

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS DE FREDERICO WESTPHALEN – RS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA:
AGRICULTURA E AMBIENTE**

Cícero Ortigara

**PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO EM
DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO DE LONGA DURAÇÃO**

**Frederico Westphalen, RS
2017**

Cícero Ortigara

**PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO EM DIFERENTES
SISTEMAS DE CULTIVO DE LONGA DURAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agronomia.**

Orientador: Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva

**Frederico Westphalen, RS
2017**

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

Ortigara, Cícero

Propriedades físicas e hídricas de um Latossolo em diferentes sistemas de cultivo de longa duração / Cícero Ortigara.- 2017.

75 f.; 30 cm

Orientador: Vanderlei Rodrigues da Silva

Coorientador: Henrique Debiasi

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, RS, 2017

1. Distribuição de poros 2. Índice de continuidade de poros 3. Condutividade hidráulica 4. Compactação do solo 5. Produtividade da soja I. Rodrigues da Silva, Vanderlei II. Debiasi, Henrique III. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Cícero Ortigara. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Linha Turchetto, S/N, Interior. Taquaruçu do Sul, RS, CEP 98410-000.

Fone: (0xx55) 99918 2345; Endereço eletrônico: ciceroortigara@hotmail.com

Cícero Ortigara

**PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO EM DIFERENTES
SISTEMAS DE CULTIVO DE LONGA DURAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

Aprovada em 23 de fevereiro de 2017

Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Clovis Orlando Da Ros (UFSM)

Douglas Rodrigo Kaiser (UFFS)

Frederico Westphalen, RS
2017

Aos meus pais, pelo apoio e pelo exemplo de persistência.

DEDICO...

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar aos meus pais, Élido José Ortigara e Geneci Centenaro Ortigara, verdadeiros guerreiros que deram toda a minha educação e condições para que eu pudesse conquistar o título de Eng. Agrônomo, e agora, o grau de mestre em Agronomia. Estes sim grandes Doutores da vida.

Aos meus irmãos Rodolfo e Bruna Ortigara, pelo exemplo e dedicação em suas caminhadas. À Sofia, ao Henrique e ao Eduardo, meus sobrinhos/afilhados, mesmo que muito pequenos, mostrando o sentido da vida.

Ao professor Vanderlei Rodrigues da Silva, não apenas pela orientação do início ao fim da graduação, mas um grande amigo. O que sei como pesquisador até hoje devo a ele. Ao professor futebolista, titular e artilheiro Rodrigo F. da Silva, pela amizade e conhecimentos transmitidos. Ao “(co-) co-orientador” de muitos trabalhos ao decorrer da graduação e mestrado além da grande amizade e admiração Moacir Tuzzin de Moraes.

Aos pesquisadores da Embrapa Soja, Henrique Debiasi e Julio Cezar Franchini, mesmo que o pouco tempo de convívio, pela orientação e ensinamentos transmitidos, por toda a confiança depositada em mim e por me dar a oportunidade da realização deste trabalho.

Ao Felipe Bonini da Luz, Lucas Aquino Alves e Junior Mello Damian, pelos risos, conversa, amizade, futebol, carne, festa, trago, conselhos, trabalho, elaboração de cerveja, dias e noites de karaokê e entre muitos outros momentos.

A todos (as) os (as) demais amigos (as) que estiveram comigo nesta caminhada, que não os nominarei para não cometer injustiças, pela amizade, força, conselhos, momentos alegres e tristes e companheirismo.

Aos amigos do Laboratório de Física do Solo da UFSM/FW pela amizade, risos, companhia e ajuda em diversos trabalhos. Aos funcionários e estagiários da área de manejo do solo e da cultura da Embrapa Soja, pela amizade e trabalho em equipe.

Às tias da limpeza por limparem toda a bagunça promovida por mim (não foi pouca) e aos guardas da UFSM/FW pelas noites, sábados e domingos de estudo e pesquisa propostos com segurança.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Centro Nacional de pesquisa da Soja da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Soja), que possibilitaram a realização deste trabalho. À Capes pela concessão da bolsa de estudo.

A todos vocês o meu MUITO OBRIGADO!

“The nation that destroys its soil, destroys itself.”

(A nação que destrói o seu solo, destrói a si mesma)

(Franklin Delano Roosevelt)

RESUMO

PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO DE LONGA DURAÇÃO

AUTOR: Cícero Ortigara

ORIENTADOR: Vanderlei Rodrigues da Silva

O uso intensivo dos solos agrícolas provocou acentuada degradação de sua estrutura química, física, biológica e microbiológicas. Com o intuito de manter ou promover melhorias na qualidade do solo diversas técnicas foram desenvolvidas, entre elas o sistema plantio direto. O objetivo deste trabalho foi de avaliar o efeito de planos de rotação e do sistema de preparo do solo nas propriedades físicas e hídricas de um Latossolo, na produtividade de grãos e no desenvolvimento da cultura da soja. O estudo foi realizado em um experimento de longa duração, implantado em 1993, em um Latossolo Vermelho Distroférico muito argiloso. O experimento apresenta esquema fatorial 2x3 (sistema de preparo do solo x planos de rotação). O fator preparo do solo é composto por: I) Preparo convencional; e II) Plantio direto. O fator planos de rotação é composto por: I) sucessão soja/trigo; II) rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; e III) sucessão soja/milho+brachiaria. Foram avaliados parâmetros físicos e hídricos do solo como a densidade, porosidade total, macro e microporosidade, infiltração e condutividade hidráulica. Os parâmetros de planta avaliados foram a densidade do comprimento radicular, altura de plantas, peso de mil grãos e produtividade da cultura da soja. A fração de água disponível, condutividade hidráulica de solo não saturado, a frequência e o volume de poros e a uniformidade de distribuição de classes de poros foram obtidos do ajuste do modelo de Van Genuchten. O sistema plantio direto em comparação ao sistema de preparo convencional do solo proporciona maior estabilidade na produtividade de grãos de soja. A avaliação isolada de atributos físicos básicos do solo pode fornecer informações limitadas e errôneas da real condição de sua estrutura. A condutividade hidráulica do solo, infiltração de água do solo, frequência e distribuição de poros do solo foram eficazes para explicar de forma mais adequada a produtividade da soja. O índice de continuidade de poros do solo proposto neste trabalho corrobora com os demais atributos do solo, medidos e estimados, podendo então ser utilizado de forma rápida e eficiente para estimativa da continuidade de poros do solo.

Palavras-chave: Distribuição de poros. Índice de continuidade de poros. Condutividade hidráulica. Compactação do solo. Produtividade da soja.

ABSTRACT

PHYSICAL AND HYDRIC PROPERTIES OF A RHODIC EUTRUDOX IN DIFFERENT LONG-TERM CROP SYSTEMS

AUTHOR: CÍCERO ORTIGARA
ADVISOR: VANDERLEI RODRIGUES DA SILVA

The intensive use of agricultural soils caused a significant degradation of its chemical, physical, biological and microbiological structure. Aiming to maintain or promote improvements in soil quality, several techniques were developed, including the no-tillage system. The objective of this study was to evaluate the effect of rotation plans and tillage system on physical and hydraulic properties of a Rhodic Eutrudox in grain yield and development of soybean. The study was carried out in a long-lived experiment, implemented in 1993, on a very clayey Rhodic Eutrudox. The experiment presents a 2x3 factorial scheme (tillage system x rotation plans). The tillage factor is composed of: I) conventional tillage; and II) no-tillage. The rotation plans factor is composed of: I) soybean/wheat succession; II) rotation maize/lupine-soybean/oats-soybean/wheat-soybean/wheat; and III) succession soybean/maize + brachiaria. Soil physical and hydraulic parameters such as density, total porosity, macro and microporosity, infiltration and hydraulic conductivity were evaluated. The plant parameters evaluated were root length density, plant height, weight of one thousand grains and yield of soybean crop. The available water fraction, hydraulic conductivity of unsaturated soil, frequency and volume of pores and uniformity of distribution of pore classes were obtained from the fit of the Van Genuchten model. The no-tillage compared to the conventional tillage provides greater stability in soybean grain yield. The isolated assessment of basic soil physical attributes can provide limited and erroneous information on the actual condition of its structure. Soil hydraulic conductivity, soil water infiltration, and frequency of soil pore distribution were effective in explaining soybean productivity more adequately. The soil pore continuity index proposed in this paper corroborates the other soil attributes, measured and estimated, and can be used quickly and efficiently to estimate soil pore continuity.

Keywords: Distribution of pores. Index of soil pore continuity. Hydraulic conductivity. Soil compaction. Soybean productivity.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I

- Figura 1 – Demarcação de cada quadrante para coleta de raízes. 26
- Figura 2 – Precipitação (a) e déficit hídrico (b) durante o período de condução da cultura da soja a campo referente ao primeiro, segundo e terceiro terço do ciclo da cultura..... 36

ARTIGO II

- Figura 1 – Retenção de água em cada sistema de preparo do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: PD= Plantio direto; PC= Preparo convencional. 54
- Figura 2 – Fração de água disponível em cada sistema de preparo do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional. 55
- Figura 3 – Condutividade hidráulica do solo em cada sistema de preparo do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional. 57
- Figura 4 – Frequência acumulada (linha contínua) e frequência das classes de poros (linha tracejada) nas camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional. 58
- Figura 5 – Volume de poros para as classes >1000 (a); 500-1000 (b); 100-500 (c); 50-100 (d); 30-50 (e); 9-30 (f); 3-9 (g); 0,2-3 μm (h) nas diferentes camadas de solo avaliadas. Onde: PD= plantio direto; PC; preparo convencional. 59
- Figura 6 – Média do índice de continuidade de poros para as comparações até a camada de 0,40 m (a) e a partir da camada de 0,30 até 1,00 m (b). Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional. 61
- Figura 7 – Retenção de água de cada plano de rotação do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha..... 63
- Figura 8 – Fração de água disponível de cada plano de rotação do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha..... 64

- Figura 9 – Condutividade hidráulica do solo de cada plano de rotação do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha. 65
- Figura 10 – Frequência acumulada (linha contínua) e frequência das classes de poros (linha tracejada) nas camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha..... 67
- Figura 11 – Volume de poros para as classes >1000 (a); 500-1000 (b); 100-500 (c); 50-100 (d); 30-50 (e); 9-30 (f); 3-9 (g); 0,2-3 μm (h) nas diferentes camadas de solo avaliadas. Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha. 68
- Figura 12 – Média do índice de continuidade de poros para as comparações até a camada de 0,40 m (a) e da camada de 0,30 até 1,00 m (b). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha. 70

