídricas do solo após escarificação do solo compactado, manejado em sistema plantio direto;
- Verificar os benefícios da escarificação do solo compactado, manejado em sistema plantio direto, no incremento da taxa de infiltração de água no solo e capacidade de água disponível para as plantas;
- Conhecer técnicas de utilização de semeadoras com hastes sulcadoras, como estratégia de mitigação do estado de compactação do solo em sistema plantio direto.



## 5 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária da unidade descentralizada Embrapa Trigo, localizada no município de Coxilha, na região norte do estado do Rio Grande do Sul, nas coordenadas geográficas de 28°11'17" de latitude sul e 52°19'31" de longitude oeste (Figura 3). No local a altitude é de 696 m acima do nível do mar e o relevo é suave ondulado.

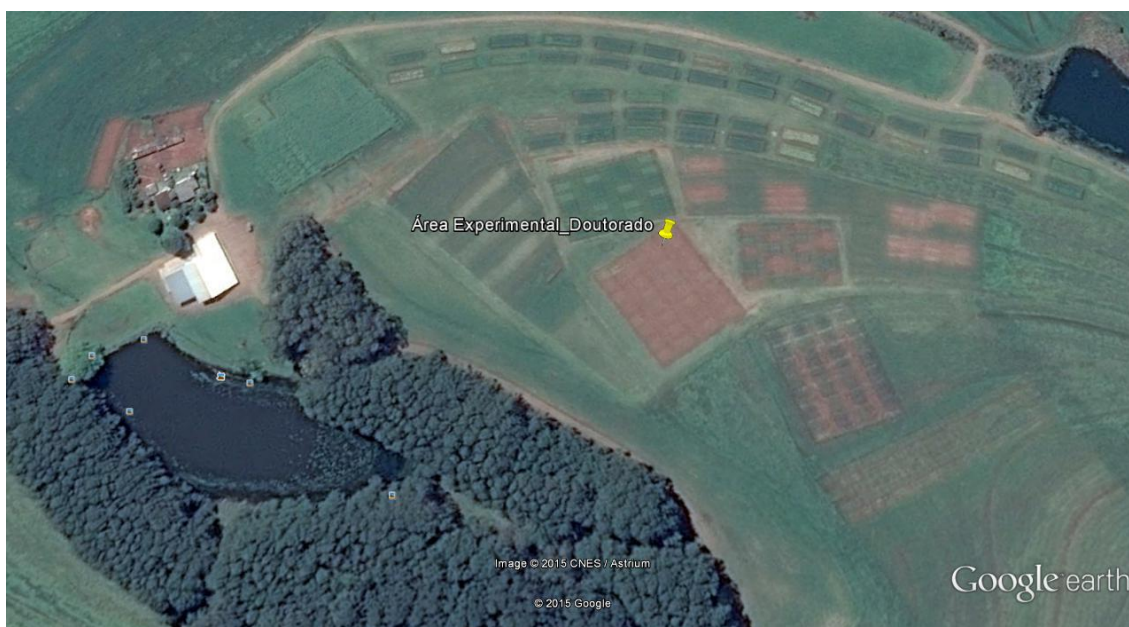


Figura 3 - Imagem da área experimental extraída do Google Earth.

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. As chuvas são bem distribuídas ao longo do ano, com média mensal superior a 60 mm (NIMER, 1989), totalizando precipitações anuais próximas a 1.750 mm.

O solo da área de estudo é basicamente de origem basáltica, da Formação Serra Geral, classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2013). O solo é de textura argilosa (Tabela 1), profundo, bem drenado, com baixo teor de argila dispersa em água e distribuído em relevo ondulado a suavemente ondulado. Naturalmente apresenta baixa fertilidade química, mas, uma vez corrigidas as deficiências químicas, constitui-se em solo de elevada fertilidade. A escolha deste solo está associada ao fato de ser uma classe de solo representativa das áreas manejadas sob sistema plantio direto no planalto riograndense.

Tabela 1 - Composição granulométrica e densidade de partícula do Latossolo Vermelho Distrófico típico da área experimental.

Camada (m)	AG	AF	Silte	Argila	Dp
	----- g kg <sup>-1</sup> -----				Mg m <sup>-3</sup>
0 a 0,07	65,4	163,1	231,3	540,2	2,79
0,07 a 0,15	58,8	162,4	229,7	549,1	2,79
0,15 a 0,25	56,5	142,1	245,9	555,5	2,77

AG: areia grossa; AF: areia fina; Dp: densidade de partícula

### 5.1 Caracterização do ensaio de campo conduzido pela Embrapa Trigo

O ensaio de campo foi instalado no ano de 2009, como experimento de longa duração, denominado “Práticas mecânicas para remediação da compactação do solo” da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Trigo. O estudo desenvolvido pela Embrapa Trigo está estruturado com delineamento em blocos ao acaso com parcelas subdivididas no espaço e com quatro repetições (Figura 4).

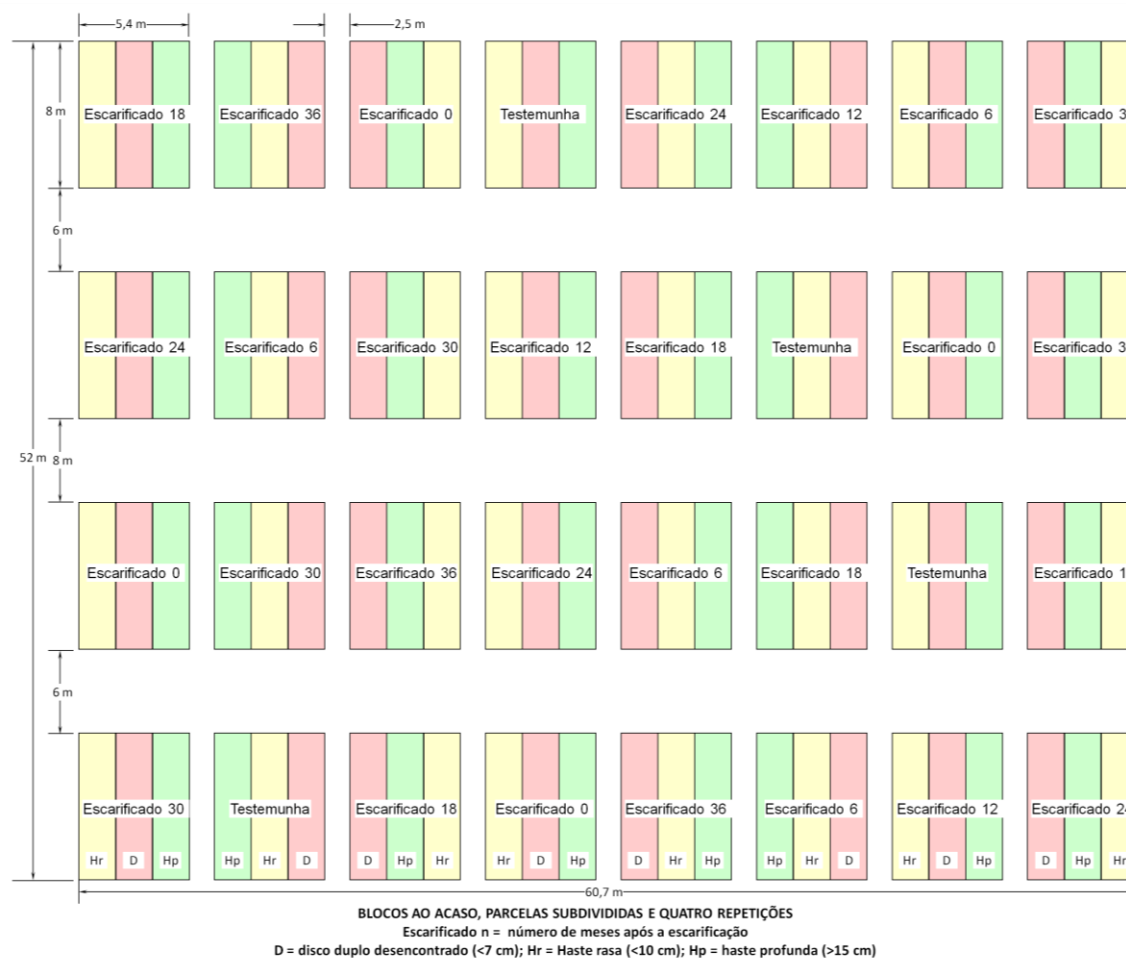


Figura 4 - Representação esquemática do experimento “Práticas mecânicas para remediação da compactação do solo”, Embrapa Trigo, Passo Fundo, 2009.

Na parcela principal, com dimensões de 8 m x 5,4 m, foram casualizados os níveis do fator práticas de manejo do solo, compostos por unidades experimentais submetidas ao Sistema Plantio Direto (SPD) contínuo e por unidades experimentais nas quais o SPD foi interrompido por escarificações do solo, a 0,25 m de profundidade, com escarificador equipado com cinco hastes, espaçadas em 0,30 m, e rolo destorreador, que dispensa a operação de gradagem subsequente (Figura 5).



Figura 5 - Escarificador com rolo destorroador utilizado para descompactação mecânica do solo na área manejada em sistema plantio direto.

A cada safra agrícola uma nova unidade experimental foi submetida à intervenção mecânica de modo que na safra agrícola 2012/2013, quando o solo foi amostrado, o experimento contava com oito tratamentos, constituídos por uma testemunha (27 anos sob SPD contínuo) e sete tempos (0, 6, 12, 18, 24, 30 e 36 meses) de retomada do SPD após uma escarificação mecânica em área maneja em SPD, ficando os fatores da parcela principal caracterizados da seguinte forma:

T: testemunha, área manejada em SPD há 27 anos;

E0: área escarificada na safra da amostragem, ou seja, no verão 2012/2013;

E6: área escarificada há 6 meses, ou seja, no inverno de 2012;

E12: área escarificada há 12 meses, ou seja, no verão 2011/2012;

E18: área escarificada há 18 meses, ou seja, no inverno de 2011;

E24: área escarificada há 24 meses, ou seja, no verão 2010/2011;

E30: área escarificada há 30 meses, ou seja, no inverno de 2010;

E36: área escarificada há 36 meses, ou seja, no verão 2009/2010.

Já na subparcela, com dimensões de 8 m x 1,8 m, os níveis do fator manejo de solo foram compostos pelo uso de semeadora equipada com disco de

corte+haste sulcadora cuja operação foi realizada em duas profundidades – 0,10 m (Hr) e 0,15 m (Hp) - e semeadora equipada apenas com discos duplos defasados (D) atuando a 0,07 m de profundidade, para colocação do adubo no sulco da semeadura.

O modelo de produção de grãos adotado no ensaio compreendeu as culturas de milho, trigo, soja e centeio, seguindo a sucessão de culturas indicada na Tabela 2. A adubação de base, em cada safra agrícola e com especificidade para cada espécie cultivada, foi feita 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 0,10 m (SBCS-CQFS, 2004). O manejo de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado de acordo com as indicações técnicas específicas para cada cultura.

Tabela 2 - Modelo de produção adotado no experimento “Práticas mecânicas para remediação da compactação do solo”, Embrapa Trigo, Passo Fundo, 2009.

Modelo de Produção – Safra Agrícola							
2009/10	2010	2010/11	2011	2011/12	2012	2012/13	2013
milho	trigo	soja	centeio	milho	trigo	soja	centeio

## 5.2 Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos

Para maior facilidade de obtenção e análise dos resultados, este trabalho foi dividido em duas partes: Estudo 1 - Reconsolidação do solo após escarificação mecânica em Latossolo de textura argilosa manejado em SPD; Estudo 2 - Benefícios do mecanismo sulcador da semeadora sobre propriedades físico-hídricas do solo. Dessa forma, o ensaio de campo desenvolvido pela Embrapa Trigo não foi integralmente utilizado neste estudo, havendo a

necessidade de ajuste na caracterização dos tratamentos e delineamento experimental.

Para a realização do Estudo 1 - Reconsolidação do solo após escarificação mecânica em Latossolo de textura argilosa manejado em SPD, que visa a avaliação do efeito residual da escarificação como estratégia de descompactação mecânica do solo em áreas manejadas sob SPD, foram utilizadas apenas as subparcelas do experimento original cuja semeadura foi realizada com as semeadoras equipadas com disco duplos defasados. Logo, esta subparcela compôs a unidade experimental deste estudo, deixando de existir a estrutura experimental em parcela subdividida (do experimento conduzido pela Embrapa). Com isso, o estudo configura-se com delineamento experimental blocos ao acaso, com quatro repetições e oito tratamentos, totalizando 32 unidades experimentais. Os tratamentos, compostos pelo manejo contínuo sob SPD e pelos diferentes tempos de retorno do SPD após uma intervenção por escarificação mecânica, apresentam a seguinte caracterização:

T: testemunha, área manejada em SPD há 27 anos;

E0: área escarificada na safra da amostragem, ou seja, no verão 2012/2013;

E6: área escarificada há 6 meses, ou seja, no inverno de 2012;

E12: área escarificada há 12 meses, ou seja, no verão 2011/2012;

E18: área escarificada há 18 meses, ou seja, no inverno de 2011;

E24: área escarificada há 24 meses, ou seja, no verão 2010/2011;

E30: área escarificada há 30 meses, ou seja, no inverno de 2010;

E36: área escarificada há 36 meses, ou seja, no verão 2009/2010.

O Estudo 2 - Benefícios do mecanismo sulcador da semeadora sobre propriedades físico-hídricas do solo, foi realizado apenas nas subparcelas do experimento de campo mantidas sob SPD contínuo (testemunha do experimento conduzido pela Embrapa). Com isso, o estudo configura-se com delineamento experimental em blocos ao acaso, com quatro repetições, em que são avaliados três tratamentos, totalizando, dessa forma, 12 unidades experimentais. Os tratamentos avaliados apresentam a seguinte caracterização:

Hr: semeadora com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m;

Hp: semeadora com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m;

D: semeadora equipada com discos duplos defasados atuando a 0,07 m

### 5.3 Parâmetros avaliados

#### 5.3.1 Estudo 1 - Reconsolidação do solo após escarificação mecânica em Latossolo de textura argilosa manejado em SPD

O estudo contemplou a avaliação do efeito residual da escarificação mecânica em SPD sobre as seguintes propriedades físicas do solo: densidade do solo, densidade relativa do solo, porosidade total, macro e microporosidade do solo, resistência do solo à penetração, estabilidade de agregados em água e permeabilidade do solo ao ar. Bem como, das seguintes propriedades físico-hídricas do solo: taxa de infiltração de água no solo, retenção de água no solo, água disponível para as plantas, condutividade hidráulica do solo saturado e condutividade hidráulica solo não saturado.

Para a análise da densidade do solo, da distribuição do tamanho de poros e da estabilidade de agregados em água foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada no mês de maio de 2013. A coleta das amostras foi realizada na entrelinha de cultivo da soja (safra 2012/2013), em três profundidades (Figura 6), adotando-se para a definição das camadas o método do perfil cultural (TAVARES FILHO et al., 1999). De acordo com este método, admite-se, como primeira profundidade a camada superficial, que apresenta estrutura granular solta e com maior concentração do sistema radicular, no caso, 0–0,07 m aproximadamente. Como segunda profundidade aquela que apresenta estrutura maciça e adensada, onde se percebe redução da concentração do sistema radicular, no caso, 0,07–0,15 m aproximadamente e, como terceira profundidade, aquela que apresenta estrutura típica de Latossolo



com menor expressão do número de raízes, no caso, 0,15-0,25 m. No centro de cada camada foram coletadas duas amostras de solo com estrutura preservada, utilizando cilindros de aço inox de 4,0 x 5,5 cm para avaliação da densidade do solo e distribuição do tamanho de poros e uma amostra (monolito) de solo com aproximadamente 0,5 kg para a determinação da estabilidade de agregados em água.

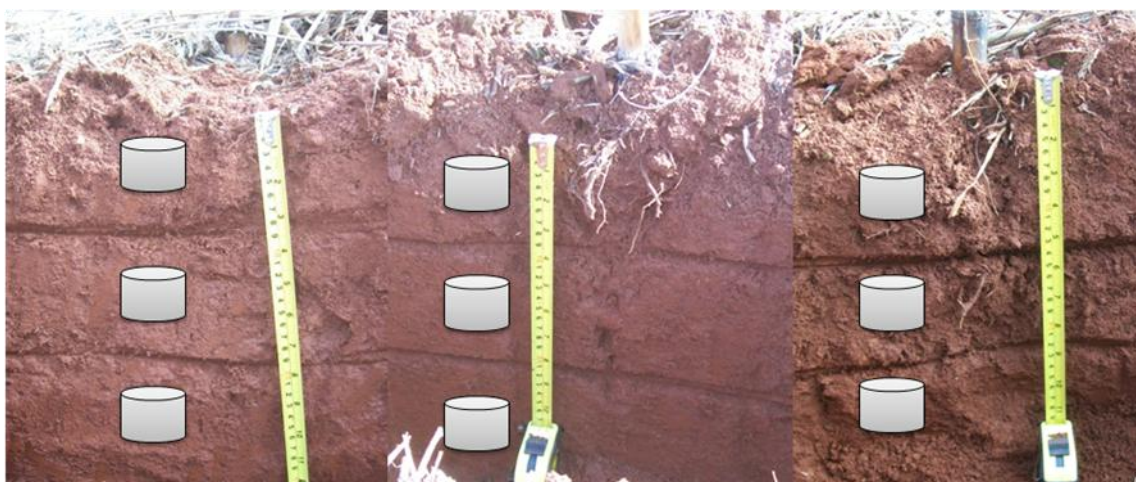


Figura 6 - Estratificação das camadas de solo pelo método do perfil cultural e posicionamento dos anéis volumétricos para coleta das amostras.

Após a coleta, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria, onde foram saturadas por capilaridade por um período de 48 horas, pesadas e levadas à coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) para determinação da porosidade. Com base nessa metodologia, a macroporosidade foi calculada pelo volume de água retirado da amostra desde a saturação até a tensão de 6 kPa e a microporosidade corresponde ao volume restante de água que fica na amostra, a qual é extraída em estufa a 105 °C, por 24 horas.

A densidade do solo foi determinada nas mesmas amostras utilizadas para avaliação da porosidade do solo, onde após a secagem das amostras em estufa a 105 °C por 24 horas realizou-se a pesagem e, pela relação entre a massa de solo seco e o volume da amostra, foi obtida a densidade do solo em



$\text{Mg m}^{-3}$ . A densidade máxima do solo ( $D_{\text{smax}}$ ) do teste de Proctor foi calculada pela equação sugerida por Marcolin e Klein (2011) [ $D_{\text{smax}} = -0,0092 \cdot \text{Argila} + 2,0138$  ( $r^2 = 0,92$ ), com Argila em %], obtendo-se os valores de 1,52, 1,51 e  $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente, para as camadas de 0 a 0,07 m, 0,07 a 0,15 m e 0,15 a 0,25 m. De posse dos dados de densidade do solo e densidade máxima do solo realizou-se o cálculo da densidade relativa do solo (ou grau de compactação), através da divisão do valor encontrado para densidade do solo e o valor de densidade máxima do solo para cada profundidade avaliada.

A distribuição do tamanho de agregados foi realizada pelo método de Kemper e Chepil (1965). Para tanto, após a coleta, as amostras foram peneiradas em peneira de 8 mm e secas ao ar. Posteriormente, realizou-se o peneiramento dos agregados em água, no aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936), durante dez minutos, por meio de peneiras com diâmetro de malha 4,76; 2,0; 1,0 e 0,21 mm, separando agregados em cinco classes (8,00-4,76; 4,76-2,00; 2,00-1,00; 1,00-0,21 e, menores que 0,21 mm). O solo que permaneceu em cada peneira foi pesado após secar em estufa ( $105 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e disperso com NaOH a 6% de concentração para descontar materiais inertes, como areia e demais impurezas contidas em cada classe, buscando evitar a superestimação da estabilidade de agregados.

Para expressar a estabilidade estrutural do solo determinou-se o índice de estabilidade de agregados (IEA), diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), além da porcentagem de agregados por classe de tamanho ( $PA_i$ ), conforme as equações abaixo.

$$IEA = DMP_u / DMP_S$$

$$DMP = \left( \sum_{i=1}^n (MA_i \times di / MAT) \right)$$

$$DMG = \exp \left( \sum_{i=1}^n (MA_i \times \ln(di) / MAT) \right)$$

$$PA_i = (MA_i/MAT) \times 100$$

Em que:

$DMP_u$  = DMP obtido pelo peneiramento em água;

$DMP_s$  = DMP obtido em peneiramento seco;

$MA_i$  = massa de agregados da classe  $i$  descontada a fração inerte;

$MAT$  = massa total de agregados descontada a fração inerte;

$d_i$  = diâmetro médio da classe  $i$ .

$PA_i$  = porcentagem de agregados da classe  $i$ ;

A determinação da resistência do solo à penetração mecânica foi realizada a campo, utilizando um Penetrômetro Georreferenciado PNT-2000, com ponta cônica de  $30^\circ$  e com área do cone de  $129 \text{ mm}^2$ , segundo normas ASAE S 313.3. As observações foram realizadas a cada  $0,01 \text{ m}$  de profundidade, de zero a  $0,40 \text{ m}$  e com velocidade de penetração de aproximadamente  $2 \text{ m min}^{-1}$ , sendo os dados expressos em MPa.

