

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**QUALIDADE FÍSICA DE LATOSSOLO VERMELHO EM FUNÇÃO DE  
PLANTAS E CARGAS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO COM E SEM  
ESCARIFICAÇÃO**

**Altamir Mateus Bertollo**  
**(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**QUALIDADE FÍSICA DE LATOSSOLO VERMELHO EM FUNÇÃO DE  
PLANTAS E CARGAS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO COM E SEM  
ESCARIFICAÇÃO**

ALTAMIR MATEUS BERTOLLO

Engenheiro Agrônomo (UFSM)  
Mestre em Agronomia – Agricultura e Ambiente (UFSM)

Tese apresentada como um dos  
requisitos à obtenção do  
Grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil  
Maio de 2018

### CIP - Catalogação na Publicação

Bertollo, Altamir Mateus

Qualidade física de Latossolo vermelho em função de plantas e cargas em Sistema Plantio Direto com e sem escarificação / Altamir Mateus Bertollo. -- 2018.

117 f.

Orientador: Renato Levien.

Coorientador: Henrique Debiasi.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. compactação do solo. 2. rotação de culturas. 3. tomografia computadorizada. I. Levien, Renato, orient. II. Debiasi, Henrique, coorient. III. Título.

ALTAMIR MATEUS BERTOLLO  
Engenheiro Agrônomo - UFSM  
Mestre em Agronomia - UFSM

## TESE

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

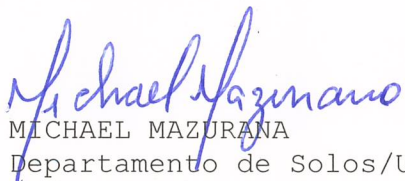
### **DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO**

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Faculdade de Agronomia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 25.05.18  
Pela Banca Examinadora



RENATO LEVIÉN  
Orientador-PPG Ciência do Solo

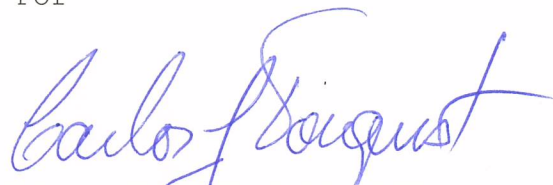


MICHAEL MAZURANA  
Departamento de Solos/UFRGS

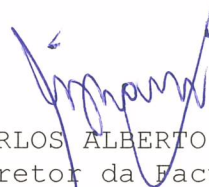
MADALENA BOENI  
Secretaria Estadual da  
Agricultura, Pecuária e Irrigação

VANDERLEI RODRIGUES DA SILVA  
Departamento de Ciências Agronômicas  
e Ambientais/UFSM

Homologado em: 21.05.19  
Por



CARLOS GUSTAVO TORNQUIST  
Coordenador do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo



CARLOS ALBERTO BISSANI  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

Dedico aos meus pais Adalto  
Bertollo e Algenir Bertollo

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, por iluminar o meu caminho e pelas oportunidades que tem me proporcionado.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela possibilidade de cursar o Doutorado.

Ao professor Dr. Renato Levien, pela orientação, confiança, incentivo e apoio prestado no decorrer do Doutorado, pela compreensão em autorizar a continuidade do doutoramento conciliado com o trabalho externo ao programa.

Aos demais professores e à coordenação do PPGCS, pelo empenho e dedicação em transmitir o conhecimento, auxiliando-nos no desenvolvimento profissional e pessoal. Também aos funcionários do PPGCS, em nome do Jader, sempre prestativo.

Aos pesquisadores da Embrapa Soja e Embrapa Instrumentação Agropecuária, Dr. Henrique Debiasi, Dr. Julio Cesar Franchini e Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz, pela acolhida, orientação e auxílio no desenvolver do trabalho, tanto na área experimental quanto nos laboratórios da Embrapa.

Aos funcionários da área de manejo do solo da Embrapa Soja, Agostinho, Elizeu, Dudinha, Ildefonso e João Macedo, pelo suporte técnico-operacional para realização da implantação e condução dos cultivos. Também aos técnicos Donizete, Gustavo, Mariluci e Paulo Lasso, pelo auxílio na coleta das amostras e execução das análises laboratoriais.

Aos estagiários da Embrapa Soja, Macgaiver, Kenedy, Iza Zina, Victor, Antônio (Tchô), Maiara, Leonardo, Gustavo e Reinaldo, pela parceria nas coletas e análises das amostras e acolhida em Londrina.

Aos amigos e colegas do laboratório de Relação Solo Máquina, Michael, Moacir, Zulpo, Tiago, Marcelo, Jefe, Hyran, Gabi, Thais, Thaianie, Julio e Fortes, pela colaboração na execução das atividades, pela parceria e amizade.

Em especial aos meus pais, Adalto Bertollo e Algenir Bertollo, pelo incentivo à educação, por acreditarem em meu potencial, nunca deixando que

eu desistisse de alcançar os objetivos. Também aos meus irmãos, Adalgir e Gilvan, pelo apoio e incentivo.

A Tássia, pelo amor, companheirismo, compreensão e apoio.

Aos colegas da Secretaria Estadual de Agricultura, Pecuária e Irrigação.

Enfim, a todos aqueles que fizeram e fazem parte desta caminhada, contribuindo direta ou indiretamente para que eu vencesse esta importante etapa.

A todos vocês o meu MUITO OBRIGADO!

# QUALIDADE FÍSICA DE LATOSSOLO VERMELHO EM FUNÇÃO DE PLANTAS E CARGAS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO COM E SEM ESCARIFICAÇÃO<sup>1</sup>

**Autor:** Eng. Agr. MSc. Altamir Mateus Bertollo

**Orientador:** Prof. Dr. Renato Levien

**Co-orientador:** Dr. Henrique Debiasi

## RESUMO

O uso agrícola dos solos modifica as suas propriedades físicas. O tráfego de máquinas é uma das principais causas de alterações na distribuição do espaço poroso. O uso de espécies vegetais contribui na estruturação do solo, aporte de resíduos na superfície e no perfil do solo e ciclagem de nutrientes com a sua decomposição. Para avaliar a capacidade de mitigação da compactação do solo pelo uso de plantas de cobertura, implantou-se experimento com o uso de espécies vegetais em níveis de compactação de Latossolo Vermelho, realizando-se três estudos. No primeiro, aborda-se as alterações das propriedades físicas do solo pelo uso de diferentes espécies vegetais na recuperação da estrutura do Latossolo. Para tanto, coletou-se amostras indeformadas de solo entre 2013 e 2015, durante o cultivo da soja. Diagnosticou-se que o tráfego de máquinas agrícolas ocasionou aumento na densidade, resistência à penetração e microporosidade, com redução na macroporosidade e porosidade total. Ainda, o uso de plantas de cobertura durante dois anos auxiliou na reestruturação do Latossolo, com a diminuição das perturbações causadas pelos tratamentos onde o solo foi trafegado. O segundo estudo investigou o efeito do uso das gramíneas em níveis de compactação de Latossolo no desenvolvimento radicular e desempenho produtivo da soja. Para esta avaliação, coletou-se monólitos de solo até a profundidade de 0,5 m. Verificou-se que o preparo reduzido do solo com escarificação e a área com tráfego intenso de colhedora influenciaram negativamente a produção de grãos de soja, a qual apresentou maior produção em Sistema Plantio Direto (SPD) cultivada subsequente às espécies braquiária e trigo. Também, a densidade do solo com valores acima de 1,2 Mg m<sup>-3</sup> prejudicou o desenvolvimento do sistema radicular da soja. No terceiro estudo, utilizou-se a microtomografia computadorizada para diagnosticar o efeito do sistema radicular de braquiária e milho na reestruturação de Latossolo com níveis de compactação. A análise microtomográfica apresentou que o tráfego com colhedora diminuiu o número e a conectividade dos poros do solo. Contudo, o cultivo de milho proporcionou ambiente com maior presença e conexão de poros. Com os três estudos, é possível concluir que o tráfego de máquinas apresenta restrições ao desenvolvimento das culturas, mas o uso de espécie vegetal é capaz de mitigar a compactação gerada pelo tráfego. Neste experimento, a braquiária e o trigo cultivados em SPD proporcionaram maior produção de grãos de soja, enquanto que o milho modificou a distribuição de poros na camada superficial do solo.

<sup>1</sup>Tese de Doutorado em Ciência do Solo – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (117 p.) – maio, 2018.



# PHYSICAL QUALITY OF OXISOL BECAUSE OF THE PLANTS AND LOADS IN TILLAGE SYSTEM WITH AND WITHOUT CHISELING<sup>1</sup>

**Author:** Eng. Agr. MSc. Altamir Mateus Bertollo

**Adviser:** Prof. Dr. Renato Levien

**Co-adviser:** Dr. Henrique Debiassi

## ABSTRACT

The agricultural use of the soils modifies their physical properties. The traffic of machines is one of the main causes of alterations in the distribution of the porous space. The use of plant species contributes in the structuring of the soil, crop residues in the surface and in the soil profile, and nutrient cycling of nutrients with their decomposition. To evaluate the potential of mitigating soil compaction using cover crops, an experiment was deployed with the use of plant species in Oxisol compaction levels, realizing three studies. In the first, discusses the changes of the physical properties of the soil by use of different plant species in the recovery of Oxisol structure. For this, non deformed soil samples were collected between 2013 and 2015, during the cultivation of soybeans. It was diagnosed that the traffic of agricultural machines caused increase in density, resistance to penetration and microporosity, with reduction in macroporosity and total porosity. Also, the use of cover plants for two years assisted in the restructuring of Oxisol, with the reduction of disturbances caused by treatments where the soil was trafficked. The second study investigated the effect of the use of grasses on Oxisol compaction levels in root development and soybean yield. For this evaluation, soil monoliths were collected to a depth of 0.5 m. It was verified that the reduced tillage preparation with chiseling and the area with intense harvester traffic had a negative effect on the production of soybean grains, which presented higher production under no-tillage system (SPD) cultivated after the brachiaria and wheat species. Also, soil density with values above  $1.2 \text{ Mg m}^{-3}$  impaired the development of the root system of soybean. In the third study, the micro-computed tomography was used to diagnose the effect of root system of brachiaria and corn on the restructuring of Oxisol with levels of compaction. The microtomographic analysis showed that the traffic with harvester decreased the number and connectivity of the soil pores. However, corn cultivation provided an ambience with greater presence and pore connection. With the three studies, it is possible to conclude that the traffic of machines presents restrictions to the development of the crops, but the use of plants species is able to mitigate the compaction generated by the traffic. In this experiment, brachiaria and wheat cultivated in SPD provided higher soybean grain yield, while corn modified the pore distribution in the soil surface layer.

---

<sup>1</sup>Doctoral Thesis in Soil Science – Soil Science Graduate Program, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS (117 p.) – may, 2018.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Coleta de amostras indeformadas de solo: a) grid de coleta; b) cilindros utilizados para coleta indeformada de solo.....20
- Figura 2.** Comparativo das propriedades físicas do solo (Densidade do solo, Microporosidade e Macroporosidade) em 2013, 2014 e 2015 para os tratamentos níveis de compactação do solo: a) SPM; b) SPD; c) SPDT4; d) SPDT8. ....24
- Figura 3.** Distribuição da Densidade do solo ( $Mg\ m^3$ ) para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho.....27
- Figura 4.** Distribuição da microporosidade ( $m^3\ m^3$ ) no perfil do solo para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho. ....29
- Figura 5.** Macroporosidade do solo ( $m^3\ m^3$ ) para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho. ....30
- Figura 6.** Porosidade total do solo ( $m^3m^3$ ) para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho. ....31
- Figura 7.** Resistência à Penetração (MPa) para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho .....32
- Figura 8.** Curva de retenção de água no solo para os tratamentos níveis de compactação nas camadas: a) 0-0,10 m; b) 0,10-0,20 m; c) 0,20-0,30 m; d) 0,30-0,40 m; e e) 0,40-0,50 m.....35
- Figura 9.** Coleta de amostras indeformadas de solo: a) grid de coleta; b) extração dos monólitos de solo.....41

<b>Figura 10.</b> Produção de massa seca de raízes: trigo 2013 (a), trigo 2014 (b), soja 2013/14 (c), aveia 2014 (d), braquiária 2014 (e) e milho 2014 (f), por camadas, para os tratamentos níveis de compactação. ....	44
<b>Figura 11.</b> Produtividade de grãos dos cultivos antecessores à soja para o tratamento níveis de compactação em Latossolo vermelho. ....	45
<b>Figura 12.</b> Área superficial radicular de soja, safra 2014/15, na camada de 0,0-0,10 m em função das espécies vegetais antecessoras e níveis de compactação em Latossolo Vermelho. ....	47
<b>Figura 13.</b> Área superficial das raízes da soja, safra 2014/15, na profundidade de 0,10 a 0,50 m para o tratamento níveis de compactação. ....	48
<b>Figura 14.</b> Volume das raízes da soja, safra 2014/15, na camada de 0,0 a 0,10 m para a interação entre os tratamentos espécie vegetal e níveis de compactação.....	49
<b>Figura 15.</b> Volume das raízes da soja, safra 2014/15, na profundidade de 0,1 a 0,50 m para o tratamento níveis de compactação do solo.....	50
<b>Figura 16.</b> Massa seca de raízes de soja, safra 2014/15, para o tratamento níveis de compactação do solo.....	51
<b>Figura 17.</b> Relações da densidade do solo, na camada de 0 a 0,2 m, em Latossolo Vermelho com as características do sistema radicular da soja: área superficial (a), volume (b), comprimento (c) e massa seca radicular (d).....	52
<b>Figura 18.</b> Produção de grãos de soja, safra 2014/15, para os tratamentos espécie vegetal e níveis de compactação.....	53

<b>Figura 19.</b> Relação da densidade do solo na produção de grãos de soja para os tratamentos espécie vegetal (aveia, braquiária, milho e trigo). .....	54
<b>Figura 20.</b> Densidade do solo, para o tratamento níveis de compactação do solo: a) SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; b) SPD: Sistema Plantio Direto; c) SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator; e d) SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora.....	56
<b>Figura 21.</b> Coleta de amostras de solo para análise de microtomografia computadorizada: a) coleta das amostras; b) preparo para transporte das amostras; c) ajuste e dimensionamento da amostra.....	64
<b>Figura 22.</b> Microtomógrafo SkyScan 1172 utilizado para análise das amostras. ....	65
<b>Figura 23.</b> Imagens de Latossolo Vermelho reconstruídas por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) na camada de 0,025 a 0,075 m: a) Braquiária SPM; b) Braquiária SPD; c) Braquiária SPDT8; d) Milho SPM; e) Milho SPD; e f) Milho SPDT8. ....	68
<b>Figura 24.</b> Sistema radicular da soja com desenvolvimento horizontal devido à presença de camada com impedimento. ....	69
<b>Figura 25.</b> Imagens de Latossolo Vermelho reconstruídas por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) na camada de 0,125 a 0,175 m: a) Braquiária SPM; b) Braquiária SPD; c) Braquiária SPDT8; d) Milho SPM; e) Milho SPD; e f) Milho SPDT8. ....	70

**Figura 26.** Grau de anisotropia dos poros de um Latossolo Vermelho obtidos por análise de imagem de microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC): a) GA para a camada de 0,025 a 0,075 m; b) GA para a camada de 0,125 a 0,175 m.....72

**Figura 27.** Dimensão Fractal 3D dos poros de um Latossolo Vermelho obtidos por análise de imagem de microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC): a) DF para a camada de 0,025 a 0,075 m; b) DF para a camada de 0,125 a 0,175 m. ....73

**Figura 28.** Número de Euler dos poros de um Latossolo Vermelho obtidos por análise de imagem de microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC): a) Número de Euler para a camada de 0,025 a 0,075 m; b) Número de Euler para a camada de 0,125 a 0,175 m. ....74

**Figura 29.** Renderizações tridimensionais obtidas por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) de Latossolo Vermelho na camada de 0,025 a 0,075 m: a) Braquiária SPM; b) Braquiária SPD; c) Braquiária SPDT8; d) Milho SPM; e) Milho SPD; e f) Milho SPDT8.....76

**Figura 30.** Renderizações tridimensionais obtidas por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) de Latossolo Vermelho na camada de 0,125 a 0,175 m: a) Braquiária SPM; b) Braquiária SPD; c) Braquiária SPDT8; d) Milho SPM; e) Milho SPD; e f) Milho SPDT8.....77

**Figura 31.** Distribuição do tamanho dos poros obtidos por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) na análise de imagem de um Latossolo Vermelho, com níveis de compactação e uso de gramíneas, na camada de 0,025 a 0,075 m. 78

**Figura 32.** Distribuição do tamanho dos poros obtidos por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) na análise de imagem de um Latossolo Vermelho, com níveis de compactação e uso de gramíneas, na camada de 0,125 a 0,175 m. 79

## RELAÇÃO DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

SPD= Sistema Plantio Direto

USDA= Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

SSSA= Sociedade Americana de Ciência do Solo

C/N= Relação Carbono Nitrogênio

FAO= Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura

TC= Tomografia Computadorizada

$\mu$ TC= Microtomografia Computadorizada

3D= Três dimensões

Cfa= Clima subtropical, com verão quente.

SPM= Sistema de preparo mínimo

SPDT4= Sistema plantio direto com quatro tráfegos de trator

SPDT8= Sistema plantio direto com oito tráfegos de colhedora

kPa= Kilo Pascal

MPa= Mega Pascal

RP= Resistência à penetração

CRA= Curva de retenção de água no solo

$\Psi_m$ = Potencial matricial

Ds= densidade do solo

Mic= Microporosidade

Mac= Macroporosidade

Pt= Porosidade Total

CCD= Dispositivo acoplado de carga

$\mu$ A= Microampère

kV= Quilovolt

2K= 2.048 pixels de resolução horizontal

$\Delta\phi$ = Gradiente angular

ROI= Região de interesse da imagem

VOI= Volume de interesse da imagem

GA= Grau de anisotropia

CMI= Comprimento médio de interceptação

NE= Número de Euler

DF= Dimensão fractal

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução Geral .....	1
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica.....	4
1 Qualidade estrutural do solo.....	4
2 Sistema Plantio Direto e as alterações no solo .....	5
3 Compactação do Solo em Sistema Plantio Direto .....	6
4 Plantas de cobertura e propriedades físicas do solo.....	9
5 Tomografia computadorizada para a análise da qualidade estrutural do solo	12
CAPÍTULO III - PLANTAS DE COBERTURA NA RECUPERAÇÃO DA ESTRUTURA FÍSICA DE LATOSSOLO INDUZIDO A NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO.....	16
1 Introdução.....	16
2 Material e métodos.....	18
2.1 Local.....	18
2.2 Delineamento experimental.....	18
2.3 Amostragem do solo e determinações .....	20
2.4 Análise dos dados .....	23
3 Resultados e Discussão.....	23
3.1 Análise temporal dos parâmetros físicos do solo .....	23
3.2 Análise dos atributos físicos do solo em 2015.....	26
4 Conclusões.....	36
CAPÍTULO IV - EFEITO DE CULTURAS ANTECESSORAS NO DESENVOLVIMENTO RADICULAR E RENDIMENTO DE GRÃOS DE SOJA EM LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO A NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO	37
1 Introdução.....	37

2	Material e Métodos.....	38
2.1	Local .....	38
2.2	Delineamento experimental.....	39
2.3	Coleta das amostras e determinações .....	40
2.4	Análise dos dados .....	42
3	Resultados e Discussão.....	43
3.1	Produção do sistema radicular e de grãos das culturas antecessoras à soja .....	43
3.2	Produção do sistema radicular e de grãos da soja.....	46
4	Conclusões.....	58
CAPÍTULO V - REARRANJO DE MACROPOROS PELO USO DE BRAQUIÁRIA E MILHO EM LATOSSOLO VERMELHO COM NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO.....		59
1	Introdução.....	59
2	Material e Métodos.....	61
2.1	Local do experimento.....	61
2.2	Delineamento experimental.....	62
2.3	Coleta das amostras.....	63
2.4	Microtomógrafo e processamento das imagens.....	64
3	Resultados e Discussão.....	67
4	Conclusões.....	80
CAPÍTULO VI - Conclusões Gerais .....		82
Referências Bibliográficas.....		83
Resumo Bibliográfico .....		101



## **CAPÍTULO I – Introdução Geral**

O Sistema Plantio Direto (SPD) cria um ambiente favorável ao crescimento vegetal e contribui para a estabilização da produção e para a recuperação ou manutenção da qualidade do solo (ALVARENGA et al., 2001). Registros apontam que, na década de 1970, agricultores paranaenses introduziram esta técnica no Brasil com o objetivo de amenizar os graves efeitos do revolvimento do solo e a queima do material vegetal que permanecia na superfície do solo. Com a expansão da área agrícola e a divulgação das vantagens desta técnica para os atributos químicos, físicos e biológicos, a área cultivada sob SPD foi se expandindo e, estima-se que, dos 58,2 milhões de hectares cultivados com grãos no Brasil (CONAB, 2016), o SPD é a forma de cultivo de maior predomínio, sendo que em 2012 a área cultivada era de aproximadamente 32 milhões de hectares (FAO, 2016).

Esta expansão na área cultivada sob SPD só foi possível devido aos avanços tecnológicos, através do aprimoramento de máquinas e equipamentos para a realização da semeadura das culturas sem revolvimento, tratos culturais e sistemas de colheita, mantendo na superfície do solo o material vegetal das culturas antecessoras e sem revolver o solo.

Porém, apesar da ampla divulgação aos agricultores sobre os benefícios do SPD, os preceitos do Sistema estão sendo negligenciados. Dentre as práticas utilizadas pelos agricultores que prejudicam a conservação do solo, pode ser observada a semeadura sem considerar a declividade do terreno, que, em grande parte dos casos, é realizada no sentido de maior comprimento da lavoura, coincidindo com o sentido do declive e provocando a falsa impressão de ganho na capacidade operacional (LEVIEN et al., 2011). Com a operação de semeadura no sentido do declive, são formados sulcos pelos mecanismos de deposição de semente e fertilizantes.

Outro fator importante para qualidade do ambiente solo, que está sendo menos utilizado, é a prática de rotação de culturas, a qual se caracteriza pelo cultivo de uma planta subsequente ao final do ciclo de outra cultura. Com isso, tem se tornado frequente a sucessão soja-trigo ou, em casos ainda mais graves, a permanência da área em pousio no inverno. Segundo relatórios da Companhia Nacional de Abastecimento, estima-se que a área sob pousio no cultivo de inverno é maior do que a área cultivada (CONAB 2016). Esta falta de rotação de culturas diminui o aporte de material vegetal em superfície e no interior do solo.

Com a ausência de rotação de culturas, o solo está sujeito às ações do ambiente. Os restos culturais presentes são decompostos e a capacidade de proteção física é rapidamente extinta. Além da proteção física do solo, os restos culturais são importantes para a estruturação dos componentes minerais do solo (agregação). A formação de agregados estáveis ocorre através de processos químicos, físicos e biológicos (TISDALL; OADES, 1982). Nos processos químicos, a formação de agregados é originada pela floculação de partículas primárias, sendo que, para isso, é necessária a atuação de substâncias ligantes, como a matéria orgânica. Nos processos físicos, os agregados podem ser gerados por ciclos de umedecimento e secagem, que promovem a aproximação e o afastamento das partículas. Nos processos biológicos, as plantas e os microrganismos atuam na agregação. O crescimento radicular das plantas resulta no rearranjo das partículas, através de pressão gerada pelo seu desenvolvimento no solo, quando as raízes absorvem água e atuam fisicamente através dos processos de umedecimento e secagem. Neste desenvolvimento, as raízes também liberam exsudatos orgânicos que, juntamente com hifas de fungos, bactérias e actinomicetos, produzem polissacarídeos e massa microbiana, responsáveis pela microagregação dessas partículas primárias.

O SPD disponibiliza, além do aporte de resíduos na superfície, material vegetal no interior do solo, através do desenvolvimento do sistema radicular. Este sistema radicular auxilia na porosidade do solo e no equilíbrio da sua densidade. Porém, com a pouca adesão do uso da prática de rotação de culturas, associado ao tráfego de máquinas em condições inadequadas (DEBIASI et al., 2008; VALICHESKI et al., 2012; VALADÃO et al., 2015) e

intensidade de carga animal elevada (ALBUQUERQUE et al., 2001; DEBIASI; FRANCHINI, 2012; BONETTI et al., 2015), são relatados problemas com a formação de uma camada de maior grau de compactação, geralmente posicionada entre 0,1 a 0,2 m de profundidade (DEBIASI et al., 2010; FRANCHINI et al., 2011), que ocasionam impedimento ao crescimento radicular da cultura e a infiltração de água no solo. Em aproximadamente 45% das áreas cultivadas com soja em solos argilosos do Paraná, o grau de compactação na camada de 0,1 a 0,2 m é limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas (FRANCHINI et al., 2009). Esta compactação, e consequente limitação ao crescimento radicular, pode diminuir a produtividade das culturas (CHEN; WEIL, 2011).

Em técnicas de cultivo onde há uma ação mecânica de revolvimento do solo, tem-se um rompimento, por atuação física, da camada compactada do solo. Porém, esta ação é momentânea, e a estrutura que foi rompida pela ação mecânica logo vai se reestruturar e formar um novo agregado, que, por sua vez, poderá exercer maior ação de resistência ao crescimento das raízes e infiltração da água do que a estrutura que foi rompida, inicialmente, pela atuação física. Assim, se mostra importante o uso da atividade biológica como modo de prevenção e, em casos onde já ocorram camadas de impedimento, mitigação da compactação do solo em subsuperfície.

## CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1. Qualidade estrutural do solo

O solo é um recurso natural de fundamental importância para a produção de alimentos e matérias-primas. Por ser um sistema trifásico (sólido, líquido e gasoso) e dinâmico, é essencial que suas características químicas, físicas e biológicas sejam preservadas. Para isto, se faz necessário o uso de técnicas de manejo conservacionistas, que não interfiram no equilíbrio do sistema.

Para o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture – USDA*), qualidade do solo é definida como a capacidade que o solo possui para desempenhar as funções e a capacidade de preservação dessas funções para o uso futuro (USDA, 2016). Em uma publicação de 1997, a Sociedade Americana de Ciência do Solo (*Soil Science Society of America – SSSA*) (KARLEN et al., 1997) elaborou um material para estimular a discussão entre seus membros do tema qualidade do solo. E, em uma metáfora, os integrantes da SSSA conceituaram a qualidade do solo como um “banco de três pernas”, onde a função e equilíbrio dos três componentes principais o sustentam, por meio da conservação da atividade biológica, da qualidade do ambiente e da saúde das plantas e animais.

A qualidade do solo é geralmente considerada levando-se em conta aspectos físicos, químicos e biológicos. É uma forma de avaliação do grau de degradação do solo e, também, para distinção entre práticas de manejo. Dexter (2004) caracteriza como exemplos de má qualidade física do solo quando há na área um ou mais dos seguintes parâmetros: baixa infiltração de água no solo, escoamento superficial, densidade elevada, aeração reduzida e pouco desenvolvimento radicular.

A estrutura do solo é o resultado de um arranjo sistematizado entre seus componentes sólidos, minerais e orgânicos. É no seu sistema físico onde ocorrem as interações entre os gases e a solução do solo (SOUZA et al., 2014), em que a sua estrutura está mais suscetível a ações de manejo ou práticas culturais que resultem em degradação do sistema.

Sequinatto et al. (2014) avaliaram a qualidade de um Argissolo, em SPD, submetido a práticas de manejo recuperadoras de sua estrutura física, dentre estas o uso de plantas de cobertura. Os autores observaram que a densidade e a porosidade do solo são sensíveis às mudanças do manejo do solo, os quais foram considerados bons indicadores da qualidade do solo.

Uma técnica de manejo que contribui para a melhoria da estrutura do solo é através do uso de plantas, que proporcionam a formação de bioporos com variados tamanhos, os quais auxiliam na difusão de gases no solo, na movimentação de água e no crescimento das raízes. O desenvolvimento radicular destas plantas auxilia na melhoria do estado de agregação do solo. Em “Uma visão sobre qualidade do solo”, Vezzani e Mielniczuk (2009) destacam que os sistemas agrícolas que favorecem a qualidade do solo são aqueles que cultivam plantas intensamente, de preferência de espécies diferentes, sem o revolvimento do solo. Desta forma, é possível constatar a importância do SPD para o ambiente solo.

## **2. Sistema Plantio Direto e as alterações no solo**

A degradação do solo está associada ao manejo inadequado dos recursos naturais. No setor agrícola, as causas que mais contribuem para esta degradação são o monocultivo, queimadas da cobertura florestal e vegetação nativa, práticas de manejo que não proporcionam a proteção adequada ao solo e degradam a estrutura (aração e gradagem), o excesso de tráfego de máquinas e o manejo de animais acima da capacidade de suporte de carga nas pastagens (CHAVES et al., 2012).

A prática de manter os resíduos culturais na superfície do solo, sem incorporação, traz benefícios para o mesmo. Para as propriedades físicas, contribui na proteção da estrutura do solo ao impedir a ação direta das gotas de chuva sobre a superfície e auxiliar na regulação térmica (FURLANI et al.,

2008). Devido à reflexão e absorção de energia solar incidente, diminuindo as perdas de água por evaporação (GILL et al., 1996), colabora nas propriedades químicas e biológicas, por meio da liberação de nutrientes e exsudatos ao se decomporem.

Através da rotação de culturas, tem-se uma diversidade de resíduos que são depositados na superfície do solo. A decomposição destes materiais varia entre as diferentes culturas, principalmente em razão da sua composição química quanto aos teores de lignina, hemicelulose, celulose e polifenóis, e às relações entre constituintes, como carbono e nitrogênio (C/N) (AITA; GIACOMINI, 2003). Quando permanecem na superfície do solo, os resíduos apresentam menor decomposição do que quando são incorporados ao solo (ALCÂNTARA et al., 2000).

Desenvolvendo trabalho em Londrina (PR), em uma área de Latossolo Vermelho, Castro Filho et al. (1998), constataram que a adoção do SPD proporcionou maior acúmulo de resíduos vegetais na superfície, melhorando o estado de agregação do solo pelo incremento de carbono orgânico na camada de 0 a 10cm.

Ao comparar diferentes tempos de adoção do SPD, Mazurana (2015) constatou que houve modificações na estrutura do solo. Estas variações não foram passíveis de identificação pela análise das variáveis físicas isoladas, e sim pela análise de variáveis físicas que atuam em processos, como fluxos de água e ar. Tais modificações ocorreram nas camadas superficiais do solo, onde se concentra a maior parte do sistema radicular das culturas.

No entanto, associado aos benefícios que o SPD traz ao solo, há relatos de formação de camadas compactadas, provocadas por um conjunto de negligências, de forma que ocorrem modificações no desenvolvimento radicular das culturas.

### **3. Compactação do Solo em Sistema Plantio Direto**

A compactação do solo é a redução do volume de uma massa de solo, reduzindo o volume de poros. No entanto, nem todos os poros são reduzidos de forma semelhante. Os poros maiores são reduzidos primeiro em

tamanho, e a compactação cessa quando o solo se torna suficientemente forte para suportar o esforço aplicado (RICHARD et al., 2001). Esta diminuição do tamanho e da distribuição dos maiores poros altera a característica de retenção e fluxo de água e ar.

A estrutura do solo e o estado de compactação são fatores importantes que influenciam o crescimento radicular das plantas. A estrutura do solo é heterogênea, tanto espacial como temporariamente, devido aos efeitos do meio ambiente, manejo do solo e crescimento da planta. A compactação do solo é um fenômeno que envolve inter-relações significativas entre as propriedades físicas e biológicas mais reconhecidas dos solos (NAWAZ et al., 2013; VEREECKEN et al., 2016). O espaço dos poros do solo, a resistência mecânica e a disponibilidade de nutrientes são todos modificados pela compactação do solo. As raízes que crescem nos solos geralmente experimentam uma mistura de solo solto e compacto (WHITMORE; WHALLEY, 2009).