LISTA DE TABELAS

MATERIAL E MÉTODOS GERAIS

Tabela 1 – Composição granulométrica da área experimental em diferentes camadas do solo.	18
Tabela 2 – Conversão dos tratamentos da fase 1 para a fase 2.	19
Tabela 3 – Descrição dos modelos de produção em função dos ciclos de cultivo para primeira fase do experimento.	20
Tabela 4 – Descrição dos modelos de produção em função dos ciclos de cultivo para segunda fase do experimento.	20

ARTIGO I

Tabela 1 – Médias referentes aos efeitos simples de preparo do solo e planos de rotação das variáveis densidade do solo e porosidade total para cada camada avaliada.	31
Tabela 2 – Médias referentes aos efeitos simples de preparo do solo e planos de rotação das variáveis microporosidade e macroporosidade para cada camada avaliada.	33
Tabela 3 – Médias referentes ao preparo do solo para cada plano de rotação e seus efeitos simples para infiltração de água tridimensional e condutividade hidráulica do solo saturado.	34
Tabela 4 – Médias referentes ao preparo do solo para cada plano de rotação e seus efeitos simples para produtividade.	37
Tabela 5 – Médias referentes aos efeitos simples de preparo do solo e planos de rotação para altura de planta e peso de 1000 grãos de soja.	38
Tabela 6 – Médias referentes ao preparo do solo para cada plano de rotação e seus efeitos simples para densidade do comprimento radicular (cm cm^{-3})	41

ARTIGO II

Tabela 1 – Índice de continuidade de poros para cada classe de poros entre as diferentes camadas comparadas para preparo do solo.	60
Tabela 2 – Índice de continuidade de poros para cada classe de poros entre as diferentes camadas comparadas para os planos de rotação avaliados.	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1	HIPÓTESES.....	16
1.2	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2.1	Objetivos específicos	17
2	MATERIAL E MÉTODOS GERAIS	18
2.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	18
2.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	18
2.3	IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DAS CULTURAS.....	20
2.4	DEMAIS INFORMAÇÕES.....	21
3	ARTIGO 1: PRODUTIVIDADE DA SOJA E ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO DE LONGA DURAÇÃO	22
3.1	RESUMO.....	22
3.2	ABSTRACT.....	23
3.3	INTRODUÇÃO.....	23
3.4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.4.1	Experimento de campo	25
3.4.2	Avaliação de planta	25
3.4.2.1	<i>Produtividade da soja</i>	25
3.4.2.2	<i>Altura de planta e peso de mil grãos</i>	25
3.4.2.3	<i>Coleta de raízes</i>	26
3.4.3	Amostragem de solo	27
3.4.4	Determinação das propriedades físico-hídricas do solo	27
3.4.4.1	<i>Densidade do solo</i>	28
3.4.4.2	<i>Densidade de partículas</i>	28
3.4.4.3	<i>Macro, micro e porosidade total do solo</i>	28
3.4.4.4	<i>Taxa de infiltração tridimensional e condutividade hidráulica do solo saturado</i>	29
3.4.5	Dados climáticos	30
3.4.6	Análise estatística dos dados	30
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
3.5.1	Propriedades físicas e hídricas do solo	30
3.5.2	Parâmetros de plantas da cultura da Soja	35
3.6	CONCLUSÕES.....	42
3.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
4	ARTIGO 2: RETENÇÃO DE ÁGUA E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO NÃO SATURADO EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO DE LONGA DURAÇÃO	46
4.1	RESUMO.....	46
4.2	ABSTRACT.....	47
4.3	INTRODUÇÃO.....	47
4.4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
4.4.1	Experimento de campo	49
4.4.2	Amostragem de solo	49
4.4.3	Determinação das propriedades físicas e hídricas do solo	50
4.4.4	Proposta de novo índice de continuidade de poros	51
4.4.4.1	<i>Uniformidade de distribuição de classes de poros</i>	51
4.4.4.2	<i>Uniformidade da condutividade hidráulica relativa do solo</i>	51

4.4.4.3	<i>Índice de continuidade de poros</i>	52
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.5.1	Efeito do preparo sobre as propriedades do solo	53
4.5.2	Efeito do plano de rotação sobre as propriedades do solo	62
4.6	CONCLUSÕES.....	70
4.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura evoluiu ao longo dos anos e a preocupação pela preservação dos recursos naturais como a água e o solo passaram a ser tratadas com maior importância à medida em que as terras para o cultivo agrícola não eram mais capazes de sustentar a produtividade das culturas. A perda de solo pelo processo de erosão, o esgotamento da fertilidade e compactação excessiva do solo podem ser consideradas como os maiores problemas da agricultura tradicional. Para minimizar esses efeitos no solo e no ambiente, foram desenvolvidas técnicas de correção da acidez e fertilidade do solo, terraceamento (ZHAO et al., 2013), cultivo em faixas e o sistema plantio direto (SPD) (BHATTACHARYYA et al., 2006; FRANCHINI et al., 2009; PITTELKOW et al., 2015).

O SPD é considerado como o principal sistema de manejo no ponto de vista da conservação do solo e água, desde que respeitados princípios básicos como a manutenção da palhada, controle do tráfego, semeadura em nível, rotação de culturas entre outros (FRANCHINI et al., 2009). Estes autores citam ainda o desenvolvimento radicular das culturas, a disponibilidade e a infiltração de água no solo como os principais fatores que deverão ser considerados na adoção de alguma prática de manejo do solo.

Várias dúvidas do benefício do SPD sob o solo e as culturas foram bem elucidadas, como o acúmulo de carbono (MESSIGA et al., 2011; LOPEZ-FANDO et al., 2007), melhorias na ciclagem de nutrientes (DORAN et al., 1998), maior desenvolvimento radicular das culturas (MORAES, 2017), aumento na infiltração de água no solo (BHATTACHARYYA et al., 2006; MORAES, 2013), redução dos riscos de erosão (TIECHER, 2015), entre outros benefícios indiretos, tais como a menor amplitude térmica do solo e redução da disseminação de nematoides e principalmente na manutenção e acréscimo da produtividade das culturas (FRANCHINI et al., 2009; FRANCHINI et al., 2012; MORAES, 2013). Porém, quando implementado de forma deficiente, com baixa produção de palhada, rotação de culturas menos diversificado e ausência do controle do tráfego, faz com que este sistema receba o nome de “plantio direto” (PD). O PD apresenta problemas de compactação excessiva do solo em muitas áreas, principalmente em camadas sub superficiais (MORAES, 2013; FRANCHINI et al., 2009).

A compactação do solo é um problema que se intensificou nos últimos 30 anos com a adoção do PD. A baixa mobilização do solo limitada à linha de semeadura e o tráfego de máquinas na superfície do solo provocam um acúmulo de pressões no solo que reduz a porosidade total e aumenta a resistência à penetração das raízes e densidade do solo. Este tipo

de degradação, no PD, é resultante da pressão dos pneus, órgãos ativos das máquinas, implementos e do tempo que o solo está sendo cultivado sem revolvimento. O revolvimento mecânico do solo por muitos anos se constituiu em uma das formas mais eficazes de romper essas camadas compactadas. Porém este manejo provoca a transferência da camada compactada da superfície para camadas mais profundas, efeito este, conhecido como “pé de grade” ou “pé de arado”, dependendo da profundidade onde ocorre esta camada compactada (MORAES, 2013; FRANCHINI et al., 2009).

Um problema observado referente ao revolvimento mecânico do solo é que seu efeito no solo é de curta duração, normalmente entre 6 a 24 meses (FRANCHINI et al., 2009). Outro fator importante a ser levado em consideração em relação ao revolvimento mecânico, é que o mesmo destrói bioporos do solo alterando a continuidade de poros, acelera a degradação da palhada sob o solo, expõe a matéria orgânica à degradação, entre outros.

A utilização de plantas de cobertura do solo com desenvolvimento radicular expressivo de diferentes espécies, com diferentes sistemas radiculares é uma importante alternativa para realizar a escarificação biológica do solo. Uma vez que, no período da entressafra das culturas de interesse econômico, estas promovem a formação de bioporos pela decomposição do seu sistema radicular, que podem ser utilizados pelas raízes das culturas de interesse econômico e também, para os fluxos de água e ar no solo (BENJAMIN, 1993; BHATTACHARYYA et al., 2006). Estes bioporos apresentam maior comprimento e estabilidade, sendo eles os grandes responsáveis pelo transporte de água através do perfil do solo (HILLEL, 2003; REICHERT et al., 2011). Porém, ainda não se conhece a real interferência deste sistema de manejo sobre o fluxo de água ao longo do perfil do solo e a razão de que em anos com déficit hídrico o PD consolidado apresenta superioridade de produção das culturas (FRANCHINI et al., 2012).

1.1 HIPÓTESES

A produtividade da cultura da soja é superior em sistema que prioriza a rotação de culturas, independentemente do tipo de preparo do solo em experimento de longa duração.

Ocorre maior disponibilidade de água do solo no plantio direto quando comparado ao preparo convencional e, no sistema com rotação de culturas em relação ao sistema com sucessão em experimento implantado sobre um Latossolo muito argiloso de longa duração.

O revolvimento do solo provoca menor continuidade de poros ao longo do perfil, o que acarreta em menor condutividade hidráulica, tanto em solo saturado quanto em solo não saturado em experimento de longa duração.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito do preparo do solo e planos de rotação de culturas nas propriedades físicas e hídricas de um Latossolo Vermelho Distroférico, na produtividade de grãos e no desenvolvimento da cultura da soja.

1.2.1 Objetivos específicos

Avaliar os efeitos da adoção do preparo convencional e plantio direto e planos de rotação nos atributos físicos e hídricos do solo, na produtividade e desenvolvimento radicular da soja em experimento de longa duração.

Avaliar o efeito do plantio direto e preparo convencional com diferentes planos de rotação na distribuição de poros e parâmetros de estimativa do movimento de água do solo e indicar a utilização de nova metodologia para avaliação da continuidade de poros em um Latossolo muito argiloso.