As avaliações foram realizadas no início e no final do ciclo da cultura da soja na safra agrícola 2012/2013, na condição de umidade indicada na Figura 7. As determinações foram realizadas na linha de semeadura e, na entrelinha à  $0,05$ ;  $0,10$ ;  $0,20 \text{ m}$  à esquerda e a direita da linha de cultivo, conforme Figura 8.

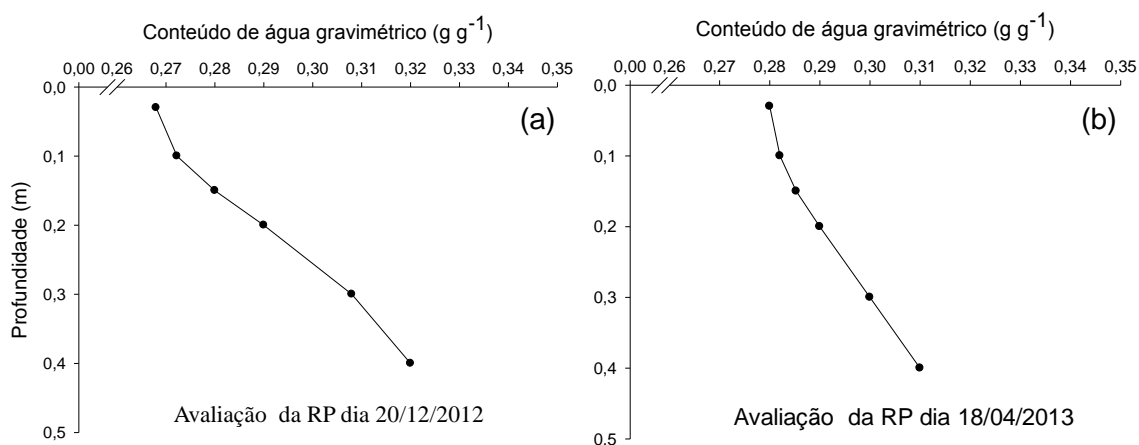


Figura 7 - Umidade gravimétrica do solo no momento da avaliação da resistência do solo a penetração no início (20/12/12) (a) e no fim (18/04/13) (b) do ciclo da cultura da soja na safra agrícola 2012/2013.

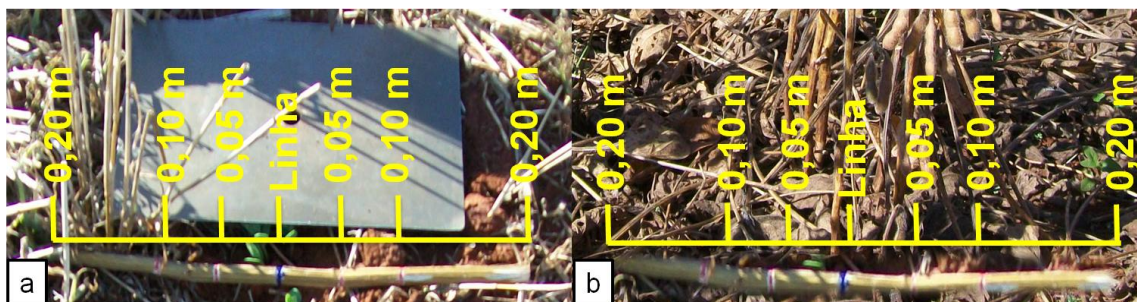


Figura 8 - Avaliação da resistência do solo a penetração na linha e na entrelinha de semeadura no início (a) e no fim do ciclo (b) da cultura da soja na safra agrícola 2012/2013.

A infiltração de água no solo foi avaliada no mês de março de 2013 mediante uso do infiltrômetro de anéis concêntricos, no qual o anel interno apresentava um diâmetro de 0,20 m e o anel externo diâmetro de 0,40 m, ambos inseridos até a profundidade de 0,15 m no solo, conforme metodologia descrita por Embrapa (1997). Para a determinação da lâmina de água infiltrada utilizou-se um tubo de PVC de 100 mm graduado e vedado, que em sua parte externa possuía um piezômetro para registrar o nível de água nos diferentes tempos de leitura. Os testes tiveram duração de duas horas cada, sendo as leituras realizadas há 1, 2, 7, 12 e 17 minutos após o início da avaliação e, a seguir, em intervalos regulares de 10 minutos até completar o tempo de avaliação de duas horas. Para fins de comparação entre os tratamentos, assumiu-se como taxa de infiltração estável (TIE) o valor obtido na última leitura (tempo de duas horas), quando volume de água infiltrado permanecia praticamente estável.

A capacidade do solo em reter água foi calculada a partir da curva de retenção de água no solo (CRA). Para a associação dos pares de tensão e conteúdo de água foram utilizadas as mesmas amostras coletadas para a determinação da densidade e porosidade do solo. Assim, após serem submetidas ao processo de toaleta e à saturação por capilaridade, as amostras de solo foram colocadas em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), onde foram aplicadas as tensões de 1, 6 e 10 kPa, e, em câmaras de Richards, para a aplicação das tensões de 33 e 100 kPa (KLUTE, 1986). Para a obtenção da

umidade nas tensões de 500 e 1500 kPa foram utilizadas amostras com estrutura deformada, reservadas no momento de realização do toailete das amostras coletadas em anéis volumétricos. Nessas amostras o potencial matricial foi medido em um psicrômetro de ponto de orvalho-WP4, conforme descrito por Klein et al. (2006) e a umidade foi obtida multiplicando-se o conteúdo gravimétrico de água pela densidade do solo de cada amostra.

O ajuste das curvas aos pares de tensão e umidade foi realizado usando o modelo Van Genuchten, 1980, conforme a equação:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$$

Em que:

$\theta$  : conteúdo volumétrico de água ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_r$ : umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_s$ : umidade volumétrica no ponto de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\psi$ : tensão de água no solo (cm);

$\alpha$ ,  $n$  e  $m$ : coeficientes empíricos, de ajuste da equação.

O parâmetro  $\theta_s$  foi obtido diretamente da porosidade total, o parâmetro  $m$  foi obtido pelo critério sugerido por MUALEM, (1976), através da equação  $m = 1 - 1/n$ , a fim de possibilitar a estimativa da condutividade hidráulica do solo não saturado. Os demais parâmetros:  $\alpha$ ,  $\theta_r$  e  $n$  foram estimados por meio do procedimento *proc nlin* do programa SAS 9.2 (SAS INSTITUTE INC., 2010).

A partir da curva de retenção foi estimado também o conteúdo de água na capacidade de campo (CC), para as tensões de 10 e 33 kPa, e o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (PMP), a 1500 kPa. Para umidade na capacidade de campo foram utilizadas as tensões de 10 e 33 kPa, uma vez que 33 kPa é um valor classicamente utilizado como limite superior da água disponível (JAMISON, 1953), enquanto diversos autores indicam que para solos tropicais

seria mais adequada a determinação da capacidade de campo na tensão de 10 kPa (REICHARDT, 1988; MELLO et al., 2002). Assim, a capacidade de água disponível foi calculada pela diferença do conteúdo de água entre as tensões de 10 e 33 kPa e 1500 kPa, considerados como o limite superior e inferior, respectivamente, de disponibilidade de água à maioria das plantas.

Depois de atingidas as tensões de 10, 33 e 100 kPa para a obtenção da curva de retenção de água no solo, mediu-se o fluxo de ar nas amostras, em permeâmetro de carga constante (KMOCH; HANUS, 1965). O equipamento consiste na aplicação de fluxo de ar na amostra de solo à pressão baixa (0,1 kPa) e constante (para evitar fluxo turbulento) por meio de fluxímetros com diferentes vazões. Um manômetro de água mede essa diferença de pressão (0,1 kPa) entre o ambiente e o ar que flui pela amostra de solo. A condutividade ao ar ( $K_l$ ,  $\text{cm s}^{-1}$ ) e a permeabilidade ao ar ( $K_a$ ,  $\mu\text{m}^2$ ) foram calculadas pelas seguintes equações:

$$K_l = \rho_l g \frac{\Delta V L}{\Delta t \Delta p A} \qquad K_a = k_l \frac{\eta}{\rho_l g}$$

Em que:

$\rho_l$  a densidade do ar na medição ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$g$  a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ );

$\Delta V$  o volume de ar ( $\text{m}^3$ ) que passa pela amostra durante o tempo  $\Delta t$  (min);

$L$  a altura da amostra (m);

$\Delta p$  a pressão de ar aplicada (hPa) ;

$A$  a área superficial da amostra ( $\text{m}^2$ );

$\eta$  a viscosidade do ar ( $\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ).

Para o cálculo da densidade do ar, usado na fórmula da permeabilidade ao ar, foi utilizada a seguinte equação:

$$\rho_l = \rho_n \times \left[ \frac{T_n \times p}{p_n \times T} \right]$$

Em que:

$\rho_l$  = densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\rho_n$  = densidade padrão do ar ( $1,293 \text{ kg m}^{-3}$ )

$T_n$  = temperatura padrão ( $273,15 \text{ }^\circ \text{K}$ )

$p$  = pressão atmosférica durante a medida (mbar)

$p_n$  = pressão atmosférica padrão (1013 mbar)

$T$  = temperatura do ar durante a medida ( $^\circ \text{K}$ )

Após ser atingida a tensão de 100 kPa em câmara de Richards pesadas e colocadas no permeâmetro para determinação da permeabilidade do solo ao ar, as amostras foram novamente saturadas por capilaridade para avaliação da condutividade hidráulica do solo saturado. Para tanto, foi utilizado permeâmetro de carga constante (LIBARDI, 2005), sendo a condutividade hidráulica calculada pela equação:

$$K_{sat} = \frac{q \times l}{A \times h \times t}$$

Em que:

$K_{sat}$  = é a condutividade hidráulica saturada em  $\text{cm h}^{-1}$ ;

$q$  = é o volume percolado pela amostra em  $\text{cm}^3$ ;

$l$  = é a altura da amostra em cm;

$A$  = é a área da amostra de solo em  $\text{cm}^2$ ;

$h$  = é a altura da amostra mais a altura da lâmina de água aplicada em cm;

$t$  = é o tempo de medição em h.

A condutividade hidráulica de solo não saturado ( $K$ ,  $\text{cm h}^{-1}$ ) foi calculada pelo modelo teórico de van Genuchten-Mualem, conforme descrito em Jong Van Lier et al. (2009):

$$K = K_s \times Se^l \left( 1 - \left( 1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2$$

Em que:

$Se$  é a saturação efetiva  $(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ ;

$l = 0,5$ ;

$K_s$  = condutividade hidráulica de solo ( $\text{cm h}^{-1}$ );

$m = 1-1/n$ , obtido do ajuste das curvas de retenção de água.

### 5.3.2 Estudo 2 - Benefícios do mecanismo sulcador da semeadora sobre propriedades físico-hídricas do solo

Nesse estudo foram avaliados a densidade do solo, densidade relativa do solo, porosidade total, macro e microporosidade do solo, resistência do solo à penetração mecânica, taxa de infiltração de água no solo e retenção de água no solo, água disponível para as plantas, condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado e permeabilidade ao ar, seguindo a metodologia descrita no item 5.3.1.

A coleta das amostras foi realizada no mês de maio de 2013 na linha de semeadura da cultura da soja cultivada na safra agrícola 2012/2013 (Figura 9). As amostras foram obtidas em três profundidades 0 a 0,07 m, 0,07 a 0,15 m e, 0,15 a 0,25 m.



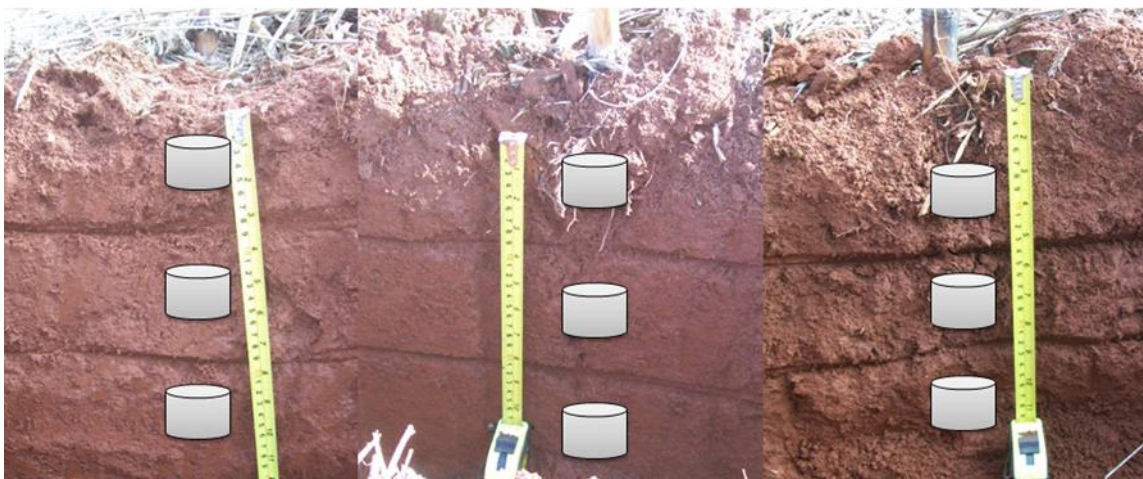


Figura 9 - Estratificação das camadas de solo e posicionamento dos anéis volumétricos para coleta das amostras com estrutura preservada.

## 5.6 Análise dos resultados

Nos dois estudos a análise dos dados iniciou pela verificação do atendimento às pressuposições do modelo matemático para realização de testes paramétricos. Observou-se que a permeabilidade ao ar, condutividade hidráulica do solo saturado, condutividade hidráulica do solo não saturado, taxa estável de infiltração de água no solo (TIE) e lâmina de água infiltrada, não atendiam a pressuposição da normalidade dos dados, avaliada pelo teste de Lilliefords. Visando adequar os dados a esse pressuposto, foi aplicada a transformação logarítmica para a TIE e lâmina de água infiltrada e, a transformação raiz quarta para a permeabilidade ao ar, condutividade hidráulica do solo saturado e condutividade hidráulica do solo não saturado.

Após a transformação, os dados foram novamente submetidos à análise de atendimento às pressuposições do modelo matemático para verificar se a transformação foi eficiente em ajustar a variável ao pressuposto violado. Para a TIE, lâmina de água infiltrada e condutividade hidráulica do solo não saturado verificou-se que a transformação foi eficiente e os resultados transformados seguiram a distribuição normal, bem como atenderam também ao pressuposto de homogeneidade das variâncias avaliada pelo teste de Cochran. Para a



permeabilidade ao ar e condutividade hidráulica do solo saturado a transformação raiz quarta não normalizou os resultados. Assim, essas variáveis foram analisadas pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e os resultados comparados pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Para as demais variáveis do estudo os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de hipótese com 5% de probabilidade de erro. Quando houve rejeição da hipótese nula ( $H_0: \varphi(A)=0$ ) os resultados foram comparados pelo teste de Tukey, com nível de significância de 5%. Todas as avaliações foram realizadas no software estatístico Assistat 7.7 beta.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 Reconsolidação do solo após escarificação mecânica em Latossolo de textura argilosa manejado em SPD**

A estabilidade estrutural do solo após a escarificação mecânica do solo manejado em sistema plantio direto, avaliada mediante a distribuição do tamanho de agregados estáveis em água (Tabela 3), indicou que a prática de mitigação do estado de compactação do solo não alterou a estabilidade dos agregados em água tanto nas classes de tamanho quanto nas camadas avaliadas, à exceção da classe <0,21 mm na camada de 0,07 a 0,15 m. Isso indica que o revolvimento do solo promovido pela escarificação não prejudicou a estabilidade estrutural do solo, ou seja, o uso do escarificador para descompactação do solo pode ter proporcionado a formação de fissuras com mínima mobilização do solo, o que pode contribuir para a manutenção de grande parte da cobertura morta, além de proporcionar alta rugosidade da superfície do terreno (SECCO; REINERT, 1997), reduzindo o escoamento superficial (VÁZQUEZ; GONZÁLEZ, 2003) e a susceptibilidade do solo a erosão.

A ausência de diferença significativa entre os tratamentos foi observada também para o diâmetro médio ponderado (DMP) (Figura 10), o qual é tanto maior quanto mais elevada for a porcentagem de agregados grandes retidos nas peneiras com malhas maiores. Assim, a exemplo do que foi verificado para a distribuição dos agregados estáveis em água, o DMP apresentou maior concentração nas classes de diâmetro maiores que 2 mm nas camadas 0 a 0,07 m e 0,07 a 0,15 m e nas classes maiores do que 1 mm na camada de 0,15 a 0,25 m, não havendo diferença entre os tratamentos. O mesmo comportamento se repetiu para o diâmetro médio geométrico (DMG), que representa uma estimativa do tamanho da classe de agregados de maior ocorrência.

Tabela 3 - Distribuição do tamanho de agregados estáveis em água (%) pelo método de Kemper e Chepil (1965), em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36).

Tratamento	Classes de Agregados (mm)				
	8-4,76	4,76-2	2-1	1-0,21	<0,21
----- 0 a 0,07 m -----					
E0	56,96 <sup>ns</sup>	15,00 <sup>ns</sup>	6,54 <sup>ns</sup>	13,33 <sup>ns</sup>	8,18 <sup>ns</sup>
E6	50,73	15,96	8,19	15,51	9,61
E12	41,50	17,94	10,76	20,56	9,24
E18	42,17	17,00	9,79	20,71	10,34
E24	42,86	18,53	10,20	19,94	8,48
E30	57,24	14,95	6,20	13,40	8,22
E36	49,94	14,90	8,10	17,50	9,56
T	43,43	18,17	8,45	20,41	9,54
CV (%)	17,68	22,24	24,32	26,69	23,78
DMS	20,18	8,73	4,92	11,18	5,16
----- 0,07 a 0,15 m -----					
E0	41,60 <sup>ns</sup>	20,80 <sup>ns</sup>	11,00 <sup>ns</sup>	19,29 <sup>ns</sup>	7,30 <sup>*</sup> ab
E6	45,01	16,18	10,34	20,40	8,07 ab
E12	45,97	16,61	10,83	18,69	7,90 ab
E18	47,42	17,24	10,17	17,08	8,09 ab
E24	42,84	20,97	10,51	18,95	6,73 ab
E30	37,97	21,11	10,84	20,64	9,43 a
E36	57,55	15,48	7,67	13,09	6,22 ab
T	52,34	19,83	10,05	13,96	4,83 b
CV (%)	20,67	19,12	23,41	28,46	22,66
DMS	22,72	8,40	5,65	11,99	3,93
----- 0,15 a 0,25 m -----					
E0	6,27 <sup>ns</sup>	13,98 <sup>ns</sup>	19,24 <sup>ns</sup>	37,92 <sup>ns</sup>	9,81 <sup>ns</sup>
E6	5,73	11,96	23,15	48,14	11,02
E12	6,85	12,58	21,94	47,17	11,46
E18	10,26	17,17	21,97	39,15	11,45
E24	19,17	12,59	18,21	44,51	9,83
E30	10,92	14,18	26,85	40,22	7,83
E36	6,24	11,97	22,20	46,66	12,93
T	6,94	15,85	22,33	37,76	10,54
CV (%)	75,69	26,83	18,75	24,04	21,11
DMS	16,25	8,77	9,78	24,34	5,31

<sup>ns</sup> 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.

Esses resultados corroboram a tendência apresentada pela distribuição do tamanho dos agregados em água, de que a escarificação esporádica do solo manejado sob sistema plantio direto não compromete a estabilidade dos agregados do solo. Além disso, os resultados podem estar indicando também que o modelo de produção de grãos utilizado no estudo, com a rotação de culturas envolvendo milho, trigo, soja e centeio possibilitou a formação e estabilização de agregados de maior diâmetro. Dessa forma, supõe-se que o modelo de produção pode ter favorecido a atividade dos microrganismos e o maior teor de matéria orgânica, fatores que favorecem o maior diâmetro dos agregados estáveis em água.