A compactação de solo em camadas geralmente limita o crescimento das raízes e a eficiência do uso dos recursos. A variação espacial na resistência mecânica afeta o grau de agrupamento das raízes (GAO et al., 2016). Geralmente, as camadas densas são localizadas nas regiões mais profundas do perfil do solo, devido aos efeitos do preparo anterior ao SPD, e manifestam-se por camadas de solo com maior densidade (MOREIRA et al., 2016).

Nessas condições, os sistemas radiculares que enfrentam zonas compactadas de solo têm a oportunidade de se desenvolver em zonas de solos mais soltos. Mesmo em solos compactados, áreas de menor impedância mecânica são encontradas devido a fendas de encolhimento, canais formados pela fauna do solo, crescimento radicular de culturas ou vegetação anteriormente cultivada (JIN et al., 2013).

As plantas apresentam capacidade diferenciada de desenvolverem seu sistema radicular em ambientes com solo compactado (JIMENEZ et al., 2008). Quando o solo apresenta uma camada compactada em superfície, ocorrem limitações no desenvolvimento inicial da maioria das plantas, restringindo a germinação das sementes e a implantação das culturas. Na condição de presença de camada compactada em subsuperfície, há limitações

no desenvolvimento do sistema radicular das culturas e, conseqüentemente, na absorção de água e nutrientes.

O cultivo da soja é realizado de maneira mecanizada, de tal modo que o tráfego de máquinas é intenso e a mobilização do solo é limitada à linha de semeadura sobre ação do mecanismo de sulco (sulcadores tipo facão ou disco duplo). Assim, frequentemente são relatados problemas com compactação do solo em superfície/subsuperfície (SILVA et al., 2004; SILVA et al., 2006; BERGAMIN et al., 2010b; VALADÃO et al., 2015).

Trabalhando em Argissolo Vermelho sob tráfego controlado de máquinas, Mazurana et al. (2013), observaram que o tráfego influenciou na densidade do solo e que, em condições onde o solo não foi cultivado (pousio), houve interferência do tráfego de máquinas na macroporosidade do solo até a profundidade de 0,10m.

Conforme Braidá et al. (2006), a presença dos resíduos culturais na superfície é capaz de dissipar até 30% da energia de compactação da qual o solo é submetido. Por sua vez, Valadão et al. (2015), estudando a compactação do solo no sistema radicular da soja, avaliaram que, onde o solo foi trafegado com oito vezes, houve alteração na área do sistema radicular da soja e na distribuição no perfil do solo. Os autores constataram que a compactação do solo pelo tráfego de trator reduziu em 23% a área de raiz na camada superficial, não sendo detectado desenvolvimento radicular abaixo de 0,15 m de profundidade. A compactação do solo alterou a estrutura da raiz da soja, com engrossamento das raízes secundárias, alterando o diâmetro médio.

Apesar de ser apontada como uma prática eficiente na redução da compactação do solo (ABREU et al., 2004), a escarificação do solo nem sempre é eficaz nesta tarefa (KUNZ et al., 2013). Por outro lado, Valicheski et al. (2012), estudando o desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja em solo compactado, observaram que o uso de plantas de cobertura antecedendo o cultivo da soja e o uso de sulcadores tipo facão na operação de semeadura minimizam os efeitos de compactação do solo, possibilitando a obtenção de produtividade satisfatória.

Esta prática de cobertura do solo com plantas configura-se como uma alternativa à diminuição da área degradada por compactação. Pois, segundo dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e



Agricultura (FAO), dos 80% da área com cobertura vegetal, 36% apresentam-se estáveis ou pouco degradados, 8% moderadamente degradados, 25% degradados e 10% em fase de recuperação (FAO, 2011).

Com a crescente demanda por alimentos e a intensificação dos cultivos, a produção agrícola tem se tornado cada vez mais dinâmica. A intensificação de operações mecanizadas resulta em práticas de manejo que acabam indo em desconforto com as recomendações técnicas para uma agricultura conservacionista. Assim, se mostra importante o estudo do efeito das plantas na ação de mitigação da compactação do solo e melhoria do ambiente solo.

#### **4. Plantas de cobertura e propriedades físicas do solo**

Embora a estrutura do solo possa influenciar a distribuição das raízes no solo, as raízes das plantas são capazes de modificar a estrutura do solo para acomodar seu crescimento. As raízes das plantas afetam a estrutura do solo através de uma variedade de mecanismos, incluindo penetração direta, ancoragem, extração de água e exsudação de compostos na rizosfera (BENGOUGH et al., 2016). As raízes podem deformar o solo ao crescer nos poros existentes ou através da matriz do solo e criar altos estresses de compressão (JIN et al., 2013). O diâmetro da raiz está intimamente relacionado com a sua rigidez, o que é importante para a penetração em solos duros (PAEZ-GARCIA et al., 2015).

A pressão radial exercida pelas raízes em crescimento irá comprimir o solo em sua vizinhança e diminuir a porosidade no solo circundante (POPOVA et al., 2016). Os pelos radiculares ajudam na penetração do solo ancorando a superfície radicular para as paredes dos poros (BENGOUGH et al., 2016).

As dificuldades na melhoria dos atributos físicos de um solo, em comparação com os atributos químicos, vêm ocasionando um maior cuidado quanto à escolha de práticas conservacionistas de uso e manejo do solo, o que aumenta a importância do uso de plantas de cobertura (SOUZA et al., 2014). Ao final de seu ciclo, as plantas de cobertura disponibilizam na superfície e no interior do solo diferentes quantidades de biomassa, que variam em função da

particularidade de cada espécie, período de crescimento, dentre outros fatores. Desta forma, a manutenção permanente de cobertura sobre o solo vai aportar carbono no sistema, mantendo a qualidade do solo, pois as taxas de entrada de energia superam as taxas de perda, de forma análoga ao que ocorre no ambiente natural (MELLO, 2006).

O acúmulo de matéria orgânica no solo, proporcionado pelo uso de plantas de cobertura, influencia na resistência à compactação do solo, aumentando a umidade crítica para compactação (BRAIDA et al., 2006). O crescimento do sistema radicular das culturas só ocorre quando a pressão exercida pela raiz, que é função do seu diâmetro (MISRA et al., 1986), é superior à resistência do solo à penetração (PASSIOURA, 1991).

Trabalhando com plantas de cobertura e tráfego controlado de máquinas agrícolas em Argissolo, Debiasi et al. (2008) verificaram que o uso das plantas de cobertura de inverno diminuiu a capacidade de suporte de carga e aumentou a susceptibilidade à compactação. Isto ocorreu devido à redução da densidade do solo e incremento na macroporosidade. Os autores destacam que o uso de plantas de cobertura proporcionou melhor estrutura do solo, o que foi constatado mesmo depois de sete tráfegos sobre a área. Na safra 2006/2007, os cultivos com plantas de cobertura reduziram a compactação na camada superficial (0-0,06m) em comparação à área sob pousio e, na condição de baixa disponibilidade hídrica, proporcionaram maior produtividade para o milho e soja (DEBIASI et al., 2010).

Uma das práticas mais utilizadas para remediar a compactação do solo é a escarificação mecânica. No entanto, a eficiência desta prática para a produtividade das culturas tem sido controversa. Para Klein et al. (2008), a escarificação mecânica resultou em aumentos significativos de produtividade para a cultura do trigo. Já Secco et al. (2009) concluem que, mesmo em condição de diferentes níveis de compactação, a escarificação mecânica não resulta no aumento de produtividade da soja. Girardello et al. (2014) verificaram que não houve incremento de produtividade da soja em razão da escarificação mecânica, independentemente do tipo de escarificador utilizado. Para Nicoloso et al. (2008), a escarificação mecânica é eficiente no incremento da produtividade das culturas quando associada ao uso de plantas de cobertura no inverno. Segundo os autores, se for utilizada como uma prática isolada, a

escarificação mecânica realizada na véspera da implantação da cultura terá seu efeito reduzido quando esta atingir o seu estágio reprodutivo, considerado como o mais crítico para determinação da produtividade de grãos.

As práticas de manejo alteram o espaço interagregado, e que depois dessa alteração, forças externas e internas aos agregados atuam em conjunto, reorganizando-os em uma estrutura mais densa Or e Ghezzehei (2002). Carvalho et al. (2014), estudando a agregação de solos de Latossolos tropicais, verificaram que os agregados menores apresentaram menor densidade e maior porosidade intra-agregados.

A estrutura do solo pode ser definida como “a forma, o tamanho e a disposição espacial de partículas individuais do solo e grupos de partículas (agregados)”, ou como “a combinação de diferentes tipos de poros com partículas sólidas (agregados)”. A forma do poro, a distribuição do tamanho dos poros e o arranjo dos poros afetam os processos mais importantes no solo, os quais influenciam os desenvolvimentos da planta, como armazenamento e movimento de água e gases, movimentos de soluto e facilidade de crescimento radicular.

Por esta razão, as medidas do espaço ocupados por poros são cada vez mais utilizadas para caracterizar a estrutura do solo. De fato, entre as partículas dispostas isoladamente ou em agregados, existe um complexo sistema de espaços de poros nos quais as raízes das plantas, micro-organismos e fauna do solo dependem do armazenamento e movimentação de água e ar.

A porosidade do solo representa as fases do solo líquido e gasoso. Para caracterizar o sistema poroso, é necessário determinar a distribuição do tamanho, a forma e a conectividade dos poros, já que as funções agronômicas dos poros dependem destes aspectos.

Os fatores de forma permitem a divisão de poros em diferentes grupos, como, por exemplo, poros mais ou menos arredondados (regulares), irregulares e alongados (BOUMA et al., 1977; PAGLIAI et al., 1983). As porções de cada grupo de forma podem ser subdivididas em um número seletivo de classes de tamanho de acordo com o diâmetro de poro equivalente para poros arredondados e irregulares, ou a largura, para poros alongados. Os diâmetros de poro equivalentes são calculados a partir da área de poros

regulares e irregulares, enquanto que a largura dos poros alongados é calculada a partir da sua área e de dados perimétricos, usando, para tanto, uma equação quadrática, tendo em vista que é assumido que os poros alongados são retângulos estreitos longos (PAGLIAI et al., 1984).

Os poros regulares são de formato arredondado e podem ser distinguidos em dois tipos de acordo com a sua origem: os poros esféricos, formados por ar aprisionado durante a secagem do solo; e os canais, formados pela atividade biológica (crescimento radicular e movimento da fauna do solo). Sua distinção em seções finas do solo é muito evidente porque os poros esféricos (vesículas, de acordo com Brewer (1964)) têm paredes muito suaves, enquanto os canais, embora cortados de maneira transversal na seção fina, apresentam paredes ásperas com depósitos exsudatos de insetos ou raízes. A presença de muitos poros esféricos do primeiro tipo (vesículas) cria uma estrutura vesicular típica de solos com problemas evidentes de degradação.

Os poros irregulares são os vazios comuns do solo com paredes irregulares (*vughs*, de acordo com para a terminologia micromorfológica de Brewer (1964)) e podem ser isolados ou interligados. Em solos cultivados, esses poros podem ser produzidos pela ação de implementos de preparo do solo.

A partir desse contexto, este trabalho realiza uma análise que observa a estrutura do solo e a organização das partículas e do espaço poroso, em um Latossolo Vermelho, o qual foi submetido a níveis de compactação. Busca-se verificar se o cultivo com culturas é capaz de auxiliar nessa distribuição dos poros, determinado neste trabalho através da técnica de tomografia computadorizada.

## **5. Tomografia computadorizada para a análise da qualidade estrutural do solo**

A tomografia computadorizada (TC) é uma técnica não-destrutiva e não-invasiva, utilizada para investigar os atributos de “dentro” do objeto de interesse. Esta técnica foi inicialmente desenvolvida para uso na medicina. Após, foi e vem sendo adaptada para ser usada como uma técnica para análise de materiais em pesquisas agrícolas, principalmente pela razão de ser não-

invasiva, permitindo medidas repetidas sobre a mesma amostra, sem provocar alterações no objeto em estudo. Outro fato importante é que o desenvolvimento de scanners mais modernos abriu a possibilidade de análises com melhores resoluções.

A maioria das técnicas de análise de imagem convencionais utilizadas em física do solo não permitem a investigação de amostras não perturbadas, de maneira que elas destruam sua estrutura ou não permitem uma segunda medição na mesma posição. Um exemplo é a técnica micromorfológica utilizada em análise de imagem de blocos impregnados ou blocos finos (COOPER et al., 2005; HORGAN, 1998; LI et al., 2004).

Avanços nas imagens de TC de raiosX permitiram a visualização e quantificação da estrutura 3D de macroporos intra e entre agregados (PETH et al., 2008). Estudos utilizaram esta técnica para analisar a relação entre as características dos poros e a força de tração agregada e a fragmentação do solo (MUNKHOLM et al., 2012; MAVEED et al., 2014).

Entre as aplicações da TC na Ciência do Solo, destacam-se estudos de compactação do solo, caminhos preferenciais para o desenvolvimento de raízes, encrostamento superficial, alterações estruturais em ciclos de umedecimento e secagem, deslocamento miscível e imiscível de nutrientes na presença de raízes e fluxo preferencial de poluentes em solos expansivos (PIRES, 2006).

A compactação do solo resulta na transformação da estrutura do solo. Vários fenômenos podem conduzir a uma compactação do solo no campo, que são induzidas por meio de processos naturais ou antrópicos. Entre esses fenômenos, podem ser destacadas as práticas de manejo do solo, o tráfego de implementos agrícolas e animais, e o impacto direto da gota de chuva sobre o solo descoberto. Durante a compactação, o solo sofre uma redução de espaço de poros, onde os maiores poros podem ser preenchidos com partículas de solo mais finas, tendo como consequência um aumento na densidade do solo. Crestana e Vaz (1998) sugeriram que a tomografia computadorizada pode ser uma ferramenta importante e interessante para estudos de meios porosos não invasivos em tais casos, ao passo que é possível diagnosticar esta migração de partículas de menores tamanhos, sem destruir a estrutura do solo.

No que se refere à compactação do solo, Marsili et al. (1998) analisaram a estrutura do solo após ser submetido ao tráfego de máquinas e observaram que a passagem da roda do trator causava a compactação do solo, principalmente nas camadas superficiais. Estas camadas compactadas apresentaram uma estrutura fortemente massiva, ao mesmo tempo que, em áreas que não sofreram tráfego, a estrutura apresenta blocos angulares e subangulares. Para a camada superficial, os poros finos alongados encontram-se orientados no sentido paralelo ao topo do solo, de modo que são formadas estruturas em placas, típicas de solos compactados. Os autores constataram também que ocorreu transformação na forma dos poros, que se encontravam alongados e não possuíam continuidade vertical, resultando na diminuição da infiltração de água.

A exploração da estrutura do solo através da rede de poros e a relação com as raízes das plantas são de fundamental importância para o entendimento da dinâmica ecológica na zona vadosa (DAL FERRO et al., 2014). A microtomografia assistida por computador de raios-X ( $\mu$ TC) recentemente demonstrou considerável promessa para estudos não destrutivos em geociências (MEES et al., 2003), em diferentes escalas (DAL FERRO et al., 2013). Os scanners  $\mu$ TC podem alcançar alta resolução (na ordem de alguns microns) em amostras de volume representativo (cerca de 5 cm), e melhorar a capacidade de imagem em termos de detecção de alterações sutis na estrutura.

A técnica demonstra um potencial para quantificar as interações raiz-solo *in situ* devido à sua complexidade 3D e capacidade de estimar seus efeitos em colunas de solo não perturbadas (MOONEY et al., 2012). No entanto,  $\mu$ TC tem uma fraca capacidade de distinguir entre as raízes e as fases dos poros nas colunas de solo, uma vez que a densidade de atenuação das raízes é semelhante a dos poros do solo. Apenas em alguns casos particulares (por exemplo, camada superficial de uma pastagem), as raízes foram facilmente visualizadas (KUKA et al., 2013), como resultado da alta densidade de raízes.

Especificamente em relação à física do solo no Brasil, as principais aplicações da tomografia computadorizada envolvem estudos sobre a distribuição da densidade do solo e teor de água, mudanças na porosidade,

mudanças naturais e artificiais na estrutura do solo, o movimento da água no solo, a qualidade da amostra de solo, e efeitos de diferentes práticas de manejo em solo estrutura (PIRES et al., 2010).

O uso da técnica de TC na investigação da porosidade e parâmetros de forma de poros é citado em trabalhos (DE GRYZE et al., 2006; NUNAM et al., 2006; TURBERG et al., 2014; SCHNEE et al., 2016) como uma técnica para compreender as interações do ambiente solo em menores escalas, até mesmo a nível de crescimento radicular (MOONEY, et al., 2012; SCHMIDT et al., 2012; HALING, et al., 2013; FOEREID, 2015).

Müller et al. (2018) demonstram que vincular as medições físicas tradicionais do solo com as técnicas de visualização do solo em pequena escala é uma ferramenta eficaz para parametrização dos modelos de simulação. O que possibilita uma compreensão e quantificação dos serviços ecossistêmicos essenciais dos solos, como a regulação dos fluxos de água e gás e a filtragem de contaminantes.

## **CAPÍTULO III – Plantas de cobertura na recuperação da estrutura física de Latossolo induzido a níveis de compactação**

### **1. Introdução**

A compactação do solo pelo tráfego de máquinas é a principal causa da degradação física dos solos agrícolas, tendo como agravante a intensidade de tráfego em condições inadequadas de umidade do solo (FLOWERS; LAL, 1998). Nas áreas agrícolas, a compactação do solo é influenciada por diversos fatores, destacando-se o tipo de solo (SILVA et al., 1994), teor de matéria orgânica (DALCHIAVON et al., 2014), quantidade e qualidade de resíduos sobre o solo (BRAIDA et al., 2006), número de tráfegos sobre a área (CORTEZ et al., 2014), tipo de rodado das máquinas (ZHAO et al., 2010) e o teor de umidade (SILVA et al., 2000).

Para minimizar os efeitos da compactação do solo no desenvolvimento de plantas, utiliza-se a escarificação do solo, operação que rompe fisicamente as ligações entre os agregados, alterando a macroestrutura do solo. Esta técnica é considerada eficaz para reduzir a resistência mecânica do solo à penetração (KLEIN; CAMARA, 2007), porém, o gasto energético é considerável (CHAMEN, 2015) e pode ter efeito temporário, demandando repetições frequentes (SILVA et al., 2012; NUNES et al., 2014; DRESCHER et al., 2016). Outra forma, mais eficiente na redução da compactação do solo, é a chamada escarificação biológica, a qual se dá por meio do uso dos sistemas radiculares das culturas como ferramenta para romper as camadas com maiores níveis de compactação (GARCIA et al., 2013).



A rotação de culturas traz benefícios para a qualidade do solo, resultando em aumentos de produtividade das culturas econômicas envolvidas no sistema de produção, reduzindo o custo pela racionalização do uso de insumos (FRANCHINI et al., 2011). Além disso, o aporte de material vegetal na superfície auxilia no controle da erosão do solo (VOLK; COGO, 2014), aumento dos teores de matéria orgânica do solo (ROSA et al., 2017), redução das oscilações de temperatura e perdas de água por evaporação (HECKLER; SALTON, 2002; ALMEIDA et al., 2018). Do mesmo modo, a presença de material vegetal na superfície do solo é responsável por dissipar parte da energia de compactação exercida pelo tráfego na superfície do solo (BRAIDA et al., 2006).

Conforme destacado por Franchini et al. (2011), o Estado do Paraná, adota dois sistemas de produção, caracterizados como sucessão de culturas, com predomínio de soja no verão e de trigo no inverno para a metade Sul e Sudoeste (área subtropical), e de soja no verão e de milho segunda safra no inverno, nas regiões Norte e Oeste (área de transição climática).

Desta forma, se faz importante o estudo de adaptação e aprimoramento de sistemas de rotação de culturas, permitindo identificar outras possibilidades de espécies vegetais para períodos de entressafra, para que possam atuar na redução da compactação do solo. Neste trabalho, deu-se enfoque à capacidade do uso de plantas de cobertura em mitigar a compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas agrícolas em área cultivada sob SPD.

A hipótese deste trabalho foi de que o uso de sistemas radiculares de gramíneas acelera a recuperação estrutural de um Latossolo Vermelho trafegado e escarificado. O objetivo deste trabalho foi determinar o efeito de diferentes espécies vegetais na recuperação da estrutura de um Latossolo Vermelho após a compactação adicional ou a escarificação.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Local

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Embrapa Soja, no município de Londrina (PR) (23°11' S e 51°11' W, altitude de 600 m), situada em região que apresenta clima tipo Cfa, subtropical úmido mesotérmico, segundo a classificação de Köppen, com médias anuais de 20°C de temperatura e de 1.340 mm de precipitação média. O solo desta área é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (SANTOS et al., 2013), com 784 g kg<sup>-1</sup> de argila na camada de 0-0,30 m de profundidade.

Entre os anos de 1991 a 2009, a área foi manejada sob SPD, com a rotação de culturas soja/milho no verão e trigo/aveia no inverno. De 2010 a 2012, foi cultivada, em área total, cobertura de braquiária (*Urochloa ruziziensis*) sem manejo da massa seca. Antecedendo a implantação dos tratamentos deste experimento, foi realizada dessecação do material vegetal presente na área, com duas aplicações de Glifosato com 90 e 20 dias antecedendo o início do experimento, com a utilização de 1.800 e 1.080 g ha<sup>-1</sup> de produto comercial em cada aplicação, respectivamente.

### 2.2. Delineamento experimental

O experimento consiste em um fatorial 4x4 (espécies vegetais x níveis de compactação) sob o delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições e parcelas subdivididas. O fator espécies vegetais nas parcelas são constituídos por quatro culturas: (I) aveia preta (*Avena strigosa*); (II) braquiária (*Urochloa ruziziensis*); (III) milho (*Zea mays*) de 2ª safra; e (IV) trigo (*Triticum aestivum*). O fator nível de compactação, alocado nas subparcelas, abrange: (a) SPM: sistema de preparo mínimo com escarificação do solo (escarificador de 5 hastes, espaçadas 0,35 m entre si, com ponteiras de 0,08 m, profundidade média de ação equivalente a 0,25 m, equipado com rolo destorroador), realizada na implantação do experimento; (b) SPD: Sistema Plantio Direto contínuo, sem manejo adicional; (c) SPDT4: Sistema Plantio Direto com toda a área trafegada quatro vezes com um trator (marca CBT

modelo 8060, 4x2 com tração dianteira auxiliar, equipado com estrutura para pá de concha na dianteira, pneus dianteiros 14.9-24 R1 e traseiros 18.4-34 R1, com lastragem metálica e hidráulica - 75% do volume do pneu), com massa total de 7,2 Mg (4,3 Mg no eixo traseiro) e pressão de contato pneu-solo no eixo traseiro estimada em 180 kPa, através de procedimento proposto por O'sullivan, Henshall e Dickson (1999); (d) SPDT8: Sistema Plantio Direto trafegado oito vezes com uma colhedora autopropelida (marca SLC, modelo 6200, equipada com plataforma colhedora de milho, pneus dianteiros 18.4-30 R1 e traseiros 9.00-16) com massa total de 9,5 Mg (6 Mg no eixo dianteiro), pressão de contato pneu-solo no eixo dianteiro estimada em 220 kPa, através de procedimento proposto por O'sullivan, Henshall e Dickson (1999).

A implantação dos tratamentos referentes aos níveis de compactação foi realizada em fevereiro de 2013. No momento da prática dos tráfegos, o solo se encontrava com umidade em capacidade de campo (conteúdo de água no solo na camada de 0-0,2 m de 0,33 g g<sup>-1</sup>). A escarificação foi realizada quando o solo se encontrava com consistência friável (conteúdo de água de 0,29 g g<sup>-1</sup>, na camada de 0-0,2 m).

No cultivo de inverno de 2013, foi semeado trigo em área total (cultivar BRS Pardella), com população de 250 plantas m<sup>-2</sup>, e espaçamento entrelinha de 0,17 m. Para a operação, foi utilizada semeadora-adubadora marca New Holland, modelo SHM 11/13, equipada com sulcadores de adubo e semente tipo disco duplo defasado.

No cultivo de verão ano 2013/14, foi cultivada soja (*Glycine max*) em área total (cultivar BRS 359 RR), semeada em 10 de outubro de 2013, com um espaçamento entrelinhas de 0,45 m para uma população de 30 plantas m<sup>-2</sup>. Foi utilizada semeadora-adubadora marca Jumil, modelo Exacta 5070, equipada com sulcadores de adubo e sementes do tipo haste e disco duplo desencontrado, respectivamente, com profundidade de semeadura de 0,05 m e de 0,1 m para a deposição de fertilizante (NPK 0-20-20, 270 kg ha<sup>-1</sup>).

No cultivo de outono-inverno de 2014, foram implantados os tratamentos com as espécies vegetais. A cultura do milho foi com semeadora-adubadora marca Semeato, modelo SHM 11/13, com três linhas espaçadas 0,9 m. A aveia preta, braquiária e trigo foram semeadas com a semeadora-adubadora utilizada em 2013, com espaçamento entrelinhas de 0,17 m. No

cultivo de verão 2014/15 foi semeada soja em área total, com as mesmas configurações da operação realizada no ano antecedente.

### 2.3. Amostragem do solo e determinações

Amostras indeformadas de solo foram coletadas em cinco camadas (0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 m) utilizando anéis de aço inox com volume de 98 cm<sup>3</sup> (0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro interno). Em cada camada foram coletadas amostras de solo em três posições equidistantes: (a) na entrelinha à esquerda; (b) no centro da linha de semeadura; e (c) na entrelinha à direita da cultura da soja. Assim, 15 amostras por tratamento e repetições foram coletadas, totalizando 720 amostras, conforme apresentado na Figura 1. A coleta do material foi realizada entre os ciclos fenológicos de floração e início do estágio fenológico R3 da soja.

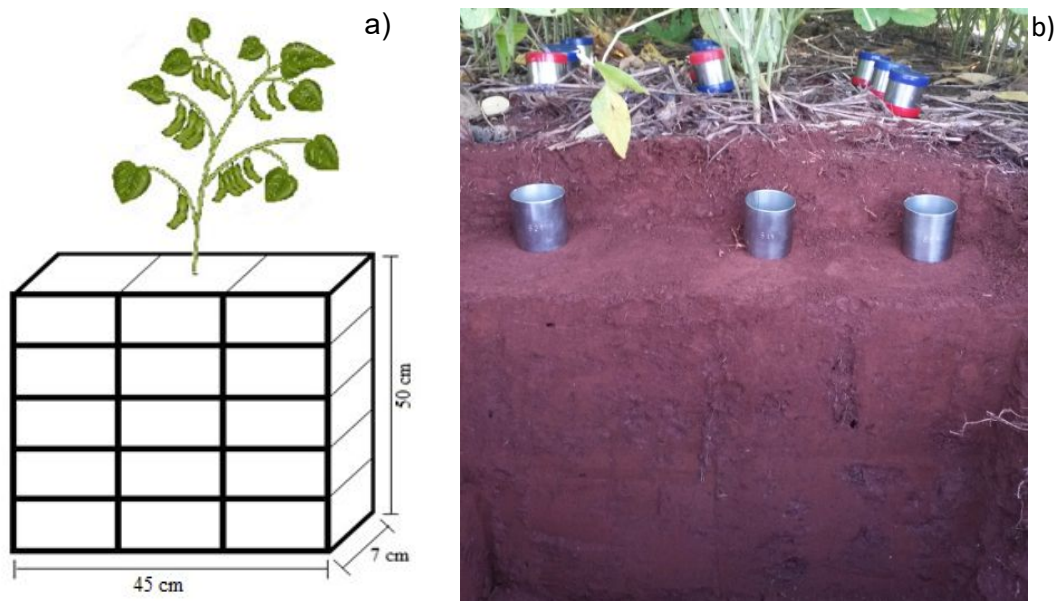


Figura 1. Coleta de amostras indeformadas de solo: a) grid de coleta; b) cilindros utilizados para coleta indeformada de solo.

A coleta foi realizada com o conteúdo de água do solo próximo da capacidade de campo, com auxílio de um dispositivo amostrador de solo, de modo que os anéis são inseridos verticalmente no solo, de forma sequencial no centro dos quadrantes avaliados.

No laboratório, as amostras foram preparadas com a retirada do excesso de solo. Em seguida, as mesmas foram saturadas em recipientes por meio da manutenção de uma lâmina de água máxima de dois terços da altura dos anéis metálicos, por aproximadamente 72 horas, até a completa saturação do solo. Para a determinação da resistência à penetração (RP) e da curva de retenção de água no solo (CRA), foi utilizado o procedimento descrito em Silva et al. (1994).

As amostras foram separadas de acordo com o local de coleta (quadrantes “a”, “b” e “c”), sendo que as amostras do quadrante “a” foram utilizadas para análise da porosidade e RP, as amostras do quadrante “c” foram utilizadas para determinação da CRA e todas as amostras foram utilizadas para a determinação da densidade do solo. As amostras do quadrante “a” foram submetidas aos potenciais matriciais de -3 e -6 kPa utilizando mesa de tensão (EMBRAPA, 1997). Após atingirem o equilíbrio no potencial matricial -6 kPa, as amostras foram pesadas e determinou-se a RP utilizando penetrômetro estático de bancada similar ao descrito por Tormena et al. (1998). O penetrômetro, modelo MA-933 da marca Marconi, é constituído de uma haste metálica com um cone na sua extremidade com semi-ângulo de 30°, diâmetro de 0,004 m e área da base de 0,1256 cm<sup>2</sup>, ligado a um medidor composto por uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kgf. A velocidade de penetração foi de 0,02 m min<sup>-1</sup>. A resistência à penetração foi determinada através da equação 1:

$$IC = ((F * 9,806648)/A)/1 * 10^6 \quad (1)$$

onde: IC= Índice de cone (MPa); F= força (kg f); A= área do cone (m<sup>2</sup>).

Após a determinação da RP, as amostras foram secas em estufa a ±105°C por 24 horas para a determinação da massa de solo seco.

Para calcular a densidade do solo, dividiu-se a massa das amostras secas a 105 °C pelo volume do anel volumétrico, conforme equação 2:

$$Ds = Mss/Vt \quad (2)$$

onde: Ds= Densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>); Mss = massa da amostra de solo seca à 105 °C; Vt = volume total do anel.

A porosidade total do solo ( $P_t$ ), ou seja, o volume de vazios do solo que pode estar ocupado por água ou ar, foi obtido através da diferença de massa do solo saturado para o solo seco, conforme equação 3:

$$P_t = (M_{Ssat} - M_{Ss}) / V_t \quad (3)$$

onde:  $P_t$ = porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ );  $M_{Ssat}$ = Massa do solo saturado (Mg);  $M_{Ss}$ = Massa de solo seco (Mg);  $V_t$ = Volume total da amostra ( $m^3$ ).

A microporosidade foi determinada utilizando o teor de água retida nas amostras em equilíbrio com a tensão de 0,006 MPa, considerando que essa tensão é suficiente para retirar toda a água contida nos macroporos, sendo que a água restante representa o volume de microporos (EMBRAPA, 1997), obtida pela equação 4:

$$M_{ic} = (P_{0,006MPa} - M_{Ss}) / V_t \quad (4)$$

onde:  $M_{ic}$ = Microporosidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ );  $P_{0,006MPa}$ = massa de solo após a tensão de 0,006 MPa (Mg);  $M_{Ss}$ = massa de solo seco (Mg);  $V_t$ = volume total da amostra ( $m^3$ ).