2 MATERIAL E MÉTODOS GERAIS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O estudo foi realizado em um experimento de longa duração, implantado em 1993, localizado na Fazenda Experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Soja (Embrapa Soja), situada no município de Londrina, no norte do Estado do Paraná, tendo como coordenadas 23°20' latitude Sul e 51°18' longitude Oeste, e altitude de 616 m. O clima da região é classificado como Cfa (classificação de Koppen), subtropical úmido, mesotérmico, com temperatura média anual de 20°C e precipitação média anual de 1.622 mm. O solo da área de estudo é de origem basáltica, classificado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) como Latossolo Vermelho Distroférrico (SANTOS et al., 2013) com textura muito argilosa. A composição granulométrica do solo pode ser vista na tabela 1. A análise química do solo é apresentada por Luz (2017).

Tabela 1 – Composição granulométrica da área experimental em diferentes camadas do solo

Camada - m	Argila - g kg ⁻¹	Silte - g kg ⁻¹	Areia - g kg ⁻¹
0,00-0,05	746	181	72
0,05-0,10	774	152	74
0,10-0,20	768	157	76
0,20-0,30	777	152	71
0,30-0,40	798	138	64
0,40-0,60	806	126	68
0,60-0,80	808	127	65
0,80-1,00	794	118	88
Média	784	144	72

2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O experimento foi conduzido em duas fases distintas, a primeira foi da cultura de inverno de 1993 até a cultura de inverno de 2002, a segunda fase, teve início na cultura de verão de 2003 até 2016. Na primeira fase do experimento o mesmo era dividido em esquema fatorial 4x2 (preparo do solo *versus* ciclo da cultivar de soja), em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. O tamanho de cada parcela é de 7 m de largura por 38 m de comprimento. O fator preparo do solo era composto por: I) Preparo convencional com aração no verão e grade

pesada no inverno (SPCA-GP); II) Preparo convencional com grade pesada no verão e no inverno (SPCGP); III) Plantio direto contínuo com rotação de culturas (tremoço (*Lupinus albus* L.)/milho (*Zea mays* L.)-aveia(*Avena strigosa* Schreb.)/soja (*Glicine max* (L.) Merr)-trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja) (SPD1); e IV) Plantio direto contínuo com rotação de culturas (nabo (*Raphanus sativus* L.)/milho-aveia/soja-trigo/soja) (SPD2). Já o fator ciclo da cultivar de soja era composto por: I) cultivar de ciclo médio e; II) precoce.

Na segunda fase do experimento os tratamentos foram alterados para esquema fatorial 2x3 (preparo do solo x planos de rotação de culturas), em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. O fator preparo do solo é composto por: I) Preparo convencional com aração no verão e grade pesada no inverno (PC); e II) Plantio direto contínuo sem revolvimento do solo (PD). O fator planos de rotação é composto por: I) soja/trigo (ST); II milho/tremoço–soja/aveia–soja/trigo–soja/trigo (ROT) e III) soja/milho+brachiária (SM). Para o tratamento III do fator plano de rotação (soja/milho+brachiária) nos anos de 2004, 2005, 2006, 2012, 2014 e 2015 não foi possível semear a cultura da brachiária permanecendo em cultivo solteiro a cultura do milho no inverno.

Na tabela 2 pode ser melhor visualizada a conversão dos tratamentos da fase 1 para a fase 2 e na tabela 3 estão descritos os modelos de produção utilizados na primeira fase do experimento de 1993 até 2003. Na tabela 4 estão descritos os modelos de culturas utilizados na segunda fase do experimento de 2004 até 2015.

Tabela 2 – Conversão dos tratamentos da fase 1 para a fase 2

Fase 1		Fase 2	
Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2
SPCA-GP*	C. Precoce	PC	I – ST
SPCA-GP	C. Médio	PC	II – ROT
SPCGP	C. Precoce	PC	III – SM
SPCGP	C. Médio	-	-
SPD1	C. Precoce	PD	I – ST
SPD1	C. Médio	PD	II – ROT
SPD2	C. Precoce	PD	III – SM
SPD2	C. Médio	-	-

* SPCA-GP = Sistema de preparo convencional com aração no verão e grade pesada no inverno; SPCGP = Sistema de preparo convencional com grade pesada no verão e no inverno; SPD1 = Sistema plantio direto contínuo com rotação de culturas (tremoço/milho-aveia/soja-trigo/soja); SPD2 = Sistema plantio direto contínuo com rotação de culturas (nabo/milho-aveia/soja-trigo/soja); PC= Preparo convencional do solo; PD= Plantio direto; ST= sucessão soja/trigo; ROT rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão soja/milho+brachiaria.

Tabela 3 – Descrição dos modelos de produção em função dos ciclos de cultivo para primeira fase do experimento

Modelo de Produção	1994, 1997, 2000		1995, 1998, 2001		1996, 1999, 2002	
	Out-Inv	Pri-Ver	Out-Inv	Pri-Ver	Out-Inv	Pri-Ver
SPCA-GP M	Tr*	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj
SPCA-GP P	Tr	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj
SPCGP M	Tr	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj
SPCGP P	Tr	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj
SPD1 M	Tm	MI	Av	Sj	Tr	Sj
SPD1 P	Tm	MI	Av	Sj	Tr	Sj
SPD2 M	Nb	MI	Av	Sj	Tr	Sj
SPD2 P	Nb	MI	Av	Sj	Tr	Sj

*Culturas utilizadas em cada cultivo no outono-inverno (Out-Inv) e primavera-verão (Pri-Ver) para cada ano agrícola, onde: Tr= Trigo; Tm= Tremoço; MI= Milho; Sj= Soja; Av= Aveia;

Tabela 4 – Descrição dos modelos de produção em função dos ciclos de cultivo para segunda fase do experimento

Modelo de Produção	2004, 2008, 2012		2005, 2009, 2013		2006, 2010, 2014		2007, 2011, 2015	
	Out-Inv	Pri-Ver	Out-Inv	Pri-Ver	Out-Inv	Pri-Ver	Out-Inv	Pri-Ver
PC ST	Tr*	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj
PC ROT	Tm	MI	Av	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj
PC SM	MI+Br	Sj	MI+Br	Sj	MI+Br	Sj	MI+Br	Sj
PD ST	Tr	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj
PD ROT	Tm	MI	Av	Sj	Tr	Sj	Tr	Sj
PD SM	MI+Br	Sj	MI+Br	Sj	MI+Br	Sj	MI+Br	Sj

*Culturas utilizadas em cada cultivo outono-inverno (Out-Inv) e primavera-verão (Pri-Ver) para cada ano agrícola, onde: Tr= Trigo; Tm= Tremoço; MI= Milho; Br= Brachiaria; Sj= Soja; Av= Aveia;

2.3 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DAS CULTURAS

Em cada safra, todos os tratamentos receberam as mesmas quantidades de fertilizantes, definidas com base na análise química de solo e nas recomendações para cada cultura. Os fertilizantes (N, P₂O₅ e K₂O) foram aplicados juntamente com a semeadura das culturas, localizados 0,05 m abaixo e ao lado das sementes. Para a cultura da soja, não foi aplicado N mineral, sendo as sementes inoculadas com *Bradyrhizobium elkanii* e *B. japonicum*.

As parcelas cultivadas com as culturas do trigo e de cobertura do solo no inverno (tremoço, aveia ou nabo) foram semeadas entre os meses de março e junho. As culturas de soja e milho foram semeadas nos meses de agosto e novembro de cada ano agrícola. A semeadura,

o manejo da cultura, e o controle de ervas daninhas, pragas e doenças seguiram as indicações técnicas para as culturas da soja, milho e trigo para a região, e foram as mesmas para todos os tratamentos. No PD, a vegetação presente na área, antes da semeadura das culturas, foi controlada via dessecação.

2.4 DEMAIS INFORMAÇÕES

Maiores informações sobre análise estatística, materiais e métodos utilizados para coleta, processamento e apresentação dos dados, serão apresentados nos dois artigos a seguir desta dissertação (Itens 3 e 4).

3 ARTIGO 1: PRODUTIVIDADE DA SOJA E ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO DE LONGA DURAÇÃO

3.1 RESUMO

A ampliação do sistema plantio direto proporcionou melhorias na conservação do solo e água, porém, a utilização deste sistema de forma errônea pode provocar aumento do grau de compactação do solo. O objetivo deste trabalho foi de avaliar os efeitos da adoção do preparo convencional e plantio direto e diferentes planos de rotação de culturas nos atributos físicos e hídricos do solo, na produtividade e desenvolvimento radicular da soja em experimento de longa duração. O estudo foi realizado em um experimento de longa duração, em um Latossolo Vermelho Distroférrico muito argiloso. O experimento apresenta esquema fatorial 2x3 (preparo do solo *versus* planos de rotação), em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. O fator preparo do solo é composto por: I) preparo convencional (PC); e II) plantio direto (PD). O fator planos de rotação é composto por: PC= Preparo convencional do solo; PD= Plantio direto; I) sucessão soja/trigo (ST); II) rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo (ROT) e III) sucessão soja/milho+brachiaria (SM). Para tanto foram avaliados parâmetros físicos do solo como a densidade, porosidade total, macro e microporosidade, infiltração de água e condutividade hidráulica. Os parâmetros de planta avaliados foram a densidade do comprimento radicular, altura de plantas, peso de mil grãos e produtividade da cultura da soja. A cultura da soja apresenta menor produtividade, altura de plantas e desenvolvimento radicular em superfície para o preparo convencional do solo em relação ao plantio direto. O uso de diferentes planos de rotação pouco influencia os efeitos da compactação em plantio direto ocorrendo diferenças apenas para condutividade hidráulica e infiltração de água no solo. A condutividade hidráulica e a infiltração de água no solo foram maiores para camadas mais profundas do solo e o plano de rotação composto pela sucessão soja/trigo (ST) foi superior à sucessão soja/milho safrinha (SM) para as profundidades de 0,30 e 0,40 m. Os planos de rotação que proporcionam as melhores produtividades de grãos de soja dão preferência à sucessão em detrimento à rotação de culturas.

Palavras-chave: Manejo do solo, conservação do solo, compactação do solo.