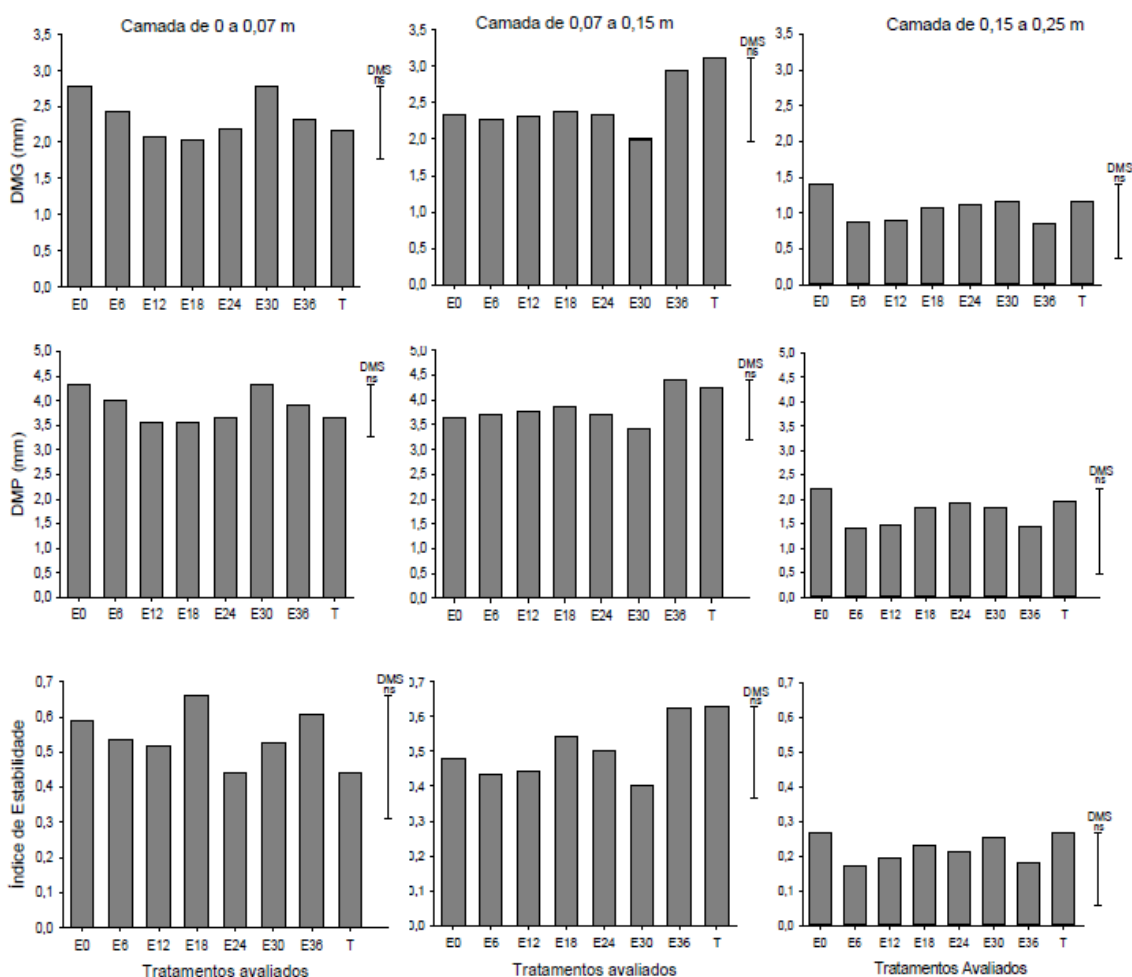


Figura 10 - Diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados estáveis em água e índice de estabilidade de agregados em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). Barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Embora não se conheçam números absolutos que permitam interpretar, através dos resultados da análise de agregados em água, quando um solo pode ser considerado de boas ou más propriedades físicas, Bognola et al. (1998) indicam como sendo de baixa estabilidade os solos com índice de agregação (diâmetro médio ponderado) abaixo de 0,50 mm. Nesse sentido, pode-se observar que os sistemas de manejo do solo avaliados nesse estudo apresentam bons níveis de agregação, uma vez que todos os tratamentos, nas três camadas avaliadas, atingiram níveis superiores a 0,5 mm.

Em contrapartida, os resultados obtidos para as variáveis de densidade do solo (Figura 11) e porosidade do solo (Tabela 4) indicaram que a escarificação mecânica do solo manejado sob SPD consolidado manteve a alteração nestas propriedades físicas do solo por curto período de tempo. Desse modo, para essas variáveis os benefícios da escarificação foram mantidos apenas nas parcelas escarificadas há menos de seis meses.

Silva et al. (2012), em Latossolo Vermelho distrófico, também observaram que os efeitos da escarificação, avaliados pela densidade do solo e grau de compactação do solo, apresentaram duração inferior a um ano, sugerindo que os efeitos benéficos da escarificação, em reduzir a densidade do solo em superfície, em curto prazo, propiciam aumento dos riscos de compactação do solo em profundidade. Esse comportamento também foi verificado por Chamen (2011) que avaliou a descompactação de um solo franco arenoso e verificou que os benefícios foram mantidos apenas quando não havia nenhum tráfego subsequente. Quando o solo foi trafegado, apenas duas passagens de trator foram suficientes para devolver o solo para o estado de compactação mais intenso do que a condição original. Resultados similares foram obtidos também por Said (2003), ao avaliar a subsolagem em solos arenoso, argilo arenoso e argiloso, levando-o à conclusão que a descompactação do solo só é benéfica se extremo cuidado é exercido no manejo desse solo durante e após a operação, para evitar uma subsequente compactação.

Tabela 4 - Porosidade total, macro e microporosidade do Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36).

Tratamento	Porosidade Total m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Microporosidade m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Macroporosidade m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
----- 0 a 0,07 m -----			
E0	0,59 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>
E6	0,57	0,37	0,21
E12	0,56	0,36	0,19
E18	0,57	0,40	0,16
E24	0,52	0,41	0,11
E30	0,54	0,43	0,11
E36	0,57	0,40	0,17
T	0,54	0,40	0,14
CV (%)	7,1	8,2	34,9
----- 0,07 a 0,15 m -----			
E0	0,55 a	0,40 <sup>ns</sup>	0,15 a
E6	0,51 ab	0,40	0,11 ab
E12	0,51 ab	0,40	0,12 ab
E18	0,50 ab	0,40	0,10 ab
E24	0,49 ab	0,39	0,11 ab
E30	0,50 ab	0,40	0,10 ab
E36	0,50 ab	0,40	0,10 ab
T	0,48 b	0,41	0,07 b
CV (%)	3,8	3,8	23,6
----- 0,15 a 0,25 m -----			
E0	0,51 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	0,06 b
E6	0,52	0,46	0,06 b
E12	0,53	0,45	0,08 ab
E18	0,54	0,43	0,11 a
E24	0,50	0,44	0,06 b
E30	0,51	0,45	0,07 b
E36	0,54	0,45	0,09 ab
T	0,51	0,44	0,07 ab
CV (%)	4,0	3,5	24,2

<sup>ns</sup> 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.

No presente estudo, menor densidade do solo acompanhada de maior porosidade total e maior macroporosidade do solo foi observada apenas na camada de 0,07 a 0,15 m do tratamento E0. Os demais tratamentos não diferiram da testemunha, mantida sob sistema plantio direto há 27 anos. Resultados

semelhantes foram obtidos por Tavares-Filho et al. (2006), que analisaram o efeito da escarificação em um Latossolo Vermelho Distroférico com 710 g kg<sup>-1</sup> de argila no estado do Paraná e também verificaram que após um ano de cultivo a área escarificada não mais diferia da testemunha com mais de 20 anos de plantio direto. Vieira e Klein (2007), em Latossolo Vermelho distrófico típico, com 450 g kg<sup>-1</sup> de argila, 210 g kg<sup>-1</sup> de silte e 350 g kg<sup>-1</sup> de areia, similar ao solo utilizado nesse estudo, realizaram uma comparação entre área sob SPD consolidado e SPD escarificado há 24 meses e perceberam que não houve nenhuma diferença entre os tratamentos quanto à densidade do solo.

Dentre as possíveis razões para a existência de efeito residual efêmero de variáveis caracterizadoras do estado físico do solo, como a densidade e a porosidade do solo, pode estar a resiliência do solo, ou seja, a habilidade intrínseca do solo em recuperar-se de degradação ou do estresse aplicado, e retornar a um novo equilíbrio, semelhante ao estado antecedente (BLANCO; LAL, 2010). Assim, em áreas de plantio direto, a capacidade de recuperação natural da estrutura do solo, que sucede os processos de degradação por compactação, pode estar contribuindo para que o solo retorne ao estado anterior à intervenção mecânica em pouco tempo. Logo, processos naturais como a contração e expansão do solo podem contribuir para dissipar a compactação causada pelo tráfego de máquinas e dispensar o consumo de tempo e energia com operações mecanizadas de descompactação, como a escarificação.

Em condições como essa, não seria necessária, portanto, a intervenção mecânica do solo, nem como prática de mitigação do estado de compactação nem como estratégia para prevenir que o solo atinja níveis críticos de compactação. Além disso, como o efeito residual foi inferior a um ano, a manutenção dos benefícios da escarificação implicaria em repetição anual dessa prática mecânica, o que se contrapõe aos fundamentos do sistema plantio direto.

Por outro lado, ao assumir a existência de um volume mínimo de espaço aéreo para que a difusão de O<sub>2</sub> atenda a demanda do sistema radicular (GRABLE; SIEMER, 1968) e, aceitando como valor crítico a porosidade de aeração de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (TROEH et al., 1982; ALLAIRE et al., 2008), pode-se observar que, nas duas primeiras camadas de solo avaliadas apenas a testemunha apresentou uma macroporosidade do solo considerada como limitante para porosidade de aeração, na camada de 0,07 a 0,15 m (Tabela 4). Já na

terceira camada, com exceção da área escarificada há 18 meses, todos os tratamentos avaliados apresentaram valores de macroporosidade do solo inferiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , podendo, dessa forma, limitar a porosidade de aeração do solo.

A densidade relativa (grau de compactação) (Figura 11) também apresentou diferenças significativas apenas entre a testemunha e as unidades experimentais escarificadas há menos de seis meses. Todavia, o que chama a atenção nessa variável são os elevados valores assumidos, especialmente para a camada de 0,07 a 0,15 m, reconhecida como a camada de maior compactação do solo em áreas manejadas sob sistema plantio direto. Nessa camada, todos os tratamentos, com exceção de E0, apresentaram densidade relativa superior a 0,90 (grau de compactação superior a 90%).

Ao avaliar a influência do grau de compactação no desenvolvimento da cultura da soja, Suzuki (2005) verificou que o aumento do grau de compactação do solo reduziu linearmente a macroporosidade e o crescimento radicular da soja e aumentou linearmente a resistência do solo à penetração. Nesse estudo, o autor verificou que a macroporosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , considerada como limitante para porosidade de aeração (TROEH et al., 1982; ALLAIRE et al., 2008), correspondeu a um grau de compactação de aproximadamente 89% para solos com  $100 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, 80% para solos com 200-300  $\text{g kg}^{-1}$  de argila e 75% para solos com 300-700  $\text{g kg}^{-1}$  de argila. Dessa forma, os valores do grau de compactação obtidos para o Latossolo Vermelho Distrófico típico em todos os tratamentos, exceto E0, estariam bem acima do valor considerado com limitante para a porosidade de aeração, no estudo de Suzuki (2005), indicando a possibilidade de ocorrer limitações ao crescimento radicular das culturas.

Suzuki (2005) observou ainda que os maiores rendimentos da cultura da soja foram obtidos, aproximadamente, no grau de compactação de 85% para os Argissolos e 82% para os Latossolos. Justificando que um grau de compactação elevado pode reduzir a porosidade do solo, diminuindo a aeração e aumentando a densidade e resistência do solo à penetração e, grau de compactação muito baixo pode indicar solo muito solto, comprometendo a retenção de água e o contato solo-semente na semeadura.



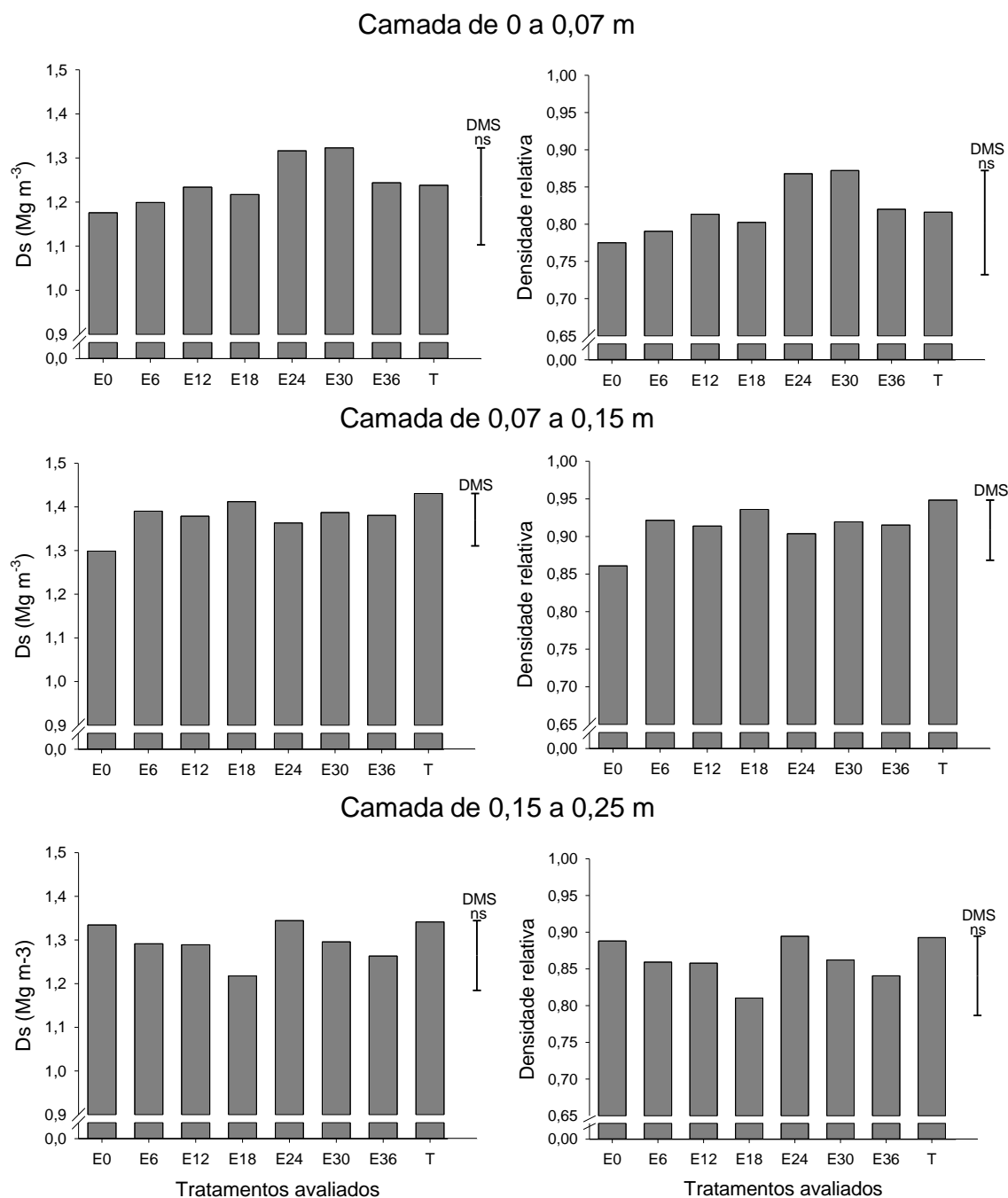


Figura 11 - Densidade do Solo ( $D_s$ ) ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) e Densidade Relativa do solo, em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). Barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Um entrave para a comparação direta dos valores ótimos e limitantes de grau de compactação obtidos por Suzuki (2005) com os valores obtidos nesse estudo referem-se ao método de determinação da densidade máxima do solo,

uma vez que o autor utilizou amostras equilibradas à tensão de 33 kPa e submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação em cada amostra de carga única de 200, 400, 800, 1600 e 3200 kPa e não os valores do teste de Proctor. Todavia, estudos utilizando o teste de Proctor para determinação da densidade máxima do solo também indicaram redução de crescimento das plantas e rendimento da cultura para valores de grau de compactação inferiores aos obtidos nesse estudo. Como exemplo, destacam-se Lipiec et al. (1991), que realizaram experimentos com a cultura da cevada em solo com  $600 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e concluíram que o crescimento das plantas e o rendimento de grãos foi reduzido quando a densidade relativa excedeu 0,88, e Klein (2006), que obteve condições ótimas para o desenvolvimento das plantas com densidade relativa de 0,71 e limitantes quando a densidade relativa foi superior a 0,88 em Latossolo Vermelho de textura argilosa.

Desse modo é possível inferir que os elevados valores de densidade relativa obtidos na camada de 0,07 a 0,15 m podem causar restrições ao crescimento radicular das culturas, reduzindo a porosidade de aeração e aumentando a resistência mecânica do solo à penetração, o que pode repercutir negativamente sobre a produtividade das culturas.

Ao avaliar a resistência do solo à penetração em diferentes pontos do perfil do solo e em diferentes momentos do ciclo da cultura da soja na safra 2012/2013 foi possível perceber que logo após a semeadura (Figura 12) os valores do índice de cone foram menores do que no final do ciclo de cultivo (Figura 13), embora com umidade do solo similar nas duas avaliações (Figura 7). Verificou-se que em todos os tratamentos os valores de resistência do solo à penetração dos primeiros 0,05 m foram inferiores a 1 MPa, o que pode estar associado a maior atuação dos ciclos de umedecimento e de secagem e à atividade biológica, associada à recente ação do sulcador da semeadora, o qual atuou igualmente nos primeiros centímetros de todos os tratamentos. Em profundidades superiores a 0,07 m, onde não houve atuação do sulcador da semeadora, verificou-se um incremento do valor de resistência do solo à penetração, reforçando a existência de uma camada de maior restrição ao crescimento radicular (mais compactada), em áreas sob plantio direto localizada entre 0,07 e 0,15 m, conforme verificado anteriormente por Genro Junior et al. (2004), Suzuki et al. (2008), Secco et al. (2009), Drescher et al. (2011).

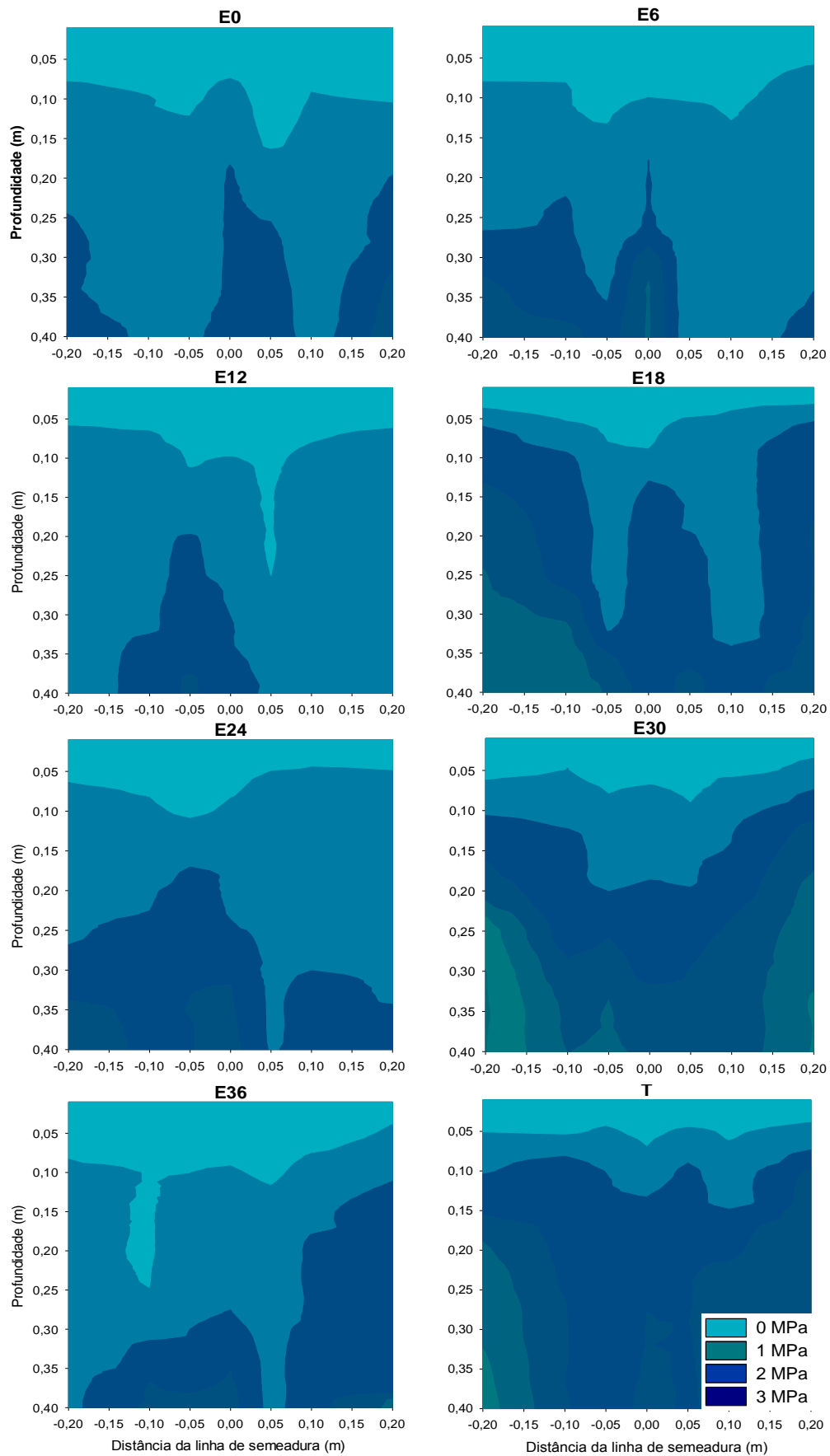


Figura 12 - Resistência do solo à penetração 20 dias após semeadura de soja da safra 2012/2013 em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36).