A macroporosidade do solo foi determinada utilizando o teor de água da amostra saturada que foi liberada até a tensão de 0,006 Mpa (Embrapa, 1997), obtida pela equação 5:

$$M_{ac} = (M_{Ssat} - P_{0,006MPa}) / V_t \quad (5)$$

onde:  $M_{ac}$ = macroporosidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ );  $M_{Ssat}$ = massa de solo saturado (Mg);  $P_{0,006MPa}$ = massa de solo após a tensão de 0,006 MPa (Mg);  $V_t$ = volume total da amostra ( $m^3$ ).

Para a determinação da CRA, as amostras coletadas no quadrante "c" foram saturadas e submetidas às tensões matriciais de 3 e 6 kPa, utilizando a mesa de tensão e de 10, 33 e 500 kPa no extrator de Richards (EMBRAPA, 1997). Depois de alcançar o equilíbrio em cada tensão em que foram submetidas, as amostras de solo foram pesadas e, após a determinação da massa no último potencial, secas em estufa a 105°C durante 48 horas.

O conteúdo de água no solo retido em potenciais matriciais superiores aos determinados pelos extratores de placa porosa ( $\Psi_m > 1.500$  kPa) foi determinado usando psicrômetro de termopar, modelo WP4-C Dewpoint Potential Meter (DECAGON DEVICE, 2000). Para isso, foram utilizadas amostras de solo deformada, obtidas por peneiramento em malha de 2 mm. A amostra de solo foi inicialmente equilibrada ao conteúdo de água correspondente ao potencial de 1.500 kPa, utilizando-se então, a partir desta, subamostras de solo úmido contendo aproximadamente 2 g, que foram colocadas em recipiente próprio do aparelho e encaminhadas para dentro da câmara hermética de leitura. A determinação do potencial matricial foi obtida pelo método do ponto de orvalho, ou seja, no equilíbrio do conteúdo de água no interior da câmara com potencial de água no solo (DECAGON DEVICE, 2000).

Utilizando o software Soil Water Retention Curve (SWRC), os dados obtidos foram ajustados ao modelo de Van Genuchten (1980) para os pontos da CRA.

#### 2.4. Análise dos dados

Os atributos físicos do solo foram submetidos à ANOVA, para cada camada amostrada. Quando o efeito dos tratamentos foi significativo em nível de 5% de probabilidade de erro, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, utilizando o software estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011), e os gráficos foram plotados por meio do programa SigmaPlot®12.5 (*Systat software, Inc.*).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Análise temporal dos parâmetros físicos do solo

Analisando o parâmetro densidade do solo temporalmente, é possível verificar que, passados dois anos das operações de manejo do solo, na camada superficial (0,0-0,10 m) o tratamento SPDT4, onde foram aplicados quatro tráfegos de trator com pressão de contato solo-pneu de 180 kPa, já se apresenta equiparado aos tratamentos SPD contínuo e SPM, com diminuição

de 13,3% na Ds em dois anos (Figura 2). Há resquícios dos efeitos da escarificação em camadas subsuperficiais, em que, possivelmente, a ação do sistema radicular das culturas utilizadas nos cultivos auxiliou na estruturação do solo, resultando em Ds menor do que a que foi obtida após as operações de manejo do solo dos demais tratamentos. Cortez et al. (2017) destacam que a escarificação reduz a compactação, porém, com os primeiros tráfegos na área é possível ocorrer valores elevados de compactação, aqui perceptíveis na superfície do solo.

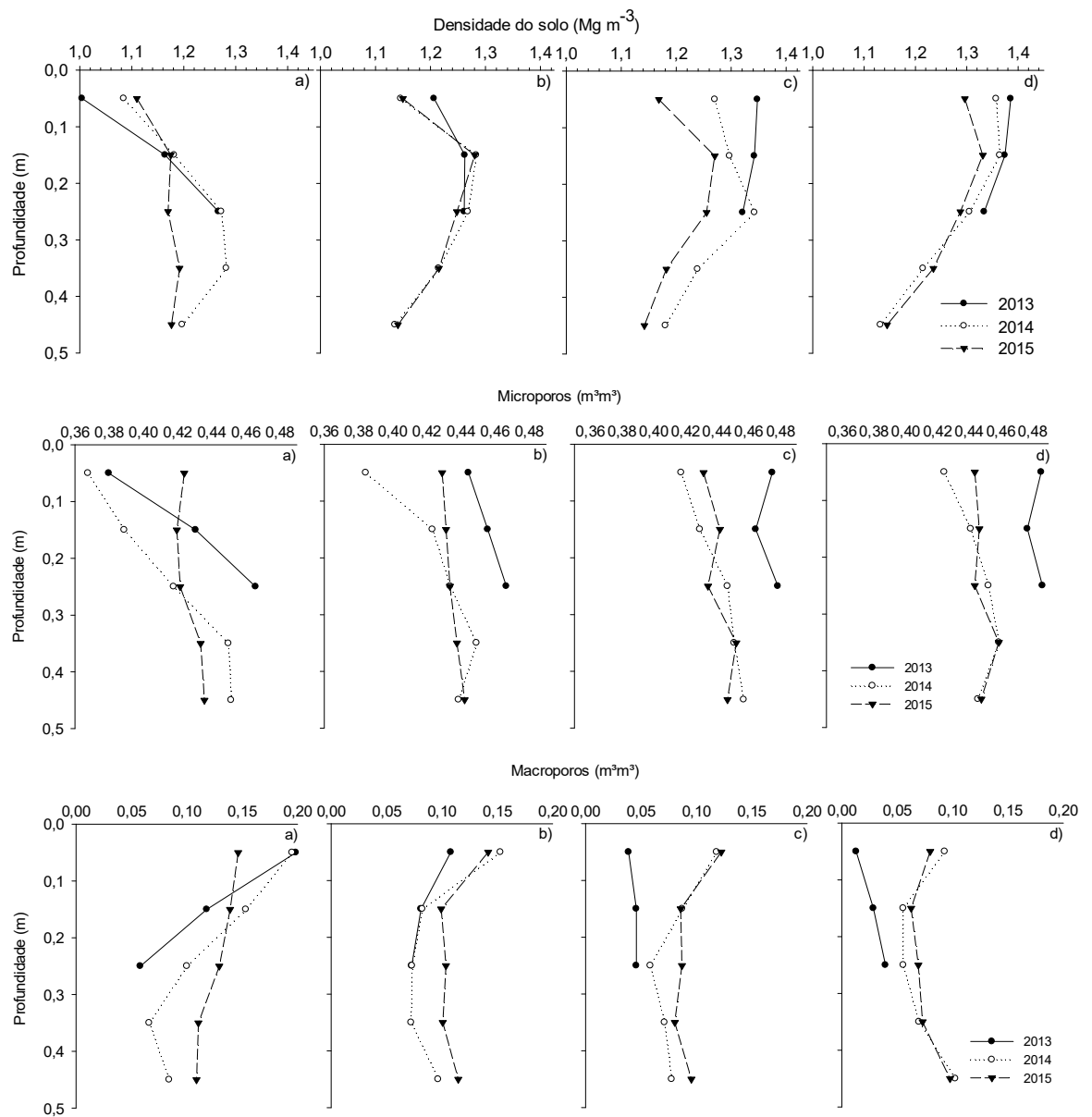


Figura 2. Comparativo das propriedades físicas do solo (Densidade do solo, Microporosidade e Macroporosidade) em 2013, 2014 e 2015 para os tratamentos níveis de compactação do solo: a) SPM; b) SPD; c) SPDT4; d) SPDT8.



SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa).

O tratamento SPDT8 apresentou diminuição de 6,9% na densidade do solo na camada superficial dois anos após o tráfego (Figura 2). Contudo, este tratamento continua apresentando maiores valores neste parâmetro em relação aos demais, demonstrando que a compactação resultante de 8 tráfegos de colhedora, com pressão de contato pneu-solo de 220 kPa, causou deformação de maior intensidade, limitando a capacidade de reorganização das partículas.

Comparando a distribuição dos microporos e macroporos no perfil do solo durante os três anos, é possível visualizar na Figura 2 que ocorreu redução nos valores de microporos e aumento nos valores de macroporos para os tratamentos nos quais não houve escarificação do solo (SPD, SPDT4 e SPDT8). Nos tratamentos em que a área foi induzida ao tráfego de máquinas (SPDT4 e SPDT8), os valores iniciais de microporos eram superiores a  $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , enquanto os macroporos eram inferiores a  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . A ação do tráfego das máquinas agrícolas resulta em pressão que é exercida sobre o volume de solo ocupado por poros, que tendem a diminuir seu formato, ocasionando poros de menor tamanho e, muitas vezes, sem que haja ligação entre eles (continuidade), o que é prejudicial para as trocas gasosas e movimentação de água no perfil do solo.

Os tratamentos com níveis de compactação resultaram em diminuição dos valores de macroporos, que se apresentam inferiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , considerado como limitante por Grable e Siemer (1968). É possível visualizar que, dois anos após a implantação dos tratamentos compactação do solo, os valores dos macroporos estão aumentando nas áreas trafegadas, principalmente na camada superficial. No tratamento onde o solo foi escarificado, os valores de macroporos estão diminuindo na superfície e aumentando nas camadas mais profundas. Para Calonego et al. (2017), o aumento da macroporosidade na camada de 0,0 a 0,10 m causado pela escarificação resultou em aumento da macroporosidade na camada 0,10 a 0,20 m dois anos depois, devido ao maior crescimento das raízes das plantas em profundidade.

### 3.2. Análise dos atributos físicos do solo em 2015

Os atributos físicos do solo foram alterados pelo tratamento níveis de compactação, não sendo influenciados pelo tratamento espécie vegetal. Este resultado pode ser justificado pela recente ação das plantas de cobertura no experimento conduzido. Acredita-se que, em um maior período de tempo, as diferentes culturas podem vir a apresentar seu potencial na mitigação da compactação do solo, o que deve, no entanto, ser verificado por meio de futuras pesquisas. Tais dados vão ao encontro do estudo desenvolvido por Calonego et al. (2017), que também não identificaram interações das culturas de outono-inverno, após dois anos de uso, nas propriedades físicas do solo.

O revolvimento do solo (SPM) e a energia aplicada nos tratamentos onde o solo foi trafegado (SPDT4 e SPDT8) causaram alterações na organização das partículas de solo. O SPDT8 aumentou a densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RP) e microporosidade (Mic), reduzindo a macroporosidade (Mac) e a porosidade total (Pt).

Na camada superficial (0,0-0,10 m), houve um acréscimo de 12,5% na densidade do solo no SPDT8 quando comparado aos demais tratamentos (Figura 3). Do mesmo modo, Bergamin et al. (2010a) constataram alterações nos atributos físicos na camada superficial do solo causados pelo tráfego de máquinas agrícolas em área de SPD. O efeito da ação do tráfego intenso foi perceptível até a profundidade de 0,3 m, sendo que na camada de 0,1 a 0,2 m encontram-se os maiores valores ( $1,31 \text{ Mg m}^3$ ). Esta profundidade é considerada por pesquisadores como a camada que apresenta altos níveis de compactação, podendo limitar o crescimento radicular das culturas (SILVA et al., 2000; DRESCHER et al., 2011).

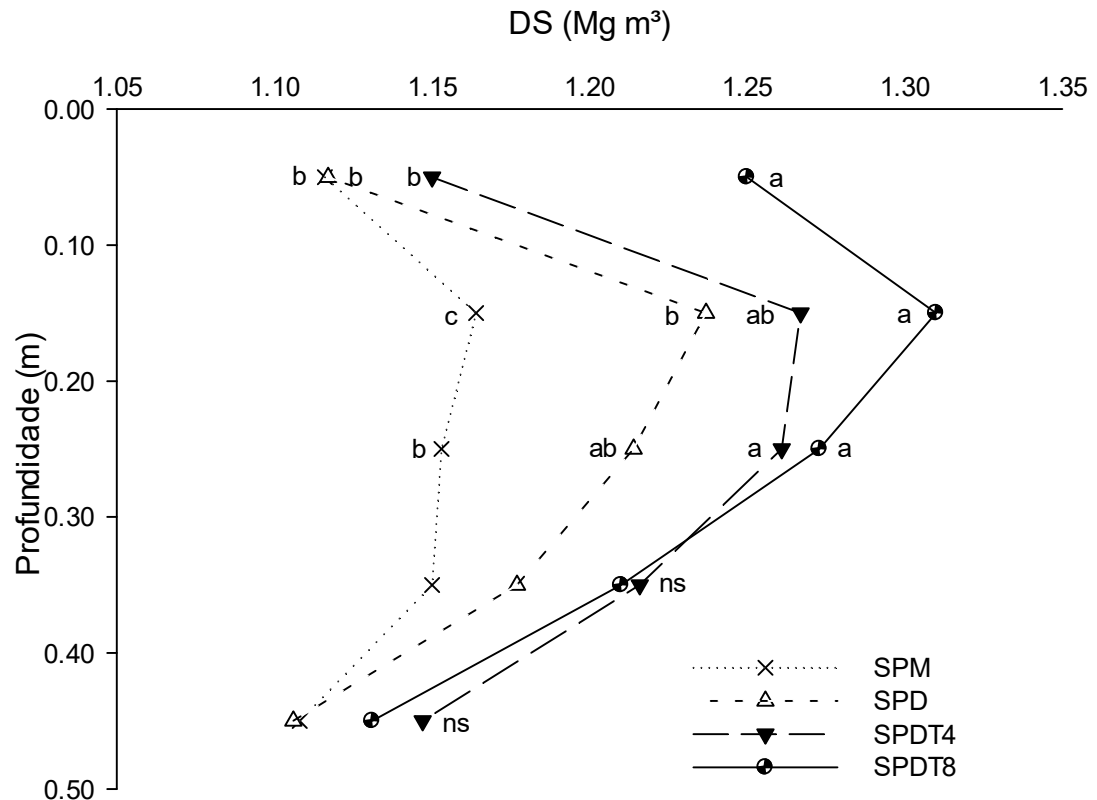


Figura 3. Distribuição da Densidade do solo ( $\text{Mg m}^3$ ) para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%; ns: não significativo a 5%.

Com o passar do tempo e o desenvolvimento de cultivos sobre a área, é possível perceber a capacidade de reestruturação do solo, em que o tratamento SPDT4 se apresenta similar ao tratamento no qual o solo foi escarificado (camada superficial) e ao tratamento SPD contínuo (camada subsuperficial) (Figura 3).

O tráfego do tratamento SPDT8 sobre a superfície do solo resultou em maior quantidade de microporos (Figura 4). Este aumento é significativo na camada superficial de 0,0-0,10 m, em que no SPDT8 a microporosidade é superior aos demais tratamentos. Na camada subsuperficial de 0,10-0,20 m, a microporosidade do solo nos tratamentos SPDT4 e SPD contínuo apresentam-se similares ao tratamento SPDT8. Nesta camada, os menores valores para microporosidade ocorrem onde o solo foi escarificado.

Esta diminuição da microporosidade no tratamento em que o solo foi escarificado se dá pela ação de revolvimento do solo. Esta operação resulta na

quebra da estrutura do solo, pela ação mecânica do escarificador, que altera a distribuição e proporção de macro e microporos. Quando há a formação de agregados estáveis, pela ação do sistema radicular das culturas, hifas de fungos e material orgânico, ocorre também a formação de uma estrutura “equilibrada”, com a presença de microporos em quantidade e qualidade que incumbem ao solo uma estrutura de melhor qualidade.

Solos com melhor qualidade física são caracterizados como aqueles em que a estruturação se apresenta como fator principal. Nesta qualidade física, o arranjo e a continuidade dos poros são de fundamental importância, pois são estes os responsáveis pela troca gasosa e fluxo e armazenamento de água no interior do solo.

Na camada de 0,20-0,40 m, os tratamentos SPD contínuo e SPDT4 apresentam médias que não distinguem significativamente dos tratamentos SPM e SPDT8, os quais, por sua vez, diferem-se entre si (Figura 4). Identifica-se que a escarificação do solo apresentou efeitos na diminuição da microporosidade, enquanto o tráfego intenso (SPDT8) incrementou a compactação do solo na camada de 0,20-0,40 m.

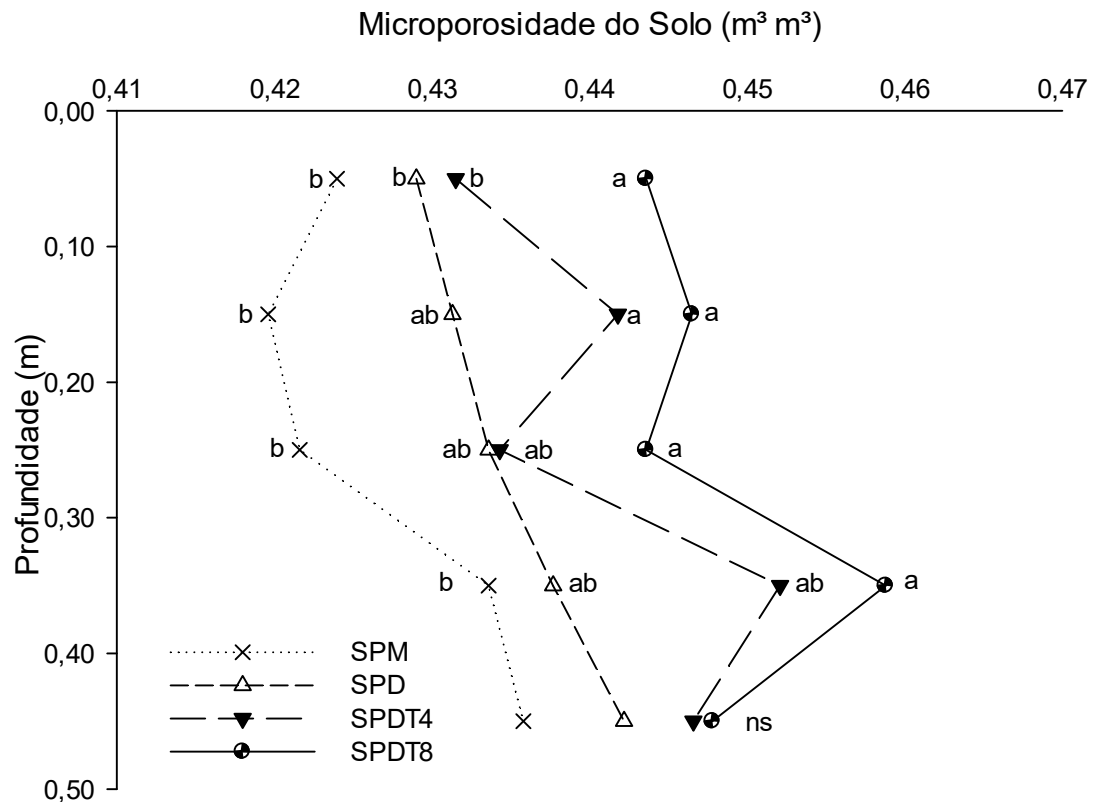


Figura 4. Distribuição da microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) no perfil do solo para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). \*médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>: não significativo a 5% pelo teste de Tukey.

Os manejos do solo apresentam efeitos na macroporosidade até a profundidade de 0,3 m (Figura 5), em que o tratamento SPM apresentou maiores valores de espaço poroso e o tráfego de máquinas resultou na diminuição do espaço de vazios do solo.

Na camada superficial, o tratamento SPDT8 resultou em redução de 42% nos macroporos quando comparado com o tratamento SPD contínuo. Na camada subsuperficial (0,10 a 0,20 m), há efeitos distintos para os tratamentos SPM e SPDT8, com uma amplitude de 56% na macroporosidade, tendo o tratamento SPD contínuo como valor de referência.

Na área escarificada, há aumento de 28% nos macroporos, e na área com tráfego de colhedora ocorreu redução de 28%, com valores de 0,06  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Figura 5). Com a porosidade de aeração inferior a 0,10  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (em que se encontram os tratamentos SPDT4 e SPDT8), pode ser prejudicada a taxa de

fluxo de O<sub>2</sub>, limitando a atividade microbiana e o crescimento das plantas (BRADY; WEIL, 2002).

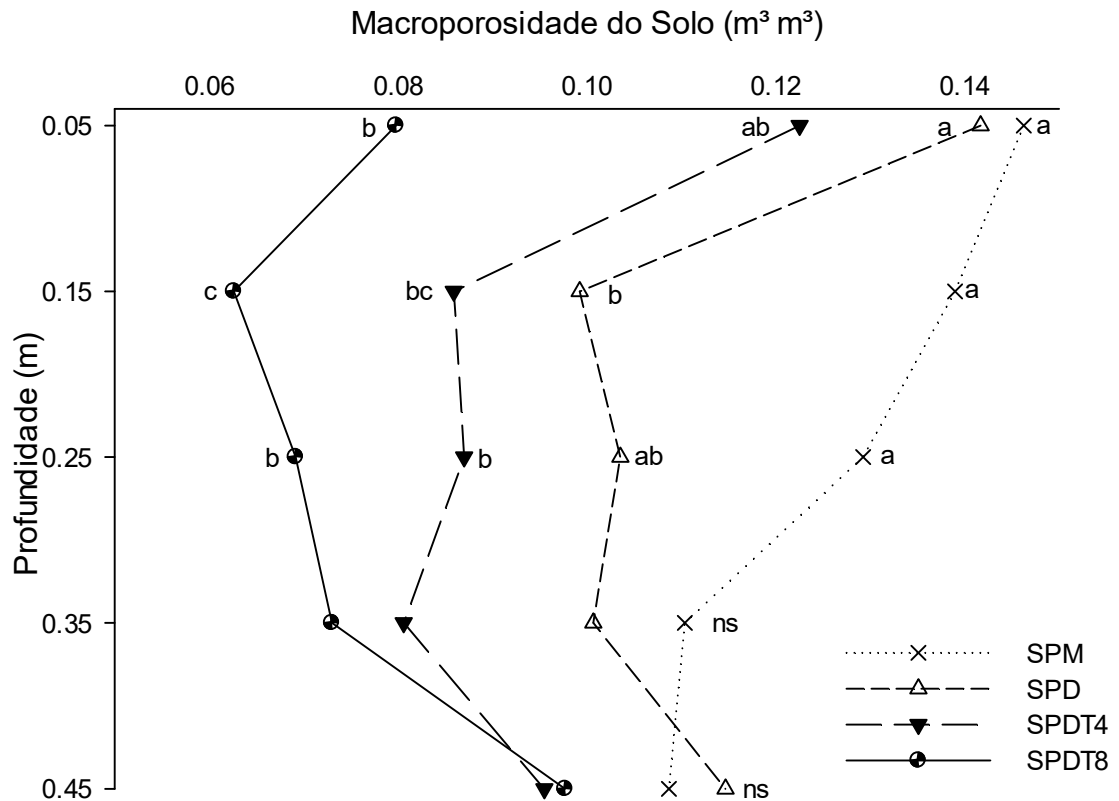


Figura 5. Macroporosidade do solo (m<sup>3</sup> m<sup>3</sup>) para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). \*médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>: não significativo a 5% pelo teste de Tukey.

O tráfego imposto pelo tratamento SPDT8 resultou em diminuição da porosidade total, com valores próximos a 0,52 m<sup>3</sup> m<sup>3</sup> (Figura 6). A compactação do solo, neste caso representada pela área onde o solo foi trafegado, atua inicialmente nos macroporos do solo, transformando-os em microporos (DIAS JUNIOR, 2000), alterando a porosidade total da área. Este efeito do tráfego de máquinas também foi diagnosticado por Valicheski et al. (2012), que desenvolveram ensaio de tráfego de trator (5 Mg de massa total), e, onde o solo foi trafegado quatro e seis vezes, houve diminuição da porosidade e aumento da densidade e resistência à penetração.

O manejo do solo com escarificação resultou em maiores valores de Pt, contudo, dois anos após as operações de manejo, na camada superficial,

este tratamento apresenta porosidade total semelhante aos tratamentos SPD e SPDT4. Na camada subsuperficial, o tratamento SPM apresentou efeitos de aumento na porosidade.

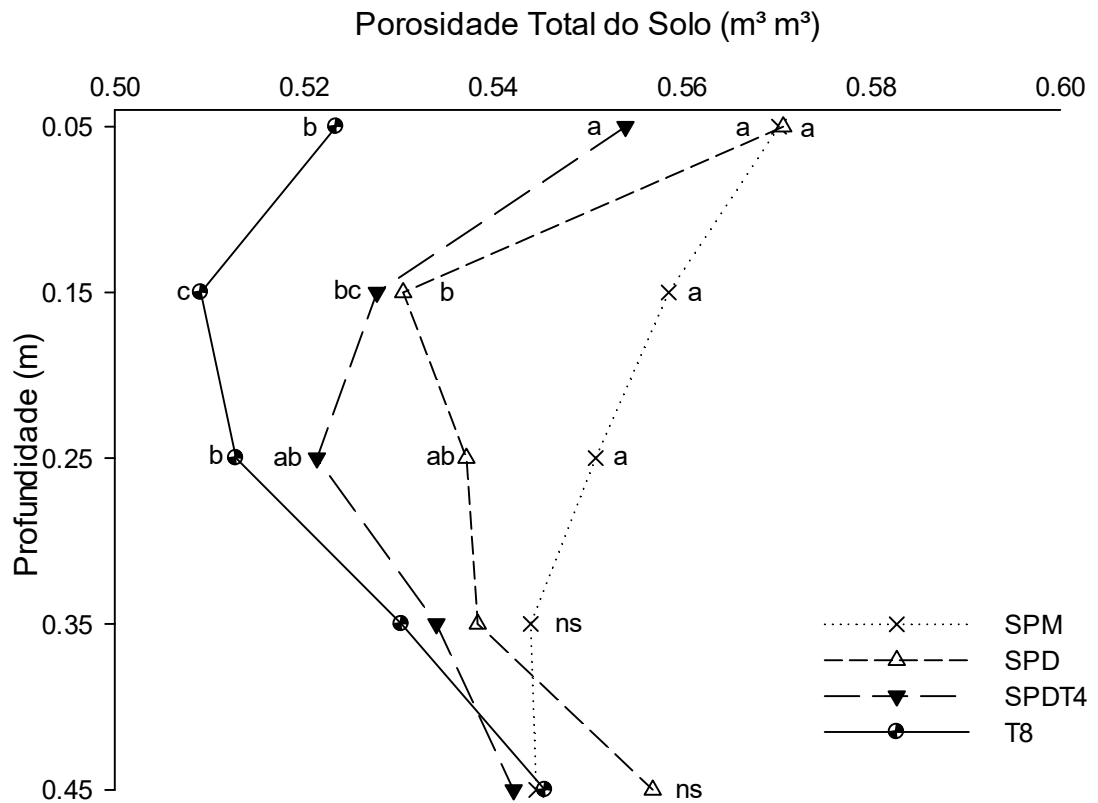


Figura 6. Porosidade total do solo ( $m^3 m^{-3}$ ) para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). \*médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; ns: não significativo a 5% pelo teste de Tukey.

O tratamento manejo do solo apresentou efeito para a resistência mecânica do solo à penetração até a profundidade de 0,3 m, em que o tratamento SPM resultou nos menores valores (Figura 7). Na camada superficial, há distinções para os demais tratamentos, no qual o tratamento SPD foi semelhante ao SPM e SPDT4, e o tratamento SPDT8 teve os maiores valores de resistência mecânica do solo à penetração. Nas camadas subsuperficiais de 0,10 a 0,20 m, os tratamentos SPD, SPDT4 e SPDT8 foram semelhantes entre si.

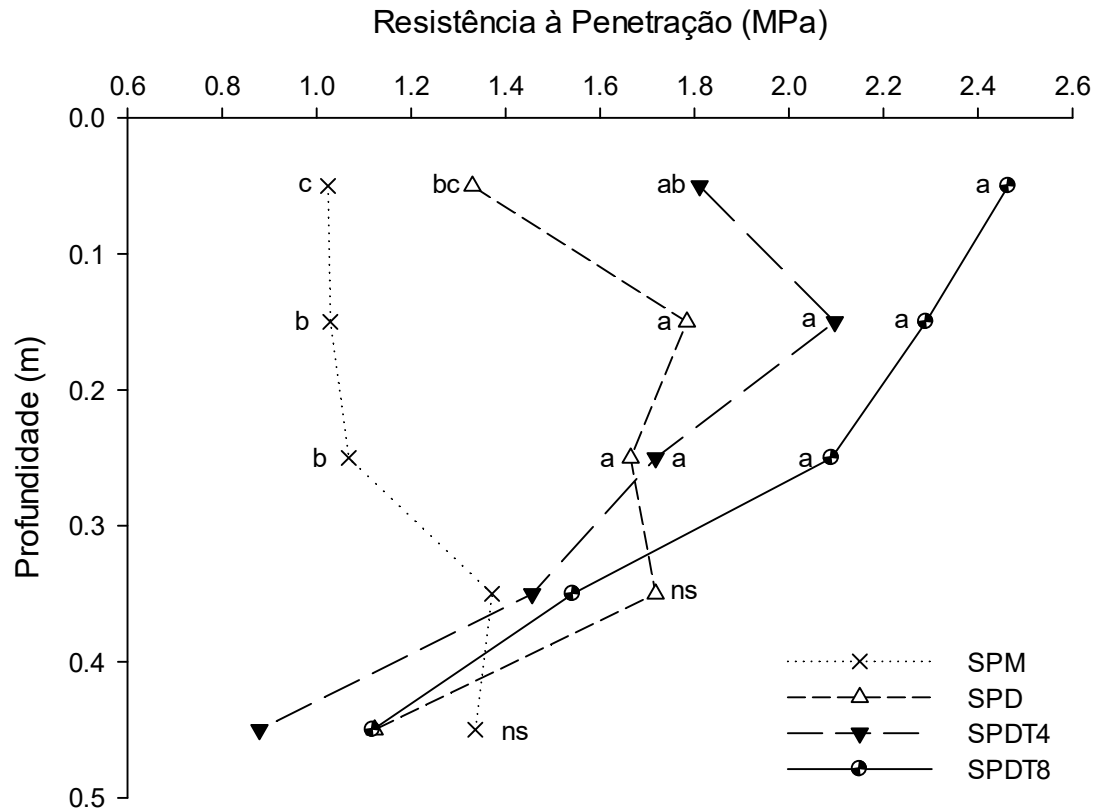


Figura 7. Resistência à Penetração (MPa) para os tratamentos níveis de compactação em Latossolo Vermelho

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). \*médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>: não significativo a 5% pelo teste de Tukey.

Este efeito de aumento nos valores de resistência do solo à penetração nas camadas superficiais do solo pela ação do tráfego de máquinas em área de plantio direto também foi diagnosticado por Trentin et al. (2018), devido à dissipação da carga gerada pelo tráfego na camada superficial do solo. Espessato et al. (2017), estudando os efeitos do tráfego de máquinas (1, 6, 11, 16 e 21 passadas de trator) no desenvolvimento e produção da soja, constataram que os valores de RP até a profundidade de 0,20 m afetaram o desenvolvimento e o rendimento da soja. Nas áreas trafegadas mais do que seis vezes, houve redução no rendimento de grãos e aumento na resistência à penetração.

A diminuição da resistência do solo à penetração devido à operação de escarificação já era esperada. Entretanto, a mobilização do solo pela escarificação favorece reduções no suporte de carga (ORTIGARA et al., 2014)



e do armazenamento de água no solo. Cortez et al. (2017) apontam que, em áreas sob SPD, os valores de resistência do solo à penetração são maiores até a camada de 0,30 m, sendo capaz de suportar maior carga do que os solos escarificados. Silva et al. (2012) concluem que os efeitos benéficos a curto prazo da escarificação na redução da densidade do solo em superfície aumenta o risco de compactação em camadas mais profundas.