PAPER 1: SOYBEAN PRODUCTIVITY AND PHYSICAL AND WATER ATTRIBUTES OF A RHODIC EUTRUDOX UNDER DIFFERENT LONG-TERM CULTIVATION SYSTEMS

3.2 ABSTRACT

The expansion of the no-tillage system provided improvements in soil and water conservation, but the use of this system in an erroneous way may lead to an increase in the degree of soil compaction. The objective of this work was to evaluate the effects of conventional tillage and no-tillage system besides different crop rotation plans on soil physical and hydric attributes, yield and root development of soybean in a long-term experiment. The study was carried out in a long-term experiment on a very clayey Rhodic Eutrudox soil. The experiment presented a 2x3 factorial scheme (tillage system versus rotation plans), in a randomized complete block design with four replications. The preparation factor of the soil is composed of: I) conventional tillage (CT); and II) no-tillage (NT). The rotation planes factor is composed of: I) soybean/wheat (SW) succession; II) corn/lupine-soybean/oat-soybean/wheat-wheat rotation (ROT) and III) soybean/Maize + brachiaria (SM) rotation. Soil physical parameters such as density, total porosity, macro and microporosity, water infiltration and hydraulic conductivity were evaluated. The plant parameters evaluated were root length density, plant height, weight of one thousand grains and yield of soybean crop. The soybean crop presents lower productivity, plant height and surface root development for conventional soil preparation in relation to the no-tillage system. The use of different rotation plans has little influence on the effects of no-tillage compaction, with differences only in hydraulic conductivity and soil water infiltration. The hydraulic conductivity and water infiltration in the soil were higher for deeper soil layers and the rotation plan composed by the soybean/wheat (SW) sequence was superior to the soybean/maize (SM) succession at depths of 0.30 And 0.40 m. Rotation plans that provide the best soybean yields give preference to succession over crop rotation.

Keywords: Soil management, soil conservation, soil compaction.

3.3 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) proporciona melhorias na conservação do solo e água (FRANCHINI et al., 2012). Porém, em contrapartida, a ausência do revolvimento do solo pode provocar aumento do grau de compactação do mesmo, normalmente entre as camadas de 0,08 a 0,20 m (FRANCHINI et al., 2009; GENRO JUNIOR et al., 2009; SECCO et al., 2009; MORAES, 2013).

Tais acréscimos no estado de compactação evidenciados por parâmetros físicos do solo como a densidade, porosidade, ou por parâmetros mecânicos como a resistência mecânica à penetração, nem sempre se correlacionam com a produtividade das culturas (FRANCHINI et al., 2011; MORAES, 2013).

Uma ferramenta que auxilia de forma rápida e eficiente no rompimento de camadas compactadas é a intervenção mecânica por meio de subsoladores, arados e grades. Esta prática aumenta do espaço poroso, reduz a densidade e resistência mecânica à penetração do solo (REICHERT et al., 2009; MORAES et al., 2016). Porém, Lopez-Fando et al. (2007) e Koppe (2014) alertam sobre a quebra da continuidade de poros com o revolvimento do solo. A continuidade de poros é responsável por melhor fluxo de água e difusão de ar, podendo assim alterar o padrão de crescimento da raiz e da exposição da matéria orgânica do solo, ficando esta desprotegida e facilmente degradável, em solo revolvido. Lopez-Fando et al. (2007) citam ainda os efeitos deletérios do revolvimento do solo como responsáveis na redução da eficiência de fertilizantes, produtividade das culturas, escoamento superficial e erosão do solo.

Outra forma de rompimento de camadas compactadas do solo é por meio da escarificação biológica do solo, utilizando plantas de cobertura que tenham o desenvolvimento do sistema radicular mais acentuado. Moraes et al. (2016) defendem a realização de mais pesquisas com relação aos efeitos de planos de rotação mais diversificados sobre atributos físicos e propriedades hídricas do solo. Tais autores ainda não encontraram na mobilização do solo uma forma de redução dos problemas com compactação e melhoria nas condições para o desenvolvimento de plantas.

A utilização de plantas de cobertura com sistema radicular agressivo como forma de rompimento de camadas compactadas do solo, embora seja de lenta ação é recomendada ainda por vários autores (BENJAMIN, 1993; BHATTACHARYYA et al., 2006; SANTOS et al., 2006; MORAES, 2013; MORAES et al., 2016), visto que seus efeitos no solo são mais duradouros na comparação com o revolvimento. A densidade do solo é um parâmetro que não sofre variação para o efeito de rotação ou sucessão de culturas (MORAES et al., 2016). Enquanto que os bioporos formados pelo crescimento radicular podem diminuir a resistência do solo à penetração, aumentar a friabilidade e condutividade hidráulica saturada (BENJAMIN, 1993). Além disso, os bioporos podem reduzir os efeitos da compactação do solo sobre o crescimento da planta, visto que eles se tornam caminhos preferenciais para o crescimento das raízes (CALONEGO; ROSOLEM, 2010).

As hipóteses deste trabalho são: 1) o preparo convencional do solo degrada sua estrutura e conseqüentemente, é refletida no desenvolvimento e produtividade da soja; 2) a utilização de plantas de cobertura podem atenuar os efeitos da compactação em PD e promover benefícios no desenvolvimento e produtividade da soja. Para tanto o objetivo deste trabalho foi de avaliar os efeitos

da adoção do preparo convencional e plantio direto e diferentes planos de rotação de culturas nos atributos físicos e hídricos do solo, na produtividade e desenvolvimento radicular da soja em experimento de longa duração.

3.4 MATERIAIS E MÉTODOS

3.4.1 Experimento de campo

A descrição geral do experimento bem como a implantação e condução do experimento de campo foram apresentadas no item 4 desta dissertação.

3.4.2 Avaliação de planta

3.4.2.1 Produtividade da soja

A produtividade de grãos da cultura da soja foi determinada pela colheita mecânica da área central das parcelas, eliminando bordaduras, para cada parcela. Os grãos colhidos foram limpos, pesados e determinada a umidade pelo método da estufa conforme a Regras para Análises de Sementes (BRASIL, 2009), os valores obtidos foram corrigidos para 13 % de umidade.

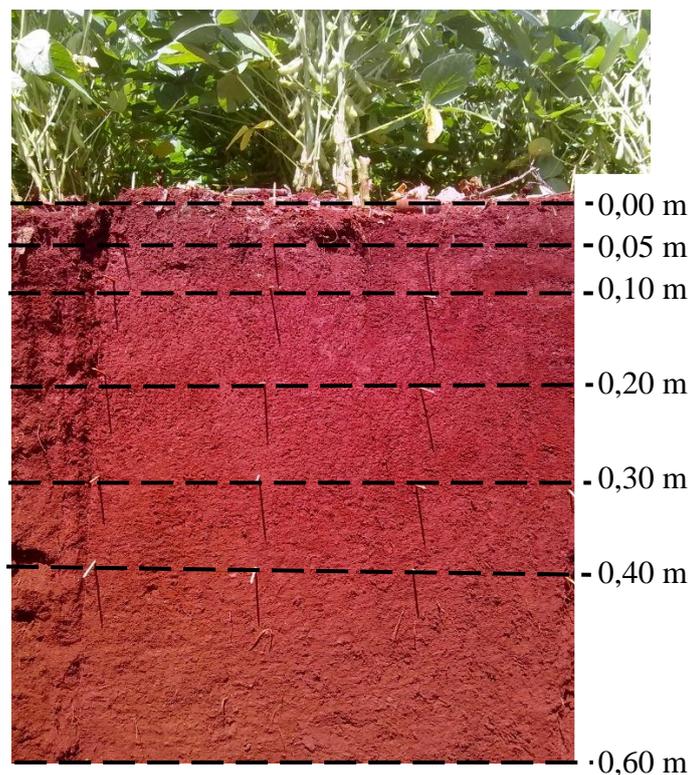
3.4.2.2 Altura de planta e peso de mil grãos

A altura da planta foi medida pela distância do colo da planta até a extremidade da haste principal, em cm, medida em cinco plantas aleatoriamente. O peso de mil grãos determinada segundo metodologia descrita nas Regras para Análises de Sementes (BRASIL, 2009).

3.4.2.3 Coleta de raízes

A amostragem de raízes foi realizada no estágio de R2 da cultura da soja da safra 2015/16. Para a coleta de raízes foi aberta uma trincheira de aproximadamente 1,00 x 1,00 x 1,00 m em cada parcela com auxílio de uma escavadeira. Após a abertura da trincheira foi realizada a limpeza da área destinada à coleta tendo como base uma linha de semeadura aleatória na parcela. A largura total da coleta foi de 0,45 m, sendo dividida, com auxílio de palitos, em 3 sub amostras de 0,15 m por camada e comprimento de 0,07 m para cada uma das seguintes camadas: 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,60 m, sendo então retirado o bloco de solo com auxílio de pá de corte e espátulas. A forma de demarcação dos quadrantes para a coleta de raízes está demonstrada na figura 1.

Figura 1 – Demarcação de cada quadrante para coleta de raízes.



As amostras foram acondicionadas em sacos de plástico, levadas para sala de lavagem de raízes da Embrapa Soja onde foram lavadas em água corrente, sobre peneiras de malha de 0,5 mm. Em seguida, as raízes foram armazenadas em potes plásticos com álcool 70 % em geladeira até seu processamento. Em laboratório as amostras das raízes foram organizadas sobre um scanner, sem sobreposição, e então escaneado, com resolução de 200 dpi. As amostras de raízes foram secas em

estufa de circulação forçada de ar a 70°C, até massa constante, para quantificação da matéria seca para cálculos posteriores de massa seca.

As imagens digitalizadas foram processadas individualmente com a utilização do programa Safira, desenvolvido pela Embrapa (JORGE; RODRIGUES, 2008). A partir dos resultados obtidos pelo programa, e o volume de cada amostra de solo/raiz coletada foi estimada a densidade do comprimento de raízes, em cm de raiz por cm³ de solo.

3.4.3 Amostragem de solo

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em oito camadas do solo (0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m), usando anéis de aço inox com dimensões de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro interno. Os anéis foram inseridos horizontalmente no solo, por meio de alavanca e suporte amostrador no centro de cada camada, sem que houvesse qualquer forma de impacto sobre a amostra. Foram coletados 20 anéis por tratamento para as camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m (cinco repetições por parcela) e 8 anéis por tratamento para as camadas 0,30-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m (duas repetições por parcela) nas entrelinhas não trafegadas da cultura de verão, totalizando 682 amostras.

Após a coleta a campo, as amostras foram revestidas na parte superior e inferior com uma tampa plástica, e acondicionadas em caixas com estrutura de proteção para o transporte até o laboratório de Física do Solo da Embrapa Soja, onde permaneceram sob refrigeração ($\pm 5^\circ\text{C}$) como forma de inibir a atividade biológica, até sua análise.

3.4.4 Determinação das propriedades físico-hídricas do solo

Em laboratório, as amostras foram saturadas em recipientes por meio da manutenção de uma lâmina de água máxima de três quartos da altura dos anéis metálicos por aproximadamente 72 horas, até a completa saturação do solo. Posteriormente as amostras foram conduzidas à mesa de tensão de 3 e 6 kPa por 48 horas sendo realizadas pesagens antes de cada troca de tensão. E então conduzidas à estufa a 105°C, por aproximadamente 24 horas, até peso constante (EMBRAPA, 1997).