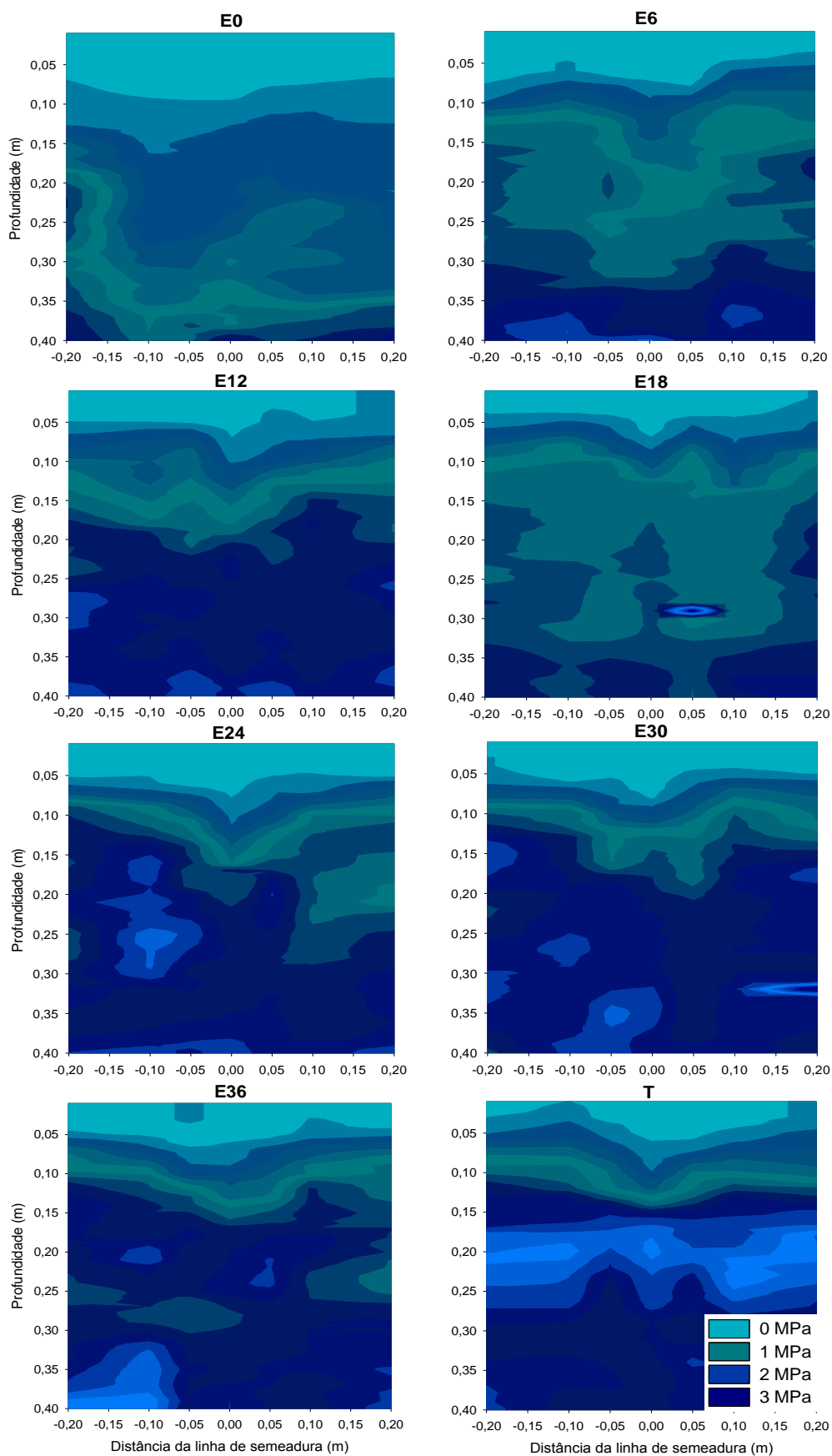


Figura 13 – Resistência do solo à penetração no fim do ciclo da soja (safra 2012/2013) cultivada em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36).

Na avaliação da resistência do solo à penetração realizada logo após a semeadura da soja (Figura 12), foram observados baixos valores de resistência mecânica nas áreas escarificadas há 0, 6, 12, 18 e 24 meses. Somente a partir do tratamento E30 foi verificada a presença de valores de resistência do solo à penetração superiores a 2 MPa. Resultados similares também foram obtidos na avaliação realizada no final do ciclo da soja (Figura 13), na qual a escarificação mecânica do solo manteve um perfil com menores valores de resistência do solo à penetração até 18 meses após a intervenção mecânica. Esses resultados indicam que, embora os benefícios da escarificação mecânica sobre a densidade e porosidade do solo sejam mantidos por apenas uma safra agrícola, os mesmos podem perdurar por períodos de tempo superiores para outras propriedades, como é o caso da resistência do solo à penetração mecânica. Assim, antes de realizar nova escarificação, é de suma importância realizar um diagnóstico da existência de valores restritivos ao desenvolvimento radicular.

Na avaliação realizada no final do ciclo da cultura da soja (Figura 13) foram verificados valores de resistência do solo à penetração mecânica superiores a 3 MPa abaixo de 0,10 m nos períodos superiores a 24 meses após à escarificação. Essa informação torna-se preocupante quando o valor de 2 MPa é assumido como valor crítico de resistência do solo à penetração mecânica, a partir do qual, o desenvolvimento radicular das culturas pode ser prejudicado (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999).

Nessas condições, pode haver aumento da energia necessária para o desenvolvimento das raízes das plantas, diminuição da alongação e crescimento radicular (LIPIEC; HATANO, 2003) e, com isso, redução no volume de solo explorado pelas raízes, o que pode reduzir a absorção de fósforo, que é pouco móvel no solo e transportado principalmente por difusão, e de potássio, com predomínio da difusão sobre o fluxo de massa (DOLAN et al., 1992). Além do que, em condições de altas compactações, pode haver redução do carbono alocado para a parte aérea devido à maior necessidade de carboidratos às raízes (ATWEEL, 1990), culminando com reflexos negativos sobre o rendimento das culturas agrícolas. Logo, a obtenção de elevados valores de resistência do solo à penetração mecânica pode servir como indicador para a necessidade de repetição da operação de escarificação.

Com relação ao comportamento físico-hídrico do solo, observou-se que a curva de retenção de água (CRA) (Figura 14) refletiu o comportamento observado para a porosidade do solo (Tabela 4). Assim, na camada superficial (0 a 0,07 m), a área escarificada há menos tempo apresentou maior umidade de saturação, resultado dos incrementos na porosidade do solo. Com isso, o que se observa é que nas situações de maior nível de saturação, os solos que perdem mais água com a aplicação de pequenas tensões são os que foram submetidos à escarificação recentemente. Já na área mantida continuamente sob SPD (testemunha) ou nas áreas escarificadas há mais tempo (E24, E30 e E36) há menor drenagem quando da aplicação de tensões menores que 10 KPa.

Na camada de 0,07 a 0,15 m, apenas a área escarificada há menos de meio ano apresentou maior umidade de saturação, enquanto a área mantida sob SPD contínuo apresentou os menores valores. De modo que se percebe que o tratamento E0 apresenta maior drenagem para pequenos aumentos na tensão matricial, indicando a presença de maior macroporosidade. Como o tamanho do poro determina o potencial da água nele retida e, portanto, a tensão necessária para esvaziá-lo, quanto maior o tamanho do poro, menor a tensão necessária para a retirada de água e, quanto menor o tamanho do poro, maior será a tensão necessária para esvaziá-lo.

Assim, a diminuição da macroporosidade na área manejada sob SPD contínuo pode resultar em uma maior retenção de água no solo, enquanto a maior macroporosidade, advinda da escarificação recente, pode favorecer a maior condutividade hidráulica do solo saturado e o processo de infiltração de água no solo, reduzindo a suscetibilidade do solo ao processo de erosão hídrica.

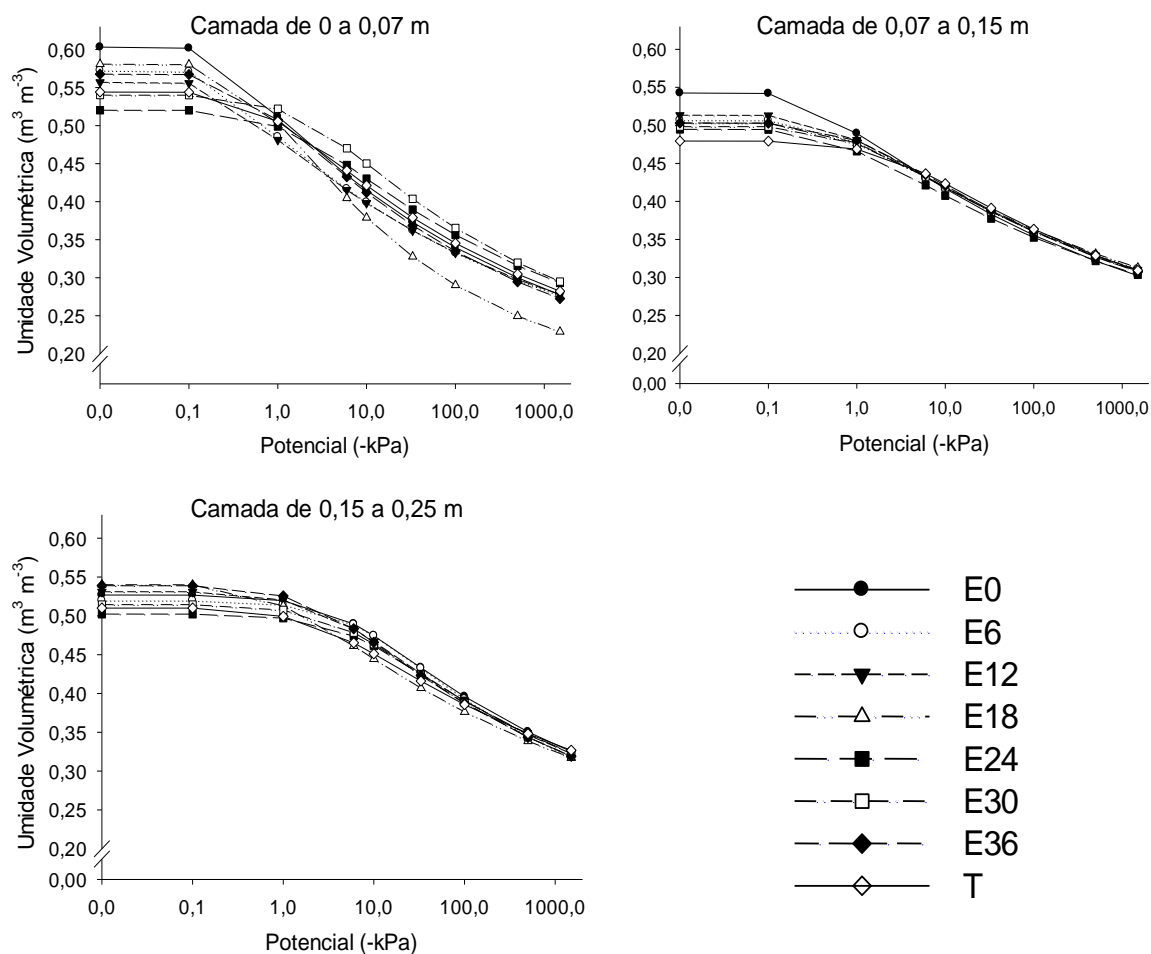


Figura 14 - Curvas de retenção de água no solo do Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36).

Na camada de 0,15 a 0,25 m, todos os tratamentos apresentaram umidade de saturação e comportamento da curva de retenção de água no solo muito similares. Esse resultado já havia sido obtido para a porosidade do solo (Tabela 4), em que não houve diferença entre os tratamentos avaliados para a porosidade total e para a microporosidade do solo desta camada, indicando que o efeito da escarificação é mais pronunciado nas camadas mais superficiais do solo.

Ao observar o comportamento das curvas de retenção de água no solo percebe-se que a escarificação em áreas manejadas sob sistema plantio direto, ao promover aumentos da macroporosidade do solo influenciou a umidade de saturação e a retenção de água apenas para baixos valores de tensão

matricial. Assim, quando a tensão matricial ultrapassou aos 10 kPa, valor assumido para definição da capacidade de campo em solos tropicais (REICHARDT, 1988; MELLO et al., 2002), a CRA no solo de todos os tratamentos apresentou o mesmo comportamento. Como reflexo disso, não houve diferença para a água disponível determinada pela diferença da umidade na capacidade de campo (10 e 33 kPa) e no ponto de murcha permanente (1500 kPa) entre os tratamentos para nenhuma das camadas avaliadas (Figura 15).

Esses resultados indicam que a escarificação do solo não melhorou a disponibilidade de água para as plantas, ou seja, não houve benefício imediato ou residual da intervenção mecânica na área de plantio direto consolidado para o incremento da água disponível. Esse comportamento também foi observado por Kaiser (2010) ao avaliar a água disponível até a camada de 0,5 m em Argissolo manejado sob preparo convencional, plantio direto, plantio direto com compactação adicional e plantio direto com escarificação superficial e com escarificação profunda, no qual observou que a água disponível foi significativamente menor na camada superficial do preparo convencional e, o plantio direto com escarificação superficial teve menor quantidade de água disponível na camada de 0,15 a 0,20 m. Nas demais camadas, a água disponível não foi alterada pelo manejo aplicado em relação ao plantio direto, utilizado como referência, por ser a condição estrutural natural da área.

A ausência de incremento na água disponível em solos sob sistema plantio direto escarificado pode ser decorrente do aumento da porosidade total do solo, condicionado especialmente pelo incremento da macroporosidade (Tabela 4), sem aumentar a microporosidade do solo em comparação ao plantio direto contínuo. Como a microporosidade é responsável pela retenção de água no solo, o aumento da porosidade total não se expressou em termos de conteúdo de água disponível no solo para nenhuma estratégia de manejo do solo avaliada no estudo. Nesse sentido, Chamen et al. (2015) atentam que a utilização de processos de descompactação mecânica para aumentar as taxas de infiltração pode promover grandes benefícios em termos de redução do risco de inundação e erosão, mas igualmente, pode trazer prejuízos associados a drenagem mais rápida da água e redução da água disponível às culturas.



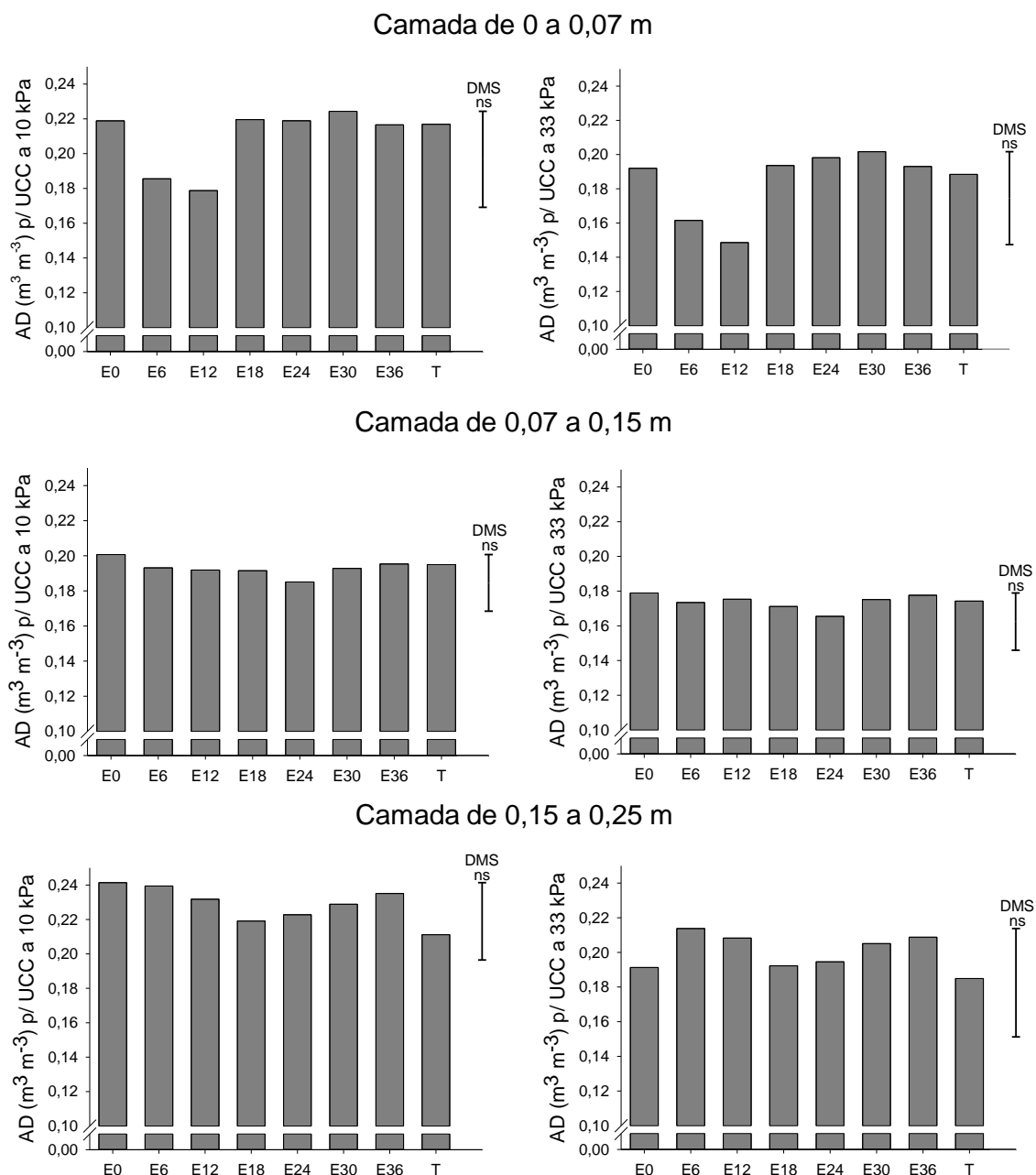


Figura 15 - Água disponível entre capacidade de campo a 10 e a 33 kPa e ponto de murcha permanente (1500 kPa) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). Barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns= não significativo.

Esse resultado pode explicar porque a intervenção mecânica em sistema plantio direto consolidado nem sempre promove aumento no rendimento das culturas, conforme verificado para feijão (COLLARES et al., 2006), soja

(CAMARA; KLEIN, 2005; KLEIN; CAMARA, 2007; DRESCHER et al., 2012) e milho (MAHL et. al, 2008; GUBIANI et al., 2013; NUNES et al., 2014), mesmo quando realizada há pouco tempo. Beutler et al. (2008) verificaram, inclusive, que em solo revolvido e solo sem compactação adicional o rendimento da soja foi menor que o rendimento onde o solo foi trafegado. Desse modo, pode ocorrer do rendimento das culturas ser maior em solo compactado do que em solo em que foi realizada a descompactação mecânica.

Nesse contexto, para conhecer o efeito residual da escarificação mecânica sobre as propriedades físico-hídricas do solo, torna-se necessário avaliar propriedades consideradas mais sensíveis ou facilmente alteráveis, com os impactos da compactação e descompactação do solo, como a condutividade hidráulica e a condutividade e permeabilidade do solo ao ar (SILVA et al., 2006). Essas propriedades respondem a alterações na densidade, porosidade total, distribuição do tamanho e a continuidade de poros do solo, podendo ser usadas na avaliação das alterações na estrutura do solo causadas pelo manejo.

A permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) representa a resistência imposta pelo solo à passagem do ar, sendo uma medida do espaço poroso não obstruído. Nesse sentido, os resultados obtidos para a permeabilidade ao ar nesse estudo (Tabela 5) indicam que houve incremento de  $K_a$  com o aumento da tensão matricial, para todos os tratamentos. Percebe-se que ao aumentar a tensão matricial de 10 para 33 e 100 kPa, os poros que estavam ocupados por água gradualmente cederam espaço para o processo de aeração, conferindo maiores valores de permeabilidade do solo ao ar. Assim, quando o solo apresenta alto conteúdo de água, parte dos poros são obstruídos, impedindo o fluxo dos gases gerados em camadas mais profundas do solo (BALL; SCHJONNING, 2002), podendo concentrar os gases liberados e causar efeito tóxico sobre as plantas (GREENWAY et al., 2006).

Tabela 5 - Permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ,  $\mu\text{m}^2$ ) nas tensões de 10, 33 e 100 kPa em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36).

Tratamento	Camada de solo avaliada (m)					
	0 a 0,07		0,07 a 0,15		0,15 a 0,25	
	Média	SP <sup>1</sup>	Média	SP	Média	SP
Tensão de 10 kPa						
E0	146,2	102 <sup>ns</sup>	57,5	91 <sup>ns</sup>	15,1	60 <sup>ns</sup>
E6	109,6	87	19,6	50	22,1	56
E12	55,3	58	23,0	58	23,2	82
E18	16,5	27	65,3	108	13,7	47
E24	23,9	34	29,8	65	14,5	50
E30	62,9	63	31,7	56	19,7	76
E36	135,8	80	20,9	52	27,1	61
T	101,7	77	19,2	48	43,9	96
CV (%)	103,0		73,9		86,3	
Tensão de 33 kPa						
E0	188,9	103* a	69,4	87 <sup>ns</sup>	15,5	64 <sup>ns</sup>
E6	146,2	85 ab	21,5	54	20,3	48
E12	66,5	63 ab	21,7	55	27,9	83
E18	17,8	25 b	68,2	92	24,4	73
E24	24,1	29 ab	34,3	65	13,9	55
E30	71,9	56 ab	34,0	62	20,6	78
E36	174,7	90 ab	26,3	45	30,0	58
T	126,2	77 ab	33,1	68	42,9	69
CV (%)	105,5		84,6		89,7	
Tensão de 100 kPa						
E0	241,6	103* a	99,4	93 <sup>ns</sup>	18,9	60 <sup>ns</sup>
E6	167,2	83 ab	31,7	52	40,0	54
E12	95,7	63 ab	31,8	51	33,0	85
E18	29,0	26 b	102,8	100	32,9	80
E24	30,4	27 ab	47,1	72	16,8	51
E30	96,6	57 ab	40,4	48	23,7	70
E36	233,3	87 ab	33,8	44	34,5	60
T	186,3	82 ab	54,9	68	49,3	68
CV (%)	97,7		81,8		92,1	

<sup>1</sup> SP: Soma dos Postos calculada no teste de Kruskal-Wallis.

\* Valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Valores na coluna não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Com o aumento da profundidade do solo, observou-se a redução da permeabilidade do solo ao ar em todos os tratamentos avaliados. Para E0, na tensão de 10 kPa essa redução chega a ser de 60% da camada superficial para a camada de 0,07 a 0,15 m e de 73% da camada de 0,07 a 0,15 m para a camada de 0,15 a 0,25 m. Isso acontece porque o fluxo de ar preferencial ocorre pelos macroporos contínuos, assim, ao reduzir a macroporosidade do solo alterações substanciais de permeabilidade ao ar serão verificadas. Esse comportamento também foi observado por Streck (2007), que determinou a condutividade ao ar em solos submetidos a diferentes manejos e concluiu que ela se mostrou bastante dependente da macroporosidade, expressando as alterações na estrutura do solo quando a proporção de macroporos foi alterada.

A relação entre macroporosidade do solo e permeabilidade do solo ao ar pode explicar porque foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos apenas na camada superficial, uma vez que esta concentra os maiores percentuais de macroporos. Nessa camada, tanto para a tensão de 33 quanto de 100 kPa os maiores valores para  $K_a$  foram obtidos na área escarificada há menos de seis meses, enquanto os menores valores para  $K_a$  foram obtidos na área escarificada há 18 meses. Os demais tratamentos não diferiram entre si e nem da testemunha, manejada sob SPD há 27 anos.

Esses resultados podem indicar ainda que o não revolvimento do solo em SPD e a existência de bioporos tornam a porosidade do solo mais eficiente no transporte gasoso em relação ao solo escarificado, devido à manutenção da continuidade dos poros no solo, a qual é quebrada com a mobilização, conforme observado por Osunbitan et al. (2005) e Hubert et al. (2007). Assim, embora os tratamentos recentemente escarificados tenham apresentado maior porosidade na camada de 0,07 a 0,15 m isso não refletiu em maior permeabilidade ao ar, não havendo diferença entre os tratamentos para nenhuma das tensões avaliadas.

Apesar da considerável redução da permeabilidade do solo ao ar nas camadas de 0,07 a 0,15 m e de 0,15 a 0,25 m, quando comparadas à camada superficial, os valores obtidos indicam que não há restrição à aeração, uma vez que os valores de permeabilidade foram sempre superiores a  $10 \mu\text{m}^2$ , considerado como valor adequado para uma suficiente aeração do solo (KMOCH; HANUS, 1965).

Para a condutividade hidráulica do solo, tanto na condição de solo saturado (Tabela 6) quanto na de solo não saturado (Tabela 7), também houve considerável redução com o incremento da profundidade. Esses resultados indicam que a descontinuidade de poros do solo promove redução significativa da condutividade do solo ao ar e a água (BEUTLER et al., 2001), sinalizando que alterações na estrutura provocam mudanças na porosidade, afetando os fluxos de ar e de água do solo.

Os resultados obtidos para a condutividade hidráulica do solo não saturado (Tabela 7) indicaram que o efeito residual da intervenção mecânica no sistema plantio direto na camada superficial pôde ser verificado até 18 meses após a escarificação nas tensões de 10, 33 e 100 kPa e até 12 meses nas tensões de 500 e 1000 kPa. Para a camada de 0,07 a 0,15 m esses benefícios foram mais efêmeros estendendo-se por período inferior a um ano em todas as tensões avaliadas. Na camada de 0,15 a 0,25 m, novamente não houve diferença entre os tratamentos avaliados, reforçando que o efeito da escarificação é mais pronunciado nas camadas mais superficiais do solo.

Tabela 6 - Condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36).

Tratamento	Camada de solo avaliada (m)					
	0 a 0,07		0,07 a 0,15		0,15 a 0,25	
	Média	SP <sup>1</sup>	Média	SP	Média	SP
E0	780,5	117 *a	281,7	99 *a	8,1	80 <sup>ns</sup>
E6	470,5	90 b	182,3	97 a	9,7	54
E12	301,2	68 c	22,3	59 bc	7,9	67
E18	356,4	78 bc	25,7	50 c	40,7	89
E24	27,0	26 e	77,0	94 a	4,9	43
E30	26,6	27 e	13,9	36 d	6,5	53
E36	344,6	79 bc	38,8	62 b	10,7	63
T	79,6	43 d	11,2	31 d	8,6	79
CV (%)	96,6		55,5		65,1	

<sup>1</sup> SP: Soma dos Postos calculada no teste de Kruskal-Wallis.

\* Valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Valores na coluna não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 7 - Condutividade hidráulica do solo não saturado ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36), para as tensões de 10, 33, 100, 500 e 1000 kPa.

Tratamento	Condutividade hidráulica ( $\text{mm h}^{-1}$ )				
	10 kPa	33 kPa	100 kPa	500 kPa	1000 kPa
----- 0 a 0,07 m -----					
E0	220,33 <sup>*</sup> a	182,22 <sup>*</sup> a	153,43 <sup>*</sup> a	33,93 <sup>*</sup> a	26,49 <sup>*</sup> a
E6	137,74 ab	117,10 a	99,91 a	27,93 a	21,99 a
E12	87,47 ab	65,66 abc	59,86 ab	21,44 ab	17,01 ab
E18	95,71 ab	77,09 ab	59,01 ab	3,10 bc	1,56 c
E24	11,68 cd	10,02 cd	8,50 c	2,24 c	1,73 c
E30	10,91 d	9,61 d	8,34 bc	2,04 c	1,57 c
E36	93,88 abc	77,05 abc	64,84 abc	12,29 abc	9,20 abc
T	31,06 bcd	24,55 bcd	21,82 bc	5,00 bc	3,96 bc
CV (%)	88,0	89,7	90,0	100,3	102,6
----- 0,07 a 0,15 m -----					
E0	137,16 <sup>*</sup> a	117,57 <sup>*</sup> a	103,39 <sup>*</sup> a	26,88 <sup>*</sup> a	21,62 <sup>*</sup> a
E6	105,37 ab	91,30 a	83,08 a	26,05 a	20,97 a
E12	9,99 cd	8,89 bc	7,67 bc	2,30 bc	1,84 bc
E18	15,76 cd	13,16 bc	11,96 bc	3,64 bc	2,89 bc
E24	35,07 bc	30,32 ab	27,26 ab	8,32 ab	6,62 ab
E30	6,71 d	5,97 c	5,35 c	1,56 c	1,24 c
E36	9,19 cd	7,93 bc	7,10 bc	2,21 bc	1,75 bc
T	3,88 d	3,35 c	3,05 c	0,94 c	0,75 c
CV (%)	146,8	148,2	146,3	143,2	144,3
----- 0,15 a 0,25 m -----					
E0	5,13 <sup>ns</sup>	3,87 <sup>ns</sup>	3,97 <sup>ns</sup>	0,98 <sup>ns</sup>	0,78 <sup>ns</sup>
E6	5,94	5,17	4,47	1,18	0,94
E12	4,50	3,99	3,38	0,91	0,72
E18	17,82	14,44	14,00	3,19	2,51
E24	3,30	2,89	2,57	0,71	0,56
E30	3,82	3,42	2,91	0,82	0,65
E36	5,83	5,09	4,25	1,05	0,83
T	5,15	4,35	3,82	1,13	0,90
CV (%)	129,3	125,5	124,7	119,4	118,1

\* Valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Valores na coluna não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Já para a condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 6) os benefícios da escarificação mecânica apresentaram um residual maior, perdurando até 18 meses após a intervenção mecânica na camada de 0 a 0,07

m e até os 24 meses após a intervenção na camada de 0,07 a 0,15 m de profundidade. Resultados similares aos encontrados nesse estudo foram obtidos por Vieira e Klein (2007), também em Latossolo Vermelho Distrófico típico, em estudo comparativo do sistema plantio direto há oito anos e plantio direto submetido à escarificação. Neste estudo, os benefícios da escarificação sobre a densidade do solo e distribuição do tamanho de poros perduraram também por período inferior a um ano, enquanto que para a condutividade hidráulica do solo saturado aos 24 meses após escarificação os resultados demonstraram capacidade significativamente maior de condução de água, com valores cerca de seis vezes superiores no plantio direto escarificado do que no plantio direto sem intervenção mecânica.

Assim como a condutividade hidráulica, a taxa de infiltração de água no solo também se mostra sensível para detectar as modificações nas condições físicas do solo introduzidas pelo manejo. Variações na taxa de infiltração estão relacionadas com a densidade do solo, macro e microporosidade do solo e condutividade hidráulica do solo. Em função disso, a infiltração de água no solo se caracteriza como um processo físico de extrema complexidade, dado que o solo é um meio heterogêneo, com ampla variabilidade espacial, apresentando propriedades que sofrem alterações diferenciadas no tempo e no espaço (ANKENY et al., 1990).

Nesse estudo, a taxa de infiltração de água no solo apresentou tendência à estabilização após duas horas de teste (Figura 16), de modo que o valor obtido ao final de cada teste foi assumido como taxa de infiltração estável (TIE) e utilizado para comparação dos tratamentos (Figura 17). Assim, foi possível observar que E0 e E6, ou seja, as áreas escarificadas há menos de um ano, apresentaram as maiores taxas de infiltração de água no solo. Porém, os benefícios da escarificação para a taxa de infiltração se estenderam para as áreas escarificadas há 12, 18 e 24 meses, as quais apresentaram valores intermediários para a variável, enquanto as áreas escarificadas há 30 e 36 meses e a testemunha, mantida sob SPD contínuo há 27 anos, apresentaram os menores valores de taxa de infiltração de água no solo.

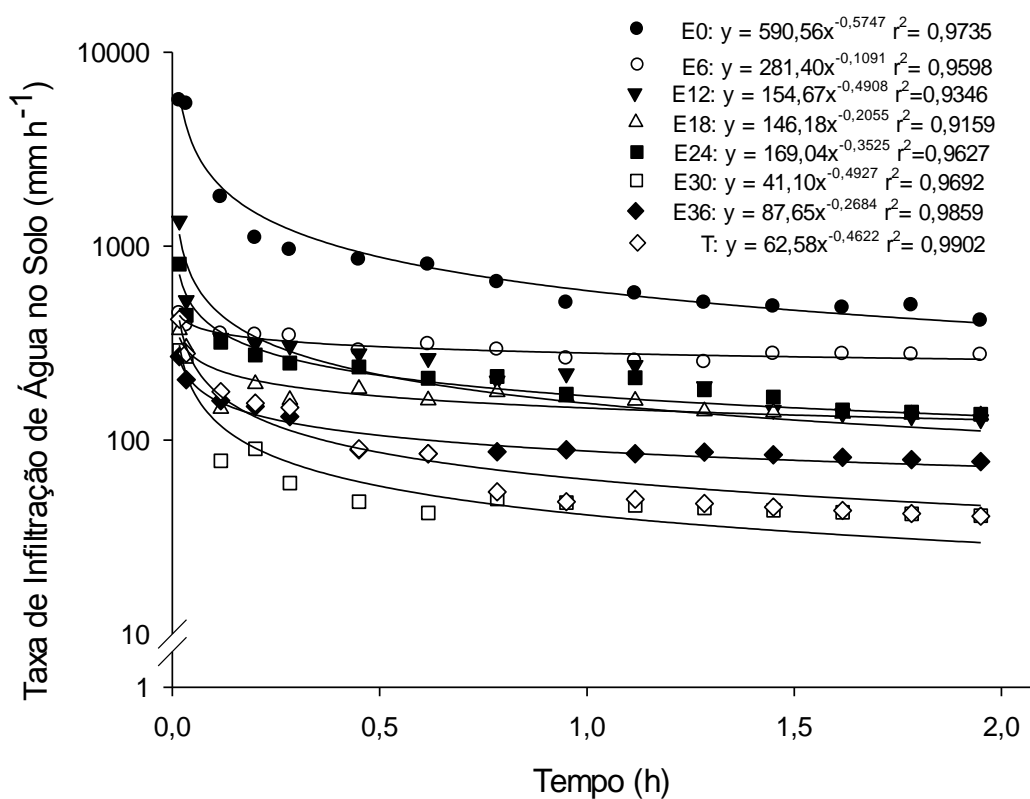


Figura 16 - Taxa de infiltração de água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36).

Esses resultados apontam para um efeito residual de dois anos da escarificação mecânica em sistema plantio direto sobre a taxa de infiltração de água no solo. A perspectiva de uma maior residualidade para essa variável quando comparada à densidade e a porosidade do solo mostra-se relevante para o manejo da água no solo, uma vez que a taxa de infiltração estável é uma grandeza ligada às taxas reais de infiltração e de escoamento superficial, estando diretamente relacionada com os processos erosivos dos solos (GUADAGNIN et al., 2007).



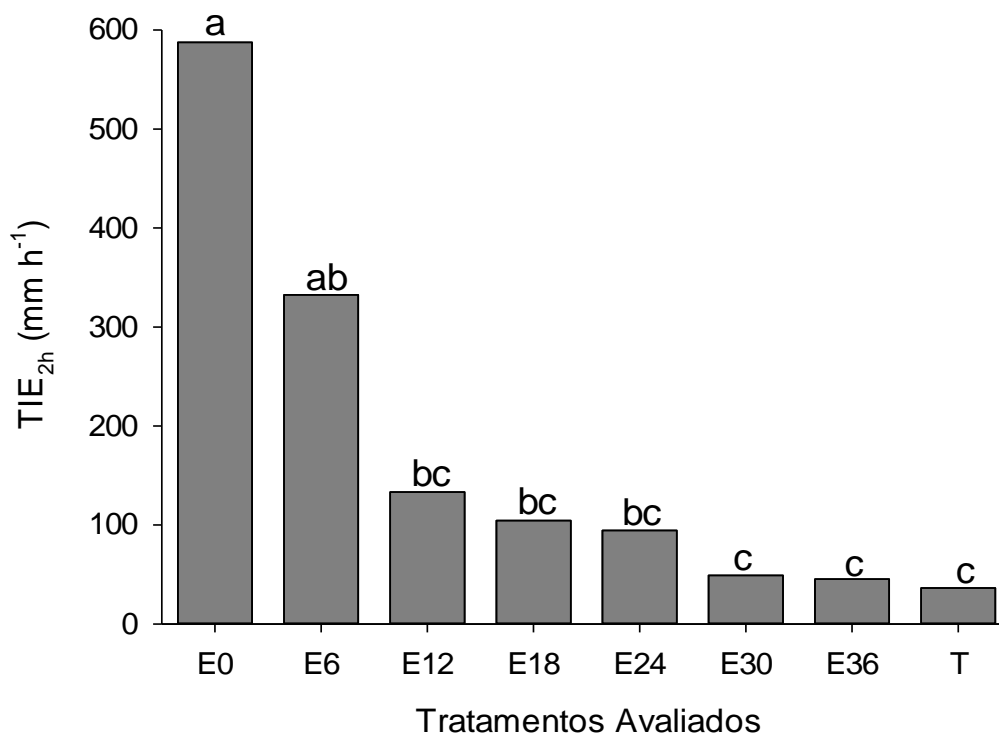


Figura 17 - Taxa de infiltração de água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) ao final de duas horas ( $\text{TIE}_{2h}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). \*Colunas com mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Além da taxa de infiltração, foram comparadas as lâminas de água infiltradas em cada tratamento 0,5, 1 e 2 horas após o início do teste de infiltração (Figura 18), e os resultados indicaram que, no tempo 0,5 e 1 hora de avaliação a área escarificada há menos de 6 meses apresentou a maior lâmina infiltrada, seguida pela área escarificada há menos de um ano. Após duas horas de avaliação a lâmina de água infiltrada nos dois tratamentos não diferiu estatisticamente, indicando que elevadas lâminas de infiltração podem ser mantidas até um ano após a escarificação. Embora, com valores menores que as parcelas escarificadas há menos de um ano, os tratamentos E12, E18 e E24 diferiram da testemunha quanto a lâmina de água infiltrada no solo após uma e duas horas de realização do teste. Apenas E30 e E36 não diferiram da testemunha, indicando que, no Latossolo avaliado, não há efeito residual da escarificação para períodos superiores há dois anos.

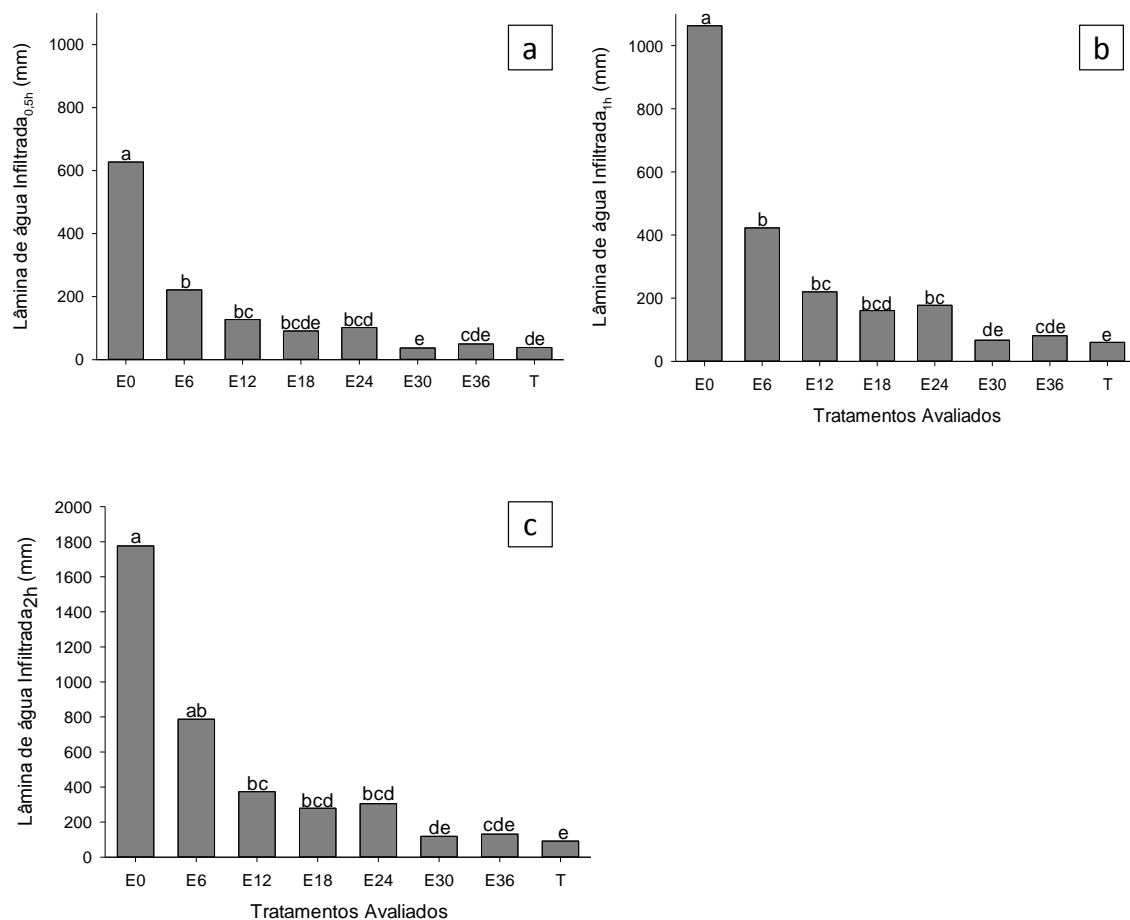


Figura 18 - Lâmina de água infiltrada (mm) ao final de 0,5 (a), 1 (b) e 2 (c) horas de avaliação em Latossolo Vermelho Distrófico típico manejado em sistema plantio direto contínuo há 27 anos (T) e em sistema plantio direto escarificado mecanicamente há 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18), 24 (E24), 30 (E30) e 36 meses (E36). \* Em cada figura colunas com mesma letra minúscula não diferem pelo teste estatístico de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Considerando que parâmetros como a capacidade de infiltração de água no solo e a condutividade hidráulica do solo estão diretamente relacionados com o processo de erosão hídrica do solo, o uso da escarificação pode se justificar como estratégia de manutenção da qualidade física do solo mediante redução dos riscos de erosão, uma vez que, para essas variáveis a maior residualidade não implicaria em necessidade de repetição anual da escarificação.

## 6.2 Benefícios do mecanismo sulcador da semeadora sobre propriedades físico-hídricas do solo

A utilização de hastes sulcadoras em diferentes profundidades como estratégia de descompactação mecânica do solo apenas na linha de semeadura não alterou a densidade do solo nem a densidade relativa do solo (Figura 19) quando comparada ao sistema de semeadura com discos duplos defasados, para nenhuma camada de solo avaliada. Todavia, ao observar os valores absolutos obtidos para os tratamentos, é possível perceber que a utilização da haste sulcadora de ação profunda foi o único tratamento que manteve o grau de compactação inferior a 90% na camada de 0,07 a 0,15 m, reconhecida como a camada de maior restrição ao crescimento radicular das plantas em áreas manejadas sob sistema plantio direto (GENRO JUNIOR et al., 2004; SUZUKI et al., 2008; SECCO et al., 2009; DRESCHER et al., 2011).