A escarificação do solo, quando utilizada de maneira isolada, sem o uso de plantas de cobertura, não é uma prática recomendada para melhorar a qualidade estrutural do solo (GUEDES FILHO et al., 2013), uma vez que ocorre a quebra dos macroagregados do solo pela ação mecânica das hastes. Drescher et al. (2016) destacam que a decisão em realizar a escarificação do solo não deve ser baseada em valores de densidade do solo ou de porosidade total. Deste modo, é necessária a verificação da estrutura do solo também por meio dos valores de resistência do solo à penetração, para identificar possíveis limitações do solo ao desenvolvimento radicular. Complementar a esta perspectiva, Bergamin et al. (2010a) apontam que o grau de compactação afeta a anatomia radicular do milho e a resistência à penetração é o indicador físico que melhor expressa esse efeito

Estudos apontam que o primeiro tráfego de máquinas sobre a área é responsável pela maior deformação do solo, sendo os efeitos das passadas subsequentes mais reduzidos (BOTTA et al., 2002; PYTKA, 2005; CUNHA et al., 2009). A capacidade que um solo tem de receber e suportar determinada carga em sua superfície é variável de solo para solo. Se a carga aplicada for menor do que a capacidade de suporte de carga, ocorrem deformações elásticas; se maior do que a capacidade de suporte, ocorrem deformações plásticas.

Tal capacidade de suportar carga confere ao solo duas características, cujas quais são destacadas em Bavoso et al. (2012) como componentes ligados à resistência do solo e aqueles relacionados à resiliência do solo. A resistência é definida como a capacidade de o solo resistir às mudanças por um distúrbio (SEYBOLD et al., 1999). Já a resiliência do solo se refere à habilidade intrínseca de recuperar-se de um estresse aplicado e retornar a uma condição semelhante ao estado antecedente (BLANCO; LAL, 2008; BONETTI et al., 2017).

A curva de retenção de água no solo apresentou diferença entre os tratamentos níveis de compactação, perceptíveis nas três primeiras camadas avaliadas (Figura 8). Na camada superficial, o conteúdo de água na saturação do solo variou de  $0,50 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , no tratamento SPDT8, a  $0,58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , no tratamento SPM. Na camada subsuperficial, os valores se apresentam semelhantes, com  $0,50 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para o tratamento SPDT8 e  $0,57 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para o tratamento SPM. Em ambas as camadas, quando aplicadas maiores tensões na amostra (maiores do que 10 kPa), há uma inversão no conteúdo de água para os tratamentos, passando para  $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  no tratamento SPDT8 e  $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  no tratamento SPM. Estes resultados vão ao encontro do que apresentam Reichert et al. (2016), que realizaram estudo com épocas de preparo do solo em área cultivada sob SPD. Os autores identificaram que a operação de preparo do solo apresentou maior conteúdo de água comparada com a área há mais tempo sob SPD.

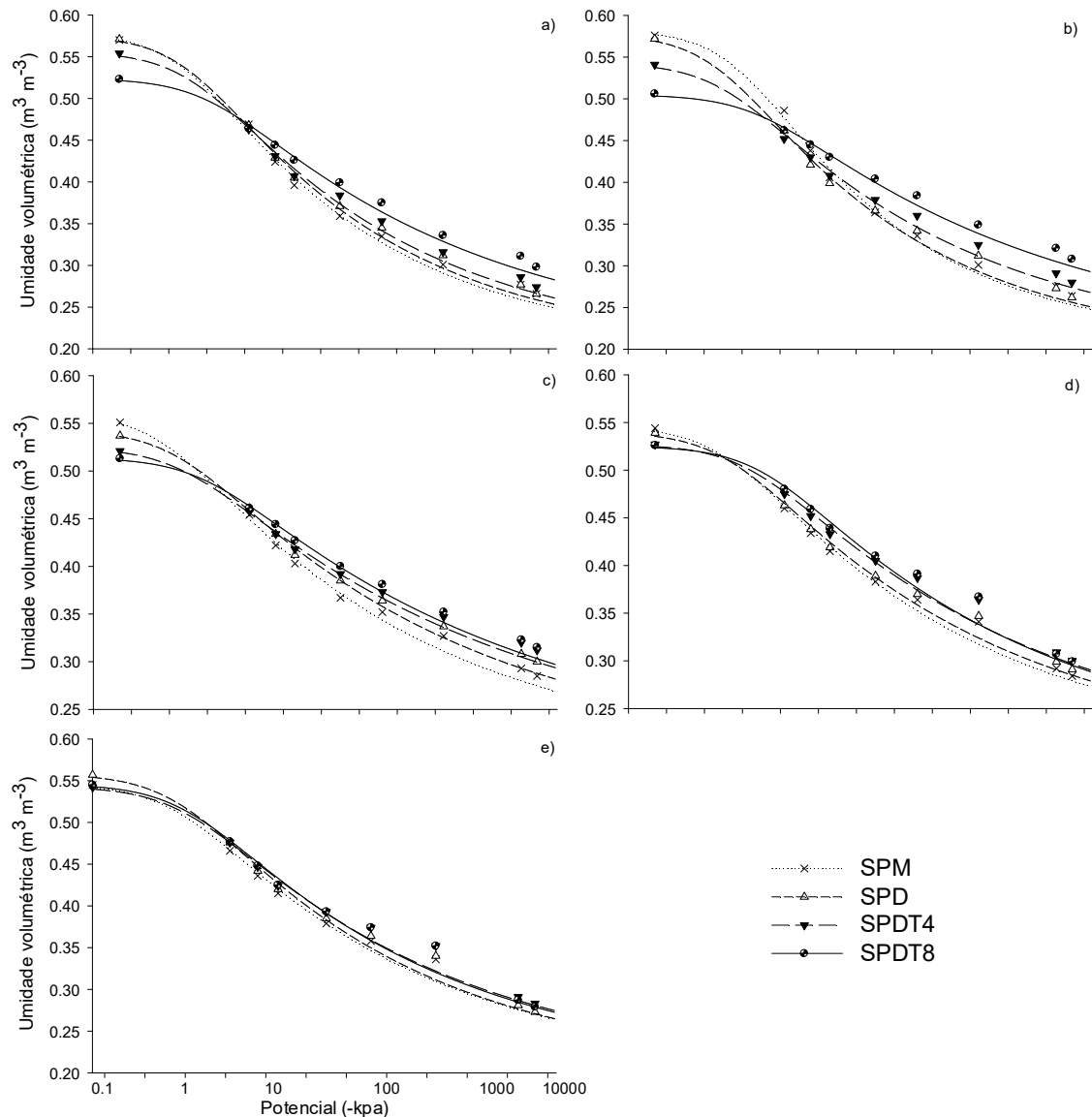


Figura 8. Curva de retenção de água no solo para os tratamentos níveis de compactação nas camadas: a) 0-0,10 m; b) 0,10-0,20 m; c) 0,20-0,30 m; d) 0,30-0,40 m; e) 0,40-0,50 m.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa).

A forma como ocorre a retenção de água no solo para estas três primeiras camadas se dá pela relação do tamanho dos poros e as funções que exercem no ambiente. No tratamento SPM, há maior quantidade de macroporos, que são responsáveis pelo fluxo e armazenamento da água no solo. Quando maiores tensões são aplicadas no solo, estes poros de maior diâmetro perdem a água mais facilmente. Já o tratamento SPDT8 apresenta

maior quantidade de microporos, que se caracterizam por reter fortemente a água em maiores tensões.

#### **4. Conclusões**

As avaliações tradicionais de estrutura do solo realizadas neste estudo não possibilitaram verificar a influência das plantas antecessoras ao cultivo da soja na reestruturação do solo, após dois anos da compactação adicional e descompactação mecânica.

O uso de plantas de cobertura durante dois anos auxiliou na reestruturação do Latossolo escarificado e trafegado. Contudo, a análise desenvolvida não possibilitou diferenciar a influência de cada cultura (aveia, braquiária, milho e trigo) para a reestruturação do solo.

A reestruturação do solo pode ser observada pela resiliência da densidade do solo e porosidade, com a diminuição das perturbações causadas pelos tratamentos onde o solo foi trafegado.

Embora não se tenha diagnosticado quais culturas apresentam maior potencial de reestruturação do solo, os dados permitem observar que após dois anos do tráfego de máquinas agrícolas, utilizados na compactação inicial do experimento, ainda observa-se aumento na densidade, resistência à penetração e microporosidade, e redução da macroporosidade e porosidade total, com diferenças perceptíveis até 0,30 m de profundidade.

Após dois anos, o tratamento escarificado apresenta menor densidade do solo e resistência mecânica do solo à penetração na camada de 0,0 a 0,30 m, em relação aos demais tratamentos.

Para investigar quais culturas são mais benéficas na recuperação estrutural do solo, compreende-se, a partir do exposto, que estudos com outras técnicas de análise podem apresentar resultados mais detalhados, complementando a pesquisa aqui realizada.

## **CAPÍTULO IV – Efeito de culturas antecessoras no desenvolvimento radicular e rendimento de grãos de soja em Latossolo vermelho submetido a níveis de compactação**

### **1. Introdução**

A área cultivada com culturas agrícolas em Sistema Plantio Direto (SPD) evoluiu consideravelmente nas últimas décadas. Derpsch e Friedrich (2010) apresentam uma taxa de crescimento de seis milhões de hectares por ano na década de 2000 a 2010. No Brasil, neste período, a área sob SPD alcançou cerca de 27,5 milhões de hectares (DERPSCH; FRIEDRICH, 2009). No Estado do Paraná, a área de cultivo sob SPD na estação do verão (soma das áreas cultivadas com soja, milho e feijão) passou de 66,13% em 2000 para 91,65% em 2014 (FBPDP, 2017).

No Sul do Brasil, o SPD foi introduzido com a adoção de culturas de cobertura no inverno para melhorar a proteção contra a erosão do solo. Para este fim, a aveia preta (*Avena strigosa*) é uma das principais espécies utilizadas devido a sua produção de matéria seca, robustez e rápido desenvolvimento, mesmo em solos com baixa fertilidade (COSTA et al., 2016; TIECHER et al., 2017). Há, entretanto, espécies vegetais que apresentam desenvolvimento radicular robusto, o que pode auxiliar na estruturação do solo e na mitigação da compactação.

No SPD, o revolvimento do solo fica restrito à linha de semeadura, em que os mecanismos da semeadora (disco e/ou sulcador do tipo haste) preparam o sulco para deposição de sementes e fertilizantes. Desta forma, mesmo em SPD, o tráfego de máquinas pode ocasionar a compactação do solo, com a formação de camadas com maiores níveis de densidade (CAVALIERI et al., 2009), alterando o desenvolvimento do sistema radicular

das plantas (BERGAMIN et al., 2010a) e restringindo o crescimento e a produtividade das culturas (ESPESSATO et al., 2017).

Assim, se faz importante o estudo do uso de espécies vegetais para atuarem na mitigação da compactação do solo, contribuindo na estruturação do solo, na formação de galerias para fluxo e armazenamento de água e ar, auxiliando o desempenho das culturas sucessivas (WILLIAMS; WEIL, 2003; AMOSSÉ et al., 2013; OLA et al., 2015).

Neste contexto, a hipótese deste trabalho é de que o uso de gramíneas em cobertura do solo no sistema de rotação, com abundante sistema radicular, favorece o crescimento radicular de soja, e, por consequência, incrementa a produtividade de grãos. Assim, os objetivos deste trabalho foram avaliar o efeito do cultivo de diferentes gramíneas na recuperação da estrutura de Latossolo Vermelho com níveis de compactação e o desempenho da cultura da soja.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1. Local**

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Embrapa Soja, no município de Londrina (PR) (23°11' S e 51°11' W, altitude de 600 m), situada em região que apresenta clima tipo Cfa, subtropical úmido mesotérmico, segundo a classificação de Köppen, com médias anuais de 20°C de temperatura e de 1340 mm de precipitação. O solo desta área é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (SANTOS et al., 2013), com 784 g kg<sup>-1</sup> de argila na camada de 0-0,30 m de profundidade.

Entre os anos de 1991 a 2009, a área foi conduzida sob SPD, com a rotação de culturas soja/milho no verão e trigo/aveia no inverno. De 2010 a 2012, foi cultivada, em área total, cobertura de braquiária (*Urochloa ruziziensis*), sem manejo da massa seca. Antecedendo a implantação das unidades amostrais deste experimento, foi realizada dessecação do material vegetal presente na área, com duas aplicações de herbicida Glifosato, aos 90 e 20 dias antes do início das atividades, com a utilização de 1.800 e 1.080 g ha<sup>-1</sup> de produto comercial em cada aplicação, respectivamente.

## 2.2 Delineamento experimental

O experimento consiste em um fatorial 4x4 (espécies vegetais x níveis de compactação) sob o delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições e parcelas subdivididas. O fator espécie vegetal, nas parcelas, é constituído por quatro espécies vegetais: (I) aveia preta (*Avena strigosa*); (II) braquiária (*Urochloa ruziziensis*); (III) milho (*Zea mays*) 2ª safra; e (IV) trigo (*Triticum aestivum*). O fator nível de compactação, alocado nas subparcelas, foi constituído por: (a) sistema de preparo mínimo com escarificação do solo (SPM) (escarificador de 5 hastes, espaçadas 0,35 m entre si, ponteiros com 0,08 m, com profundidade média de ação equivalente a 0,25 m, equipado com rolo destorroador), realizado na implantação do experimento; (b) Sistema Plantio Direto (SPD); (c) Sistema Plantio Direto trafegado quatro vezes com um trator (SPDT4) (marca CBT, modelo 8060, 4x2, com tração dianteira auxiliar, equipado com estrutura para pá de concha na dianteira, pneus dianteiros 14.9-24 R1 e traseiros 18.4-34 R1, com lastros metálicos e hidráulico de 75% do volume total nos quatro rodados), com massa total de 7,2 Mg (4,3 Mg no eixo traseiro) com pressão de contato pneu-solo estimado em 180 kPa, através de procedimento proposto por O'sullivan, Henshall e Dickson (1999); (d) Sistema Plantio Direto trafegado oito vezes com uma colhedora autopropelida (SPDT8) (marca SLC, modelo 6200, equipada com plataforma colhedora de milho, pneus dianteiros 18.4-30 R1 e traseiros 9.00-16) com massa total de 9,5 Mg (6 Mg no eixo dianteiro), com pressão de contato solo-pneu estimado em 220 kPa, através de procedimento proposto por O'sullivan, Henshall e Dickson (1999).

A implantação dos tratamentos níveis de compactação foi realizada em fevereiro de 2013. No momento da prática dos tráfegos, o solo se encontrava com umidade em capacidade de campo (conteúdo de água no solo na camada de 0-0,2 m de 0,33 g g<sup>-1</sup>). A escarificação foi realizada quando o solo se encontrava com consistência friável (conteúdo de água de 0,29 g g<sup>-1</sup>, na camada de 0-0,2 m).

No cultivo de inverno de 2013, foi semeado trigo em área total (cultivar BRS Pardella), com população de 250 plantas m<sup>-2</sup> e espaçamento

entrelinha de 0,17 m. Para a operação, foi utilizada semeadora-adubadora marca New Holland, modelo SHM 11/13, equipada com sulcadores de adubo e semente tipo disco duplo defasado.

No cultivo de verão ano 2013/14, foi cultivada soja em área total (cultivar BRS 359 RR), semeada em 10 de outubro de 2013, com um espaçamento entrelinhas de 0,45 m para uma população de 30 plantas m<sup>-2</sup>. Foi utilizada semeadora-adubadora marca Jumil, modelo Exacta 5070, equipada com sulcadores de adubo e semente do tipo haste e disco duplo desencontrado, respectivamente, com profundidade de semeadura de 0,05 m e de deposição de fertilizante (NPK 0-20-20, 270 kg ha<sup>-1</sup>) 0,1 m.

No cultivo de inverno de 2014, foram implantados os tratamentos espécies vegetais de outono-inverno. A cultura do milho (segunda safra ou safrinha) foi semeada em 27 de fevereiro de 2014, com semeadora-adubadora marca Semeato, modelo SHM 11/13, com três linhas espaçadas 0,9 m. A aveia preta, braquiária e trigo foram semeadas com a mesma semeadora-adubadora utilizada em 2013, com espaçamento entrelinhas de 0,17 m.

Para o cultivo de verão 2014/15, foi semeada soja em todas as parcelas, com as mesmas configurações da operação realizada em igual período do ano antecessor.

### 2.3 Coleta das amostras e determinações

Referentes aos cultivos antecessores à soja, safra 2014/15, apresenta-se neste trabalho os resultados de produção do sistema radicular e de grãos expostos anteriormente por Moraes (2017) em sua tese de doutorado. Trata-se de pesquisa complementar a esta investigação, sendo importante para referenciar se há, ou não, ação do sistema radicular das culturas na melhoria estrutural do solo.

A análise do sistema radicular da soja 2014/15 foi realizada por meio da coleta de monólitos de solo (Figura 9), conforme metodologia descrita em Böhm (1979). Os monólitos foram coletados em cinco camadas (0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 m). Em cada camada foram coletadas três faixas, levando-se em consideração o espaçamento da linha de semeadura da cultura da soja, sendo a amostra "A" coletada no quadrante



esquerdo da linha de semeadura; a amostra “B” coletada na linha de semeadura da soja; e a amostra “C” no quadrante direito da linha de semeadura da soja.

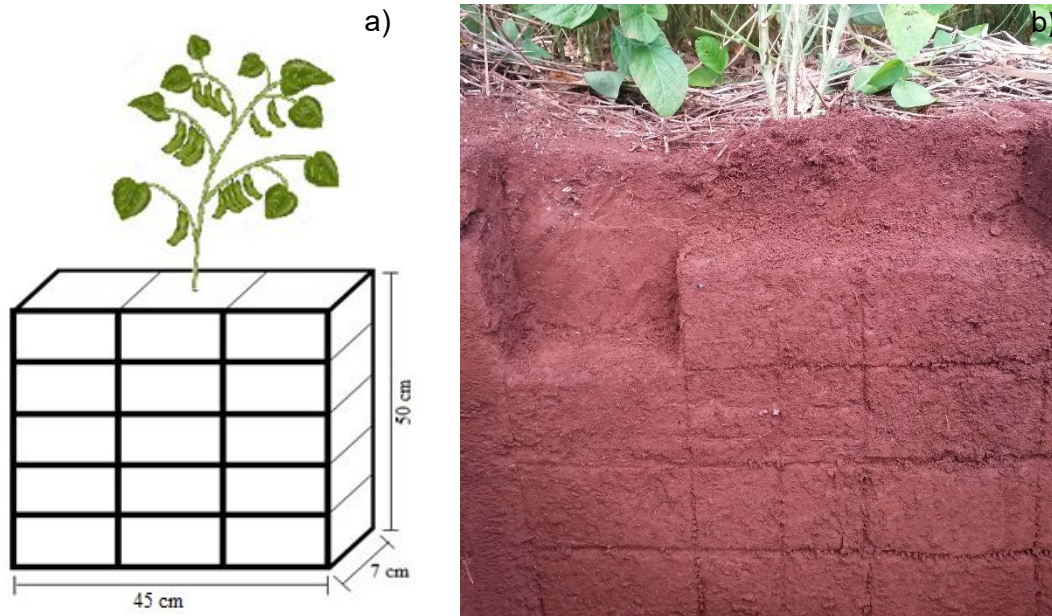


Figura 9. Coleta de amostras indeformadas de solo: a) grid de coleta; b) extração dos monólitos de solo.

Coletou-se 15 amostras por tratamento, totalizando 720 amostras indeformadas, com dimensões de 0,15 x 0,10 x 0,07 m (largura, profundidade e espessura), conforme representado na Figura 9. A coleta do material foi realizada entre os ciclos fenológicos de floração e início do estágio fenológico R3 da soja (FEHR; CAVINESS, 1977).

A coleta foi realizada com o conteúdo de água do solo próximo da capacidade de campo, onde foi demarcada a área correspondente a cada monólito, seguida da extração do volume referente a cada quadrante. Imediatamente após a remoção dos monólitos do perfil do solo, as amostras foram ensacadas em embalagem plástica e acondicionadas em caixas com estrutura de proteção para o transporte.

Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para a sala de lavagem de raízes, na qual foi realizada a separação do material vegetal do solo. Para isto, utilizou-se uma peneira com malha de 0,5 mm e água em pressão capaz de romper a estrutura do solo para que as partículas pudessem se desprender do sistema radicular e passar pela malha. Após a lavagem, o

sistema radicular de cada amostra foi alocado em recipiente de vidro, submerso em solução de álcool 70%, para conservação das amostras até a análise em laboratório.

No laboratório de Física do Solo da Embrapa Soja, as amostras foram preparadas, com a obtenção de uma amostra representativa do sistema radicular dispostas em uma placa de vidro, digitalizada com auxílio de scanner (*Delta-T Scan Root Analysis System*), e posterior processamento no software Safira 2.0 (JORGE; SILVA, 2010). Desta forma, foi possível determinar o volume, comprimento, área superficial e diâmetro radicular. Estes parâmetros foram relacionados com o volume de solo coletado para obter as razões correspondentes em m<sup>3</sup> de solo. A massa seca das raízes foi determinada e relacionada com o volume de solo coletado.

A produção de massa seca da parte aérea das culturas foi determinada através da coleta de toda a fitomassa da planta na parte aérea de uma área conhecida (0,5 m<sup>2</sup>), seca em estufa e pesada em balança de precisão. A produtividade da soja foi determinada pela colheita mecânica de 12 m de seis linhas centrais dentro de cada parcela, totalizando 32,4 m<sup>2</sup> de área. Os grãos foram limpos e pesados, os valores obtidos foram corrigidos para 13% de teor de umidade.

## 2.4 Análise dos dados

Os resultados foram submetidos à ANOVA, para cada camada amostrada. Quando o efeito dos fatores de tratamento foi significativo em nível de 5% de probabilidade de erro, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, utilizando o software estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011), e os gráficos foram plotados por meio do programa SigmaPlot®12.5 (*Systat software, Inc.*).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Produção do sistema radicular e de grãos das culturas antecessoras à soja

Os níveis de compactação do solo alteraram o desenvolvimento do sistema radicular das culturas. O trigo cultivado em 2013, logo após a implantação dos tratamentos níveis de compactação do solo, foi diretamente influenciado pela ação do tráfego das máquinas. Este efeito foi identificado principalmente na camada superficial, em que a compactação do solo pelo tráfego do trator (SPDT4) e da colhedora (SPDT8) restringiu o desenvolvimento do sistema radicular em 25% e 35%, respectivamente, quando comparado ao tratamento SPD contínuo (Figura 10a).

O tratamento SPD contínuo apresentou produção de 470 kg ha<sup>-1</sup> de massa de raiz de trigo. No tratamento SPM houve um aumento de 27%, enquanto que nos tratamentos SPDT4 e SPDT8 ocorreram reduções de 20% e 25% na massa seca de raízes de trigo, respectivamente. A distinção de produção de sistema radicular não refletiu em produtividade de grãos de trigo na safra 2013, visto que não ocorreu diferença na produção para os tratamentos níveis de compactação do solo (Figura 11).

O sistema radicular do trigo, cultivado na safra 2014, não foi influenciado pelos tratamentos (Figura 10b). Porém, houve efeito na produção de grãos (Figura 11), em que o tratamento SPD contínuo foi superior ao tratamento SPDT8. A superioridade para a produção de grãos no tratamento SPD contínuo foi diagnosticada para a soja cultivada na safra 2013/14 e o milho cultivado na safra 2014 (Figura 11). Em ambos os casos, não houve efeitos no desenvolvimento do sistema radicular das culturas, o que demonstra que, mesmo produzindo menor quantidade de raízes, o SPD contínuo disponibiliza para as culturas um ambiente que proporciona melhor desenvolvimento de grãos.

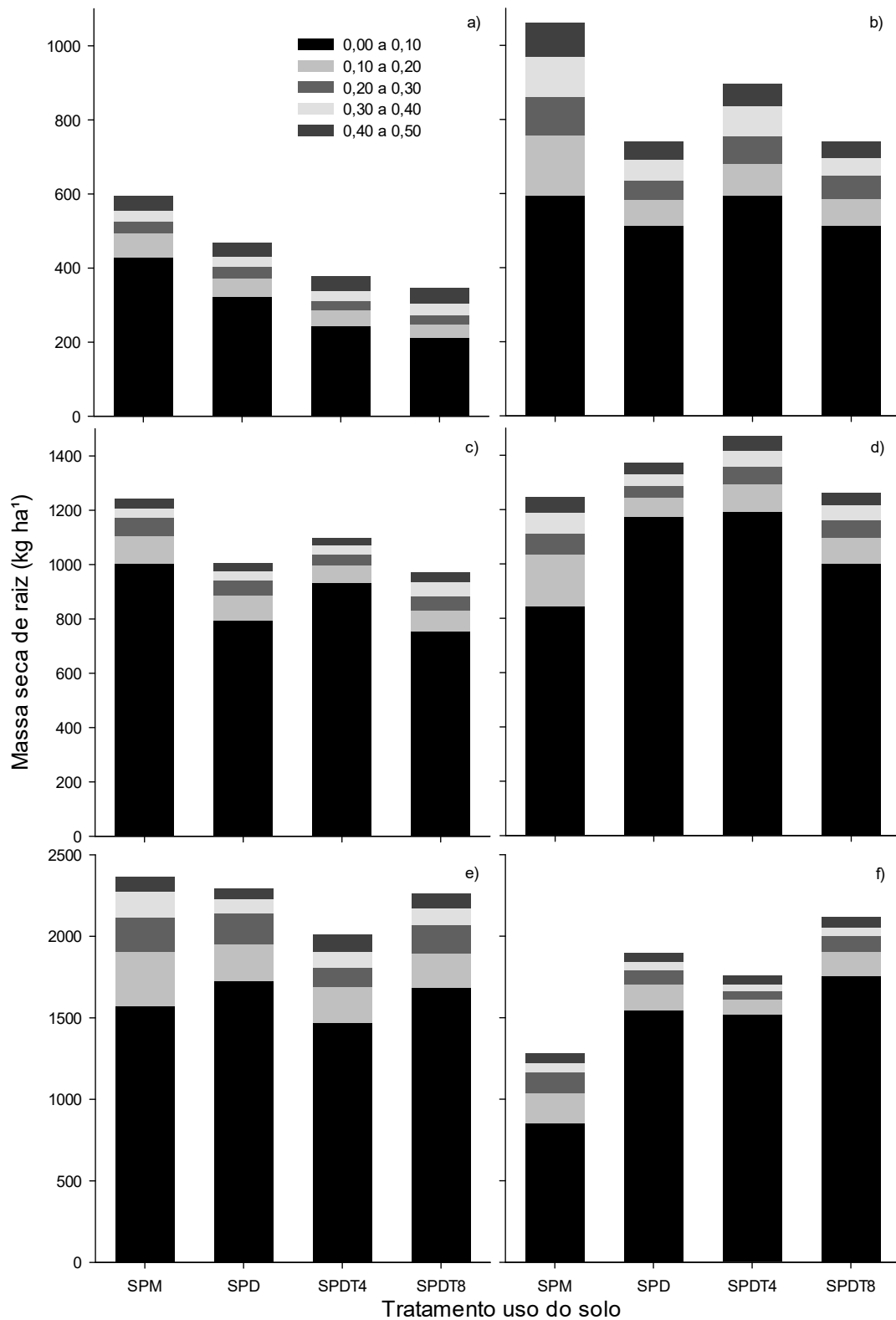


Figura 10. Produção de massa seca de raízes: trigo 2013 (a), trigo 2014 (b), soja 2013/14 (c), aveia 2014 (d), braquiária 2014 (e) e milho 2014 (f), por camadas, para os tratamentos níveis de compactação.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator; e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora.

Fonte: Moraes, 2017.

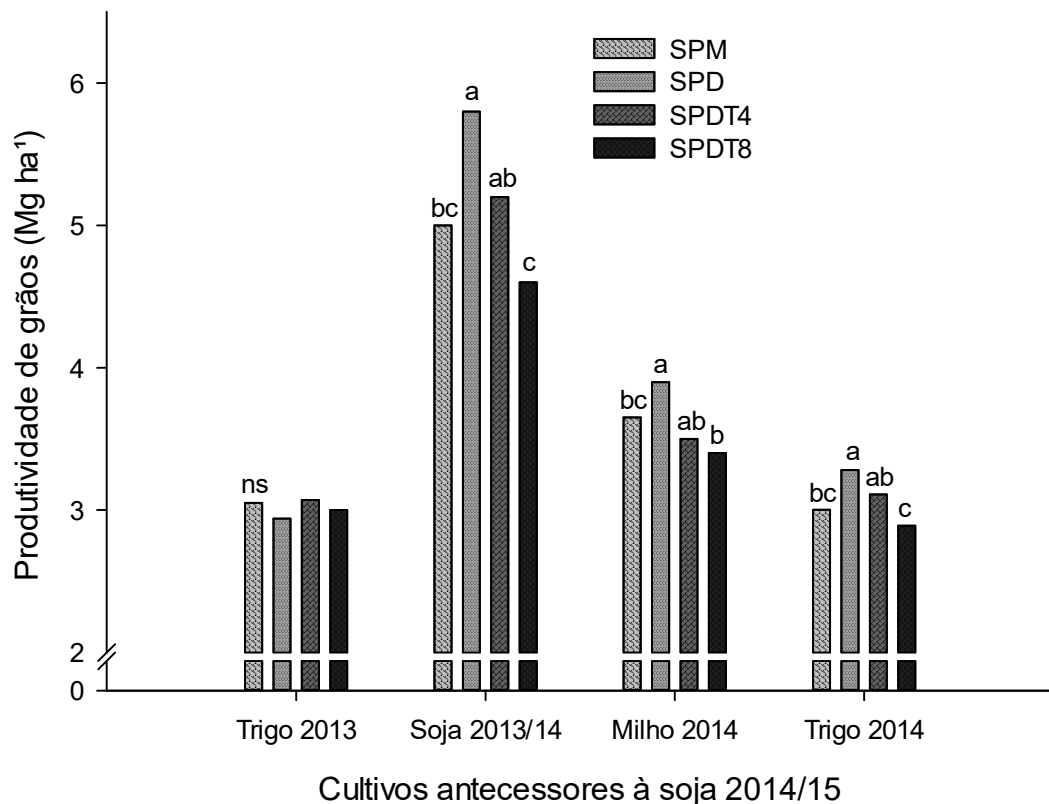


Figura 11. Produtividade de grãos dos cultivos antecessores à soja para o tratamento níveis de compactação em Latossolo vermelho.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%; ns: não significativo pelo teste de Tukey a 5%.

Fonte: Moraes, 2017.

O aumento na produção em SPD pode ser justificado por um equilíbrio físico do sistema, como analisado por Moreira et al. (2016). Ao verificar as alterações do manejo do solo nas propriedades físicas, os autores concluem que em SPD contínuo, a longo prazo, o solo permanece fisicamente funcional.

A ausência de relação entre a produção de raízes e de grãos também foi verificado por Nunes et al. (2014), que, avaliando o desenvolvimento do milho cultivado após a escarificação do solo, constataram maior desenvolvimento do sistema radicular na primeira safra após a operação de revolvimento do solo, sem que houvesse alteração na produção de grãos.

Dentre as avaliações de desenvolvimento do sistema radicular, a braquiária foi a espécie que apresentou maior produção de massa seca de raiz,

com maiores quantidades para as camadas subsuperficiais (Figura 10). Franchini et al. (2010) destacam que a cultura apresenta características de desenvolvimento radicular que lhe confere capacidade de diminuir a compactação do solo, rompendo camadas com maior densidade.