3.4.4.1 Densidade do solo

Para a determinação da densidade do solo (DS) foi utilizada a equação 1, onde o resultado foi expresso em g cm^{-3} .

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

Onde, D_s = Densidade do solo (g cm^{-3}); M_{ss} = massa da amostra de solo seca à 105°C (g); V_t = volume total do anel (cm^3).

3.4.4.2 Densidade de partículas

Foi utilizada a metodologia do balão volumétrico modificado por Gubiani et al. (2006), a qual visa determinar o volume de álcool que é necessário para completar a capacidade de um balão volumétrico, contendo uma amostra de terra fina seca ao ar (TFSA). A densidade de partículas foi quantificada através da equação 1.

$$D_p = \frac{(M_{bs} - M_b)}{50 - (M_{bsa} - M_{bs}) / D_a} \quad (2)$$

Onde, D_p = densidade de partículas do solo (g cm^{-3}); M_b = massa do balão volumétrico (g); M_{bs} = massa do balão volumétrico contendo o solo (g); M_{bsa} = massa do balão volumétrico contendo solo mais álcool (g); V_a = volume de álcool gasto para completar o volume do balão contendo o solo (ml); e D_a = densidade do álcool (g cm^{-3}).

3.4.4.3 Macro, micro e porosidade total do solo

A porosidade total do solo (P_t), ou seja, o volume vazio do solo que pode estar ocupado por água ou ar, foram obtidas indiretamente, através da relação existente entre a D_s e a densidade de partículas, conforme metodologia proposta por Embrapa (1997) (Equação 3).

$$P_t = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (3)$$

Onde, D_p = densidade de partículas do solo (g cm^{-3}); D_s = Densidade do solo (g cm^{-3}).

A microporosidade do solo foi determinada por ocasião da drenagem do solo saturado à tensão de 6 kPa por 48 horas. Após o equilíbrio do conteúdo de água nesta tensão, foi determinada a massa do solo úmido e a amostra foi encaminhada para estufa a 105°C, obtendo-se o conteúdo de água neste potencial (EMBRAPA, 1997). A microporosidade foi determinada através da equação 4, que utiliza a relação entre o conteúdo de água retido na tensão de 6 kPa e o volume total ocupado pelo solo.

$$\text{Mic} = \frac{(P_{6\text{kPa}} - m_{ss})}{V_t} \quad (4)$$

Onde, Mic = Microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); $P_{6\text{kPa}}$ = massa de solo após a tensão de 6 kPa (Mg); m_{ss} = massa de solo seco (Mg); V_t = volume total do anel (m^3).

A macroporosidade do solo foi calculada por diferença, subtraindo-se o conteúdo de água equivalente à microporosidade do conteúdo de água equivalente à porosidade total calculada (Equação 5) (EMBRAPA, 1997).

$$\text{Mac} = P_t - \text{Mic} \quad (5)$$

Onde, Mac = Macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); P_t = Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Mic = Microporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

3.4.4.4 Taxa de infiltração tridimensional e condutividade hidráulica do solo saturado

A taxa de infiltração tridimensional de água no solo saturado e a condutividade hidráulica do solo saturado no campo foram determinadas nas profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 e 0,50 m. A infiltração tridimensional considera as componentes direcionais dos fluxos na vertical, horizontal e no declive (PREVEDELLO; REICHARDT, 1991; MIGUEL et al., 2009). Para tanto, abriu-se um orifício no solo, com trado tipo caneca, com diâmetro de 0,056 m, até a profundidade desejada. A taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica foram medidas em duas repetições por parcela com permeâmetro modelo IAC (infiltrômetro de pressão em profundidade). O permeâmetro funciona pelo princípio de Mariotte, em condições de campo, através do fornecimento de água ao solo com carga hidráulica controlada (POTT; DE MARIA, 2003). Foi utilizada carga hidráulica constante de 0,05m, conforme Vieira (1998) e Miguel et al. (2009).

Os cálculos da condutividade hidráulica saturada de campo (K_{Sat}) e da infiltração saturada tridimensional, foram realizados com auxílio de planilhas de Excel utilizando a equação básica para a condição de fluxo sob carga constante, dentro do orifício cilíndrico, conforme descrito em Villela (2007). Para a determinação da infiltração saturada tridimensional, foi utilizada a taxa de fluxo constante e a geometria do orifício, pela relação entre o volume de água infiltrada e a área molhada do orifício, conforme Miguel et al. (2009).

3.4.5 Dados climáticos

Os dados climáticos foram coletados em estação meteorológica localizada a 300 metros do local do experimento e a metodologia utilizada para cálculo do déficit hídrico foi a de Thornthwaite e Mather (1955) e calculada através da planilha de Excel desenvolvida por Rolim et al. (1998), onde o déficit hídrico representa a água que a planta deixou de absorver por ocorrência de eventos adversos.

3.4.6 Análise estatística dos dados

A análise da variância (Teste F, $p < 0,05$) dos atributos de solo foi realizada para cada camada amostrada e os atributos de planta de soja para cada safra avaliada. 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 a 5% de probabilidade de erro. Os dados foram analisados por meio do programa estatístico computacional Sisvar (FERREIRA, 2011), e os gráficos foram plotados por meio do programa SigmaPlot®12.5 (Systat software, Inc.).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Propriedades físicas e hídricas do solo

A análise de variância indicou que a densidade do solo (D_s) e porosidade total (P_t), não apresentaram diferenças na interação entre os tratamentos (preparo do solo *versus* planos de rotação), bem como para os efeitos simples dos planos de rotação em todas as camadas avaliadas (Tabela 1). Já para o efeito do preparo do solo é possível verificar maior D_s para o plantio direto (PD) em relação ao preparo convencional (PC) nas camadas de 0,05-0,20 m, evidenciando o maior estado de compactação do solo para essa camada conforme foi verificado também por Franchini et al. (2011) e Moraes (2013). Já na camada de 0,20-0,30 m o PC apresentou maior D_s e menor P_t quando comparado com PD, evidenciando assim que o preparo convencional do solo provoca a transferência

da camada compactada da superfície para maiores profundidades, efeito este, conhecido popularmente como “pé de arado”.

Tabela 1 – Médias referentes aos efeitos simples de preparo do solo e planos de rotação das variáveis densidade do solo e porosidade total para cada camada avaliada.

Camada (m)	---Preparo do solo---		----- Plano de rotação -----			CV (%)
	PC	PD	ROT	SM	ST	
	----- Densidade do Solo – Ds, Mg m ⁻³ -----					
0,00-0,05	1,16 ns	1,19	1,16 ns	1,20	1,16	3,4
0,05-0,10	1,25 B*	1,31 A	1,27 ns	1,29	1,29	3,1
0,10-0,20	1,24 B	1,30 A	1,26 ns	1,26	1,28	2,3
0,20-0,30	1,26 A	1,23 B	1,24 ns	1,22	1,26	2,7
0,30-0,40	1,17 ns	1,16	1,17 ns	1,15	1,17	2,6
0,40-0,60	1,11 ns	1,10	1,10 ns	1,09	1,12	2,1
0,60-0,80	1,08 ns	1,06	1,05 ns	1,07	1,08	3,3
0,80-1,00	1,05 ns	1,04	1,04 ns	1,03	1,07	3,0
	----- Porosidade Total – Pt, m ³ m ⁻³ -----					
0,00-0,05	0,619 ns	0,609	0,618 ns	0,605	0,619	2,1
0,05-0,10	0,589 A	0,570 B	0,585 ns	0,576	0,578	2,3
0,10-0,20	0,593 ns	0,575	0,586 ns	0,586	0,580	1,7
0,20-0,30	0,589 B	0,599 A	0,593 ns	0,600	0,589	1,9
0,30-0,40	0,619 ns	0,622	0,618 ns	0,626	0,618	1,6
0,40-0,60	0,637 ns	0,638	0,638 ns	0,641	0,633	1,2
0,60-0,80	0,647 ns	0,653	0,655 ns	0,649	0,646	1,8
0,80-1,00	0,656 ns	0,659	0,660 ns	0,662	0,649	1,6

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para preparo do solo e minúscula para o plano de rotação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns= não significativo pelo teste F a 5 % de probabilidade de erro. Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional; ST= sucessão soja/trigo; ROT rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão soja/milho+brachiaria.

Ao comparar os valores de Ds deste trabalho com valores críticos limitantes à produtividade das culturas (DSC) estimados por Reichert et al. (2009) para o teor de argila deste trabalho, é possível afirmar que os valores de Ds na camada 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m para o PD estão acima do considerado limitante (1,29 Mg m⁻³). A Pt apresentou maior valor no PC na camada 0,05-0,10 e no PD na camada 0,20-0,30 m. (Tabela 1). O coeficiente de variação para Ds e Pt se encontraram abaixo de 4 % para todas as camadas avaliadas, fazendo pequenas variações serem significativas. Para as demais camadas não ocorreram diferenças.

Ao estratificar a porosidade do solo em macro e microporos também não ocorreu interação significativa entre os fatores (preparo do solo *versus* planos de rotação) (Tabela 2). Com relação aos efeitos principais, as camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m apresentaram maior quantidade de microporos para o PD em relação ao PC, além de menor quantidade de macroporos. Para as demais camadas não foram verificadas diferenças significativas entre os tipos de preparo do solo. Apesar de

ocorrer redução considerável de macroporos na camada superior do solo para o PD, essa redução não é restritiva ao fluxo de gases do solo (GRABLE e SIEME, 1968). Bhattacharyya et al. (2006), Bono et al. (2012), Castelini e Ventrella (2012) e Moraes et al. (2016), caracterizam os macroporos como grandes responsáveis pela infiltração de água no solo. Em seu trabalho, Bono et al. (2012), comparando áreas utilizadas com mata nativa, pastagem e produção de grãos de soja, relacionam a influência da macroporosidade do solo com a taxa de infiltração de água do solo e encontraram relação linear positiva para todos os tratamentos. Ou seja, quanto maior for a quantidade de macroporos do solo, maior será a infiltração de água e conseqüentemente, menor será o escoamento superficial e os riscos de erosão.