A preocupação com a ocorrência de graus de compactação superiores a 90% decorre de resultados encontrados em estudos anteriores, como Lipiec et al. (1991) que realizaram experimentos com a cultura da cevada em solo com  $600 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e concluíram que o crescimento das plantas e o rendimento de grãos foi reduzido quando a densidade relativa do solo excedeu 0,88 e, Klein (2006), que obteve condições ótimas para o desenvolvimento das plantas com densidade relativa de 0,71 e limitantes quando a densidade relativa do solo foi superior a 0,88 em Latossolo Vermelho de textura argilosa. O valor de densidade relativa do solo obtido no tratamento haste sulcadora de ação profunda, na camada de 0,07 a 0,15 m, encontra-se próximo ao considerado ideal por Suzuki (2005), o qual observou que os maiores rendimentos da cultura da soja foram obtidos, aproximadamente, no grau de compactação de 85% para os Argissolos e 82% para os Latossolos.

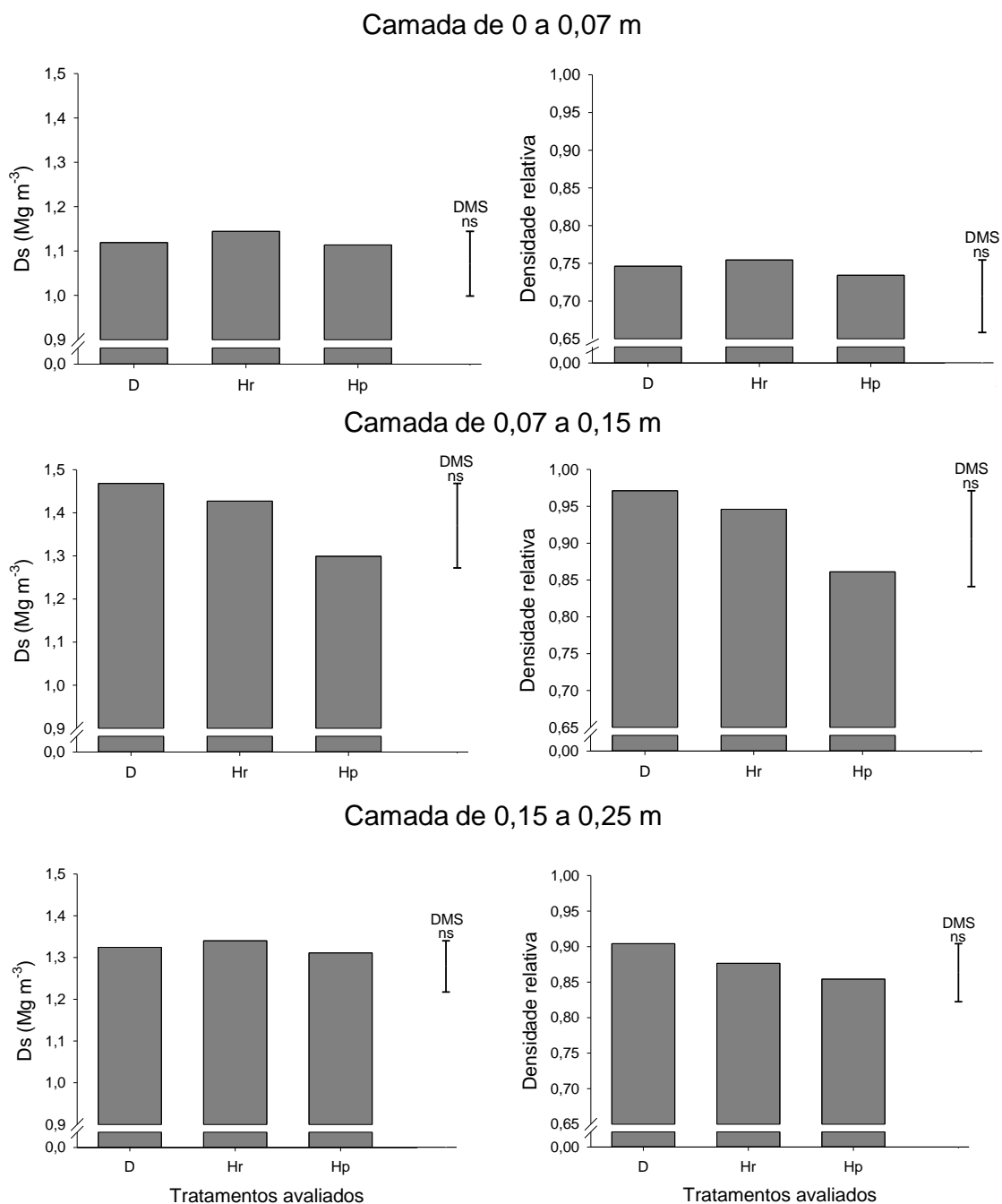


Figura 19 - Densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) e densidade relativa do solo em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com semeadora equipadas com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). Barras verticais indicam diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

O potencial de mitigação do estado de compactação do solo da haste sulcadora, atuando a 0,15 m, promoveu o aumento da porosidade total e da macroporosidade na camada de 0,07 a 0,15 m (Tabela 8). Nas camadas de 0 a 0,07 m e de 0,15 a 0,25 m não houve diferença entre os tratamentos. Esse resultado já era esperado, uma vez que na camada superficial (0 a 0,07 m) tem-se a atuação dos três sulcadores da semeadora, ou seja, em maior ou menor escala haverá revolvimento oriundo da semeadora, associado a maior concentração radicular e de matéria orgânica, maior atividade biológica e maior intensidade dos ciclos de umedecimento e de secagem (HORN; PETH, 2009; BAVOSO et al., 2012), que contribuem para a descompactação do solo. A terceira camada avaliada, por estar situada abaixo da área de atuação dos três sulcadores, não sofre influência direta dos tratamentos avaliados.

Tabela 8 - Porosidade total, macro e microporosidade ( $m^3 m^{-3}$ ) do Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com semeadora equipada com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D).

Parâmetros avaliados	Camada de solo (m)	Tratamentos			CV (%)
		Disco	Haste rasa	Haste profunda	
Porosidade total	0 a 0,07	0,61 <sup>ns</sup>	0,60	0,61	4,2
	0,07 a 0,15	0,48 <sup>*b</sup>	0,48 b	0,52 a	4,4
	0,15 a 0,25	0,51 <sup>ns</sup>	0,52	0,52	4,4
Microporosidade	0 a 0,07	0,37 <sup>ns</sup>	0,23	0,39	6,2
	0,07 a 0,15	0,40 <sup>ns</sup>	0,40	0,42	3,6
	0,15 a 0,25	0,44 <sup>ns</sup>	0,45	0,46	5,9
Macroporosidade	0 a 0,07	0,23 <sup>ns</sup>	0,37	0,22	19,2
	0,07 a 0,15	0,08 <sup>*b</sup>	0,08 b	0,10 a	13,4
	0,15 a 0,25	0,07 <sup>ns</sup>	0,07	0,07	30,1

\* Valores seguidos pela mesma letra na linha não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Valores na linha não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Na camada de 0,07 a 0,15 m há revolvimento promovido tanto pela semeadora com haste sulcadora de ação rasa, a qual foi regulada para trabalhar até 0,10 m de profundidade, quanto pela haste sulcadora de ação profunda, a

qual foi regulada para atuar aproximadamente a 0,15 m. Contudo, os resultados indicam que o revolvimento promovido pela haste rasa não foi suficiente para promover a descompactação além do que foi observado para a semeadora com discos duplos, indicando que para um maior potencial de descompactação há necessidade de regular o sulcador para atuar em profundidades maiores que 0,10 m. Nesse sentido, Reis et al. (2006) e Conte et al. (2009) ressaltam que o aumento da profundidade das hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras deve ser planejado para atuar de forma localizada nas camadas compactadas do solo.

No presente estudo, o potencial de mitigação do estado de compactação do solo promovido pela semeadora com haste sulcadora de ação profunda fica evidente nos resultados obtidos para a macroporosidade do solo na camada de 0,07 a 0,15 m. Com base nesses valores, é possível observar que as áreas semeadas com semeadora equipada com discos duplos ou com haste sulcadora de ação rasa podem apresentar restrições para a porosidade de aeração, por apresentarem uma macroporosidade do solo inferior a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , considerada como limitante para porosidade de aeração (GRABLE; SIEMER, 1968; TROEH et al., 1982; ALLAIRE et al., 2008). Ao assumir esse valor de macroporosidade do solo como crítico para a porosidade de aeração é possível perceber ainda que na camada 0,15 a 0,25 m todos os tratamentos poderão apresentar restrições na aeração do solo, pois todos apresentaram macroporosidade de  $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Além da demanda por  $\text{O}_2$ , em condições de aeração restrita, pode ocorrer também impedimento do fluxo dos gases gerados em camadas mais profundas do solo (BALL; SCOJONNING, 2002), os quais poderão ficar concentrados e causar efeito tóxico sobre as plantas (GREENWAY et al., 2006).

A maior profundidade de trabalho da haste sulcadora regulada para operar a 0,15 m, em relação aos discos duplos defasados e a haste sulcadora regulada para operar a 0,10 m, pode beneficiar o crescimento radicular, uma vez que proporcionou também menores valores de resistência do solo a penetração, tanto no início (Figura 20) quanto no fim (Figura 21) do ciclo da cultura da soja. Além da redução da resistência do solo a penetração mecânica, Cepik et al. (2010) sugerem que os agricultores deveriam considerar o uso de mecanismos sulcadores do tipo haste para aplicação de fertilizantes em solos compactados sob SPD, pois nessas áreas os nutrientes tendem a se concentrar na superfície do solo e as hastes sulcadoras permitem a colocação de fertilizante em

profundidades maiores. Essa estratégia de semeadura pode induzir o crescimento das raízes, fazendo com que se encaminhem mais profundamente no solo, assim, reduzindo os efeitos da compactação sobre o crescimento da planta.

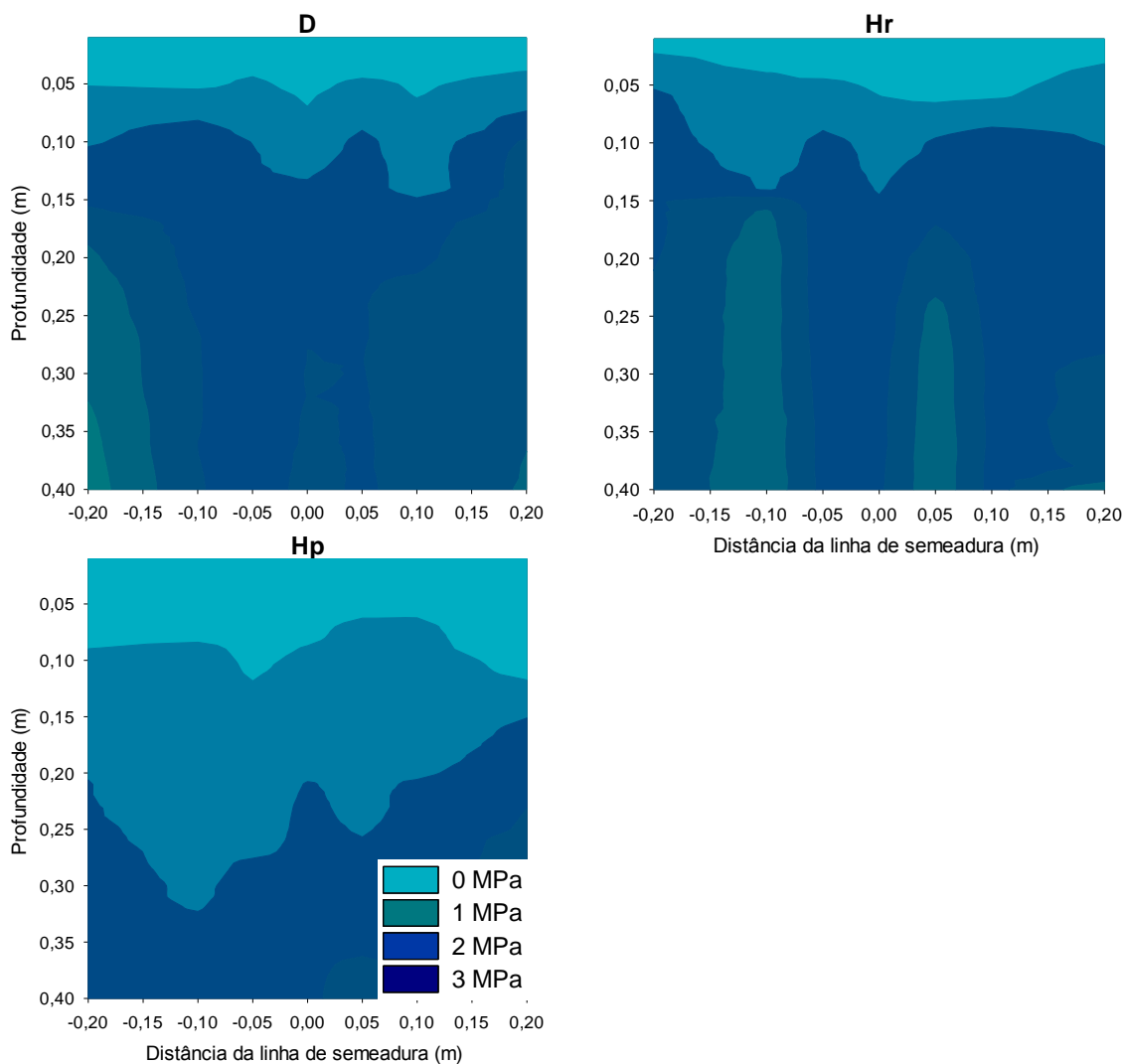


Figura 20 - Resistência do solo à penetração mecânica (MPa) avaliada 20 dias pós a semeadura de soja na safra 2012/2013 em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com semeadora equipada com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D).

Na avaliação realizada 20 dias após a semeadura da soja, foi possível observar que a resistência do solo à penetração mecânica foi baixa na camada

superficial dos três tratamentos, estando abaixo de 1 MPa nos primeiros 0,05 m. Para camadas mais profundas que 0,10 m, a resistência do solo à penetração mecânica alcançou valores superiores a 2 MPa, tanto nas parcelas semeadas com discos duplos quanto com haste sulcadora de ação rasa. Esse valor é frequentemente assumido como crítico para resistência do solo à penetração, a partir do qual o desenvolvimento radicular das culturas pode ser grandemente prejudicado (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999), com reflexos negativos sobre o rendimento das culturas agrícolas.

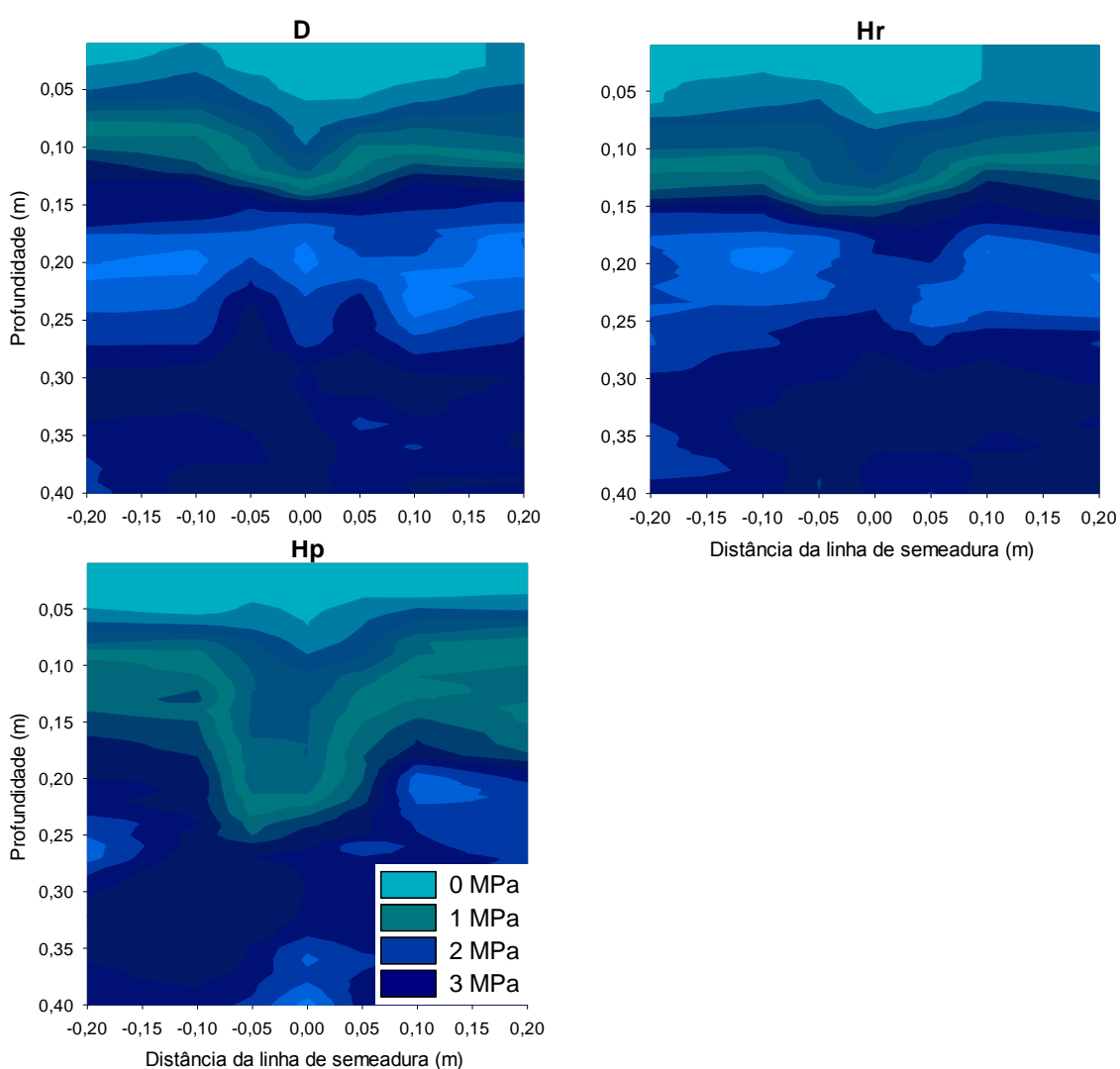


Figura 21 - Resistência do solo à penetração mecânica (MPa) avaliada no final do ciclo da soja na safra 2012/2013 em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com semeadora equipada com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D).



Para o tratamento haste sulcadora de ação profunda, valores de resistência do solo à penetração mecânica superiores a 2 MPa ocorreram apenas em profundidades superiores a 0,20 m, o que pode beneficiar o desenvolvimento das culturas, concordando com Freddi et al. (2009) que obtiveram aumento linear da altura, do diâmetro do colmo e da massa de matéria seca das plantas de milho com a diminuição da resistência do solo à penetração de 0 a 0,20 m em Latossolo Vermelho de textura argilosa. Isso acontece porque a eficiência da planta na absorção da água do solo é influenciada pelo tamanho e distribuição espacial do sistema radicular. Assim, quando há uma maior densidade de raízes no solo, diminui a distância média que a água necessita se movimentar para chegar às raízes, reduzindo a suscetibilidade ao déficit hídrico em curtos períodos sem precipitação. Dessa forma, pode-se estimular o desenvolvimento radicular das plantas e reduzir os efeitos da compactação sobre a produtividade, recuperando a qualidade em processos físicos e biológicos atuantes em Sistema Plantio Direto (DEBIASE et al., 2010).

Os benefícios da descompactação apenas na linha de semeadura para redução da resistência do solo à penetração mecânica foram mantidos até o final do ciclo da soja (Figura 21). Nesta avaliação se observa que nas parcelas semeadas com haste sulcadora de ação profunda formou-se um perfil de menor resistência do solo à penetração junto à linha de semeadura, o qual atinge profundidade superior a 0,20 m, enquanto na área semeada com discos duplos, valores de resistência do solo à penetração superiores a 3 MPa são observados na camada entre 0,10 e 0,15 m. Com base nesses resultados é possível inferir que a utilização de hastes sulcadoras pode servir como alternativa à repetição periódica da escarificação do solo para obtenção de benefícios da descompactação mecânica do solo, proporcionando maior crescimento radicular.

Embora tenha proporcionado a melhoria da qualidade física do solo, a utilização de semeadora com haste sulcadora de ação profunda não incrementou a disponibilidade de água para as culturas em nenhuma camada avaliada (Figura 22). No entanto, ao promover a redução da resistência do solo

à penetração, esta prática de manejo pode facilitar o acesso das culturas a água, através do incremento no crescimento do sistema radicular.

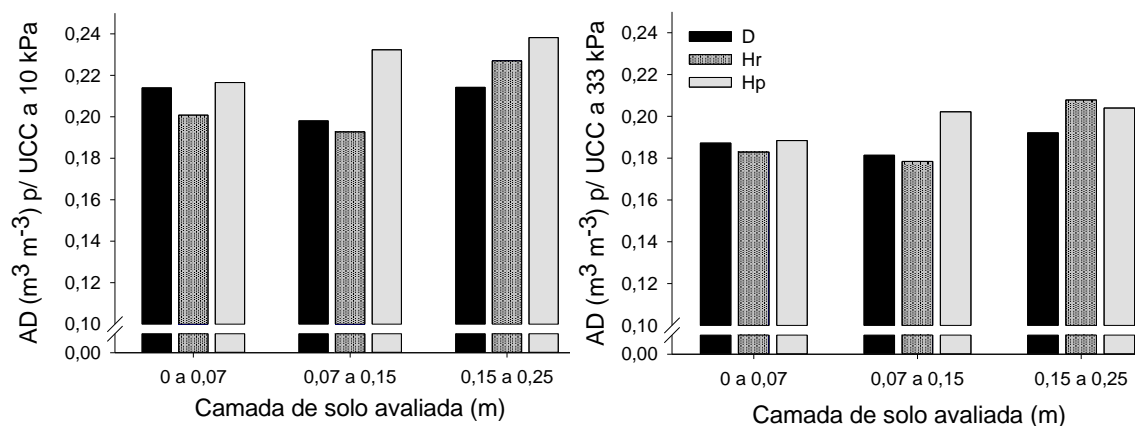


Figura 22 - Água disponível (AD) entre capacidade de campo (a 10 e a 33 kPa) e ponto de murcha permanente em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com semeadora equipada com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D).