Balbinot Junior et al. (2017), estudando o efeito do sistema radicular, da massa seca de parte aérea e a produção total de biomassa de braquiária (sistema radicular + massa seca da parte aérea), em comparação com área de pousio em outono-inverno, observaram que o efeito das raízes de *Brachiaria ruziziensis* sobre a produtividade da soja cultivada em sucessão, foi mais expressivo do que o da palha, com aumentos de 55% e 22%, respectivamente. Desta forma, é possível verificar a capacidade de melhoria do ambiente proporcionado pela cultura.

### 3.2. Produção do sistema radicular e de grãos da soja

O uso de culturas antecessoras durante dois anos alterou o desenvolvimento do sistema radicular (área superficial radicular, volume do sistema radicular e massa seca de raízes) e a produtividade de grãos da soja cultivada em Latossolo Vermelho com diferentes níveis de compactação na safra 2014/15.

A área do sistema radicular da soja, cultivada em níveis de compactação após o uso de plantas de cobertura, apresentou efeitos de interação entre os tratamentos na camada superficial de 0,0 a 0,10 m (Figura 12). A ação dos tratamentos onde o solo foi trafegado por máquinas resultou em diminuição na área do sistema radicular, com exceção do tratamento Braquiária, em que o desenvolvimento foi maior no tratamento SPDT4 do que no tratamento SPM. Para os tratamentos milho e trigo, os níveis de compactação não apresentaram diferença significativa.

A importância do uso de plantas em rotação para o estabelecimento da cultura principal já era destacado na década de 1980 por Ehlers et al. (1983). O desenvolvimento radicular da cultura antecessora auxilia na formação de um sistema de poros contínuos, que possibilita ao sistema radicular da planta, cultivada na sequência, um ambiente com menor grau de impedimento. No presente estudo, foi diagnosticada a ação da braquiária no

tratamento SPDT8, que possibilitou maior desenvolvimento do sistema radicular da soja, enquanto que a soja cultivada em sucessão à aveia preta apresentou menor quantidade de raízes (Figura 12).

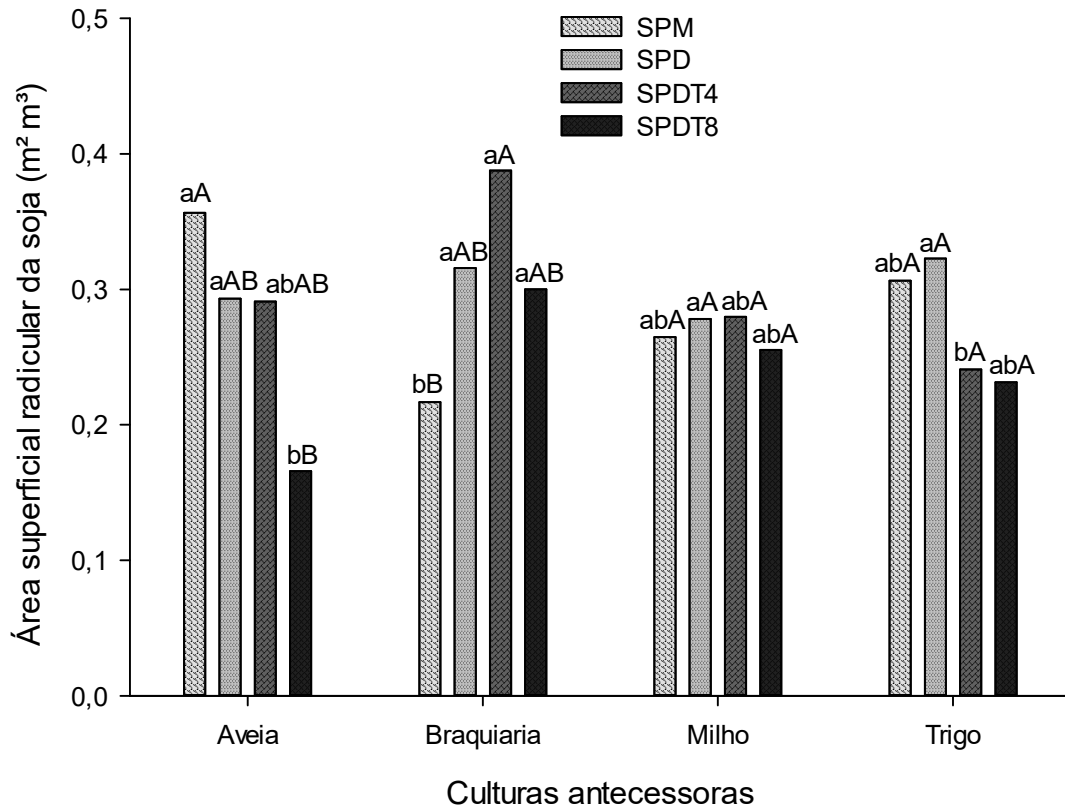


Figura 12. Área superficial radicular de soja, safra 2014/15, na camada de 0,0-0,10 m em função das espécies vegetais antecessoras e níveis de compactação em Latossolo Vermelho.

SPM sistema de preparo mínimo com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator; e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora. \*Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas entre o tratamento níveis de compactação do solo e minúsculas para os tratamentos espécie vegetal, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Nas profundidades abaixo de 0,10 m, não houve interações entre os tratamentos. Na camada de 0,10 a 0,20 m, há efeitos simples para o tratamento níveis de compactação do solo, em que a área induzida ao tráfego de máquinas resultou na diminuição da área de raízes, enquanto que a escarificação do solo proporcionou o seu maior desenvolvimento (Figura 13). A redução na área do sistema radicular da soja pela ação do tráfego com trator também foi constatada por Valadão et al. (2015), bem como alterações na

distribuição no perfil do solo, em que as raízes tendem a se concentrar mais nas camadas superficiais das áreas trafegadas.

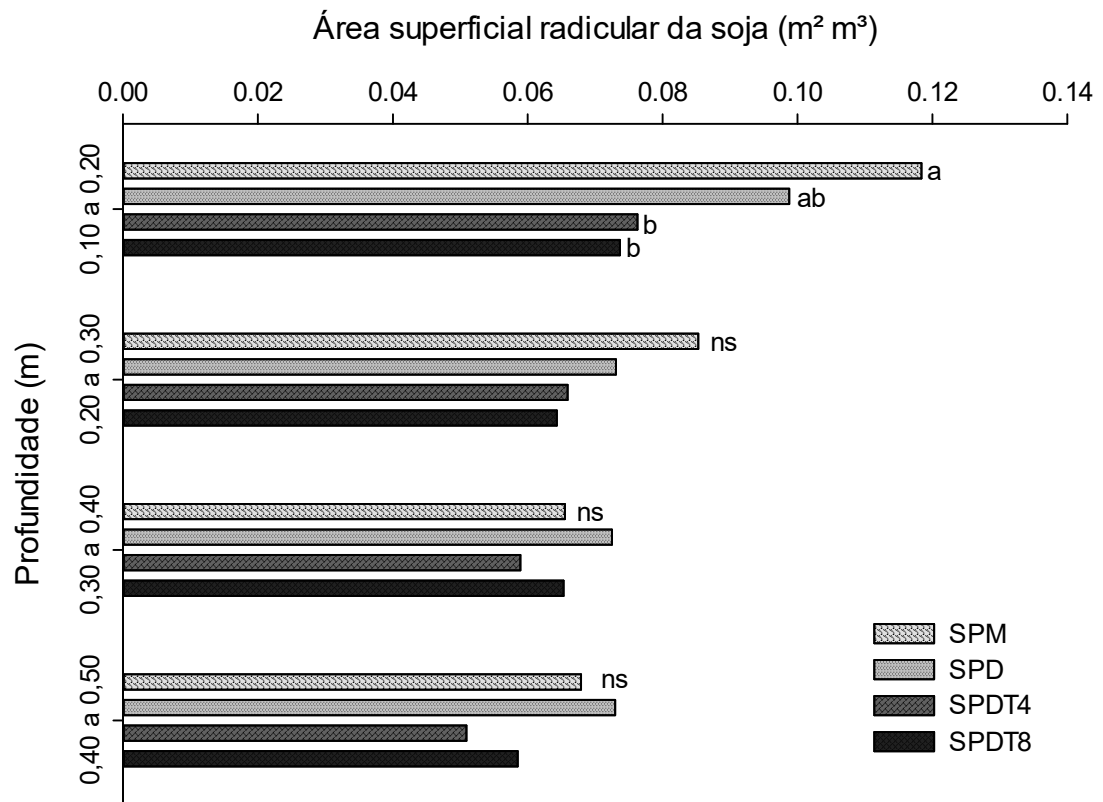


Figura 13. Área superficial das raízes da soja, safra 2014/15, na profundidade de 0,10 a 0,50 m para o tratamento níveis de compactação.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). \*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste de Tukey.

O volume de raízes da soja apresentou interação entre os tratamentos na camada superficial do solo. O tratamento aveia foi linearmente influenciado pela compactação do solo, em que os tratamentos SPM e SPD apresentaram maior volume de raízes do que o SPDT8 (Figura 14).

O tratamento trigo também demonstrou maior volume de raízes para o SPM, diferindo do SPD e SPDT4. O tratamento braquiária registrou menor volume de raízes de soja para o tratamento SPM, distinguindo-se do SPD e do SPDT4. Este efeito se deve ao maior desenvolvimento do sistema radicular da braquiária na camada subsuperficial para o tratamento SPM (Figura 10), o que favoreceu o desenvolvimento do sistema radicular da soja em profundidade para este tratamento (Figura 15).



Este maior desenvolvimento do volume de raízes pode ser explicado pela presença de macroporos nos tratamentos SPM e SPD, que permite o crescimento do sistema radicular nestas áreas de menor impedimento. Em estudo que utilizou a presença de macroporos artificiais, Colombi et al. (2017) avaliaram o desenvolvimento do sistema radicular de culturas em condições de compactação do solo. Os autores indicam que as raízes sentem o seu ambiente físico, permitindo-lhes crescer em direção e local com condições favoráveis do solo. Os diferentes tipos de interação raiz-macroporos indicam que os macroporos servem como um caminho de menor resistência e uma fonte de oxigênio, ambos resultando em aumento da produtividade das culturas nos solos compactados.

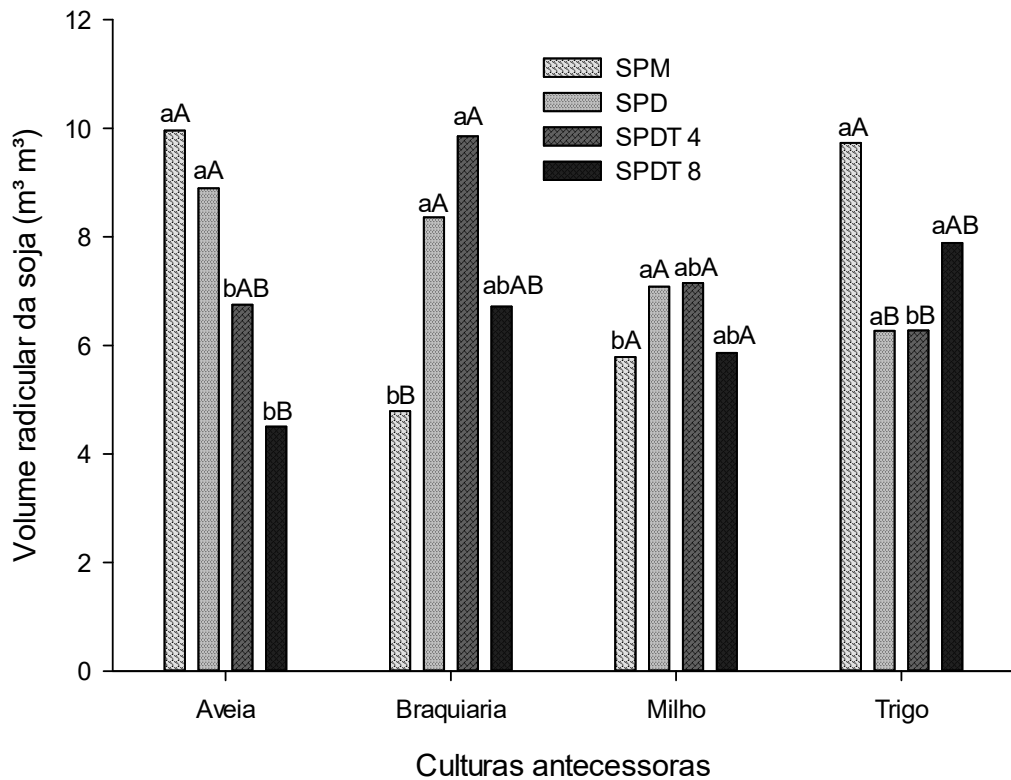


Figura 14. Volume das raízes da soja, safra 2014/15, na camada de 0,0 a 0,10 m para a interação entre os tratamentos espécie vegetal e níveis de compactação.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). \*Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas entre o tratamento níveis de compactação do solo e minúsculas para os tratamentos espécie vegetal, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Para as demais profundidades do perfil do solo, não houve interação entre os tratamentos, somente efeitos simples para os níveis de compactação do solo. O tratamento SPM apresenta maior volume de raízes de soja até a camada de 0,30 m, diferindo dos tratamentos nos quais o solo foi trafegado por máquina agrícola (Figura 15).

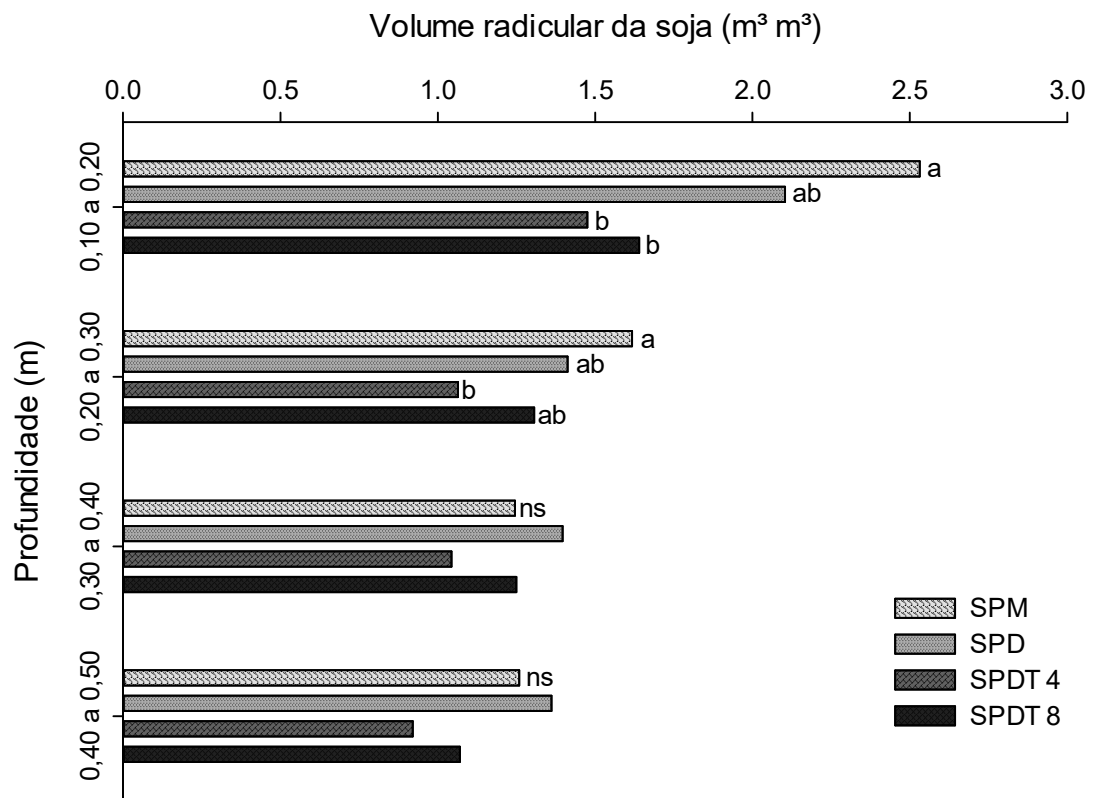


Figura 15. Volume das raízes da soja, safra 2014/15, na profundidade de 0,1 a 0,50 m para o tratamento níveis de compactação do solo.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). \*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. ns: não significativo pelo teste de Tukey a 5%.

A massa seca de raízes de soja apresentou efeitos para o tratamento níveis de compactação do solo até a profundidade de 0,20 m (Figura 16). Na camada superficial, o tratamento SPM e SPDT8 apresentam os maiores valores, diferindo do SPM. Na camada de 0,10 a 0,20 m, o SPD apresenta os maiores valores, diferenciando-se do SPDT8 que, devido à maior compactação do solo, restringiu o desenvolvimento do sistema radicular da soja. À medida que a densidade aumenta e a porosidade diminui, há incrementos na resistência à penetração da raiz, causando impedimento ao

seu crescimento (CHEN et al., 2014). A presença de camadas mais compactadas no perfil do solo provoca o desenvolvimento radicular em zonas de menor resistência, como poros biológicos e nas fissuras do solo (CARDOSO et al., 2006).

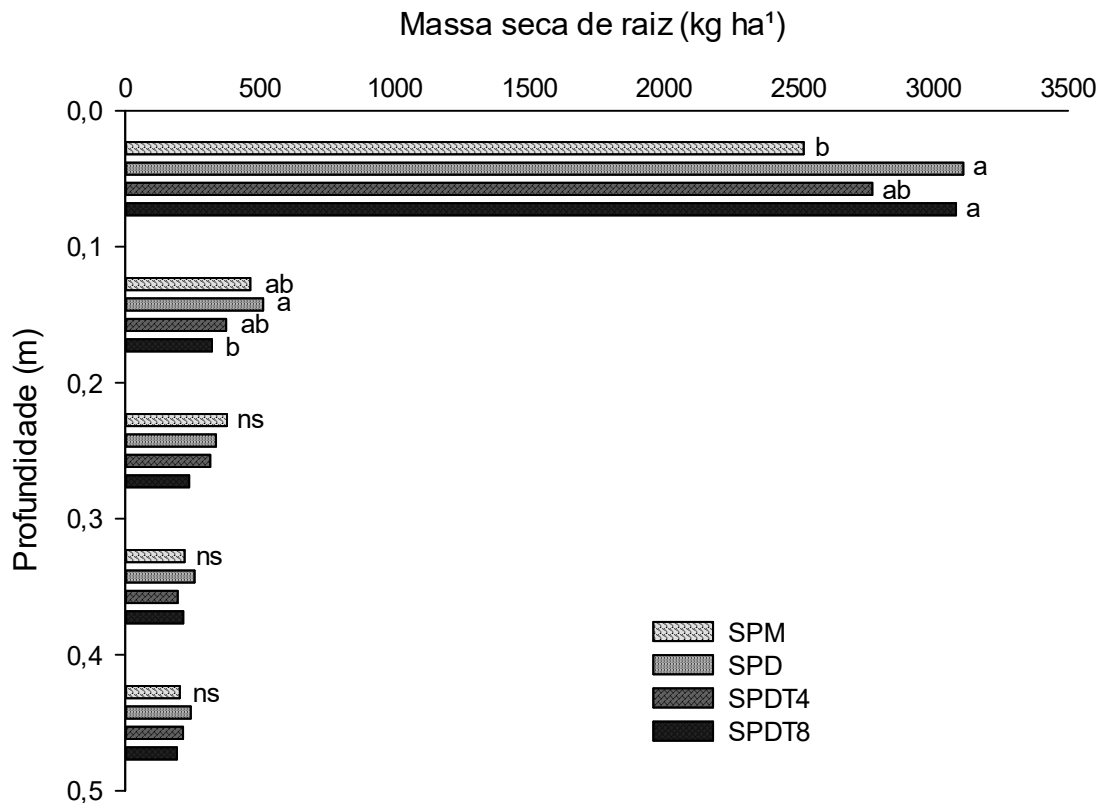


Figura 16. Massa seca de raízes de soja, safra 2014/15, para o tratamento níveis de compactação do solo.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). \*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%. <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste de Tukey a 5%.

É possível observar que o sistema radicular da soja apresentou restrição no seu desenvolvimento devido ao aumento da densidade do solo, neste caso representado pelo grau de compactação atribuído por diferentes pressões impostas ao solo pelos tratamentos SPDT4 e SPDT8. Assim, fez-se análise da correlação dos parâmetros de desenvolvimento do sistema radicular da soja avaliados (área superficial, volume, comprimento e massa seca de raiz) em função do nível de compactação do solo provocada pela escarificação ou tráfego de máquinas (Figura 17).

Todos os parâmetros de desenvolvimento do sistema radicular apresentam correlação quadrática para os níveis de compactação do solo. No tratamento onde foi escarificado, o solo apresenta menores valores de densidade, ao passo que os graus de compactação realizados por diferentes pressões impostas pelos tratamentos SPDT4 e SPDT8 resultam em aumento na sua densidade. Os índices de densidade do solo acima de  $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$  resultaram em decréscimo no desenvolvimento do sistema radicular. Li et al. (2017) observaram que o desenvolvimento do sistema radicular da soja em área com 24 anos de plantio direto em rotação com o milho foi maior do que em área com aração.

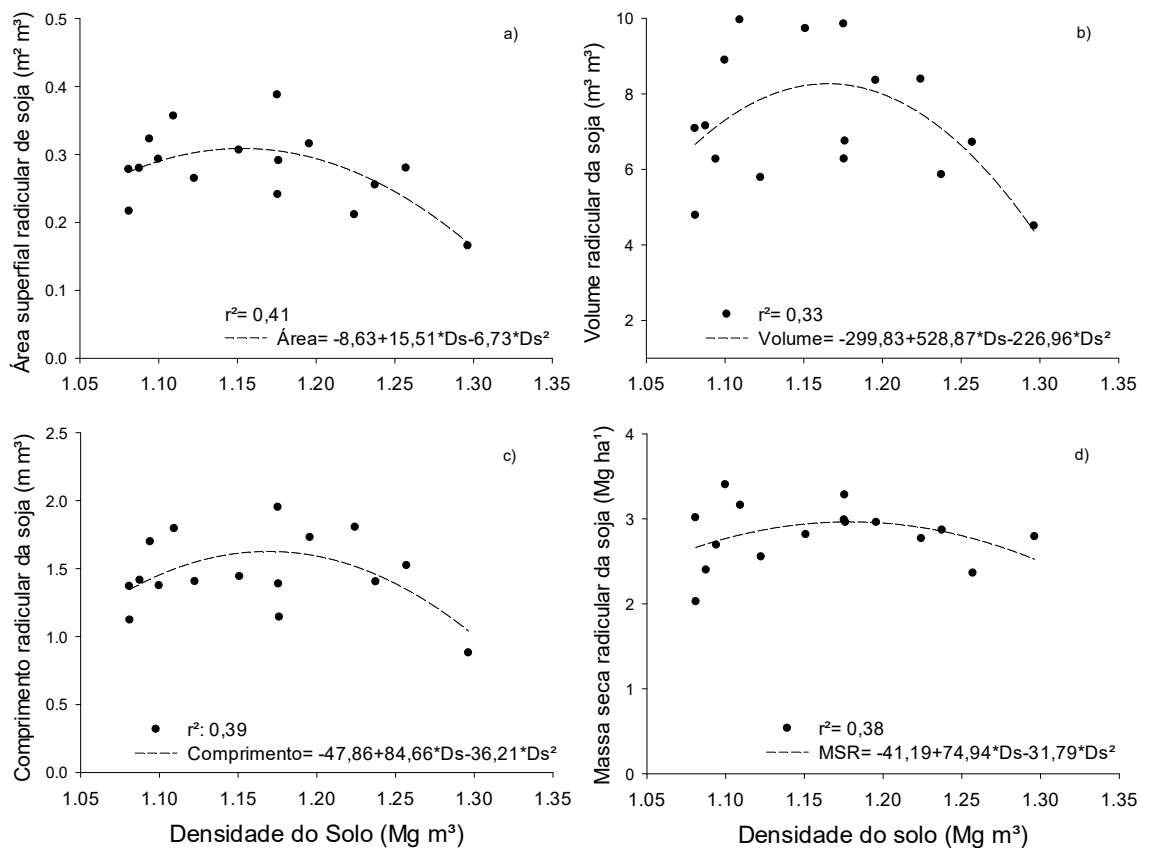


Figura 17. Relações da densidade do solo, na camada de 0 a 0,2 m, em Latossolo Vermelho com as características do sistema radicular da soja: área superficial (a), volume (b), comprimento (c) e massa seca radicular (d).

A produção de grãos de soja, safra 2014/2015, apresentou efeitos para a interação dos tratamentos (Figura 18). A soja cultivada em sucessão ao trigo nos tratamentos SPD e SPDT4 apresentou a maior produção de grãos,

diferindo do SPM, que, por sua vez, teve redução de 17% na produção de grãos de soja. Quando cultivada em sucessão à braquiária, a soja mostrou novamente maior produção de grãos para o tratamento SPD, diferentemente do SPDT8, em que há redução de 13% na produção de grãos.

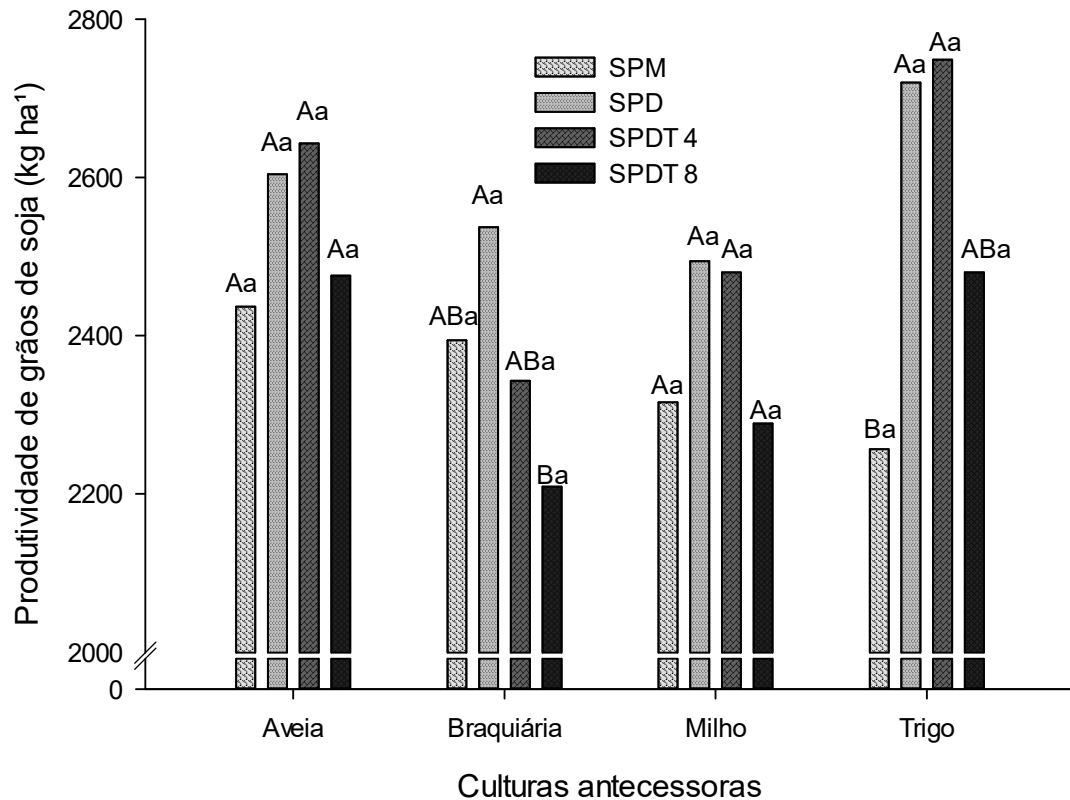


Figura 18. Produção de grãos de soja, safra 2014/15, para os tratamentos espécie vegetal e níveis de compactação.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator (7,2 Mg de massa); e SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora (9,5 Mg de massa). \*Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas entre o tratamento níveis de compactação do solo e minúsculas para os tratamentos espécie vegetal, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A maior produção de grãos de soja, cultivada subsequente à braquiária, também foi verificada por Rosolem e Pivetta (2017). Os autores observam que o uso de rotação de culturas proporcionou maior desenvolvimento do sistema radicular da cultura principal, cultivada subsequente. Ainda, o uso de *Brachiaria ruziziensis* + *Ricinus communis* no sistema de cultivo melhorou não apenas o crescimento e atividade das raízes no perfil do solo, mas também o rendimento da soja, com aumento de 14% na produção de grãos no segundo cultivo, comparado ao sistema sem o uso destas culturas.

Este aumento do rendimento da soja subsequente ao uso de braquiária também foi verificado por Balbinot Junior et al. (2017). Os autores destacam que o uso da *Brachiaria ruziziensis* no outono-inverno aumentou em 83% a produtividade de grãos de soja em sucessão, comparado ao pousio.

Analisando a produção de grãos da soja, é possível constatar que os tratamentos SPM e SPDT8 apresentam menores valores, independentemente da cultura de cobertura antecedente. Assim, faz-se um comparativo da produção de grãos em relação à média da densidade do solo, na camada de 0,0-0,20 m, para os tratamentos níveis de compactação do solo (Figura 19), em que é possível verificar que todos os tratamentos espécie vegetal apresentam redução na produção de grãos com densidade do solo acima de 1,22 Mg m<sup>-3</sup>.

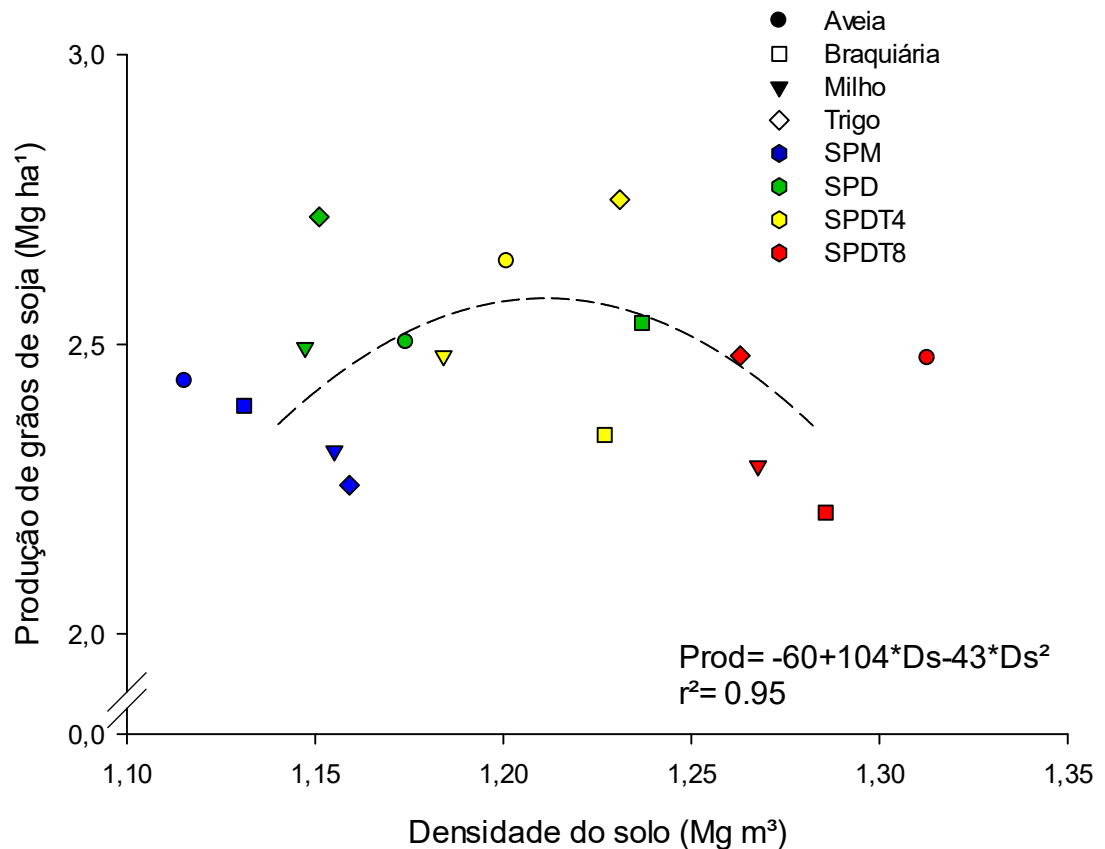


Figura 19. Relação da densidade do solo na produção de grãos de soja para os tratamentos espécie vegetal (aveia, braquiária, milho e trigo).