Ocorre maior volume de microporos para todas as camadas até a profundidade de 0,20 m no PD em relação ao PC, sendo explicados pela redução dos macroporos para microporos no processo de compactação do solo, e indicado pelo aumento de D_s nestas camadas (MORAES, 2013). Os microporos apresentam papel fundamental na retenção e armazenamento de água no solo, associados à continuidade de poros do solo os mesmos desempenham papel fundamental no fluxo de água tanto horizontal, quando vertical. Em contrapartida, Assis e Lanças (2005) afirmam que a gradagem do solo provoca a quebra de agregados do solo ocasionando o surgimento de grande quantidade de partículas finas resultando no selando total ou parcial dos poros e conseqüente redução da macroporosidade e aumento da microporosidade.

Os planos de rotação influenciaram na microporosidade do solo até a profundidade de 0,30 m onde pode-se verificar o SM (soja/milho safrinha) apresenta a maior quantidade de poros menores em todas as camadas avaliadas em relação aos planos de rotação ROT (milho/tremoço–soja/aveia–soja/trigo-soja/trigo) e ST (soja/trigo). Sağlam et al. (2015) avaliando a qualidade física de um solo sob 4 sistemas de manejo e um controle, verificaram que a microporosidade, os agregados estáveis em água e a resistência à penetração são parâmetros que mais contribuíram para o índice de qualidade física do solo, com valores entre 0,8 e 1,0. Ao passo que os mesmos autores verificaram que o parâmetro que menos contribui para o índice é a condutividade hidráulica saturada, com valores em torno de 0,2.

Tabela 2 – Médias referentes aos efeitos simples de preparo do solo e planos de rotação das variáveis microporosidade e macroporosidade para cada camada avaliada.

Camada (m)	--Preparo do solo--		-----Plano de rotação-----			CV (%)
	PC	PD	ROT	SM	ST	
----- Microporos – m ³ m ⁻³ -----						
0,00-0,05	0,406 B*	0,451 A	0,419 b	0,442 a	0,424 b	2,3
0,05-0,10	0,434 B	0,449 A	0,435 b	0,450 a	0,440 ab	2,3
0,10-0,20	0,431 B	0,450 A	0,433 ab	0,450 a	0,439 b	2,1
0,20-0,30	0,455 ns	0,457	0,451 b	0,462 a	0,455 ab	1,6
0,30-0,40	0,465 ns	0,466	0,466 ns	0,470	0,462	2,3
0,40-0,60	0,456 ns	0,461	0,454 ns	0,464	0,457	2,1
0,60-0,80	0,450 ns	0,449	0,440 ns	0,458	0,451	3,1
0,80-1,00	0,449 ns	0,446	0,442 ns	0,449	0,453	2,4
----- Macroporos – m ³ m ⁻³ -----						
0,00-0,05	0,213 A	0,158 B	0,199 a	0,163 b	0,195 a	10,8
0,05-0,10	0,155 A	0,121 B	0,150 ns	0,126	0,138	15,7
0,10-0,20	0,162 A	0,125 B	0,153 ns	0,137	0,141	11,5
0,20-0,30	0,134 ns	0,142	0,142 ns	0,138	0,134	8,8
0,30-0,40	0,155 ns	0,156	0,153 ns	0,156	0,158	11,2
0,40-0,60	0,181 ns	0,177	0,184 ns	0,177	0,176	9,2
0,60-0,80	0,197 ns	0,201	0,215 ns	0,192	0,190	11,2
0,80-1,00	0,207 ns	0,212	0,219 ns	0,213	0,197	8,7

* Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para preparo do solo e minúscula para o plano de rotação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns= não significativo pelo teste F a 5 % de probabilidade de erro. Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional; ST= sucessão soja/trigo; ROT rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão soja/milho+brachiaria.

A infiltração tridimensional de água e a condutividade hidráulica do solo não sofreram influência do preparo do solo bem como dos planos de rotação avaliados para a profundidade de 0,10 m (Tabela 3). A camada superior do solo apresenta maior volume de macroporos para PC em relação ao PD (Tabela 2) e estes poros são de grande importância para os fluxos de água no solo (BONO et al., 2012), porém, tais valores de macroporosidade não foram suficientes para proporcionar acréscimos na infiltração e condutividade hidráulica do solo. A destruição dos poros contínuos, provocada pelo preparo do solo, aumenta a tortuosidade de poros do solo, provocando interrupção de fluxo contínuo de água e conseqüente a velocidade de fluxo é reduzida (EHLERS, 1977; BALL et al., 1988; REICHERT et al., 2011).

Tabela 3 – Médias referentes ao preparo do solo para cada plano de rotação e seus efeitos simples para infiltração de água tridimensional e condutividade hidráulica do solo saturado.

Profundidade (m)	-----PC-----		-----PD-----		Preparo do solo		Plano de rotação		CV %
	SM	ST	SM	ST	PC	PD	SM	ST	
Infiltração tridimensional (mm h ⁻¹)									
0,10	64,9 ns	58,0	58,5	60,2	61,5 ns	59,3	61,7 ns	59,1	47,2
0,20	52,3 Aa*	41,6 Ba	45,7 Ab	68,7 Aa	46,9 B	57,2 A	49,0 ns	55,1	41,2
0,30	26,3 ns	52,3	81,6	114,5	39,3 B	98,0 A	53,9 b	83,4 a	31,7
0,40	118,4 Ba	182,6 Ab	157,6 Aa	142,9 Ba	150,5 ns	150,2	138,0 b	162,7 a	24,9
0,50	151,5 ns	135,7	173,2	187,3	143,6 B	180,3 A	162,4 ns	161,5	19,2
Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h ⁻¹)									
0,10	15,4 ns	13,8	13,9	14,3	14,6 ns	14,1	14,6 ns	14,0	47,2
0,20	12,4 Aa	9,9 Ba	10,9 Ab	16,3 Aa	11,1 B	13,6 A	11,6 ns	13,1	41,2
0,30	6,2 ns	12,4	19,4	27,2	9,3 B	23,3 A	12,8 b	19,8 a	31,7
0,40	28,1 Bb	43,4 Aa	37,4 Aa	33,9 Ba	35,7 ns	35,7	32,8 b	38,6 a	24,9
0,50	36,0 ns	32,2	41,1	44,5	34,1 B	42,8 A	38,6 ns	38,3 ns	19,2

* Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para preparo do solo e minúscula para o plano de rotação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns= não significativo pelo teste F a 5 % de probabilidade de erro. Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional; ST= sucessão soja/trigo; SM= sucessão soja/milho+brachiaria; Obs: não foram realizadas avaliações de condutividade hidráulica e infiltração para o plano de rotação ROT (rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo).

Portanto, a ausência de diferença da infiltração tridimensional e condutividade hidráulica em solo saturado entre PD e PC para a camada superior do solo se deve ao efeito compensatório do maior volume de macroporos sobre a quebra da continuidade de poros do PC para o PD, corroborando com Moraes et al. (2016). Castellini e Ventrella (2012) avaliando a influência dos macro e mesoporos sobre os fluxos de água no solo em PC e cultivo mínimo, verificaram que os macroporos do solo são responsáveis por 60 a 80 % de todo o fluxo de água ocorrente no solo. Tais autores citam ainda que os macroporos formados por meio do crescimento radicular ou atividade biológica apresentam maior continuidade e estabilidade.

O PD apresenta superioridade, tanto em infiltração de água no solo quanto em condutividade hidráulica em solo saturado para algumas profundidades (0,20, 0,30, 0,50 m). Tais resultados evidenciam possivelmente maior quantidade de poros contínuos no solo, visto que a condutividade hidráulica representa a resistência imposta pelo solo à passagem da água e é influenciada pela quantidade, forma, tamanho, tortuosidade e principalmente, pela umidade do solo e continuidade do sistema de poros (HILLEL, 2003). Ehlers (1977) atribuiu à manutenção das galerias contínuas formadas por minhocas à maior condutividade hidráulica do solo, tanto em superfície quanto em camadas mais profundas ligando diferentes horizontes.

O plano de rotação ST (soja/trigo) foi capaz de proporcionar maior infiltração e condutividade hidráulica em solo saturado que o plano SM (soja/milho) na profundidade de 0,20 m cultivado sob PD e nos efeitos simples para as profundidades 0,30 e 0,40 m. Provavelmente este resultado está atrelado ao mais ramificado sistema radicular da cultura do trigo em relação à cultura do milho, onde destaca-se a importância da continuidade de poros deixado pela cultura anterior nos fluxos de água do solo em meio saturado (HILLEL, 2003). A taxa de infiltração e a condutividade hidráulica de solo saturado estão diretamente relacionadas à geometria do espaço poroso do solo. Para Drescher et al. (2016) as modificações de manejo do solo pouco influenciaram a P_t e a D_s , porém, alteraram muito a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica de solo saturado.

3.5.2 Parâmetros de plantas da cultura da Soja

O rendimento de grãos da cultura da soja para todos os anos avaliados foi superior para o PD em relação ao PC (Tabela 4). O percentual de ganho em produtividade da adoção do PD em comparação à manutenção do PC variou de 12 %, (364 kg ha⁻¹ na safra 2006-07) a 121 %, (1068 kg ha⁻¹ na safra 2014-15), e porcentagem média de incremento foi de 39 % ou 10.740 kg ha⁻¹ no somatório de todos os anos avaliados. As diferenças de produtividade a partir da safra 2011/12 foram superiores a 1.000 kg ha⁻¹, com exceção da safra 2015/16 com diferença de 671 kg ha⁻¹ devido à ótima distribuição de chuvas neste período (Figura 2). Tais resultados evidenciam que as diferenças de produtividade entre PD e PC tendem a aumentar conforme o passar dos anos da adoção do PD e

quanto maior for o estresse hídrico sofrido pela cultura, maior serão as diferenças entre PD e PC, em benefício ao PD (Tabela 1 e Figura 2). Tais resultados corroboram com Franchinni et al. (2012) onde afirmam que o PD tem a capacidade de sustentar a produtividade das culturas mesmo com ocorrência de déficit hídrico.

A safra de 2014/15 apresentou o menor rendimento de grãos, tanto para PD (1.948 kg ha^{-1}) quanto para PC (880 kg ha^{-1}) (Tabela 4). Apesar do déficit hídrico não ter sido tão severo em todo o período (69 mm), tais resultados são atribuídos à falta de chuvas logo após a semeadura, provocando problemas de germinação, e ao déficit hídrico ocorrido no início da floração da cultura. Para tanto pôde-se constatar diferença de 28 cm na altura de plantas para o PD (90 cm) e PC (62 cm) (Tabela 5), atribuindo então ao PD uma maior capacidade de manter condições adequadas ao crescimento e desenvolvimento da cultura da soja. Cecagno et al. (2016) conclui em seu trabalho que a produtividade da soja depende mais da distribuição do que do volume total das chuvas. Dogan et al., (2007) verificaram que a soja apresenta potencial evapotranspirativo de 450 a 700 mm, dependendo das condições climáticas ocorrentes, necessitando assim toda esta água ser fornecida via precipitação ou irrigação.