A curva de retenção de água no solo (Figura 23) nas camadas de 0 a 0,07 m e de 0,15 a 0,25 m, a exemplo do que ocorreu para a porosidade do solo, também não apresentou diferenças entre os tratamentos. Já na camada de 0,07 a 0,15 m a curva de retenção de água refletiu exatamente o comportamento apresentado pela macroporosidade do solo, havendo maior retenção de água para menores tensões matriciais na área semeada com haste de ação profunda. Todavia, acima da tensão de 10 kPa, valor assumido para definição da capacidade de campo em solos tropicais (REICHARDT, 1988; MELLO et al., 2002), as curvas representativas dos três tratamentos apresentaram o mesmo comportamento. Isso implica na ausência de diferença para a água disponível determinada pela diferença da umidade na capacidade de campo (10 e 33 kPa) e no ponto de murcha permanente (1500 kPa) entre os tratamentos nas três camadas avaliadas.

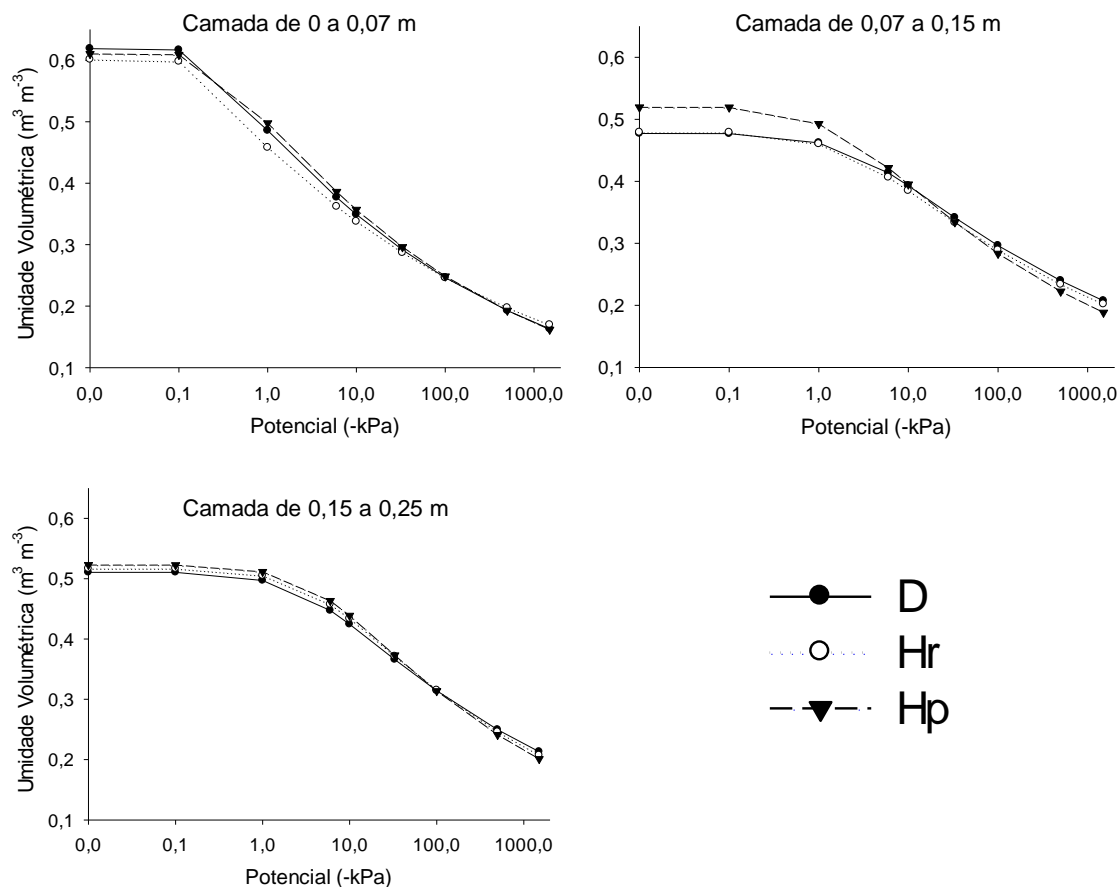


Figura 23 - Curva de retenção de água do Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D).

Como o tamanho do poro determina o potencial da água nele retido e, portanto, a tensão necessária para esvaziá-lo, o aumento da macroporosidade do solo, oriunda da utilização de haste sulcadora de ação profunda, embora proporcione maior umidade de saturação implica também em menor tensão necessária para a retirada de água. Logo essa maior umidade inicial não repercutirá, necessariamente, em maior disponibilidade de água no tratamento, conforme verificado por Chamen et al. (2015), os quais atentam que a drenagem mais rápida da água pode, inclusive, reduzir a água disponível às culturas.

Percebe-se, portanto, que o manejo do solo influencia a distribuição do tamanho dos poros e, desse modo, afeta o comportamento da água no solo, através da curva de retenção, a qual informa sobre a habilidade em armazenar

água. A habilidade do solo em conduzir água, determinada pela condutividade hidráulica, também é uma propriedade influenciada pela distribuição do tamanho dos poros e, com isso, pelas práticas de manejo empregadas.

Nesse estudo, a habilidade de conduzir água, quando considerada a condição de solo saturado, não foi diferenciada pela aplicação dos tratamentos para nenhuma camada avaliada (Tabela 9). No entanto, quando na condição de solo não saturado, a condutividade hidráulica do solo (Tabela 10) apresentou diferença entre os tratamentos tanto na camada superficial quanto na camada de 0,07 a 0,15 m. Entre os fatores que podem ter determinado a ausência de diferenças significativas para a condutividade hidráulica do solo saturado, destaca-se o elevado coeficiente de variação, associado ao tratamento estatístico aplicado aos dados. Resultados de condutividade hidráulica do solo saturado classicamente apresentam elevados coeficientes de variação, conforme observado Santos et al. (2012), os quais verificaram que a condutividade hidráulica apresentou alta variabilidade, com valor de coeficiente de variação de 261% e com razão média/mediana acima de 1. Jury et al. (1991) também verificaram que o coeficiente de variação para a condutividade hidráulica em solo saturado variou de 48 a 320%.

Assim, no presente estudo, os resultados obtidos para esta variável, além de apresentarem elevado coeficiente de variação, não seguiram a distribuição normal, mesmo após transformação dos dados, de modo que foram analisados pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Enquanto que, os resultados obtidos para a condutividade hidráulica do solo não saturado, mesmo com elevado coeficiente de variação, após a transformação raiz quarta, seguiram a distribuição normal, tendo sido analisados pelo teste de Tukey de comparação múltipla de médias. Logo, a avaliação a partir de dois métodos estatísticos, com poderes de teste diferentes, pode ter influenciado a obtenção de diferenças entre os tratamentos apenas para uma das variáveis avaliadas.

Tabela 9 - Condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D).

Tratamento	Camada de solo avaliada (m)					
	0 a 0,07		0,07 a 0,15		0,15 a 0,25	
	Média	SP <sup>1</sup>	Média	SP	Média	SP
D	597,11	22 <sup>ns</sup>	36,53	28 <sup>ns</sup>	5,58	21 <sup>ns</sup>
Hr	1058,61	29	15,22	18	17,68	22
Hp	647,20	27	50,07	32	14,27	35
CV (%)	90,2		68,9		77,6	

<sup>1</sup> SP: Soma dos Postos calculada no teste de Kruskal-Wallis.

<sup>ns</sup> Valores na coluna não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 10 - Condutividade hidráulica do solo não saturado ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistema plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D).

Tratamento	Condutividade hidráulica ( $\text{mm h}^{-1}$ )				
	10 kPa	33 kPa	100 kPa	500 kPa	1000 kPa
----- 0 a 0,07 m -----					
D	49,13 <sup>*</sup> b	39,48 <sup>*</sup> b	33,36 <sup>*</sup> b	7,29 <sup>*</sup> b	5,66 <sup>*</sup> b
Hr	297,14 a	261,59 a	217,18 a	54,53 a	42,71 a
Hp	242,75 a	202,90 ab	171,52 a	37,30 a	29,16 a
CV (%)	79,1	80,5	80,1	92,9	93,2
----- 0,07 a 0,15 m -----					
D	5,38 <sup>*</sup> b	4,92 <sup>*</sup> b	4,36 <sup>*</sup> b	1,35 <sup>*</sup> ab	1,08 <sup>*</sup> ab
Hr	1,95 b	1,78 b	1,60 b	0,49 b	0,39 b
Hp	38,31 a	32,64 a	28,43 a	6,21 a	4,94 a
CV (%)	140,3	142,5	140,7	135,8	135,9
----- 0,15 a 0,25 m -----					
D	3,40 <sup>ns</sup>	3,02 <sup>ns</sup>	2,60 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>
Hr	2,53	2,25	1,95	0,53	0,42
Hp	9,22	7,31	6,63	1,48	1,17
CV (%)	102,1	94,4	97,5	74,3	74,2

\* Valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Valores na coluna não diferem pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Após o processo de drenagem (solo não saturado), foi possível perceber que pequenas mudanças no potencial matricial, que ocorrem próximo à saturação, podem causar uma variação considerável na condutividade hidráulica. Esse comportamento pode ser visualizado ao comparar os valores de condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 9) com a condutividade hidráulica do solo nas tensões de 10, 33, 100, 500 e 1000 kPa (Tabela 10). Com base nessa comparação, percebe-se que na camada superficial ocorre redução de 91,77, 71,93 e 62,49% da condutividade hidráulica do solo saturado para a condutividade hidráulica na tensão de 10 kPa nos tratamentos D, Hr e Hp, respectivamente. Nas tensões subsequentes, ou seja, de 10 para 33 kPa, 33 para 100 kPa etc. também ocorre redução da condutividade hidráulica do solo, todavia, essa é menos pronunciada do que aquela que ocorre para as tensões próximas à saturação. Esses resultados reforçam a elevada sensibilidade presente entre a condutividade hidráulica do solo e o conteúdo de água no solo, conforme verificado por Libardi e Melo Filho (2006) e por Falleiros et al. (1998), sendo que estes verificaram que uma variação de 1 a 2% no conteúdo de água pode influenciar a condutividade hidráulica do solo em valores superiores a 170%.

Isso acontece porque quando o solo se encontra saturado, todos os poros estão preenchidos e conduzindo água, sendo sua condutividade máxima nessa condição. Quando o solo se torna não saturado, alguns poros ficam preenchidos por ar e a condutividade hidráulica decresce rapidamente. Como ao longo do ciclo das culturas as mesmas estarão expostas com mais frequência a condições de solo não saturado e, portanto, ficarão dependentes da condutividade hidráulica nessa condição, torna-se importante avaliar essa propriedade no solo em estudo, bem como, desenvolver estratégias de manejo que permitam sua otimização dentro do sistema de cultivo.

Nesse estudo, a avaliação da condutividade hidráulica do solo não saturado diferenciou o efeito dos tratamentos, tanto na camada superficial quanto na camada de 0,07 a 0,15 m. Para a camada superficial a utilização da haste sulcadora tanto atuando a 0,10 m (Hr) quanto a 0,15 m (Hp), implicou em maior condutividade hidráulica quando comparada ao mecanismo de discos duplos. Esse resultado pode ser justificado pela maior mobilização superficial do solo, conforme observado por Schlosser et al. (1999), Bordignon (2005) e Mion e Benez (2008), os quais indicaram maior mobilização superficial com a

adoção de hastes sulcadoras quando comparado com sulcador apenas com discos duplos defasados, mesmo com a haste sulcadora atuando a diferentes profundidades.

Para a camada de 0,07 a 0,15 m, a exemplo do que foi verificado para a porosidade e resistência do solo a penetração, a utilização de semeadora com haste sulcadora de ação profunda foi mais eficiente em romper a camada compactada, beneficiando a condutividade hidráulica do solo não saturado. Esses resultados reforçam as razões que tem difundido o uso de sulcadores do tipo hastes para semeadura em áreas de solos argilosos, como alternativa para romper a camada superficial mais compactada, conforme enfatizado por Araújo et al. (1999) para solos do estado do Paraná.

Os benefícios do incremento na condutividade hidráulica do solo podem possibilitar também a redução do processo erosivo em solos manejados sob SPD. Isso porque o processo de infiltração de água no solo, que reduz o escoamento superficial, é dependente da capacidade do solo em transportá-la para camadas mais profundas. Assim, o aumento da condutividade hidráulica do solo implica em maior taxa de infiltração de água no solo e redução do escoamento superficial e, portanto, redução da suscetibilidade do solo ao processo de erosão hídrica.

Na avaliação da taxa de infiltração de água os tratamentos apresentaram comportamento semelhante ao que pode ser observado na Figura 24, a qual apresenta os resultados de uma repetição. Como houve tendência a estabilização da taxa de infiltração de água após duas horas de teste o valor obtido ao final de cada avaliação foi assumido como taxa de infiltração estável ( $TIE_{2h}$ ) e utilizado para comparação dos tratamentos (Figura 25).

Através dessa avaliação é possível perceber que, após duas horas de teste, a taxa de infiltração de água no solo ( $TIE_{2h}$ ) foi duas vezes e meia maior na área semeada com sulcador de haste de ação profunda quando comparada a haste sulcadora de ação rasa ou aos discos duplos defasados, os quais apresentaram resultados muito similares. Esse mesmo comportamento se repetiu também para a lâmina de água infiltrada ao final de 0,5, 1 e 2 horas de avaliação (Figura 26), a qual foi sempre superior no tratamento com haste sulcadora de ação profunda.

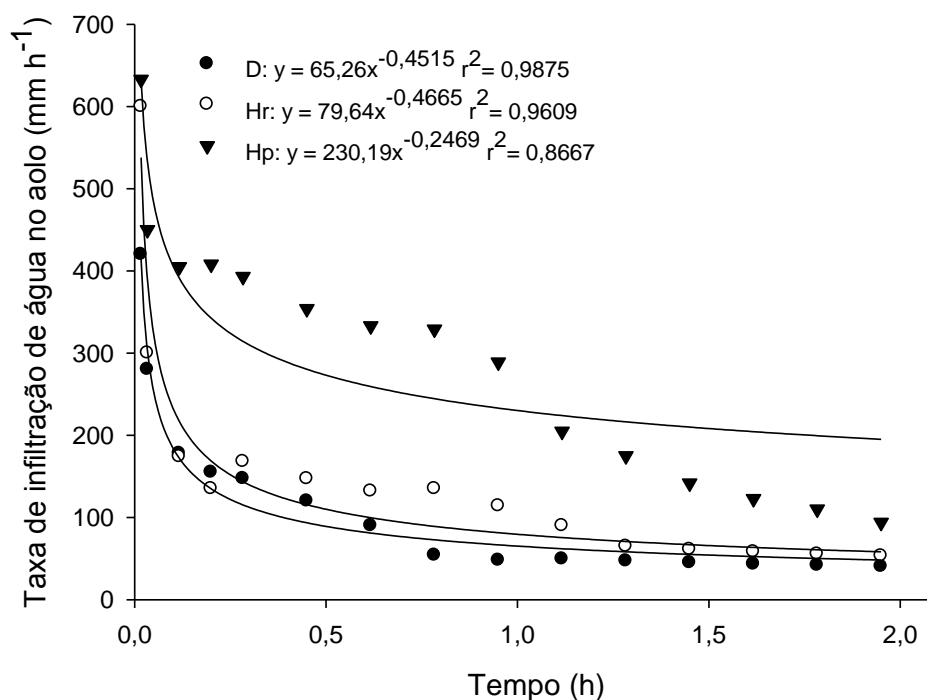


Figura 24 - Taxa de infiltração de água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D).

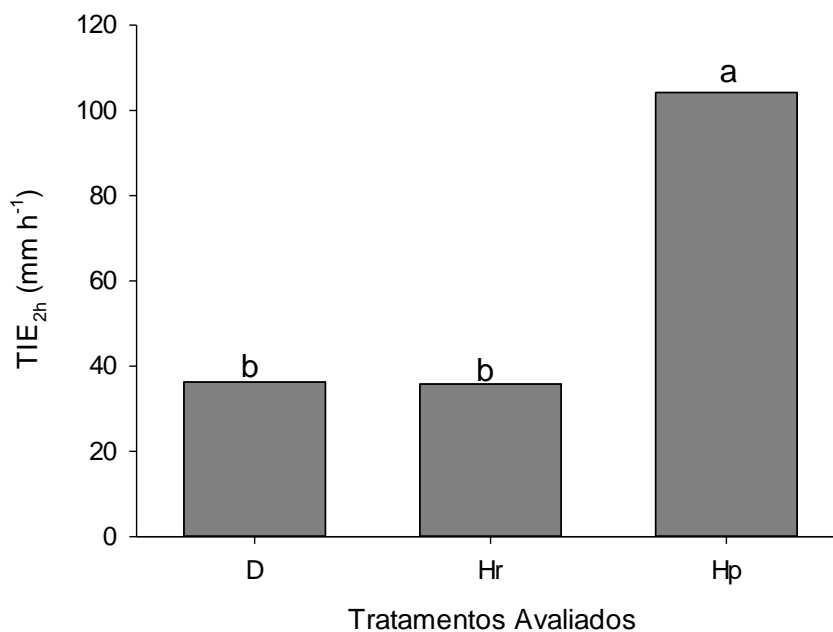


Figura 25 - Taxa de infiltração de água no solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) ao final de duas horas de avaliação ( $\text{TIE}_{2h}$ ) em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). \*Colunas com mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.



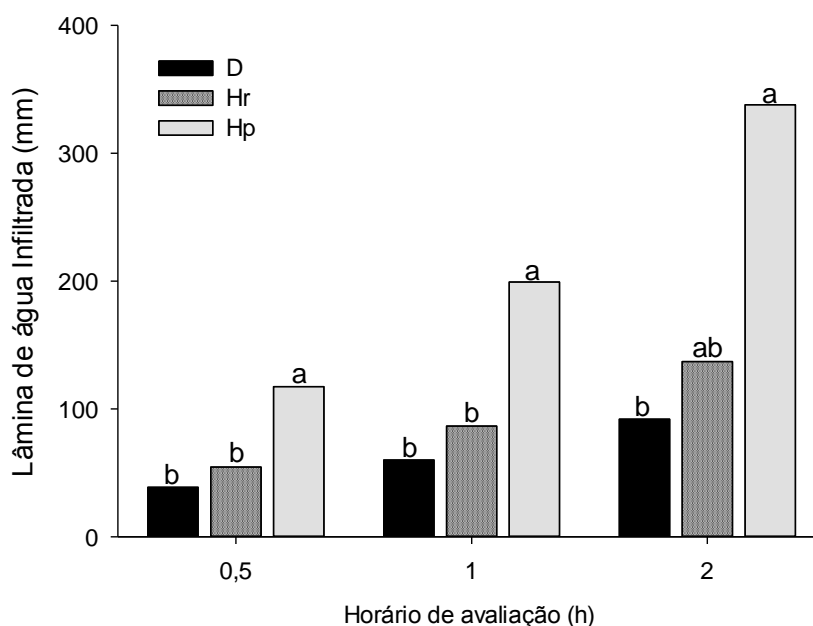


Figura 26 - Lâmina de água infiltrada (mm) ao final de 0,5, 1 e 2 horas de avaliação em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto semeado com disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,10 m (Hr), disco de corte+haste sulcadora atuando a 0,15 m (Hp) e com discos duplos defasados atuando a 0,07 m (D). \*Colunas com mesma letra minúscula no mesmo tempo de avaliação não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A partir desse resultado percebe-se que a maior profundidade de trabalho das semeadoras com hastes sulcadoras promove o rompimento da camada compactada aumentando a capacidade de infiltração de água no solo, com benefícios muito similares aos obtidos para a escarificação do solo. Além disso, a prática possibilita a manutenção de resíduos na superfície do solo, provenientes de restos de cultura, sendo também uma forma de diminuir a erosão hídrica, impedindo, em uma fase inicial, a desagregação da estrutura do solo devido ao impacto das gotas de chuvas.

Ao reduzir a resistência do solo à penetração mecânica e aumentar a porosidade do solo, condutividade hidráulica e taxa de infiltração de água no solo em comparação com a haste sulcadora de ação rasa e os discos duplos defasados, a haste sulcadora de ação profunda sustenta a hipótese de que o

emprego de elementos rompedores de solo, projetados para atuar junto à camada compactada, em semeadoras de plantio direto, promove mitigação do estado de compactação do solo. Assim, dispositivos dessa natureza podem auxiliar no desenvolvimento de estratégias para mitigação do estado de compactação da camada superficial do solo das áreas manejadas sob sistema plantio direto na região de clima subtropical úmido do Brasil.