Ícones azuis se referem às médias para o tratamento SPM (sistema de preparo mínimo); ícones verdes se referem às médias para o tratamento SPD (Sistema Plantio Direto); ícones amarelos se referem às médias para o tratamento SPDT4 (SPD com 4 tráfegos de trator); ícones vermelhos se referem às médias para o tratamento SPDT8 (SPD com 8 tráfegos de colhedora).

Este desempenho da produção de grãos de soja em função do tráfego de máquinas também foi constatado em outras pesquisas. Beulter e Centurion (2004) verificaram que a compactação total da área por rodados de máquinas aumentou a RP e reduziu a produtividade da soja. Beutler et al. (2006) identificaram que o tráfego de trator agrícola, em Latossolo Vermelho distrófico com umidade próxima à capacidade de campo, resultou em aumento nos valores de resistência à penetração (de 1,09 para 2,75 MPa). Também ocorreram perdas na produção de grãos de soja em função do aumento da compactação do solo. Ainda, Oliveira et al. (2012) observaram redução de 10% na produção de grãos de soja em função do tráfego de máquinas. Espessato et al. (2017) observaram que o aumento do número de tráfegos de trator (1, 6, 11, 16 e 21 passadas) levou ao incremento na resistência mecânica do solo à penetração, contribuindo para a diminuição na produtividade da soja. Segundo os autores, o tráfego que resultou em RP maior do que 1,2 MPa (a partir de 6 passadas) acarretou em menor produção de soja.

Os efeitos da escarificação do solo na produção de grãos foram analisados por Calonego et al. (2017), em que a prática resultou em aumentos de produção de grãos da soja na safra seguinte à operação. Porém, este efeito foi efêmero e, a partir do segundo ano após a escarificação, a soja apresentou rendimentos maiores onde cultivada sob plantas de cobertura. Em longo prazo, os autores observam que a soja cultivada em rotação com as plantas de cobertura por mais de uma década apresentou aumento na produção de grãos de 23% e 32%, quando comparado à área escarificada e mantida em pousio na primavera, respectivamente.

A distribuição espacial da densidade do solo, apresentada na Figura 20, demonstra a importância do sistema sulcador para o desenvolvimento das culturas. O grau de mobilização de solo pela ação dos sulcadores não foi determinado, contudo, é possível visualizar na Figura 20, que ocorre menor densidade do solo na linha de semeadura. O tipo de mecanismo sulcador utilizado influencia diretamente a mobilização do solo na linha de semeadura (FURLANI et al., 2011; ZULPO, 2016). Para Levien et al. (2011), ocorreu aumento no volume de solo mobilizado de 62,9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no disco duplo para 95,2 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> na haste sulcadora. Desta forma, a ação da haste em profundidade possibilita o rompimento de zonas com maior grau de

compactação e o desenvolvimento do sistema radicular em subsuperfície (NUNES et al., 2015).

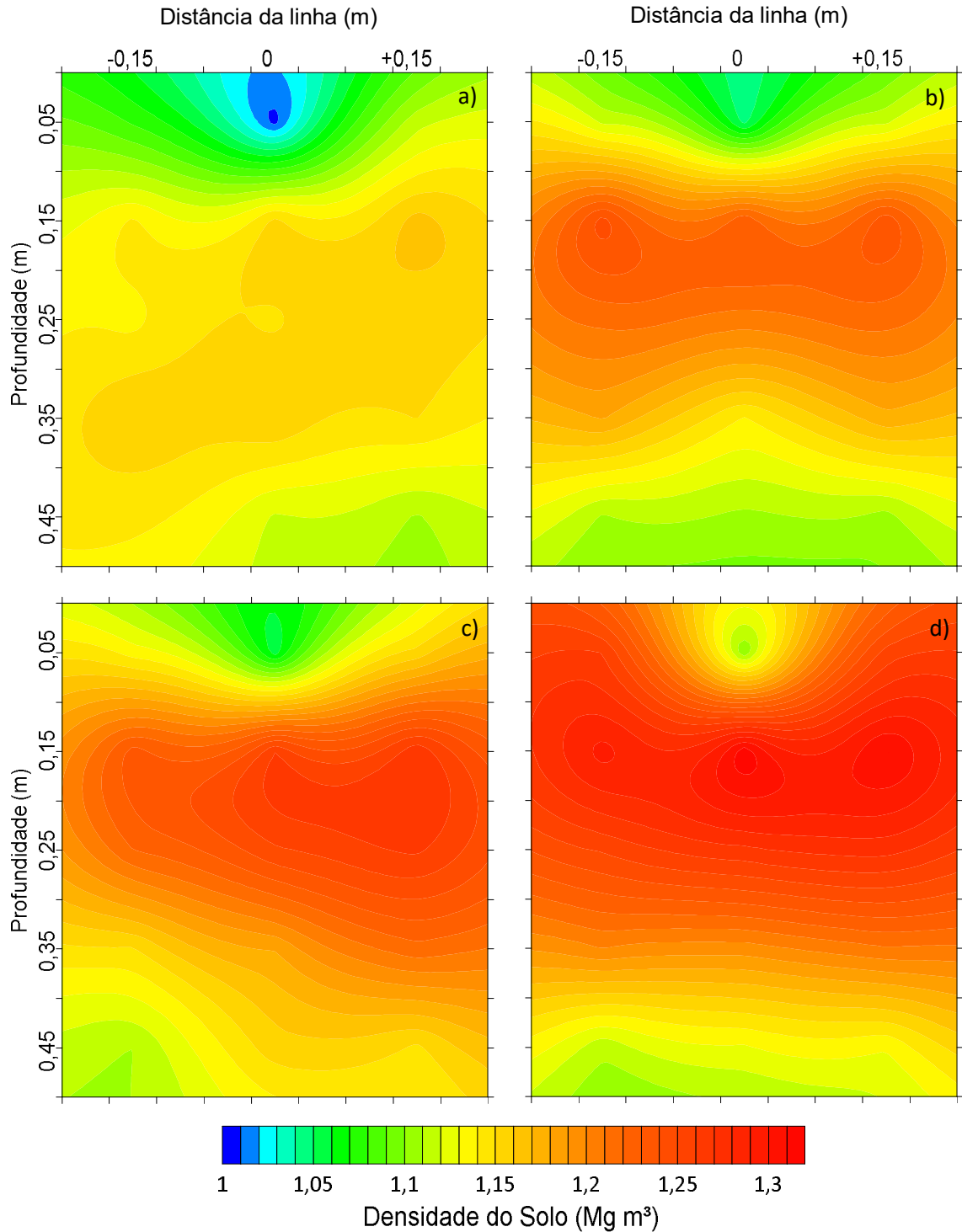


Figura 20. Densidade do solo, para o tratamento níveis de compactação do solo: a) SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; b) SPD: Sistema Plantio Direto; c) SPDT4: SPD com 4 tráfegos com trator; e d) SPDT8: SPD com 8 tráfegos de colhedora.



A ação do sistema sulcador das semeadoras forma um ambiente com menor impedimento ao desenvolvimento radicular. Contudo, este espaço fica limitado à área de ação dos mecanismos sulcadores da semeadora, podendo causar um confinamento das raízes quando estão sobre uma camada com Ds mais elevada, que pode limitar o desenvolvimento radicular em condições de restrição hídrica.

Avaliando o desenvolvimento da soja em área com níveis de compactação (0, 2, 4 e 6 tráfegos de trator) e dois sistemas de abertura de sulco (haste e disco duplo), Trentin et al. (2018) diagnosticaram que o tráfego de máquinas não alterou a produção de soja. Os autores também constataram que houve efeito do sistema de abertura do sulco, em que a soja semeada com haste apresentou produtividade 11% maior comparada ao sulcador de disco duplo.

Embora estudos apontem que a redução na Ds causada pela ação do mecanismo sulcador da semeadora não é persistente (ALLETO; COQUET, 2009), neste experimento verificou-se que a ação desse mecanismo foi importante para o estabelecimento da soja. Ainda, pesquisas indicam que a subsolagem do solo, anteriormente cultivado sob SPD, pode apresentar efeitos na Ds por seis meses (SILVA et al., 2012) a um ano (LEÃO et al., 2014), o que neste estudo foi percebido após dois anos da operação de escarificação. Complementar a isso, entende-se que é necessária a utilização de culturas com bom desenvolvimento de sistema radicular, as quais atuem na reestruturação do solo modificado pela ação mecânica, seja dos mecanismos sulcadores da semeadora ou dos subsoladores.

Segundo Bodner et al. (2014), as raízes podem estabilizar a estrutura do solo contra a degradação dos poros, proporcionando mudanças na distribuição do seu tamanho de acordo com o tipo de sistema radicular. Koebernick et al. (2017), ao analisar o desenvolvimento do sistema radicular de dois genótipos de cevada, com e sem pelos radiculares, aferiram que o pelo radicular é capaz de alterar a porosidade e conectividade do espaço poroso ( $>5\mu\text{m}$ ) na rizosfera. Estes estudos demonstram a importância do sistema radicular das culturas para as propriedades físicas do solo, sendo a rotação de culturas uma ferramenta de melhoria do ambiente rizosférico. Neste estudo, também foi possível verificar que o sistema radicular das culturas auxilia no

equilíbrio da estrutura do solo. Contudo, não foi possível diferenciar o efeito de cada planta utilizada.

#### **4. Conclusões**

O preparo reduzido do solo com escarificação e o Sistema Plantio Direto com oito tráfegos de colhedora (220 KPa de pressão) influenciam negativamente a produção de grãos de soja. A maior produtividade da soja foi verificada no tratamento manejado com SPD contínuo. Ainda, esta produtividade superior ocorreu quando a soja foi cultivada em SPD após as culturas de braquiária e trigo.

Em áreas onde o solo foi submetido a graus de compactação realizados por diferentes pressões impostas pelos tratamentos SPDT4 e SPDT8, a área, o volume e a massa de raízes de soja apresentam menor desenvolvimento na camada de 0,10 a 0,20 m.

Valores de densidade do solo acima de  $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ , na camada de 0,0 a 0,20 m, prejudicam o desenvolvimento do sistema radicular da soja, determinados pelo comprimento, volume e área superficial das raízes.

## **CAPÍTULO V – Rearranjo de macroporos pelo uso de braquiária e milho em Latossolo vermelho com níveis de compactação**

### **1. Introdução**

O uso agrícola do solo resulta em alterações das suas propriedades, seja pela compactação, ocasionada por tráfego na superfície, ou pelo revolvimento, provocado pelo preparo para a semeadura. Com o avanço das técnicas de cultivo, a mecanização vem ocupando cada vez mais espaço na produção agrícola e, através do tráfego de máquinas, tem causado alterações nas propriedades físicas do solo. Concomitante ao tráfego de máquinas, o período em que o solo permanece sem cultivo propicia condições para alterações na estrutura do solo. Estas alterações manifestam-se na densidade do solo, volume e distribuição do tamanho de poros, funções do solo (armazenagem e fluxo de água e trocas gasosas) e no desenvolvimento das plantas.

A estrutura do solo é um dos principais indicadores das mudanças da sua qualidade (CHERUBIN et al., 2017) e pode informar sobre a degradação do ambiente solo (TUCHTENHAGEN et al., 2018). O Sistema Plantio Direto (SPD), que abrange o mínimo revolvimento do solo, a rotação de culturas e a cobertura permanente, melhora a estrutura do solo (STEWART et al., 2018). Apesar dos inúmeros benefícios que o SPD proporciona ao ambiente, efeitos negativos nas propriedades físicas do solo também foram observados, como problemas de compactação subsuperficial (REINERT et al., 2008; PALM et al., 2014).

A estrutura do solo é modificada por pressões que nele são aplicadas, em que os poros existentes são comprimidos e uma estrutura mais densa e menos permeável é formada (HOLTHUSEN et al., 2018). Segundo Reichert et al. (2009), em área de SPD, essa compactação é localizada na camada de 0,07 a 0,14 m. A compactação subsuperficial (maior densidade do solo) e a resistência do solo (resistência mecânica à penetração) são frequentemente relacionadas a uma alta carga de tráfego. A compactação afeta negativamente a porosidade e outras propriedades físicas do solo, além do crescimento das raízes (RODRIGUES et al., 2011; DAL FERRO et al., 2014; LIPIEC et al., 2012).

Embora a estrutura do solo possa influenciar a distribuição das raízes, as mesmas são capazes de modificar a estrutura para acomodar seu crescimento (JIN et al., 2017). Bodner et al. (2014) verificaram que a morfologia dos sistemas radiculares interfere na dinâmica de poros. Os sistemas radiculares com maiores diâmetros (*Lathyrus sativus* e *Melilotus officinalis*) aumentaram a macroporosidade em 30%. Espécies com sistemas radiculares finos e densos (*Fagopyrum esculentum* e *Scale cereale*) induziram à heterogeneização do espaço de poros e ao maior volume de microporos.

Munkholm et al. (2016) observaram que os sistemas de uso do solo alteraram a porosidade total do solo, enquanto que os sistemas de rotação de culturas influenciaram a porosidade dos agregados. Assim, os autores sugerem que a escala de observação é importante na avaliação da influência do manejo do solo. Ainda, práticas de agricultura conservacionista (como plantio direto, cobertura e retenção de resíduos) têm sido propostas como um conjunto de técnicas para melhorar as propriedades da estrutura do solo (PICCOLI et al., 2017).

Dentre os componentes da estrutura do solo, a macroporosidade, o número, comprimento, distribuição e geometria tridimensional (continuidade, tortuosidade e conectividade) de poros são características importantes que afetam o fluxo de água e solutos, através de macroporos (BASTARDIE et al., 2005; LUO et al., 2010).

A porosidade do solo é uma propriedade física dinâmica, com mudanças no espaço e no tempo, influenciando a estrutura do solo (MENTGES et al., 2016). Esta propriedade rege a capacidade dos solos de promover a

troca de gases entre a atmosfera e o ambiente radicular e afeta diretamente o crescimento e o rendimento das culturas (TANG et al., 2011).

A porosidade é o melhor indicador da estrutura do solo e pode ser medida em diferentes escalas, combinando diferentes técnicas (PIRES et al., 2017; RABOT et al., 2018). As abordagens integradas de imagem de alta resolução e modelagem em escala de poros tornaram-se uma ferramenta eficaz para estudar as interações raiz-solo-água (JAVAUX et al., 2008; KEYES et al., 2013). Neste sentido, a microtomografia computadorizada de raios X ( $\mu$ TC) é um recurso eficiente para estudar a estrutura do solo em macroescala, em termos de quantificação da arquitetura dos poros (DAL FERRO et al., 2014; PITUELLO et al., 2016; RABOT et al., 2018).

A microtomografia computadorizada tem sido utilizada em pesquisas na Ciência do Solo para descrever o espaço de poros e analisar as relações entre as redes de poros e capacidade de fluxo de solutos (PIRES et al., 2010; WILDENSCHILD; SHEPPARD, 2013; KATUWAL et al., 2015). Embora venha sendo aplicada em diversas áreas, ainda se percebe que há carência de estudos que utilizem a microtomografia computadorizada para a caracterização de solos agrícolas e, mais especificamente, para a análise de alterações da estrutura do solo promovida pelo uso de plantas de cobertura.

O estudo das modificações da estrutura do solo, resultante do seu uso e manejo, é de fundamental importância, principalmente para a escolha de práticas mais adequadas para a produção agrícola. Diante deste contexto, o objetivo desta pesquisa foi diagnosticar, através da microtomografia computadorizada, o efeito do uso de sistema radicular de gramíneas (Braquiária e Milho) na reestruturação de Latossolo com diferentes sistemas de uso.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1. Local do experimento**

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Embrapa Soja, no município de Londrina (PR) (23°11' S e 51°11' W, altitude de 600 m), situada em região que apresenta clima tipo Cfa, subtropical úmido

mesotérmico, segundo a classificação de Köppen, com médias anuais de 20°C de temperatura e de 1340 mm de precipitação média. O solo desta área é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (SANTOS et al., 2013), com 784 g kg<sup>-1</sup> de argila na camada de 0-0,30 m de profundidade.

Entre os anos de 1991 a 2009, a área foi manejada sob Sistema Plantio Direto, com a rotação de culturas soja/milho no verão e trigo/aveia no inverno. De 2010 a 2012, foi cultivada, em área total, cobertura de braquiária (*Urochloa ruziziensis*), sem manejo da massa seca.

## 2.2. Delineamento experimental

O experimento consiste em um fatorial 2x3 (espécies vegetais x níveis de compactação) sob o delineamento experimental de blocos ao acaso com três repetições e parcelas subdivididas. O fator espécies vegetais nas parcelas é constituído por duas culturas: (I) braquiária (*Urochloa ruziziensis*); e (II) milho (*Zea mays*) de 2ª safra. O fator nível de compactação, alocado nas subparcelas, abrange: (a) SPM: sistema de preparo mínimo com escarificação do solo (escarificador de 5 hastes, espaçadas 0,35 m entre si, com ponteiras de 0,08 m, profundidade média de ação equivalente a 0,25 m, equipado com rolo destorroador), realizado na implantação do experimento; (b) SPD: Sistema Plantio Direto contínuo, sem manejo adicional; (c) SPDT8: Sistema Plantio Direto trafegado 8 vezes com uma colhedora autopropelida (marca SLC, modelo 6200, equipada com plataforma colhedora de milho, pneus dianteiros da marca Pirelli, especificação 18.4-30 R1, e traseiros da marca Pirelli, especificação 9.00-16), com massa total de 9,5 Mg.

A implantação dos tratamentos referentes aos níveis de compactação foi efetuada em fevereiro de 2013. No momento da realização dos tráfegos, o solo se encontrava com umidade em capacidade de campo (conteúdo de água no solo na camada de 0-0,2 m de 0,33 g g<sup>-1</sup>). A escarificação foi realizada quando o solo se encontrava com consistência friável (conteúdo de água de 0,29 g g<sup>-1</sup>, na camada de 0-0,2 m).

No cultivo de inverno de 2013, foi semeado trigo em área total (cultivar BRS Pardella), com população de 250 plantas m<sup>-2</sup> e espaçamento entrelinha de 0,17 m. Para a operação, foi utilizada semeadora-adubadora

marca New Holland, modelo SHM 11/13, equipada com sulcadores de adubo e de sementes do tipo disco duplo defasado, dosadores de adubo do tipo roda dentada e de sementes do tipo rotor acanalado.

No cultivo de verão ano 2013/14, foi cultivada soja (*Glycine max*) em área total (cultivar BRS 359 RR), a qual foi semeada em 10 de outubro de 2013, com um espaçamento entrelinhas de 0,45 m para uma população de 30 plantas m<sup>-2</sup>. Foi utilizada semeadora-adubadora marca Jumil, modelo Exacta 5070, equipada com sulcadores de adubo e de sementes do tipo haste e disco duplo desencontrado, respectivamente, com profundidade de semeadura de 0,05 m e deposição do fertilizante (NPK 0-20-20, dosagem de 270 kg ha<sup>-1</sup>) a 0,1 m de profundidade.

Nos cultivos do inverno de 2014 e inverno de 2015, foram implantados os tratamentos com as espécies vegetais de outono-inverno. A cultura do milho foi semeada com semeadora-adubadora marca Semeato, modelo SHM 11/13, com três linhas espaçadas de 0,9 m. A braquiária foi semeada com a semeadora-adubadora utilizada em 2013, já descrita, com espaçamento entrelinhas de 0,17 m. Nos cultivos de verão 2014/2015 e 2015/2016, foi semeada soja em área total, com as mesmas configurações da operação realizada no cultivo de 2013/2014.

### 2.3. Coleta das amostras

Em março de 2016 foram coletadas amostras indeformadas de solo, na forma de cubos com dimensões de 0,05 x 0,05 x 0,05 m, em duas profundidades (0,025-0,075 m e 0,125-0,175 m) (Figura 21). As amostras foram identificadas, embaladas em caixas para proteção e transportadas para o Centro de Instrumentação Agrícola da Embrapa, em São Carlos – SP, para análise. Após a secagem ao ar à temperatura ambiente, os cubos foram redimensionados em formato cilíndrico, com dimensões de 2,5 cm de diâmetro e 4 cm de altura, para serem analisados no microtomógrafo.

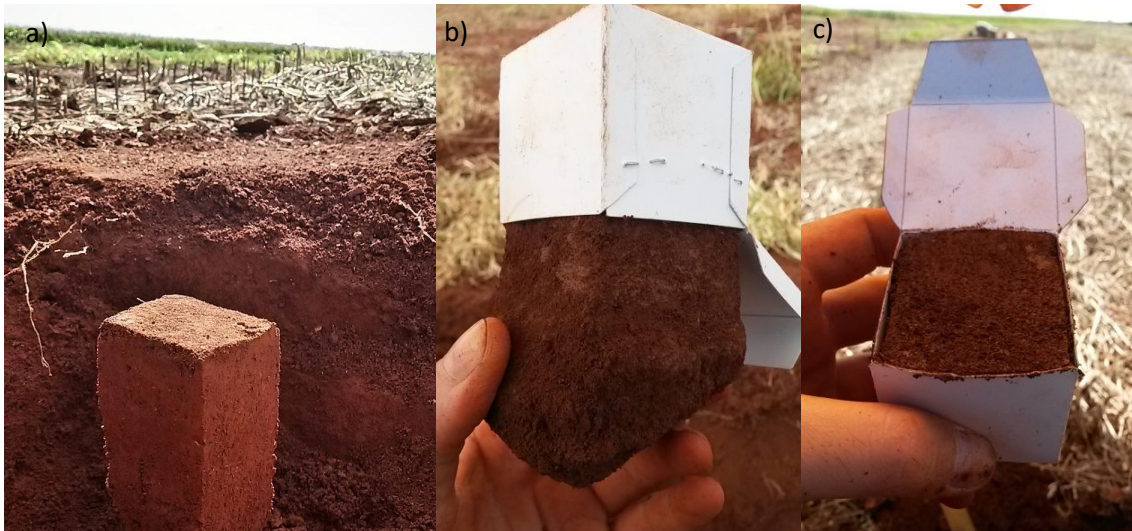


Figura 21. Coleta de amostras de solo para análise de microtomografia computadorizada: a) coleta das amostras; b) preparo para transporte das amostras; c) ajuste e dimensionamento da amostra.

#### 2.4. Microtomógrafo e processamento das imagens

A estrutura do solo foi quantificada por meio de microtomografia de raios X ( $\mu$ TC). Antes da análise  $\mu$ TC, os núcleos de solo tiveram seu tamanho reduzido para permitir um maior contraste de tons de cinza das projeções adquiridas entre a porosidade do solo e a matriz. Amostras indeformadas (2,5 cm de diâmetro, 4,0 cm de altura) foram obtidas manualmente a partir do centro dos grandes núcleos.

O sistema microtomográfico utilizado foi um aparelho comercial (Figura 22), marca SkyScan, modelo 1172 (Bruker, Kartuizersweg, Kontich, Bélgica), com feixe cônico de raios X, detector tipo CCD de 10 Mp, tensão de 100 kV e corrente de 100  $\mu$ A (LASSO et al., 2008; VAZ et al., 2011). Para a aquisição das imagens, foram utilizados alguns parâmetros de ajuste, como colimadores de Alumínio e Cobre (0,5/0,04 mm de espessura, respectivamente), ajustados e alinhados entre a fonte e o detector, para obter imagem de resolução final de 12  $\mu$ m através do 2k, modo de detector, com modo padrão da câmera ativado. Os passos angulares ( $\Delta\phi$ ) das amostras foram de 0,2° até uma varredura de 180°, totalizando 900 passos lineares.





Figura 22. Microtomógrafo SkyScan 1172 utilizado para análise das amostras.

As projeções de sombra obtidas foram reconstruídas com um algoritmo de feixe de cone Feldkamp modificado (FELDKAMP et al., 1984), com compensação de desalinhamento, alisamento e endurecimento do feixe, e correções de artefatos de anel, usando pacote de software NRecon (VAZ et al., 2011; WILDENSCHILD; SHEPPARD, 2013). Os dados foram transformados para imagens em formato BMP de 8 bits.

A análise de processamento das imagens microtomográficas reconstruídas foi realizada com software SkyScan Analyzer (CTAn). Após este procedimento, foi realizado renderizações tridimensionais das imagens, para representar o espaço ocupado por poros e sólidos em 3D, com auxílio do programa CTVox.

Com base em conjunto de imagens bidimensionais (aproximadamente 1000 imagens por amostra), foi definida uma região de interesse de imagem (ROI), a qual foi aplicada para todas do conjunto de dados, formando um volume de interesse (VOI). A binarização da imagem foi realizada definindo-se os valores de absorção inferior e superior para reconstrução. Com base no histograma de coeficiente de atenuação linear tridimensional (ou escala de cinza), o coeficiente de atenuação médio  $\mu$  usado para o método de segmentação global é dado por:

$$\mu = \frac{\mu_{ar} + \mu_{particulas}}{2} \quad (6)$$

onde  $\mu_{ar}$  e  $\mu_{particulas}$  são os coeficientes de atenuação relacionados ao ar e às partículas minerais, respectivamente.

Para este procedimento, quando o pico relacionado ao ar não era evidente, o valor adotado para o ar foi zero (CÁSSARO et al., 2017).

O grau de anisotropia (GA) foi calculado com o software CTAn, fornecido por Bruker-microCT, de acordo com o método do comprimento médio de interceptação (CMI) (HARRIGAN; MANN, 1984). O GA foi calculado globalmente dentro de cada conjunto de imagens bidimensionais e usado para quantificar se os poros eram direcionados. O CMI foi encontrado enviando, do centro do volume, vários vetores em todas as direções ao longo do volume segmentado. Cada vetor é dividido pelo número de vezes que ele interceptou o limite entre o primeiro plano (poros) e o plano de fundo (matriz do solo). Os autovalores resultantes dão os eixos do elipsoide, e os autovetores dão a orientação do elipsoide. O grau de anisotropia 3D foi calculado como:

$$GA = 1 - \frac{Ls}{Ll} \quad (7)$$

onde  $Ls$  e  $Ll$  são os eixos elipsoides mais curtos e mais longos, respectivamente. O GA varia entre 0 (estrutura isotrópica perfeita) e 1 (estrutura anisotrópica).

A dimensão fractal de massa 3D (DF) foi calculada com o método de contagem de caixas (DATHE et al., 2001; FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ; SÁNCHEZ-GRANERO, 2016; SHI et al., 2018). A dimensão fractal é usada para descrever objetos que possuem propriedades de autossimilaridade, independente de escala. À medida que a estrutura se torna mais complexa, a dimensão fractal aumenta. Portanto, a dimensão fractal pode ser vista como uma medida quantitativa da tortuosidade ou complexidade de uma forma geométrica. O número de caixas ( $N(\epsilon)$ ) varia de com o tamanho da caixa ( $\epsilon$ ) de acordo com:

$$N(\epsilon) = \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{FD} \quad (8)$$

A dimensão fractal pode ser estimada a partir da inclinação do  $\log(1/\epsilon)$  contra  $\log(N(\epsilon))$ .

A conectividade 3D dos poros foi quantificada com a característica volumétrica de Euler-Poincaré (para simplificar, aqui denominado “número de

Euler”) (GUNDERSEN et al., 1993). O número de Euler (NE) é definido da seguinte forma (VOGEL, 2000):

$$NE = \beta_0 - \beta_1 + \beta_2 \quad (9)$$

onde  $\beta_0$  é o número de objetos (poros),  $\beta_1$  é a conectividade e  $\beta_2$  é o número de cavidades fechadas.

O número de Euler é positivo quando o número de poros isolados, que não estão conectados entre si, excede o número de múltiplas conexões entre os poros ( $\beta_1 > \beta_0$ ). Como resultado, quanto maior o valor do NE, menor é a conectividade da rede de poros.

A porosidade total 3D determinada com o  $\mu$ TC de raios-X (tamanho de poro  $> 30 \mu\text{m}$ ) foi definida como o número total de voxels de poros divididos pelo número total de voxels de volume (HOUSTON et al., 2017).

Os resultados foram submetidos à ANOVA, para cada camada amostrada. Quando o efeito dos fatores de tratamento foi significativo em nível de 5% de probabilidade de erro, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, utilizando o software estatístico Sisvar (FERREIRA, 2014), e os gráficos foram plotados por meio do programa SigmaPlot®12.5 (*Systat software, Inc.*).

### 3. Resultados e Discussão

Os sistemas de uso do solo com níveis de compactação e diferentes gramíneas alteraram a forma e distribuição dos poros do solo. A microtomografia computadorizada, com parâmetros quantitativos (número de Euler, grau de anisotropia e dimensão fractal) e qualitativos (cortes transversais nas amostras de solo e renderização tridimensional das amostras de solo), foi capaz de identificar a ação do tráfego da colhedora e o uso de milho como fatores que mais influenciaram as propriedades avaliadas.

No tratamento SPDT8, o tráfego com colhedora resultou em deformações na estrutura do solo, que apresentou espaço poroso caracterizado pela presença de fissuras e galerias (Figura 23c). Neste tratamento o desenvolvimento do sistema radicular ocorreu no sentido horizontal do solo, fato que pode ser observado pela forma como o espaço poroso está apresentado na Figura 23c, com a formação de galeria do lado

direito em direção ao centro da amostra, seguindo em direção ao lado esquerdo.