Figura 2 – Precipitação (a) e déficit hídrico (b) durante o período de condução da cultura da soja a campo referente ao primeiro, segundo e terceiro terço do ciclo da cultura

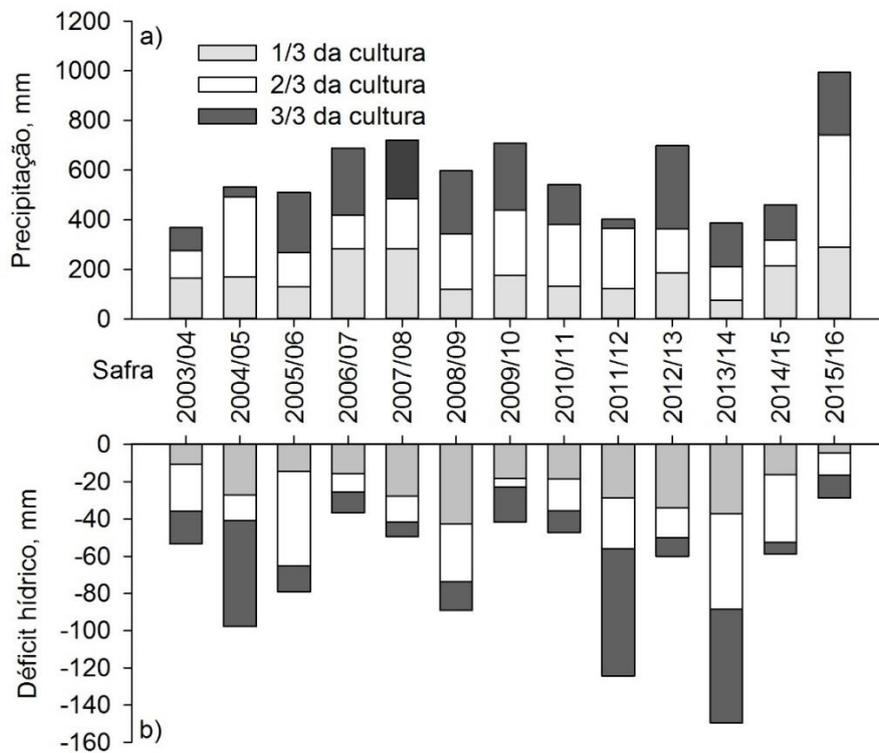


Tabela 4 – Médias referentes ao preparo do solo para cada plano de rotação e seus efeitos simples para produtividade.

Safra	-----PC-----			-----PD-----			Preparo do solo		-----Plano de rotação -----			CV %
	ST	ROT	SM	ST	ROT	SM	PC	PD	ST	ROT	SM	
	----- Produtividade, kg ha ⁻¹ -----											
2003-04	1598 ns	1346	1276	1814	2205	2388	1407 B	2136 A	1706 ns	1776	1832	12,0
2004-05	2099 ns		1951	2677		2613	2025 B	2645 A	2388 ns		2282	8,1
2005-06	2614 ns	2590	2670	3381	3317	3272	2624 B	3323 A	2997 ns	2953	2971	8,1
2006-07	3049 ns	2978	3082	3432	3425	3342	3036 B	3400 A	3240 ns	3202	3212	7,2
2007-08	1875 ns	1915	2014	2691	2551	2713	1934 B	2652 A	2283 ns	2233	2363	14,8
2008-09	2696 ns		2470	3112		3428	2583 B	3270 A	2904 ns		2949	10,2
2009-10	3119 ns	2669	2770	3714	3558	3536	2853 B	3603 A	3417 a	3113 b	3153 ab	6,8
2010-11	2772 ns	2303	2907	3358	2954	3106	2661 B	3140 A	3065 a	2629 b	3007 a	8,2
2011-12	2048 Ba	1290 Bb	2188 Ba	3131 Aa	3077 Aa	3332 Aa	1842 B	3180 A	2590 a	2184 b	2760 a	8,1
2012-13	1800 ns		1551	3274		3071	1675 B	3173 A	2537 a		2311 b	8,0
2013-14	2436 ns	2019	2006	3395	3168	3253	2153 B	3272 A	2915 a	2593 b	2629 b	7,2
2014-15	754 ns	817	1068	2016	1647	2182	880 B	1948 A	1385 ab	1232 b	1625 a	20,0
2015-16	2236 Aa	1599 Bb	1381 Bb	2360 Ab	2263 Aa	2606 Aa	1739 B	2410 A	2298 ns	1931	1994	15,3
Média	2238 ns	1952	2102	2950	2816	2988	2109 B	2935 A	2594 a	2385 b	2545 ab	9,7

* Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para preparo do solo e minúscula para o plano de rotação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns= não significativo pelo teste F a 5 % de probabilidade de erro. Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional; ST= sucessão soja/trigo; ROT rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão soja/milho+brachiaria.

Tabela 5 – Médias referentes aos efeitos simples de preparo do solo e planos de rotação para altura de planta e peso de 1000 grãos de soja.

Safrá	--Preparo do solo--		-----Plano de rotação-----			CV (%)
	PC	PD	ST	ROT	SM	
----- Altura de planta, cm -----						
2003-04	54 B	63 A	59 ns	58	59	11,6
2004-05	70 ns	74	70 ns		74	7,6
2005-06	72 ns	70	71 ns	73	69	10,3
2006-07	62 B	71 A	69 ns	67	63	6,8
2007-08	60 ns	56	55 b	57 ab	61 a	9,0
2008-09	66 ns	67	63 b		70 a	6,8
2009-10	68 ns	64	63 b	72 a	63 b	5,8
2010-11	84 B	93 A	87 ns	87	91	9,8
2011-12	69 B	79 A	70 ns	71	81	8,2
2012-13	61 B	68 A	60 b		69 a	7,2
2013-14	80 B	99 A	84 ns	93	92	7,8
2014-15	62 B	90 A	71 ns	74	82	11,9
2015-16	63 B	74 A	67 ab	74 a	64b	10,4
----- Peso de 1000 grãos, g -----						
2003-04	107 B	116 A	111 ns	111	112	3,3
2004-05	116 B	130 A	125 ns		121	2,7
2005-06	185 ns	192	192 ns	182	191	5,0
2006-07	166 B	172 A	169 ns	170	166	3,4
2007-08	169 ns	160	168 ns	168	157	9,4
2008-09	127 B	132 A	131 ns		129	2,9
2009-10	160 B	177 A	171 ns	166	168	2,4
2010-11	148 B	188 A	163 ns	164	164	3,8
2011-12	143 B	167 A	155 ns	150	159	4,7
2012-13	110 B	123 A	119 ns		114	6,2
2013-14	124 B	146 A	134 ns	134	139	3,4
2014-15	132 B	148 A	140 ns	138	141	5,6
2015-16	119 B	136 A	129 a	124 b	130 a	2,6

* Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para preparo do solo e minúscula para o plano de rotação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns= não significativo pelo teste F a 5 % de probabilidade de erro. Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional; ST= sucessão soja/trigo; ROT rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão soja/milho+brachiaria.

Tais resultados são ainda mais evidentes ao verificar a altura de plantas e peso de mil grãos (PMG) (Tabela 5), os quais foram superiores para o PD em comparação ao PC para a maioria dos períodos avaliados, com exceção das safras até 2009/10 para altura de plantas e 2007/08 para peso de mil grãos onde não apresentaram diferenças para essas variáveis. Para tanto é evidente que a mobilização do solo provoca prejuízos às propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo (HUNGRIA et al., 2009; SILVA, et al., 2010). Esta prática afeta negativamente a estrutura do solo,

continuidade de poros, o teor de C do solo, reduzindo a produtividade de grãos das culturas (MORAES, 2013). Para tanto confirma-se a hipótese deste trabalho que o preparo convencional do solo degrada sua estrutura refletindo na produtividade da soja.

Quando o maior déficit ocorreu no terço médio e final do ciclo (Figura 1) (estádio de florescimento e enchimento de grãos) as diferenças de produtividade foram acentuadas (safra 2011/12 com 73 % ou 1338 kg ha⁻¹ de diferença de produtividade) (Tabela 4). A produtividade de soja depende mais da distribuição da precipitação do que sobre as propriedades químicas e físicas do solo, tais como a Ds e Pt (MARTINS et al., 2014). Conforme verificado e destacado por Cecagno et al. (2016) os períodos que mais contribuíram para o maior rendimento da cultura da soja foram os primeiros 30 dias após a semeadura (DAS), no estabelecimento da cultura, e depois de 60 DAS, que compreende a fase de floração.

A condutividade hidráulica e a infiltração tridimensional de água no solo (Tabela 3) são os dois parâmetros que melhor se correlacionam com a produtividade das culturas (Tabela 4), devido à grande carga de informações que tais fatores podem fornecer da real situação do solo, sendo ela influenciada pela quantidade, forma, tamanho, tortuosidade e continuidade do sistema de poros do solo (EHLERS, 1977; BALL et al., 1988; HILLEL, 2003; JUNIOR et al., 2012; LIBARDI, 2012). A densidade de fluxo de água no solo não saturado é gerido pela condutividade hidráulica do solo no potencial de água em questão multiplicado pela diferença dos potenciais totais dos pontos “a” e “b” dividida pela distância dos dois pontos analisados, dada pela equação de Darcy-Buckingham (LIBARDI, 2012). Ou seja, quanto maior for o valor da condutividade hidráulica do solo, maior será a densidade de fluxo de água, portanto, a ascensão capilar do solo será maior nos ciclos de secagem em PD quando comparado ao PC.

Com relação ao fator de variação plano de rotação, apenas após a safra 2009/10 foi possível observar diferenças entre os tratamentos, portanto, foram necessárias cinco safras para os sistemas expressar diferenças de produtividade na cultura da soja. O plano ROT composto pela rotação milho/tremoço–soja/aveia–soja/trigo–soja/trigo não proporciona acréscimo na produtividade de grãos da cultura da soja e na maioria das safras agrícolas ocorre quebra de produtividade quando comparado aos demais sistemas (Tabela 4).