## 7 CONCLUSÕES

- I - A escarificação mecânica esporádica do Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa, manejado sob sistema plantio direto, não comprometeu a estabilidade estrutural do solo indicada pela estabilidade dos agregados em água.
- II – O efeito residual da escarificação mecânica do Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa, manejado sob sistema plantio direto, varia conforme a propriedade física do solo avaliada:
- a) Para as propriedades físicas densidade, porosidade total e macroporosidade, o efeito residual foi mantido apenas por uma safra agrícola;
  - b) Para a propriedade física de resistência mecânica do solo à penetração o efeito residual perdurou por 18 meses;
  - c) Para as propriedades físico-hídricas de condutividade hidráulica do solo e infiltração de água no solo, o efeito residual, embora tenha sido mais significativo no primeiro ano posterior a descompactação, foi mantido até 24 meses após a escarificação.
- III - Independentemente da propriedade físico-hídrica do solo avaliada no Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa manejado sob sistema plantio direto, não há efeito residual da escarificação mecânica para períodos superiores há dois anos.
- IV – A utilização de semeadoras com hastes sulcadoras promove o rompimento da camada compactada com benefícios similares aos obtidos pela escarificação mecânica do solo. Todavia, para que esse potencial de descompactação se expresse há necessidade de regular o sulcador para atuar junto à camada compactada.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização desse estudo indicou que os benefícios da escarificação mecânica do solo podem ser anulados em período inferior a meio ano ou serem mantidos por até 24 meses, conforme a propriedade física do solo avaliada. Dessa forma, antes de realizar ou repetir a intervenção mecânica com escarificador em área manejada sob sistema plantio direto consolidado, deve-se fazer um estudo minucioso no sentido de conhecer a existência de propriedades limitantes às funções agronômicas e ambientais do solo e, somente depois disso, se necessário, optar pela escarificação mecânica do solo.

A escarificação mecânica do solo deve ser usada de maneira cautelosa, uma vez que se trata de uma operação de alto custo, devido ao consumo energético, investimento em equipamentos, etc., que se multiplicam com o aumento da profundidade operacional. Além do que, a mobilização frequente do solo para manutenção de efeitos benéficos da escarificação propicia aumento dos riscos de compactação do solo em profundidade e pode sujeitar o solo a uma subsequente compactação mais intensa.

Para compreender melhor a influência da compactação e a manutenção dos benefícios da escarificação no solo sob sistema plantio direto, sugere-se a realização de estudos com métodos não destrutivos, como a tomografia. Esses métodos podem auxiliar no entendimento da estrutura e funcionalidade do sistema poroso do solo, permitindo maior conhecimento sobre os reais danos da compactação e reais benefícios da escarificação para o rendimento das culturas.

No que tange ao rendimento das culturas, há necessidade de promover estudos de modelagem do impacto da compactação na produtividade das culturas que permitam desenvolver um sistema de apoio à decisão sobre a necessidade de realizar intervenções mecânicas. Esse sistema deve integrar maior número de dados para prever impactos da compactação no rendimento das culturas e, assim, contribuir para o uso mais racional da escarificação em sistemas agrícolas.

A adoção de semeadoras equipadas com hastes sulcadoras pode ser uma alternativa para a descompactação do solo, pois promove efeitos benéficos similares àqueles oriundos da escarificação mecânica. Assim, ao possibilitar o crescimento radicular no local específico em que foi realizada a descompactação, diminuirá o tempo entre a mobilização do solo e o desenvolvimento vegetal, o que pode trazer efeitos positivos para a agregação do solo e, com isso, retardar a reconsolidação do solo mobilizado. No entanto, ainda devem ser realizados estudos de melhoria dos elementos sulcadores, no sentido de desenvolver equipamentos robustos que permitam a ação em profundidades maiores sem, contudo, causar excessiva mobilização superficial do solo, demanda de tração e consumo de combustível. Deve-se, portanto, melhorar aspectos relativos ao ângulo de ação e espessura do mecanismo rompedor do solo, aumentando o seu potencial de utilização em semeadoras de plantio direto.

Diante disso, percebe-se que o conhecimento do tempo de reconsolidação do solo após intervenção mecânica e a determinação da melhor profundidade de ação das hastes sulcadoras, obtidos nesse estudo, são apenas pequenos passos para o desenvolvimento de estratégias de mitigação do estado de compactação do solo, uma vez que estas aliviam, mas não solucionam efetivamente o problema. Para a efetiva melhoria da qualidade físico-hídrica do solo em SPD na região de clima subtropical úmido do Brasil ainda há lacunas demandantes de soluções tecnológicas, as quais deverão contemplar o modelo de produção como um todo. Para tanto, é imprescindível a aplicação efetiva dos já conceituados, porém pouco consagrados fundamentos do sistema plantio direto, garantindo assim, aporte de material orgânico ao solo em quantidade, qualidade e frequência compatíveis com a demanda biológica do solo.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A GRANJA. **Falta de chuva prejudica soja no RS**. Fev. de 2014. Disponível em: <http://agranja.com/index/noticias/9687/falta+de+chuva+prejudica+soja+no+rs>.

Acesso dia 20 de dezembro de 2014.

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, maio/jun., 2004.

ALAOUI, A. et al. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 115–116, p. 1–15, Oct./Nov., 2011.

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.

ALLAIRE, S. E. et al., Measurement of gas diffusion through soils: comparison of laboratory methods. **Journal of Environmental Monitoring**, Cambridge, v. 10, p. 1326-1336, Sep., 2008.

ÁLVAREZ, C.R. et al. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. **Ciencia del Suelo**, Buenos Aires, v. 27, n. 2, p. 159-169, ago./dez., 2009.

ANKENY, M.D et al. Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurement. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.54, n° 3, p.837-840, May, 1990.

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, 1999.

ATWELL, B.J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering: III. Fate of carbon transported to the root structure. **New Phytologist**, Cambridge, v.115, p.43-49, 1990.

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

BATEY, T.; MCKENZIE, D.C. Soil compaction: identification directly in the field. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 22, n. 2, p. 123–131, June, 2006.

BAVOSO, M.A. et al. Resiliência física de dois Latossolos Vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n° 6, p.1892-1904, nov./dez., 2012.

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. O. 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.

BESCANSA, P. et al. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.87, p.19-27, May, 2006.

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./mar., 2001.

BEUTLER, A. N. et al. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1591- 1600, nov., 2008.

BIRKAS, M. **Environmentally sound adaptable tillage**. Akademia Kiado, Budapest, Hungary. 2008.

BLANCO, H.; LAL, R. Soil resilience and conservation. In: BLANCO, H.; LAL, R., eds. **Principles of soil conservation and management**. Columbus, Springer Science Business Media B.V., 2010. p.15-33.

BOGNOLA, I. A. et al. **Estabilidade de agregados e DMG determinados por via úmida e via seca, em Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio de E.**

**dunnii**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 1998. 3 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Comunicado técnico, 4)

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.

BORDIGNON, J. **Projeto, construção e desenvolvimento de transdutores para medição de esforços em semeadoras-adubadoras**. 2005. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

BORGES, G.O. Resumo histórico do plantio direto no Brasil. In: **PLANTIO direto no Brasil**. Passo Fundo, Aldeia Norte, Embrapa-CNPT/Fundacep Fecotrig/Fundação ABC- 1993. p.13-18.

BOTTA, G.F. et al. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus L.*) yields. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p. 64-172, Dec., 2006.

BUSSCHER, W.J. et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.43, n.3-4, p.205-217, Nov., 1997.

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 Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 49-57, Oct., 2002.

CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v35, n.4, p.813-819, jul./ago., 2005.

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.

CANAL RURAL. **Falta de chuva deve reduzir safra de milho no Rio Grande do Sul, mas pode valorizar preço do grão**. Dez. de 2011. Disponível em: <http://www.canalrural.com.br/noticias/agricultura/falta-chuva-deve-reduzir-safra-milho-rio-grande-sul-mas-pode-valorizar-preco-grao-2188> . Acesso dia 20 de dezembro de 2014.



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, p.185-196, Aug., 2000.

CARDOSO, F.P. et al. Estado da arte do plantio direto no Brasil em 2014. In:14° Encontro Nacional de Plantio Direto na Palha. **Anais...** Bonito – MS. 12 a 14 de Agosto de 2014.

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.

CAVALCANTE, E.G.S. et al. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 394-400, mar./abr., 2007.

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.

CEPIK, C.T.C. et al. Força de tração e mobilização do solo por hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.5, p.561-566, maio, 2010.

CHAMEN, T. W.C. et al. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 146, p. 10–25, Mar., 2015.

CHAMEN, W.C.T. **The Effects of Low and Controlled Traffic Systems on Soil Physical Properties**, Yields and the Profitability of Cereal Crops on a Range of Soil Types. PhD Thesis. School of Applied Sciences, Cranfield University, Bedfordshire, UK, 290 p., 2011.

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.

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

COLLARES, G.L. et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n° 3, p. 933-942, maio/jun., 2008.

COLONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n° 4, p.1399-1407, jul./ago., 2008.

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° 6, p.1254-1261, jun., 2009.

COOPLANTIO - Cooperativa dos Agricultores de Plantio Direto. **Plantio direto** - Reduzir custos de produção, melhorar a produtividade e preservar os recursos naturais. 2012. Disponível em: <http://www1.cooplantio.com.br/quem-somos/a-cooplantio.aspx>. Acesso: 21 de dezembro de 2012.

COOKSON, W.R.; MURPHY, D.V.; ROPER, M.M. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 3, p. 763–777, Mar., 2008.

DEBIASE, H. et al. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.6, p.603-612, jun., 2010.

DEFRA. **Cross compliance guidance for soil management**. Defra Publications, London. 2005. 76p.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.703-709, jul./set., 1999.

DENARDIN, J.E. et al. **Evolução da área cultivada sob sistema plantio direto no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 32p. (Embrapa Trigo. Documentos, 29).

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, N.D. Sistema agrícola produtivo: fator de promoção da fertilidade integral do solo. In: Workshop Sobre

Plantio Direto no Estado de São Paulo. **Anais...** Campinas, 2005. (Org) DECHEN, S.C.F. Piracicaba: Fundação Agrisus; FEALQ; Campinas: Instituto Agrônômico, 2005. p.156-167.

DENARDIN, J.E. et al. Sistema plantio direto: fator de potencialidade da agricultura tropical brasileira. In: ALBUQUERQUE, A.C.S.; SILVA, A.G., ed. **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v.1. p.1251-1273.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A. 15 de abril dia nacional da conservação do solo: a agricultura desenvolvida no Brasil é conservacionista ou não? **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p.10-15, jan./abr., 2011.

DERPSCH, R. et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 2010. Disponível em: <http://www.ijabe.org>.

DIAS, C. **Simplificação do Plantio Direto reduz eficiência da lavoura**. Portal de Notícias Embrapa. 18 de julho de 2014. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1909275/simplificacao-do-plantio-direto-reduz-eficiencia-da-lavoura>>. Acesso: 12 de fevereiro de 2015.

DOLAN, M.S. et al. Corn phosphorus and potassium uptake in response to soil compaction. **Agronomy Journal**, Madison, v.84, p.639-642, July, 1992.

DRESCHER, M. S. et al. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1713-1722, set./out., 2011.

DRESCHER, M.S. et al. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1836-1844, nov./dez., 2012.

ECKELMANN, W. **Common Criteria for Risk Area Identification according to Soil Threats**. European Soil Bureau Research Report No.20, EUR 22185 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 94p. 2006.

ELTZ, F.L.F., PEIXOTO, R.T.G., JASPER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um latossolo bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p.259-267, 1989.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 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.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

FALLEIROS, M.C. et al. Spatial and temporal variability of soil hydraulic conductivity in relation to soil water redistribution, using an exponential model. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, p. 279-285, May, 1998.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP. **Área de plantio direto no Brasil**. Disponível em <[http://www.febrapdp.org.br/download/Ev\\_area\\_pd\\_brasil.pdf](http://www.febrapdp.org.br/download/Ev_area_pd_brasil.pdf)>. Acesso em dezembro de 2014.

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. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 507-514, jul./set., 1999a.

FERREIRA, M.M; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 515-524, jul./set., 1999b.

FERREIRA, M.M. Caracterização física do solo. In: LIER, Q. de J. Van **Física do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa/MG. 298 p., 2010.

FERRERAS, L.A. et al. Parâmetros físicos del suelo em condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n.1, p.161-170, jan., 2001.

FREDDI, O. S. et al. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 113-121, jan./abr., 2006.

FREDDI, O.S. et al. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I – Características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n°4, p. 793-803, jul./ago., 2009.

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.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soilwater suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 32, p. 180—186, Mar., 1968.

GREENWAY, H.; ARMSTRONG, W.; COLMER, T.D. Conditions Leading to High CO<sub>2</sub> (>5 kPa) in Waterlogged–Flooded Soils and Possible Effects on Root Growth and Metabolism. **Annals of Botany**, Oxford, v. 98, p. 9–32, July, 2006.

GUADAGNIN, C.A.; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S. Taxa de infiltração estável da água ao longo de transeções em solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota – RS. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.13, n.3, p. 337-342, jul./set., 2007.

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.

GUBIANI, P.I. et al. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n.6, p. 1502-1511, nov./dez., 2013.

HAISE, H.R., HAAS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity related to 1/3 atmosphere percentage and minimum point related to 15 and 26 atmosphere percentages. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 10, p.20-25, 1955.

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, p. 109-119, Dec., 2002.

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.

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

HORN, R.; PETH, S. Soil structure formation and management effects on gas emission. **Biologia**, Bratislava, v. 64, p. 449-453, June, 2009.

HORN, R.; WAY, T.; ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n° 1-2, p. 101-106, Oct., 2003.

HUBERT, F. et al. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. **Geoderma**, Amsterdam, v. 142, p.226-236, Nov., 2007.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro, RJ, 316 p., 2° ed., 2007.

JAMISON, V.C. Changes in air water relationships due to structural improvement of soils. **Soil Science**, Weinheim, v. 76, p. 143-151, 1953.

JIN, H. et al. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 493-502, June, 2007.

JONG VAN LIER, Q. de.; D. DOURADO NETO, D.; METSELAAR, K. Modeling of transpiration reduction in van Genuchten–Mualem type soils. **Water Resources Research**, Washington, v. 45, p. 1-9, Feb., 2009.

JURY, W.A.; GARDNER, W.R., GARDNER, W.H. **Soil physics**. 5 ed. Ney York: John Wiley; Sons, 1991. 328p.

KAISER, D.R., et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n°4, July/Aug.,2009.

KAISER, D. R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. 2010. 151p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo Solo -

Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: CURI, et al., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.1-54. 2003.

KELLER, T. et al. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 128, p. 61–80, Apr., 2013.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L., eds. **Methods of soil analysis**. Pat 1. Madison, American Society of Agronomy, p. 499-509. 1965.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 5, nº 1, p. 17-40, jan./jul., 1997.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.5, n.1, p. 26-32, jan./jun., 2006.

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

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.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, jul./set., 2006.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662.

KMOCH, H.G.; H. HANUS. **Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft**; Z. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, Band 111, S. 1-10. 1965.

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.

LEONARDO, H.C.L. **Indicadores da qualidade do solo e água para a avaliação do uso sustentável da microbacia hidrográfica do rio Passo Cue, região oeste do Estado do Paraná**. 2003. 121p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 2003.

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

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 2005. 335 p.

LIBARDI, P.L.; MELO FILHO, J.F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n° 2, p. 197-206, mar./abr., 2006.

LIPIEC, J. et al. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19:307-317, Feb., 1991.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, n. 1-2, p.107-136, Sep., 2003.

LOPES, A.S. et al. **Sistema plantio direto**: bases para o manejo da fertilidade do solo. ANDA: Associação Nacional para Difusão de Adubos. 115 p., 2010

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, supl.spe, p. 741-747, 2008.



MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Agrícola e Pecuário 2013/ 2014**. 2013. 126 p. Disponível em: <[www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/acs/PAP20132014-web.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/acs/PAP20132014-web.pdf)>. Acesso: 15 de fevereiro de 2015.

MANUWA, S.I. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 399–405, May, 2009.

MARCOLIN, C.D.; KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, Apr./June, 2011.

MELLO, C. R. et al. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.26, p.835-841, jul./ago., 2002.

MELO, G.W.; MEURER, E.J.; PINTO, L.F.S. Fontes de potássio em solos distroférricos cauliniticos originados de basalto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, nº 4, p. 597-603, jul./ago., 2004.

MION, R.L.; BENEZ, S.H. Esforços em ferramentas rompedoras de solo de semeadoras de plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1594-1600, set./out., 2008.

MIRANSARI, M. et al. Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays* L.) nutrient uptake. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 282–290, May, 2009.

MODOLO, A.J. et al. Avaliação do desempenho de duas semeadoras-adubadoras de precisão em diferentes velocidades. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.12, n.3, p.563-7, out./dez., 2004.

MORAES, M. T. **Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema Plantio direto e sua relação com a rotação de Culturas**. 205 f., Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, p. 512-522, June, 1976.

NICOLOSO, R.S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n° 6, p. 1723-1734, dez., 2008.

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

NOTÍCIAS AGRÍCOLAS. **No RS, quebra na safra de milho pode chegar a 30% com falta de chuva.** Disponível em: <http://www.noticiasagricolas.com.br/videos/entrevistas/133274-entrevista-confira-a-entrevista-com-dilermando-rostirolla---produtor-rural.html#.VJVzDcmY> . Acesso dia 20 de dezembro de 2014.

NUNES, M.R. et al. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.49, n.7, p.531-539, jul., 2014.

OLESEN, J.E., MUNKHOLM, L.J. Subsoil loosening in a crop rotation for organic farming eliminated plough pan with mixed effects on crop yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, p. 376–385, June, 2007.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. **Las maquinas agrícolas y su aplicación**. 5.ed. Madrid, Mundi-Prensa, 1995. 465p.

O'SULLIVAN, M.F., ROBERTSON, E.A.G., HENSHALL, J.K. Shear effects on gas transport in soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, p. 73–83, Feb., 1999.

OSUNBITAN, J. A.; OYEDELE, D. J.; ADEKALU, K. O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigéria. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, p.57-64, May, 2005.

RASIAH, V.; AYLMORE, L. A. G. Characterizing the changes in soil porosity by computer tomography and fractal dimension. **Soil Science**, Weinheim, v.163, p.203-211, 1998.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo - água - atmosfera**. Fundação Cargill, Campinas, 1985. 466p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.211-216, 1988.

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.

REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 310-319, mar., 2009.

REICHERT, J. M. et al. Mecânica do Solo. In: **Física do Solo**, Van Lier, Q.J. (ed.) – Viçosa, MG: SBCS, p.29-102, 2010.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez., 2006.

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

REIS, E.F. et al. Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 777- 786, set./out., 2006.

ROJAS, C. A. L.; LIER, Q. J. Van. Alterações físicas e hídricas de um podzólico em função de sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.5, p.105-115, jan./jun., 1999.

ROSA, D.P. da **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SAID, H.M. Effect of tillage implements on the state of compaction in different soils. **Egyptian Journal of Soil Science**, Cairo, v. 43, p. 91–107, 2003.

SANTOS, H.G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3º ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SAS INSTITUTE INC. **SAS/STAT® 9.22 User's Guide**. Cary, NC: SAS Institute Inc, 2010. 8445 p.

SANTOS, K.S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.828–835, ago., 2012

SCHJØNNING, P., HECKRATH, G., CHRISTENSEN, B.T. **Threats to soil quality in Denmark**: A review of existing knowledge in the context of the EU Soil Thematic Strategy. DJF Report Plant Science n° 143, The Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University. 2009.

SCHLOSSER, J.F. et al. Desempenho de três mecanismos sulcadores de semeadura na presença de diferentes culturas destinadas a cobertura de inverno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.19, n.1, p.64-70, set., 1999.

SECCO, D.; REINERT, D.J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelhoescuro sob PD. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.16, n.3, p.52-61, mar., 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, jan./fev., 2009.

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

SILVA, S.G.C. et al. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n°2, p. 547-555, Apr., 2012.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p.842-847, out./dez., 2006.

SIQUEIRA, R. Milho: semeadoras-adubadoras para sistema plantio direto com qualidade. In: XXVII Congresso Nacional de Milho e Sorgo. **Anais...** Londrina-PR, set., 2008.

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.

SPOOR, G. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 22, n. 2, p. 113-122, June, 2006.

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

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2º ed., Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2008. 222p.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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, maio/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.

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.

TAVARES FILHO, J. et al. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n°2, p. 393-399, jun., 1999.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A.A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p. 487-494, mar./abr., 2008.

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.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.33, p. 41–163, June, 1982.

TOLLNER, E. W.; HARGROVE, W. L.; LANGDALE, G. W. Influence of conventional and no-tillage practices on soil physical properties in the southern Piedmont. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.39, n° 1, p.73-76, Jan./Feb., 1984

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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p. 223-232, Oct., 1999.

TROEH, F. R. et al. Gaseous diffusion equations for porous materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 27, p. 239-253, Apr., 1982.

UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v.86, n. 5, p.759-766, Sep., 1994.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept., 1980.

VÁZQUEZ, V. E.; GONZÁLEZ, P.A. Influencia del tipo de laboreo del suelo sobre el microrrelieve de un Ferralsol. In: IX Conferencia Española de Biometria La Coruña, **Anais..** 28-30 de mayo de 2003.

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./ago., 2008.

VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n° 6, p.1271-1280, nov./dez., 2007.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal America Society of Agronomy**, Madison, v. 28, p.337-351, May, 1936.

WHITMORE, A.P. et al. Estimating soil strength in the rooting zone of wheat. **Plant Soil**, v. 339, p. 363–375, Oct., 2010.