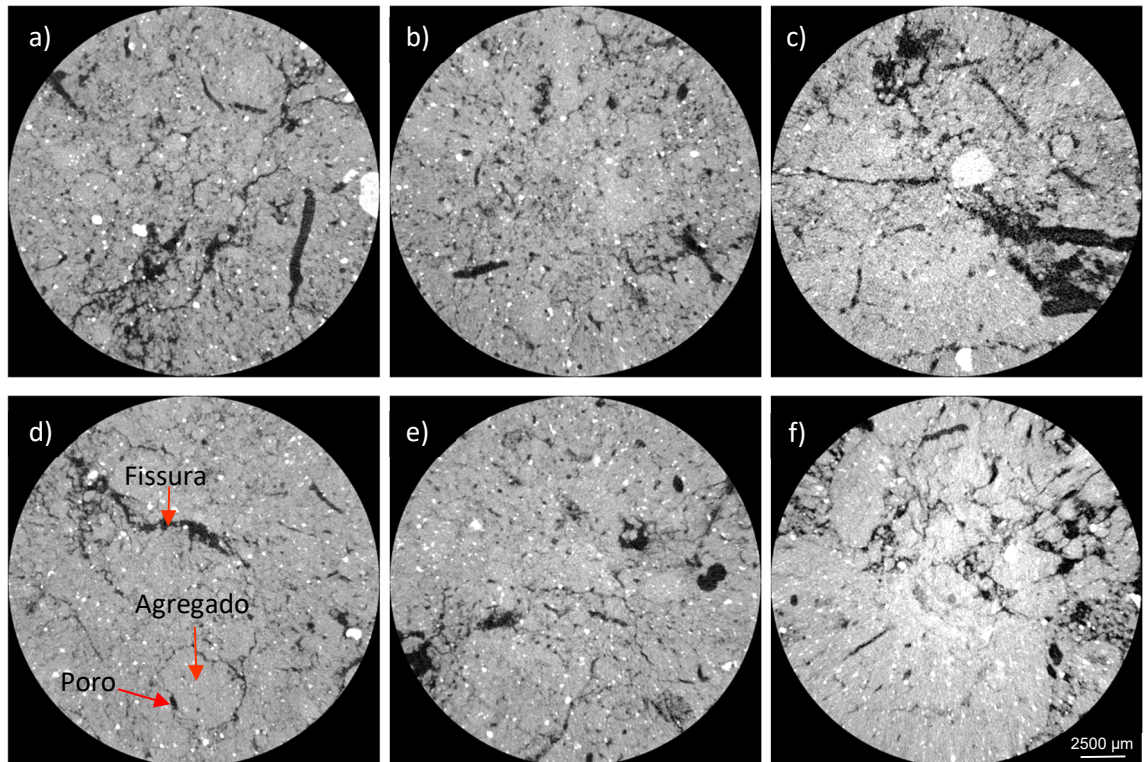


Figura 23. Imagens de Latossolo Vermelho reconstruídas por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) na camada de 0,025 a 0,075 m: a) Braquiária SPM; b) Braquiária SPD; c) Braquiária SPDT8; d) Milho SPM; e) Milho SPD; e f) Milho SPDT8.

A alteração no crescimento radicular foi constatada no momento da coleta das amostras, onde a maior densidade do solo resultou em desenvolvimento do sistema radicular da soja no sentido horizontal (Figura 24), formando pontos de ruptura da estrutura do solo, que se desagregavam no manuseio da amostra.



Figura 24. Sistema radicular da soja com desenvolvimento horizontal devido à presença de camada com impedimento.

Através da reconstrução de imagens 2D é possível diferenciar a forma dos poros (RINGROSE-VOASE; BULLOCK, 1984; HOUSTON et al., 2017; KIM et al., 2017). Na camada superficial (0,025-0,075 m), os tratamentos SPM (Figura 23d) e SPDT8 (Figura 23f) apresentam menor ligação da estrutura do solo, com aparência de fissuras. O desenvolvimento de fissuras entre os agregados aumenta a porosidade do solo (MA et al., 2015), devido à formação de novas conexões entre os agregados, gerando novas fissuras ao longo do plano de fratura (COSTA et al., 2014). Skvortsova e Utkaeva (2008) observaram que a geometria dos poros do solo é mais sensível às mudanças nas práticas de manejo do que algumas medidas baseadas em massa, como a densidade do solo.

No tratamento SPD (Figura 23e), o solo possui estrutura mais organizada, com poros de forma mais arredondada e com presença de micro e macroporos.

Na camada subsuperficial (0,125 a 0,175 m), o tratamento SPDT8 apresenta estrutura mais densa (Figura 25f), com diminuição no espaço ocupado por poros, característica do processo de compactação do solo (MARCHINI et al., 2015). Nesta profundidade, é perceptível a presença de fissuras para o tratamento SPM (Figura 25a e 25d).

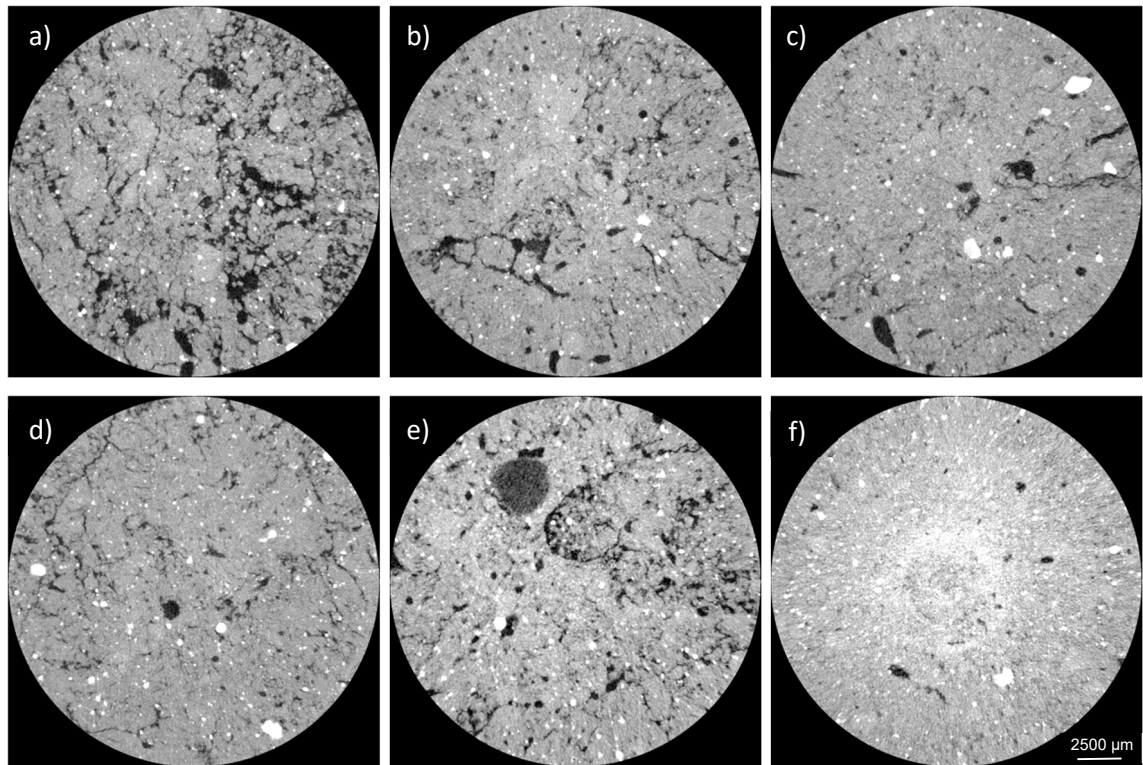


Figura 25. Imagens de Latossolo Vermelho reconstruídas por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) na camada de 0,125 a 0,175 m: a) Braquiária SPM; b) Braquiária SPD; c) Braquiária SPDT8; d) Milho SPM; e) Milho SPD; e f) Milho SPDT8.

Analisando a relação entre a força agregada do solo, a forma e a porosidade de solo sob diferentes manejos de longo prazo, Munkholm et al. (2016) observaram que o sistema de uso (SPD e aração do solo) apresentou um efeito mais acentuado na porosidade do solo, enquanto que a rotação de culturas provocou efeito na porosidade total do agregado.

O tratamento SPD com uso de milho (Figura 25e) apresenta galerias formadas pela ação do sistema radicular de culturas e/ou microbiota do solo, com diâmetro de 0,04 m, característica importante para a porosidade do solo em área de Sistema Plantio Direto consolidado (MENTGES et al., 2016).

Em ambas as camadas (0,025-0,075 m e 0,125-0,175 m), no tratamento SPD foi possível visualizar a presença de macroporos com formato arredondado, típicos de macroporos formados por raízes (LUO et al., 2010). O tratamento SPDT8 (Figura 25c e 25f) por sua vez, apresenta diminuição da porosidade na camada subsuperficial. Essa diminuição da macroporosidade para a camada subsuperficial também foi observada em estudos anteriores (KATUWAL et al., 2015; REICHERT et al., 2017).

Para Rabot et al. (2018), as técnicas de imagem são ferramentas atraentes para avaliar as funções do solo. A presença de poros alongados e sua orientação estão relacionadas ao fluxo e armazenamento de gases e água (PAGLIAI; VIGNOZZI, 2002; SKVORTSOVA; UTKAEVA, 2008). De acordo com Pagliai et al. (2004), a orientação e o alongamento dos poros são sensíveis às práticas de manejo, como o preparo do solo.

Culturas e sistemas de preparo do solo afetam não apenas a distribuição de tamanho de poros, mas também a sua arquitetura (PICOLLI et al., 2017). O sistema de preparo com revolvimento do solo reduz as ramificações e a conectividade dos poros (DAL FERRO et al., 2014). No presente estudo, a conectividade dos poros foi determinada através do grau de anisotropia.

O grau de anisotropia da porosidade do solo (GA) não apresentou diferenças para os tratamentos espécie vegetal. Houve efeitos para os tratamentos níveis de compactação, em que, nas duas camadas avaliadas, o tratamento SPD apresentou os menores valores (Figura 26), sendo mais próximos de uma estrutura isotrópica. O GA reflete a orientação dos elementos dentro de um determinado volume (ODGAARD, 1997), influenciando as características de fluxo em um meio poroso (HERNÁNDEZ ZUBELDIA et al., 2015). Os maiores valores de GA, verificados nos tratamentos SPM e SPDT8 (Figura 26), podem ser atribuídos à forma dos poros presentes nestes tratamentos, que se caracterizam por estruturas com fissuras. Chen et al. (2014) também relataram que o solo compactado apresenta maior tortuosidade de poros.

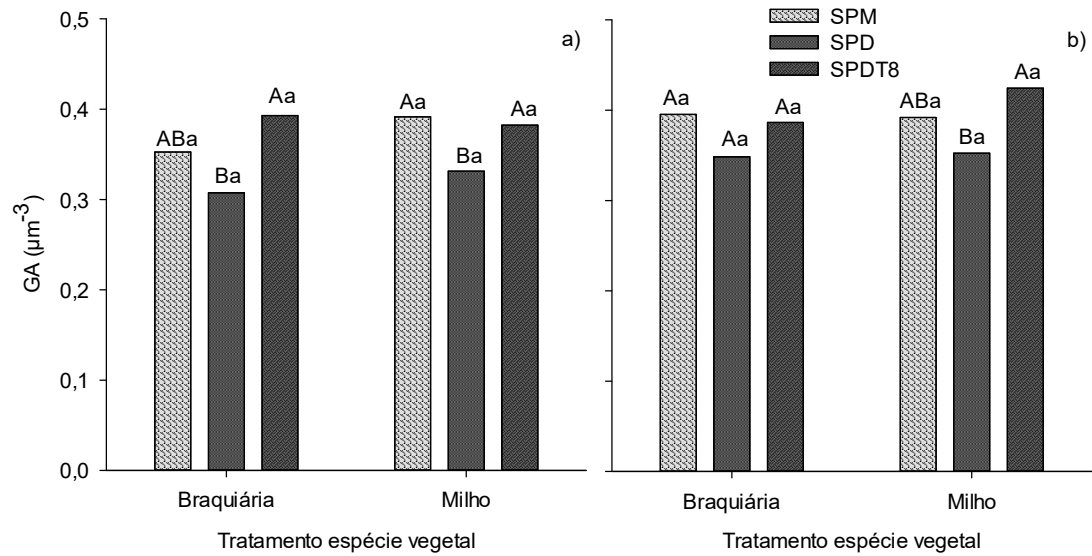


Figura 26. Grau de anisotropia dos poros de um Latossolo Vermelho obtidos por análise de imagem de microtomografia computadorizada ( $\mu\text{TC}$ ): a) GA para a camada de 0,025 a 0,075 m; b) GA para a camada de 0,125 a 0,175 m.

\*Médias seguidas pela mesma letra, minúscula entre os tratamentos espécie vegetal e maiúsculas para os tratamentos níveis de compactação dentro do tratamento espécie vegetal, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; SPM: Sistema de Preparo Mínimo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT8: Sistema Plantio Direto trafegado 8 vezes por colhedora 220 kPa de pressão aplicada.

A dimensão fractal (DF) apresentou efeitos para os tratamentos uso do solo e espécies vegetais (Figura 27). Na camada superficial, o tratamento SPDT8 exibiu os menores valores na área cultivada com braquiária, diferindo estatisticamente da área cultivada com milho. Na área com cultivo de milho, não houve distinção entre os tratamentos uso do solo. Na camada subsuperficial, o tratamento SPDT8 apresentou os menores valores de DF, em ambas as culturas, sem que houvesse distinção entre os tratamentos espécie vegetal.



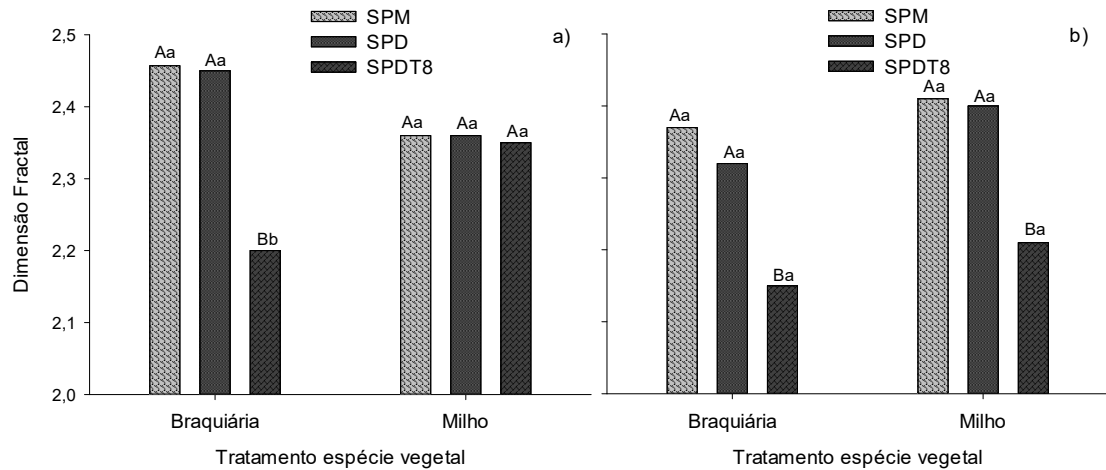


Figura 27. Dimensão Fractal 3D dos poros de um Latossolo Vermelho obtidos por análise de imagem de microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC): a) DF para a camada de 0,025 a 0,075 m; b) DF para a camada de 0,125 a 0,175 m.

\*Médias seguidas pela mesma letra, minúscula entre os tratamentos espécie vegetal e maiúsculas para os tratamentos níveis de compactação dentro do tratamento espécie vegetal, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; SPM: Sistema de Preparo Mínimo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT8: Sistema Plantio Direto trafegado 8 vezes por colhedora 220 kPa de pressão aplicada

A dimensão fractal representa a complexidade do sistema de poros (DAL FERRO et al., 2013). Assim, os menores valores de dimensão fractal para o tratamento SPDT8 estão associados à presença de fissuras nas amostras de solo onde a área foi trafegada por colhedora. Landis e Keane (2010) observaram que a dimensão fractal de amostras de rochas com trincas correlacionou-se com a perda de rigidez da amostra.

O número de Euler-Poincaré, que descreve a conectividade de espaço de poros (VOGEL; ROTH, 2001), foi influenciado pelos níveis de compactação e pelas gramíneas utilizadas no tratamento espécie vegetal usadas no experimento. Na camada superficial (0,025 a 0,075 m), é possível verificar que, quando comparado ao tratamento SPD, o tratamento SPDT8 apresentou reduções de 62% e 22% quando cultivado com braquiária e milho, respectivamente (Figura 28a). Hansson et al. (2017) também verificaram redução na conectividade de poros pela ação do tráfego de máquinas.

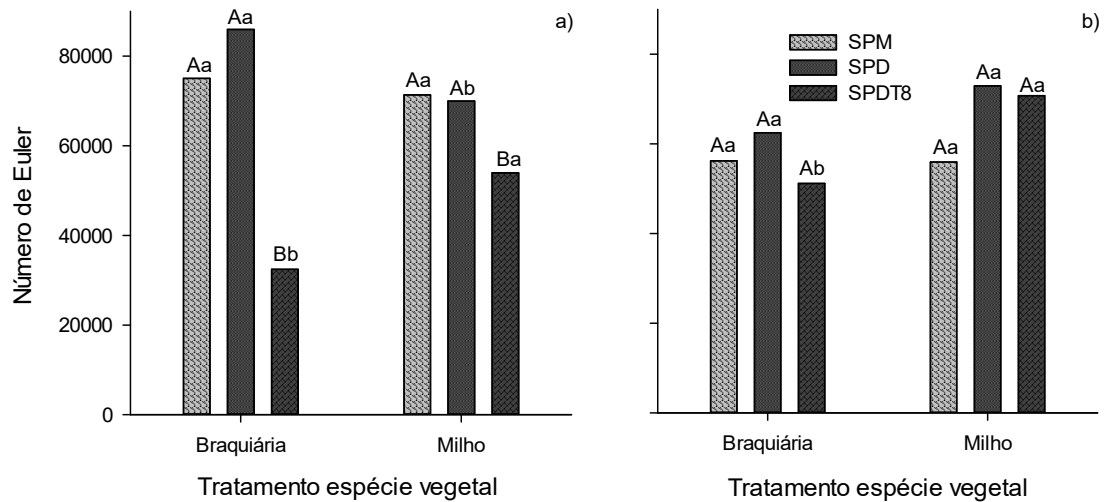


Figura 28. Número de Euler dos poros de um Latossolo Vermelho obtidos por análise de imagem de microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC): a) Número de Euler para a camada de 0,025 a 0,075 m; b) Número de Euler para a camada de 0,125 a 0,175 m.

\*Médias seguidas pela mesma letra, minúscula entre os tratamentos espécie vegetal e maiúsculas para os tratamentos níveis de compactação dentro do tratamento espécie vegetal, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; SPM: Sistema de Preparo Mínimo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT8: Sistema Plantio Direto

Entre os tratamentos espécie vegetal na área sob SPD contínuo, os valores de conectividade de poros foram maiores quando o solo foi cultivado com braquiária, tendo um aumento de 20% em comparação com o cultivo sob milho. Para o tratamento SPDT8, os maiores valores de conectividade dos poros foram verificados com o uso de milho, tanto na camada superficial (0,025 a 0,075 m) como na camada subsuperficial (0,125 a 0,175 m) (Figura 28). Para Martínez et al. (2015) o número de Euler demonstra o padrão de agregados associados a diferentes tipos de manejo. Neste estudo, o número de Euler e a renderização tridimensional das amostras submetidas à  $\mu$ TC apresentam grande similitude.

Os resultados para o número de Euler demonstram que, para as duas camadas avaliadas, no tratamento SPD há mais conexões no espaço poroso do solo, importante para o fluxo e armazenamento de solutos e gases (Figura 28). Tal resultado vai ao encontro de pesquisa desenvolvida por Pires et al. (2017), que encontraram melhor conectividade de poros para a camada de 0,0 a 0,10 m em solo sob SPD quando comparado a área com sistema de preparo convencional.

A conectividade da rede de poros é também um parâmetro chave para a biota do solo, incluindo o crescimento das plantas, bem como para o transporte de água e gás. A conectividade auxilia na condutividade hidráulica saturada, na permeabilidade ao ar, dentre outros fatores físico-hídricos (LUO et al., 2010; PARADELO et al., 2016; SANDIN et al., 2017). O parâmetro de conectividade dos poros foi observado como sensível a práticas de uso da terra (DAL FERRO et al., 2014; JARVIS et al., 2017). No entanto, Rabot et al. (2018) e Katuwal et al. (2015) destacam que a conectividade estimada através do número de Euler nem sempre foi considerada uma boa medida de conectividade de macroporos, sendo afetada por voxels isolados, como poros estruturais não conectados (RENARD; ALLARD, 2013).

As amostras de solo submetidas à microtomografia computadorizada foram reconstruídas com auxílio do programa CTVox, em que foi possível verificar que o tráfego de máquinas sobre o solo resultou em amostras com uma estrutura densa, com poros pequenos e microtrincas. A área cultivada com SPD contínuo, no entanto, apresenta uma estrutura mais porosa, com a presença de poros grandes e interconectados (Figura 29b).

Amostras coletadas na camada superficial da área trafegada por colhedora demonstram que o tratamento braquiária (Figura 29c) apresentou menor quantidade de poros, se comparado ao tratamento milho (Figura 29f), sendo visível a formação de fissuras e galerias no sentido horizontal para a área cultivada com milho (Figura 29f).

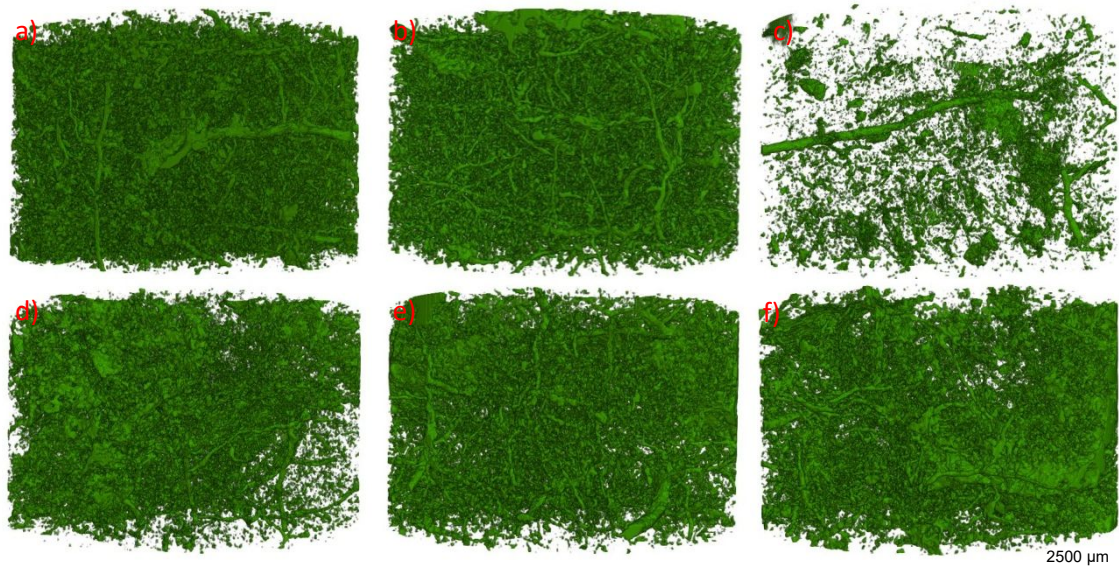


Figura 29. Renderizações tridimensionais obtidas por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) de Latossolo Vermelho na camada de 0,025 a 0,075 m: a) Braquiária SPM; b) Braquiária SPD; c) Braquiária SPDT8; d) Milho SPM; e) Milho SPD; e f) Milho SPDT8.

Raízes podem percorrer fendas, galerias e poros de maior diâmetro ou ampliar poros menores por sua capacidade exploratória (CLARK et al., 2003). Assim, entende-se que, no tratamento SPDT8 sob braquiária (Figura 29c), ocorreu maior restrição para o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, tendo em vista que há menor espaço poroso. Mentges et al. (2016) também constataram que a compactação do solo reduziu a porosidade e a continuidade de poros.

O SPD (Figura 29b e 29e) apresentou macroporosidade com orientação vertical, formado por canais radiculares e galerias da fauna do solo, que contribuem para o fluxo de água e gases (SOANE et al., 2012; VOGELER et al., 2009). O maior desenvolvimento radicular pode criar poros maiores e aumentar a porosidade do solo (HU et al., 2016).

Na camada subsuperficial é possível visualizar que há diminuição no espaço de vazios para o tratamento SPDT8 (Figura 30c e 30f). Contudo, é visível a presença de galerias formadas no sentido vertical, que expressam o desenvolvimento do sistema radicular das culturas. Poros alongados, importantes para a penetração das raízes e o fluxo e o armazenamento de água e gases, são definidos como poros de transmissão, variando de 50 a 500  $\mu$ m (PAGLIAI et al., 2004). Esses poros de transmissão desempenham papel

vital nas relações solo-água-plantas e na manutenção da boa estrutura do solo (BHATTACHARYYA et al., 2006).

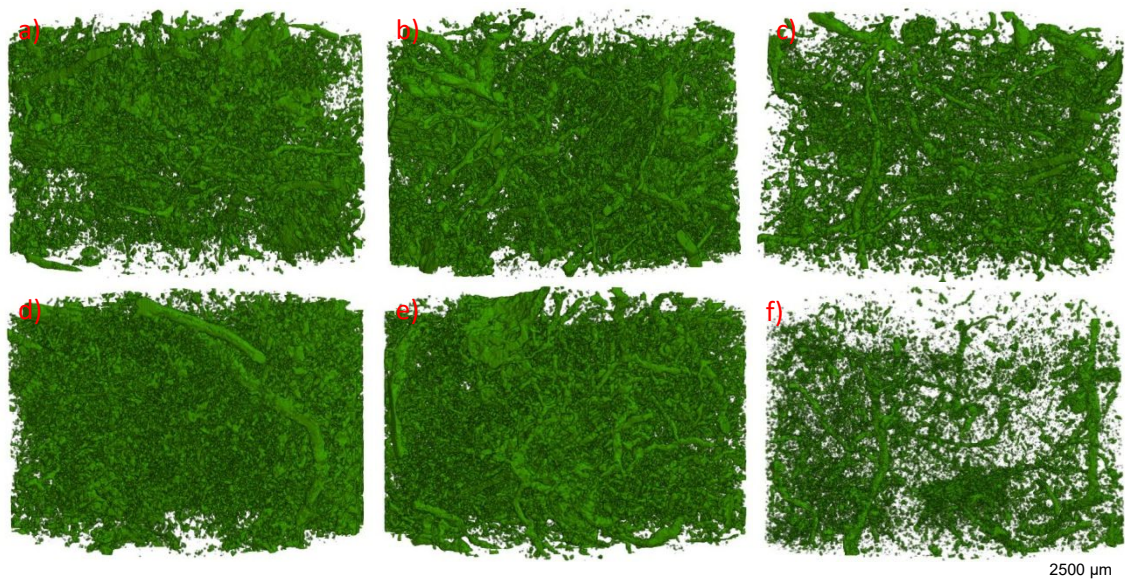


Figura 30. Renderizações tridimensionais obtidas por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) de Latossolo Vermelho na camada de 0,125 a 0,175 m: a) Braquiária SPM; b) Braquiária SPD; c) Braquiária SPDT8; d) Milho SPM; e) Milho SPD; e f) Milho SPDT8

A distribuição de tamanho de poros tem sido utilizada como um meio de caracterizar a estrutura física de geomateriais, incluindo solos, com ligações tanto com propriedades de transporte de fluidos quanto com a disponibilidade de habitat ecológico (HOUSTON et al., 2017).

A distribuição de mesoporos (30-80  $\mu$ m) na camada superficial do solo foi semelhante entre os tratamentos (Figura 31). Dal Ferro et al. (2014) observaram que as operações de manejo do solo não influenciaram a microporosidade do solo para tratamentos de plantio convencional e SPD. Segundo os autores, houve redução do tamanho dos poros, que migraram da classe de diâmetro  $> 250 \mu$ m para a classe de menor diâmetro 54 – 250  $\mu$ m. No estudo desenvolvido por Pagliai et al. (2004), ocorreu influência das práticas conservacionistas na classe de poros de 0,5 – 50  $\mu$ m.

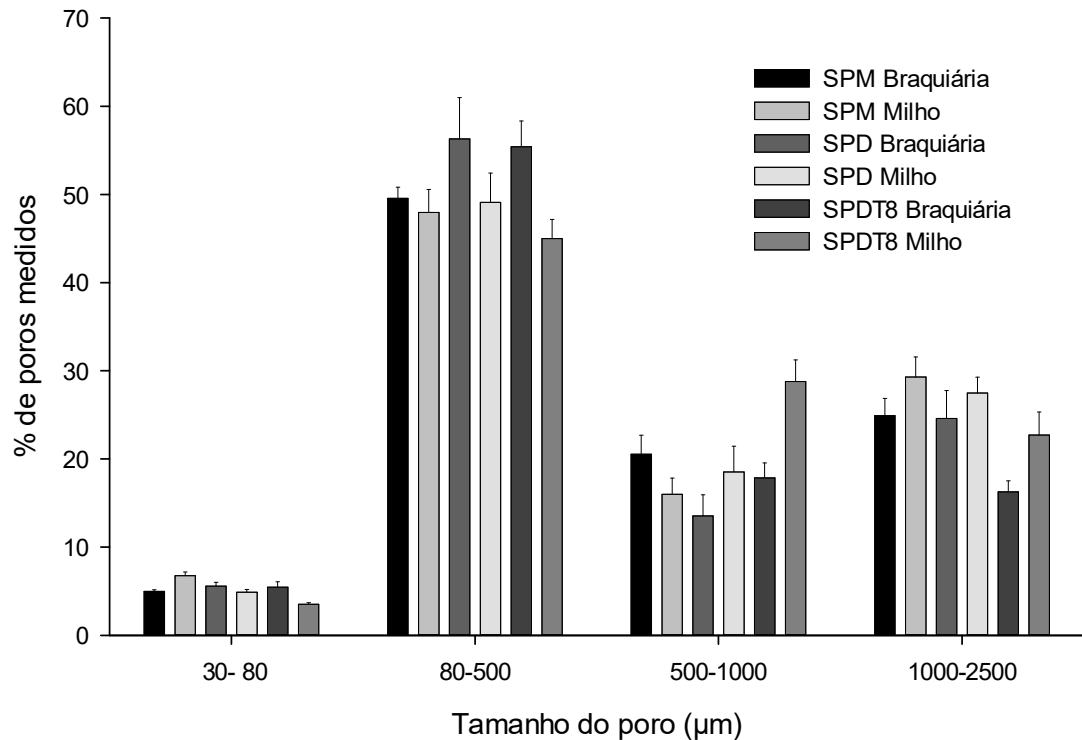


Figura 31. Distribuição do tamanho dos poros obtidos por microtomografia computadorizada ( $\mu$ TC) na análise de imagem de um Latossolo Vermelho, com níveis de compactação e uso de gramíneas, na camada de 0,025 a 0,075 m.

\*SPM: Sistema de Preparo Mínimo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT8: Sistema Plantio Direto trafegado 8 vezes por colhedora 220 kPa de pressão aplicada.

Para os macroporos com diâmetro entre 80-500  $\mu$ m, os tratamentos sob cultivo de milho apresentaram reduções na proporção de poros se comparados a área cultivada com braquiária. Nas classes de poros com maiores diâmetros (500-1000 e 1000-2500  $\mu$ m), no tratamento SPDT8 ocorreu redução na porcentagem de poros para a área cultivada com braquiária (Figura 31).

Rabot et al. (2018) destacam que há evidências experimentais de que poros de tamanho médio (na faixa de 30-90  $\mu$ m) podem desempenhar condições de suprimento de ar, água e nutrientes, os quais são importantes na perda de carbono, influenciando na decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) (KRAVCHENKO et al., 2015; TOOSI et al., 2017). Por outro lado, poros pequenos estão ligados à estabilização do carbono orgânico, fornecendo proteção física para MOS (PICCOLI et al., 2017). A porosidade e a distribuição do tamanho dos poros são frequentemente afetadas por práticas de manejo,

como preparo do solo, rotação de culturas ou uso da terra (MUNKHOLM et al., 2016; NAVEED et al., 2014; SCHLÜTER et al., 2011).

Na camada subsuperficial (0,125 a 0,175 m), a distribuição do tamanho de poros foi influenciada pelos sistemas de preparo do solo e espécies vegetais. Os poros com diâmetro entre 80-1000  $\mu\text{m}$  apresentam redução na área onde o solo foi trafegado por colhedora (Figura 32). A área cultivada com milho obteve maior quantidade de poros do que a área cultivada com braquiária, para todas as classes de macroporos. Para a classe de poros com diâmetro  $<80\mu\text{m}$  não há diferenças significativas entre os tratamentos. Do mesmo modo, Tavares Filho e Tessier (2009) não constataram alterações para o volume de poros com diâmetro  $<100\ \mu\text{m}$  em função dos sistemas de preparo do solo. Segundo os autores, as alterações que ocorreram na estrutura do solo seriam em escalas maiores, com desestruturação de agregados em áreas onde houve revolvimento do solo e maior presença de bioporos em área de SPD.

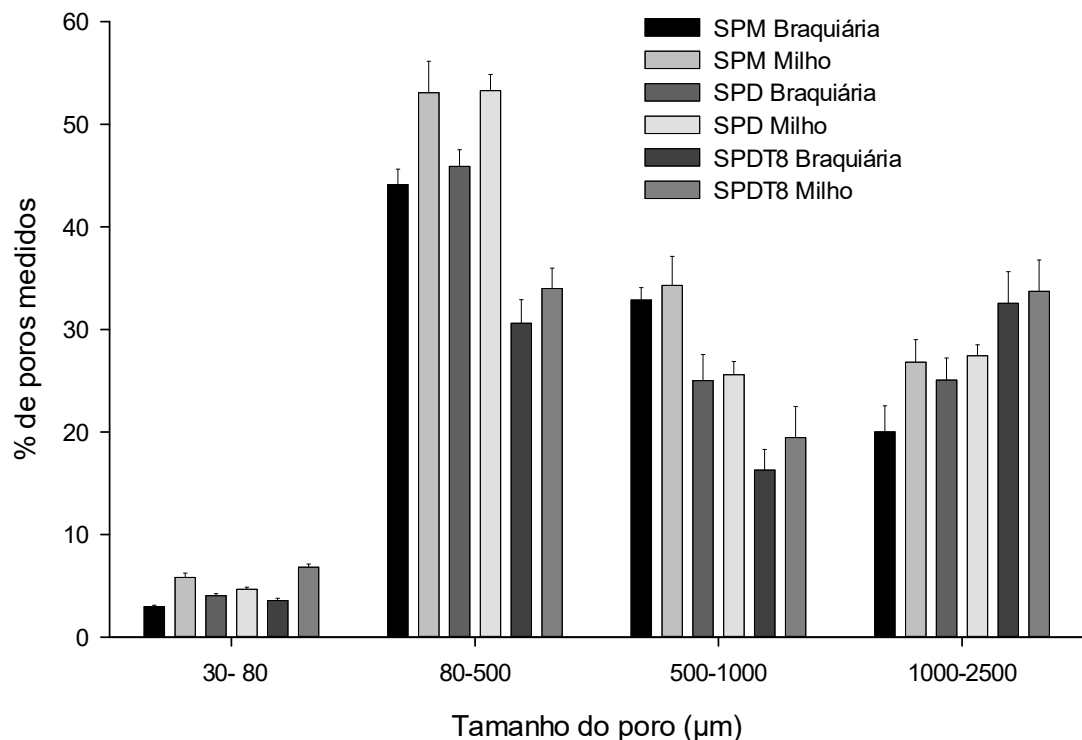


Figura 32. Distribuição do tamanho dos poros obtidos por microtomografia computadorizada ( $\mu\text{TC}$ ) na análise de imagem de um Latossolo Vermelho, com níveis de compactação e uso de gramíneas, na camada de 0,125 a 0,175 m.

\*SPM: Sistema de Preparo Mínimo; SPD: Sistema Plantio Direto; SPDT8: Sistema Plantio Direto trafegado 8 vezes por colhedora 220 kPa de pressão aplicada

Em solos argilosos, após seis anos de cultivo mínimo, Vogeler et al. (2009) verificaram pequenas diferenças na distribuição de classe de poros em relação ao preparo convencional, mas uma maior conectividade vertical que aumentou a permeabilidade ao ar.

Zhao et al. (2017), estudando a revegetação de área degradada, indicam que o padrão de revegetação teve mais importância do que a idade de restauração no desenvolvimento da estrutura do solo. O tipo de vegetação inadequado não restauraria a estrutura do solo a um nível alto em um curto período de tempo, afetando o benefício da conservação do solo e da água. Espécies vegetais adequadas para a revegetação devem, portanto, primeiro ser identificadas, especialmente para a recuperação da estrutura do solo em área degradada. Associando essa informação ao presente estudo, observa-se que o uso do milho no sistema de cultivo pode contribuir na recuperação estrutural de solo compactado.

As técnicas de imagem obtidas por  $\mu$ TC parecem ser eficientes na caracterização da estrutura do solo, pois permitem não apenas quantificar o volume e a distribuição de tamanho dos poros, mas também a conectividade e a tortuosidade das ligações formadas pelos poros, com significância adicional para as funções do solo.

#### **4. Conclusões**

O tratamento que recebeu tráfego com colhedora com pressão de 220 kPa em Latossolo vermelho distroférico resultou em maior compactação do solo, com diminuição na ocorrência de poros. A pressão exercida na superfície do solo formou zonas de restrição ao desenvolvimento do sistema radicular, que se desenvolveu no sentido horizontal.

O uso de milho foi capaz de proporcionar ambiente com maior presença e continuidade de poros em área com tráfego de colhedora. O uso da braquiária, por sua vez, não teve efeito significativo para os parâmetros avaliados a partir da análise microtomográfica.

A análise microtomográfica proporcionou detalhamento da visualização da distribuição espacial dos vazios do solo, permitindo a verificação dos efeitos de práticas de uso do solo (escarificação, Sistema



Plantio Direto e tráfego de colhedora) e de espécies vegetais (braquiária e milho) na forma e conectividade de poros.

Foi possível demonstrar a compactação gerada pela pressão do tráfego na superfície do solo e a capacidade do sistema radicular do milho em mitigar a compactação pelo número de Euler, dimensão fractal e pela renderização tridimensional.

Por fim, cabe ressaltar que o presente estudo amplia as pesquisas desenvolvidas na Ciência do Solo com o uso de microtomógrafo para diferentes fins. Ainda, demonstra o potencial da adoção deste método em futuras investigações relacionadas ao uso de plantas de cobertura.

## **CAPÍTULO VI - Conclusões Gerais**

A partir do experimento conduzido e das análises realizadas, é possível concluir que o tráfego de máquinas agrícolas ocasiona aumento na densidade e resistência à penetração de raízes, com reduções na quantidade, tamanho e distribuição dos poros.

O uso de gramíneas auxiliou na reestruturação do Latossolo, com a diminuição das perturbações causadas pelos tratamentos onde o solo foi trafegado. O cultivo de milho proporcionou ambiente com maior presença e continuidade de poros.

O preparo reduzido do solo com escarificação e a área com oito tráfegos de colhedora influenciaram negativamente na produtividade da soja. A maior produção da cultura foi verificada em Sistema Plantio Direto contínuo, quando cultivada subsequente às espécies braquiária e trigo. Verificou-se também que a densidade do solo com valores acima de  $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$  prejudica o desenvolvimento do sistema radicular da soja, determinado pelo comprimento, volume e área superficial das raízes.

## Referências Bibliográficas

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 519-531, 2004.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 601-612, 2003.
- 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, p. 717-723, 2001.
- ALCÂNTARA, F. A et al. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 277-288, 2000.
- ALLETTO, L.; COQUET, Y. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, n. 1-2, p. 85-94, 2009.
- ALMEIDA, W. S. et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, p. 130-138, 2018.
- ALVARENGA, R. C. et al. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p.25-36, 2001.
- AMOSSE, C.; JEUFFROY, M. H.; DAVID, C. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: Effects on performance and resource availability. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 145, p. 78-87. 2013.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. Contribution of roots and shoots of Brachiaria species to soybean performance in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, p. 592-598, 2017.
- BASTARDIE, F.; CAPOWIEZ, Y.; CLUZEAU, D. 3D characterisation of earthworm burrow systems in natural soil cores collected from a 12-year-old pasture. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 30, p. 34-46, 2005.

- BAVOSO, M. A. et al. Resiliência física de dois Latossolos vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1892-1904, 2012.
- BENGOUGH, A. G.; LOADES, K.; MCKENZIE, B. M. Root hairs aid soil penetration by anchoring the root surface to pore walls. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 67, p. 1071-1078, 2016.
- BERGAMIN, A. C. et al. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n.3, p. 299-305, 2010a.
- BERGAMIN, A. C. et al. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 681-691, 2010b.
- BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, 2004.
- BEUTLER, A. N. et al. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 787-794, 2006.
- BHATTACHARYYA, R. et al. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 129–140, 2006.
- BLANCO, H.; LAL, R. Soil resilience and conservation. In: BLANCO, H.; LAL, R. (Eds.). **Principles of soil conservation and management**. Columbus: Springer, 2008. p. 425-447.
- BODNER, G.; LEITNER, D.; KAUL, H. P. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. **Plant Soil**, The Hague, v. 380, p. 133-151, 2014.
- BÖHM, W. **Methods of studyng root systems**. Berlin: Springer-Verlang, 1979. 188 p.
- BONETTI, J. de A. et al. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 1, p. 104-112, 2015.
- BONETI, J. A. et al. R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 174, p. 104-112, 2017.
- BOUMA, J. et al. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 945-950, 1977.

BOTTA, G.; JORAJURIA, C. D.; DRAGHI, L. Influence of the axle load, tire size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil. **Journal Terramechanics**, Oxford, v. 39, p. 47-54, 2002.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elements of the Nature and Properties of Soils**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 624p.

BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 605-614, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399p.

BREWER, R., **Fabric and Mineral Analysis of Soils**. New York: John Wiley 1964. 470 p.

CALONEGO, J. C. et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 85, p. 31-37, 2017.

CARDOSO, E. G. et al. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio Brasília, v. 41, n. 3, p. 493-501, 2006.

CARVALHO, M. A. de et al. Composição granulométrica, densidade e porosidade de agregados de Latossolo Vermelho sob duas coberturas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 10, p.1010-1016, 2014.

CÁSSARO, F. A. M. et al. Pore-Size distributions of soils derived using a geometrical approach and multiple resolution MicroCT images. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 81, p. 468-476. 2017.

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

CAVALIERI, K. M. V. et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

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

CHAVES, T. de A. et al. **Recuperação de áreas degradadas por erosão no meio rural**. Niteroi: Programa Rio Rural, 2012. 19p.

- CHEN, G.; WEIL, R. R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 17-27, 2011.
- CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 136, p. 61-69, 2014.
- CHERUBIN M. R. et al. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 173, p. 64-74, 2017.
- CLARK, L. J.; WHALLEY, W. R.; BARRACLOUGH, P. B. How do roots penetrate strong soil? **Plant and Soil**, The Hague, v. 255, p. 93-104, 2003.
- COLOMBI, T. et al. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 574, p. 1283-1293, 2017.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB.  
**Acompanhamento da safra brasileira de Grãos**, Safra 2015/16 – Décimo Primeiro Levantamento. Brasília, v.3, ago. 2016. 176p.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; CHAPLOT, V. Origin of microaggregates in soils with Ferric horizons. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 256-263, 2005.
- CORTEZ, W. J. et al. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um Argissolo amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 1000-1010, 2014.
- CORTEZ, W. J. et al. Agronomical attributes of soybeans and soil resistance to penetration in no-tillage and chiseled surfaces. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 37, n. 1, p. 98-105, 2017.
- COSTA, P. A. et al. O. Changes in soil pore network in response to twenty-three years of irrigation in a tropical semiarid pasture from northeast Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 137, p. 23-32, 2014.
- COSTA, P. F. et al. Physical properties of a latosol eutropic red under management systems after different winter crops sucessful by the soybean crop. **African Journal of Agricultural Research**, Victoria Island, v. 11, n. 40, p. 3929-3939, 2016.
- CRESTANA, S.; VAZ, C. M. P. Non-invasive instrumentation opportunities for characterizing soil porous systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 47, p. 19-26, 1998.
- CUNHA, J. P. A. R.; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos do solo. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 371-375, 2009.

- DAL FERRO, N.; CHARRIER, P.; MORARI, F. Dual-scale micro-CT assessment of soil structure in a long-term fertilization experiment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 204-205, p. 84-93, 2013.
- DAL FERRO, N. et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 55-65, 2014.
- DALCHIAVON, F. C. et al. Inter-relações da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 2, p. 255-264, 2014.
- DATHE, A. et al. The surface fractal dimension of the soil-pore interface as measured by image analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 103, p. 203-229, 2001.
- DE GRYZE, S. et al. Pore structure changes during decomposition of fresh residue: X-Ray tomography analyses. **Geoderma**, Amsterdam, v. 134, p. 82-96, 2006.
- DEBIASI, H. et al. Capacidade de suporte e copressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2629-2637, 2008.
- DEBIASI, 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, 2010.
- DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em sistema de integração lavoura-pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 7, p. 1180-1186, 2012.
- DECAGON DEVICES. **Operator's manual version 1.3 WP4-T dewpointmeter**. Pullman, 2000. 70p.
- DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T. Development and current status of no-till adoption in the world. In: ISTRO Conference, 18., Izmir. **[Proceedings]**. Turkey, 2009. Paper T1-041, p. 1-16.
- 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**, Beijing, v. 3, p. 1-26, 2010.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Teory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004.
- DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, v. 1, p. 55-94, 2000.

DONAGEMA, G. K. et al. (Org.). **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 2011. 230p.

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, p. 1713-1722, 2011.

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 2, p. 159-168, 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.

ESPESSATO, R. R. et al. Soybean developments as a function of traffic of tractor with radial tires. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 10, p. 726-730, 2017.

FEBRAPDP - Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha e Irrigação. **Área de Plantio Direto**. [2017]. Disponível em: <<https://febrapdp.org.br/area-de-pd>>. Acesso em: 17 dez. 2017.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. 12p.

FELDKAMP, L. A.; DAVIS, L. C.; KRESS, J. W. Practical eone-beam algorithm. **Journal of the Optical Society of America**, Washington, v. 1, p. 612-619, 1984.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.

FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ M.; SÁNCHEZ-GRANERO M. A. A new fractal dimension for curves based on fractal structures. **Topology and its Applications**, Amsterdam, v. 203, p. 108-124, 2016.

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

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The state of the world's land and water resources for food and agriculture**. Roma: FAO. 2011. 50p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Adoption Worldwide**. [2016]. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/ca/6c.htm>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

FOEREID, B. X-Ray computed tomography for root quantification. **Open Journal of Soil Science**, Wuhan, v. 5, p. 145-148, 2015.



FRANCHINI, J. C. et al. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Emprapa Soja, 2009. 40p.

FRANCHINI, J. C. et al. **Integração lavoura-pecuária: alternativa para diversificação e redução do impacto ambiental do sistema produtivo no Vale do Rio Xingu**. Embapa Soja: Londrina, 2010. (Circular Técnica, n. 77)

FRANCHINI, J. C. et al. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52p.

FURLANI, C. E. A. et al. Temperatura do solo em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 375-380, 2008.

GAO, W. et al. Deep roots and soil structure. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 39, p. 1662-1668, 2016.

GARBOUT, A.; MUNKHOLM, L. J.; HANSEN, S. B. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 128, p. 104-109, 2013.

GARCIA, R. A.; LI, Y.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter and physical attributes affected by crop rotation under no-till. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 1724-1731, 2013.

GILL, K. S. et al. Tillage, mulch, and irrigation effects on corn (*Zea Mays* L.) in relation to evaporative demand. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 39, p. 213-227, 1996.

GIRARDELLO, V. C. et al. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1234-1244, 2014.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GUEDES FILHO, O. et al. Structural properties of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdam, v. 204-205, p. 94-102, 2013.

GUNDERSEN, H. J. G. et al. The conneulor: unbiased estimation of connectivity using physical dissectors under projection. **Bone**, Elmsford, v. 14, p. 217-222, 1993.

HALING, R. E. et al. Application of X-Ray computed tomography to quantify fresh root decomposition *in situ*. **Plant and Soil**, The Hague, v. 372, p. 619-627, 2013.

HANSSON, L. J. et al. Impacts of off-road traffic on soil physical properties of forest clear-cuts: X-ray and laboratory analysis. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Stockholm, v. 33, p. 166-177, 2017.

HARRIGAN, T.; MANN, R. Characterization of microstructural anisotropy in orthotropic materials using a second rank tensor. **Journal of Materials Science**, Rosemead, v. 19, p. 761-767, 1984.

HECKLER, J. C.; SALTON, J. C. **Palha: fundamento do Sistema Plantio Direto**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002.

HERNÁNDEZ ZUBELDIA, E. et al. Cellular automata and X-ray microcomputed tomography images for generating artificial porous media. **International Journal of Geomechanics**, Reston, v. 16, n. 2, 2016. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0000527>>. Acesso em: 22 jan. 2018

HOLTHUSEN, D. et al. Soil porosity, permeability and static dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 177, p. 113-124, 2018.

HORGAN, G. W. Mathematical morphology for analyzing soil structure from images. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 49, p. 161-173, 1998.

HOUSTON, A. N. et al. Quantification of the pore size distribution of soils: Assessment of existing software using tomographic and synthetic 3D images. **Geoderma**, Amsterdam, v. 299, p. 73-82, 2017.

HU, X. et al. Quantification of soil macropores under alpine vegetation using computed tomography in the Qinghai Lake Watershed, NE Qinghai-Tibet Plateau. **Geoderma**, Amsterdam, v. 264, p. 244-251, 2016.

JARVIS, N.; LARSBO, M.; KOESTEL, J. Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 287, p. 71-79, 2017.

JAVAUX, M. et al. Use of a three-dimensional detailed modeling approach for predicting root water uptake. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n.3, p.1079-1088, 2008.

JIN, K. et al. Shaping an optimal soil by root-soil interaction. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 22, n. 10, p. 823-829, 2017.

JIMENEZ, R. L. et al. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação de um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, p. 116-121, 2008.

JIN, K. et al. How do roots elongate in a structured soil? **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 64, p. 4761-4777, 2013.

JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, A. F. O. **Safira**: Sistema de Análise de Fibras e Raízes. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 20p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento 24)

KARLEN, D. L. et al. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 4-10, 1997.

KATUWAL, S. et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 237-238, p. 9-20, 2015.

KEYES, S. D. et al. High resolution synchrotron imaging of wheat root hairs growing in soil and image based modelling of phosphate uptake. **New Phytologist**, London, v. 198, n.4, p. 1023-1029, 2013.

KIM, F. H. et al. Investigation of pore structure in cobalt chrome additively manufactured parts using X-ray computed tomography and three-dimensional image analysis. **Additive Manufacturing**, Amsterdam, v. 17, p. 23-38, 2017.

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

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 365-371, 2008.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C. A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. I. Physical and mineralogical methods. Madison: ASA; SSSA, 1986. p. 635-662.

KOEBERNICK, N. et al. High-resolution synchrotron imaging shows that root hairs influence rhizosphere soil structure formation. **New Phytologist**, London, v. 216, p. 124-135. 2017.

KRAVCHENKO, A. N. et al. Protection of soil carbon within macro-aggregates depends on intra-aggregate pore characteristics. **Scientific Reports**, London, v. 5, n. 16261, 2015.

KUKA, K. et al. X-ray coputed microtomography of the soil-root relationship in grassland soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 12, n.4, p. 1-10, 2013.

KUNZ, M. et al. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1699-1708, 2013.

LANDIS, E. N.; KEANE, D. T. X-ray microtomography. **Materials Characterization**, Hanover, v. 61, p. 1305-1316, 2010.

LASSO, P. R. O.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M. **Recomendações para utilização do microtomógrafo de raios-X Sky Scan 1172 em ciências agrárias e biológicas**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 22p.

LEÃO, T. P. et al. Assessing the immediate and residual effects of chiseling for ameliorating soil compaction under long-term no-tillage. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 695, p. 431-438, 2014.

LEVIEN, R. et al. Semeadura direta do milho com dois tipos de sulcadores de adubo, em nível e no sentido do declive do terreno. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 6, p. 1003-1010, 2011.

LI, D.; VELDE, B.; ZHANG, T. Observations of pores and aggregates during aggregation in some clay-rich agricultural soils as seen in 2D image analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 118, p. 191-207, 2004.

LI, H. et al. Soybean root traits after 24 years of different soil tillage and mineral phosphorus fertilization management. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 165, p. 258-267, 2017.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2005. 344p.

LIPIEC J. et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 121, p. 74-81, 2012.

LUO, L.; LIN, H.S.; LI, S. Quantification of 3-D macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 393, p. 53-64, 2010.

MA, R. et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 149, p. 1-11, 2015.

MARCHINI, D. C. et al. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 6, p. 574-580, 2015.

MARSILI, A. et al. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber and metal tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 185-199, 1998.

MARTÍNEZ, F. S. J. et al. Soil aggregate geometry: measurements and morphology. **Geoderma**, Amsterdam, v. 237, p. 36-48, 2015.

MAZURANA, M. et al. Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo Vermelho sob tráfego controlado de máquinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1185-1195, 2013.

MAZURANA, M. **Parâmetros de capacidade de suporte de carga em solos com diferentes anos de adoção no sistema de plantio direto**. 2015. 122f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MEES, F. et al. Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. **Geological Society of London**, Special Publications, v. 215, p. 1-6, 2003.

MELLO, N. A. **Efeito do sistema de manejo nos atributos do solo, movimentação de sedimentos e exportação de carbono orgânico numa microbacia rural sob cultura do fumo**. 2006. 273f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MENTGES, M. I. et al. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 263, p. 47-59, 2016.

MISRA, R. K.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Maximum axial and radial growth pressures of plants roots. **Plant and Soil**, The Hague, v. 95, n. 3, p. 315-326, 1986.

MOONEY, S. J. et al. Developing X-Ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 352, p. 1-22, 2012.

MOREIRA, W. H. et al. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 160, p. 53-64, 2016.

MUNKHOLM, L. J. et al. Relationship between soil aggregate strength, shape and porosity for soils under different long-term management. **Geoderma**, Amsterdam, v. 268, p. 52-59, 2016.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 181-182, p. 22-29, 2012.

NAVEED, M. et al. Pore structure of natural and regenerated soil aggregates: an x-ray computed tomography analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 78, p. 377-386, 2014.

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, p. 723-734, 2008.

NUNAM, N. et al. Investigating microbial micro-habitat structure using X-ray computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 133, p. 398-407, 2006.

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, 2014.

NUNES, M. R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 119-126, 2015.

O'SULLIVAN, M. F.; HENSHALL, J. K.; DICKSON, J. W. A simplified method for estimating soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 325-335, 1999.

ODGAARD, A. Three-dimensional methods for quantification of cancellous bone architecture. **Bone**, Elmsford, v. 20, n. 4, p. 315-328, 1997.

OLA, A.; DOOD, I. C.; QUINTON, J. N. Can we manipulate root system architecture to control soil erosion? **Soil**, v. 1, p. 603-612, 2015. Disponível em: < <https://www.soil-journal.net/1/603/2015/soil-1-603-2015.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2018

OLIVEIRA, R. P. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido a níveis de compactação e irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 587-597. 2012.

OR, D.; GHEZZEHEI, T. A. Modeling post-tillage soil structural dynamics: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p.41-59, 2002.

ORTIGARA, C. et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 619-626, 2014.

PAEZ-GARCIA, A. et al. Root traits and phenotyping strategies for plant improvement. **Plants**, Basel, v. 4, p. 334-355, 2015.

PAGLIAI, M.; LA MARCA, M.; LUCAMANTE, G. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 34, p. 391-403, 1983.

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

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. The soil pore system as an indicator of soil quality. **Advances in GeoEcology**, [Catena], v. 35, p. 71-82, 2002.

- PAGLIAI M.; VIGNOZZI N.; PELLEGRINI S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 131-143. 2004.
- PALM C. et al. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 187, p. 87-105, 2014.
- PARADELO, M. et al. Xray CT-derived soil characteristics explain varying air, water, and solute transport properties across a loamy field. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 15, n. 4, p. 1-13, 2016.
- PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 29, n. 6, p. 717-728, 1991.
- PETH, S. et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 897-907, 2008.
- PICCOLI, I. et al. Conservation agriculture had a poor impact on the soil porosity of veneto low-lying plain silty soils after a 5-yr transition period: effects of conservation agriculture on soil porosity. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 28, p. 2039-2050, 2017.
- PIRES L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água pelo solo**. 2006, 229f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear na Agricultura e no Ambiente, Centro de Engenharia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- PIRES, L. F. et al. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, p. 197-210, 2010.
- PIRES, L. F. et al. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 165, p. 66-79, 2017.
- PITUELLO, C. et al. Nano to macro pore structure changes induced by long-term residue management in three different soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 217, p. 49-58. 2016.
- POPOVA, L. et al. Plant root tortuosity: an indicator of root path formation in soil with different composition and density. **Annals of Botany**, Oxford, v. 118, p. 685-698, 2016.
- PYTKA, J. Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 1, p. 77-88, 2005.

RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 314, p. 122-137, 2018.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 242-254, 2009.

REICHERT, J. M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 123-136, 2016.

REICHERT, J. M. et al. Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage? **Geoderma**, Amsterdam, v. 301, p. 72-79, 2017.

RENARD, P.; ALLARD, D. Connectivity metrics for subsurface flow and transport. **Advances in Water Resources**, Essex, v. 51, p. 168-196, 2013.

RICHARD, G. et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 52, p. 49-58, 2001.

RINGROSE-VOASE, A. J.; BULLOCK, P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, p. 673-684, 1984.

RODRIGUES, S. et al. Permeabilidade ao ar em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 105-114, 2011.

ROSA, D. M. et al. Substâncias húmicas do solo cultivado com plantas de cobertura em rotação com milho e soja. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 2, p. 221-230, abr-jun, 2017.

ROSOLEM, C. A.; PIVETTA, L. A. Mechanical and biological approaches to alleviate soil compaction in tropical soils: assessed by root growth and activity (Rb uptake) of soybean and maize grown in rotation with cover crops. **Soil Use and Management**, Lismore, v. 33, p. 141-152, 2017.

SANDIN, M. et al. Post-tillage evolution of structural pore space and saturated and near-saturated hydraulic conductivity in a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 165, p. 161-168, 2017.

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



- SCHLÜTER, S.; WELLER, U.; VOGEL, H.J. Soil-structure development including seasonal dynamics in a long-term fertilization experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 174, p. 395-403, 2011.
- SCHMIDT, S. et al. Effect of scanning and image reconstruction settings in X-Ray computed tomography on soil image quality and segmentation performance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 207-208, p. 154-165, 2013.
- SCHNEE, L. S. et al. Analysis of physical pore space characteristics of two pyrolytic biochars and potential as microhabitat. **Plant and Soil**, The Hague, v. 408, p. 357-368, 2016.
- SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimentos de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 58-64, 2009.
- SEQUINATTO, L. et al. Qualidade de um Argissolo submetido a práticas de manejo recuperadoras de sua estrutura física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 344-350, 2014.
- SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, p. 224-234, 1999.
- SHI, X. et al. Micrometer-scale fractures in coal related to coal rank based on micro-CT scanning and fractal theory. **Fuel**, London, v. 212, p. 162-172, 2018.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.
- SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 31-40, 2006.
- SILVA, S. G. C. et al. M. Temporary effect of chiseling on the compaction of Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 547-555, 2012.
- SILVA, V. R. da; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.
- SILVA, V. R. da; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 795-801, 2000.
- SKVORTSOVA, E. B.; UTKAEVA, V. F. Soil pore space arrangement as a geometric indicator of soil structure. **Eurasian Soil Science**, Silver Spring, v. 41, p. 1198-1204, 2008.

SOANE B. D. et al. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 118, p. 66-87. 2012.

SOUZA, L. da S. et al. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília: Embrapa, 2014. v.1, 507p.

STEWART, P. R. et al. The adaptive capacity of maize-based conservation agriculture systems to climate stress in tropical and subtropical environments: a meta-regression of yields. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 251, p. 194-202, 2018.

TANG, A. M. et al. A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, p. 171-181, 2011.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Characterization of soil structure and porosity under long-term conventional tillage and no-tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1837-1844, 2009.

TIECHER, T. et al. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 308, p. 78-85, 2017.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 33, p. 141-163, 1982.

TOOSI, E. R. et al. Effects of management and pore characteristics on organic matter composition of macroaggregates: evidence from characterization of organic matter and imaging. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 68, p. 200-211, 2017.

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

TRENTIN, R. G. et al. Soybean productivity in Rhodic Hapludox compacted by the action of furrow openers. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 40, e35015, 2018.

TUCHTENHAGEN, I. K. et al. Visual evaluation of the soil structure under different management systems in lowlands in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170270, 2018. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v42/1806-9657-rbcs-18069657rbcs20170270.pdf>>. Acesso em: 06 fev. 2018

TURBERG, P. et al. Characterization of structural disturbances in peats by X-ray CT-based density determinations. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v. 65, p. 613-624, 2014.

USDA. **Soil Quality Institute**. [Washington, 2016]. Disponível em: <<http://soils.usda.gov/squi/>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

VALADÃO, F. C. de A. et al. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 243-255, 2015.

VALICHESKI, R. R. et al. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012.

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

VAZ, C. M. P. et al. Evaluation of an advanced benchtop Micro-Computed tomography system for quantifying porosities and pore-size distributions of two Brazilian Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, p. 832-841, 2011.

VERECKEN, H. et al. Modeling soil processes: review, key challenges, and new perspectives. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 15, p. 1-57, 2016.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p.743-755, 2009.

VOGEL, H. J. A numerical experiment on pore size, pore connectivity, water retention, permeability, and solute transport using network models. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 51, p. 99-105, 2000.

VOGEL, H. J.; ROTH, K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure. **Advances in Water Resources**, Essex, v. 24, p. 233-242, 2001.

VOGELER I. et al. Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 137-143. 2009.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P. Erosão hídrica, em três momentos da cultura do milho, influenciada por métodos de preparo do solo e semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 565-574, 2014.

WHITMORE, A. P.; WHALLEY, W. R. Physical effects of soil drying on roots and crop growth. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 60, p. 2845-2857, 2009.

WILDENSCHILD, D.; SHEPPARD, A. P. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and process in subsurface porous medium systems. **Advances in Water Resources**, Essex, v. 51, p. 217-246, 2013.

WILLIAMS, S. M.; WEIL, R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 4, p.1403-1409, 2003.

ZHAO, Y. et al. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 109, p. 75-86, 2010.

ZHAO, D. et al. Effect of vegetation type on microstructure of soil aggregates on the Loess Plateau, China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 242, p.1-8, 2017.

ZULPO, L. **Variáveis termo-físico-hídricas no sulco de semeadura do milho em plantio direto relacionadas com tráfego de rodados, mecanismos sulcadores de fertilizantes e coberturas do solo**. 2016. 74f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **Resumo Bibliográfico**

Altamir Mateus Bertollo, nascido em 09/11/1987, em Ajuricaba, Rio Grande do Sul. Filho de Adalto e Algenir Bertollo, agricultores, desenvolveu estudo de ensino fundamental nas escolas do interior do município: Escola Luterana Sião (1ª e 2ª séries), Colégio Estadual Medianeira (3ª e 4ª séries) e Colégio Estadual Comendador Soares de Barros (5 a 8 série). Ensino médio integrado ao Curso Técnico em Agropecuária (2002-2005) no Instituto Municipal de Ensino Assis Brasil – IMEAB, em Ijuí, RS. Graduado em Agronomia pela Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen (2007-2012). Mestre em Agronomia: Agricultura e Ambiente, pela Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen (2012-2014). Sob orientação do Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva, desenvolveu dissertação intitulada “Calagem, gessagem e manejos de solo nas propriedades físicas de um Latossolo”. Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2014-2018). Sob orientação do Prof. Dr. Renato Levien, desenvolveu trabalho de tese intitulado “Mitigação da compactação do solo pelo uso de espécies vegetais”. Desde março de 2015 atua como Analista Agropecuário e Florestal – Engenheiro Agrônomo, na Secretaria de Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento Rural do Estado do Rio Grande do Sul.