Do início da adoção de cada plano de rotação, nas últimas 9 safras onde houve a semeadura da cultura da soja em todas as parcelas (exceto as safras 2003/04, 2004/05, 2008/09 e 2012/13), o tratamento ROT produziu um somatório de 2.120 kg ha⁻¹ de grãos de soja a menos em relação à sucessão soja/trigo (ST) e 1.644 kg ha⁻¹ em relação à sucessão soja/milho (SM). As médias de produtividade de todas as safras avaliadas demonstram o plano ST (2.594 kg ha⁻¹) apresentou maior média de produtividade se comparado ao plano ROT (2.385 kg ha⁻¹) e ambos não diferiram do plano SM (2.545 kg ha⁻¹) (Tabela 4). Tais resultados são contrários aos obtidos por Franchini et al. (2011)

onde os mesmos demonstram que a soja apresenta respostas positivas à rotação de culturas, principalmente quando cultivada no verão subsequente ao cultivo da cultura do milho, podendo tais incrementos chegar a 17 %. Tais autores recomendam ainda que no mínimo, 25% da área agrícola do produtor seja destinada para o cultivo de milho no verão. Santos et al. (2006) utilizando os planos de rotação: 1) soja/trigo-milho/ervilhaca; 2) soja/aveia-branca-soja/trigo-milho/ervilhaca; 3) soja/trigo-milho/ervilhaca-soja/aveia branca; e 4) soja/trigo em um Latossolo Vermelho Distrófico verificaram que o plano composto por soja/trigo todo ano apresenta menor produtividade de grãos que em plano com rotação, não corroborando com este trabalho, visto que, os planos mais simples de sucessão de culturas apresentam maior produtividade. Tais autores atribuem ainda estas produtividades, em parte, à população final de plantas, à massa de grãos por planta, à massa de mil grãos e à estatura de plantas de soja maior no plano composto pela rotação de culturas.

A hipótese que a utilização de planos de rotação com culturas mais diversificadas pode atenuar os efeitos da compactação em PD e promover benefícios na produtividade da soja para as condições deste trabalho é rejeitada. Uma característica geral do Latossolo é a elevada estabilidade estrutural, associado a isso, o plano de rotação ROT não apresenta grande diversidade de culturas. Portanto, tal plano de rotação não promove benefícios à produtividade da soja e na Ds e Pt.

O PD proporciona condições adequadas ao crescimento radicular em superfície, desde aos primeiros cm de solo, apresentando nos efeitos simples valores médios de 5,37 cm cm⁻³ para PD e 1,94 cm cm⁻³ para o PC (Tabela 6). Para a camada de 0,05-0,10 m o SPC (3,31 cm cm⁻³) apresenta maior densidade de crescimento radicular em relação ao PD (1,93 cm cm⁻³), tais valores concordam com os valores de Ds (1,31 Mg m⁻³) encontrados neste trabalho (Tabela 1). Bengough et al. (2011) em sua revisão bibliográfica cita a impedância mecânica do solo e o teor de umidade do mesmo como os principais fatores limitantes ao crescimento radicular.

Quando desmembrados os efeitos simples dos planos de rotação e preparo do solo, a camada 0,05-0,10 m apresenta comprimento radicular por cm³ de solo de 2,57 cm para o plano ST (sucessão soja/trigo) e de 4,08 cm para o plano SM (sucessão soja/milho) sob PC. Enquanto que o cultivo em plantio direto (PD) promove condições de solo que afetam na redução do comprimento radicular, com valores de 2,25 cm cm⁻³ para o plano de rotação ST e de 1,61 cm cm⁻³ para o plano SM. Solos mais argilosos e compactados chegam e permanecem saturados de água mais rapidamente que solos mais arenosos e com menor estado de compactação após alguma chuva (BENGOUGH et al., 2011). Portanto, o período em que o solo se encontra com baixa quantidade do espaço poroso cheio de ar é ampliado, tornando-se assim um limitador ao crescimento radicular (GRABLE; SIEME, 1968). Tais resultados corroboram com os valores de Ds verificados na Tabela 1 que evidenciam a ocorrência de uma camada mais compactada na posição entre 0,05-0,20 m e aos menores valores de macroporos encontrados nessa camada para o PD (Tabela 2).

Tabela 6 – Médias referentes ao preparo do solo para cada plano de rotação e seus efeitos simples para densidade do comprimento radicular (cm cm^{-3})

Camada (m)	-----PC-----		-----PD-----	
	SM	ST	SM	ST
0,00-0,05	1,746 ns*	2,131	4,465	6,286
0,05-0,10	4,082 Aa	2,547 Ab	1,614 Ba	2,254 Aa
0,10-0,20	1,201 ns	1,166	0,754	0,472
0,20-0,30	0,596 ns	0,489	0,417	0,287
0,30-0,40	0,247 ns	0,279	0,337	0,200
0,40-0,60	0,111 ns	0,341	0,175	0,317
	-----Efeitos Simples-----			
	PC	PD	SM	ST
0,00-0,05	1,938 B	5,375 A	3,105 ns	4,208
0,05-0,10	3,314 A	1,934 B	2,848 ns	2400
0,10-0,20	1,183 A	0,613 B	0,977 ns	0,819
0,20-0,30	0,543 ns	0,352	0,507 ns	0,388
0,30-0,40	0,263 ns	0,269	0,292 ns	0,239
0,40-0,60	0,226 ns	0,246	0,143 b	0,329 a

* Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para preparo do solo e minúscula para o plano de rotação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns= não significativo pelo teste F a 5 % de probabilidade de erro. Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional; ST= sucessão soja/trigo; SM= sucessão soja/milho+brachiaria; Obs: não foram realizadas avaliações de densidade do comprimento radicular para o plano de rotação ROT (rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo).

O crescimento radicular da soja foi maior para a o PD na camada de 0,00-0,05 em relação ao PC. Nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m o PC apresentou maior densidade do crescimento radicular em relação ao PD. Tais resultados podem ter duas explicações possíveis: 1) A adoção do plantio direto melhora as condições, nos primeiros centímetros do solo para o crescimento radicular da cultura da soja. Este efeito pode estar associado a uma menor temperatura e maior umidade do solo para o PD em relação ao PC proporcionada pela cobertura e proteção do solo além da maior concentração de nutrientes (quimiotropismo) na camada superior do solo fazendo com que o sistema radicular da cultura tenha maior desenvolvimento em superfície, conforme demonstrado na avaliação química deste solo (LUZ, 2017); e 2) a ausência de revolvimento do solo ocasionou acréscimo da Ds para as camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (Tabela 1) acima do limite considerado crítico ao crescimento e produtividade da soja (REICHERT et al., 2009), para tanto o sistema radicular da cultura pode ter ficado limitado à um maior crescimento em superfície em detrimento à camadas mais profundas.

Com relação ao crescimento radicular da cultura da soja é interessante realizar a estratificação das camadas 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, visto que as maiores diferenças de densidade de crescimento radicular são encontradas nestas duas camadas (Tabela 6). Enquanto que Li et al. (2017) verificaram

maior densidade do comprimento radicular para PD quando comparado ao PC nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, enquanto as demais camadas não apresentaram diferenças entre si. A maior quantidade de raízes na camada superior torna o sistema radicular mais eficiente na absorção de nutrientes (FARMAHA et al., 2012; LI et al., 2017), porém a distribuição radicular em superfície pode ser problemática quando a disponibilidade de água for baixa (FARMAHA et al., 2012).

3.6 CONCLUSÕES

Embora o plantio direto apresente maiores valores de densidade do solo e microporos e menor volume de macroporos, tais valores não são limitantes ao desenvolvimento e produtividade da cultura da soja quando comparado ao preparo convencional.

O uso de diferentes planos de rotação não reduz os efeitos da compactação em plantio direto para a densidade, porosidade total, macro e microporos do solo.

A condutividade hidráulica e a infiltração de água no solo foram maiores para camadas mais profundas do solo e o plano de rotação composto pela sucessão soja/trigo (ST) foi superior à sucessão soja/milho safrinha (SM) para as profundidades de 0,30 e 0,40 m.

A cultura da soja para este solo e clima não respondeu em aumento de produtividade ao plano de rotação composto pela rotação de culturas.

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29 p. 512-522, 2005.

BALL, B. C.; O'SULLIVAN, M. F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v. 39, p. 327-339, 1988.

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 & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 129-140, 2006.

BENGOUGH, A. G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, p. 59-68, 2011.

BENJAMIN, J. G. Tillage effects on near-surface soil hydraulic properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 26, p. 277-288, 1993.

BONO, J. A. M. et al. Infiltração de água no solo em um Latossolo Vermelho da região sudoeste dos cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1845-1853, 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. 1. ed. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399 p.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiselling and no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 33, p. 242-249, 2010.

CASTELLINI, M.; VENTRELLA, D. Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy, **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 47-56, 2012.

CECAGNO, D; et al. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 54-62, 2016.

DOGAN, E.; KIRNAK, H.; COPUR, O. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-soybean simulations under semi-arid climatic conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 103, p. 154-159, 2007.

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, p. 159-168, 2016.

EHLERS, W. Measurement and calculation of hydraulic conductivity in horizons of tilled and untilled loess-derived soil, Germany. **Geoderma**, Amsterdam, v. 19, p. 293-306, 1977.

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

FARMAHA, B. S.; FERNÁNDEZ, F. G., NAFZIGER, E. D. Distribution of Soybean Roots, Soil Water, Phosphorus and Potassium Concentrations with Broadcast and Subsurface-Band Fertilization, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, p. 1079-1089, 2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FRANCHINI, J. C. et al. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina, Embrapa Soja, 2009. 39p. (Documentos, 314).

FRANCHINI, J. C. et al. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p. (Documentos, 327).

FRANCHINI, J. C. et al. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178-185, 2012.

GENRO JUNIOR, S. A. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 65-73, 2009.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo: exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 664-668, 2006.

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

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. New York: Academic, 2003. 392p.

HUNGRIA, M. et al. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, Athens, v. 42, n. 3, p. 288-296, 2009.

JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, A. F. O. **Safira: sistema de análise de fibras e raízes**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 21p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 24).

JUNIOR, S. D. S. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1854-1867, 2012.

KOPPE, E. **Atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 2014. 75 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2014.

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

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**, São Paulo, v. 61. Edusp, 2012.

LÓPEZ-FANDO, C.; DORADO, J.; PARDO M. T. Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 95, p. 266-276, 2007.

MARTINS, A. P. et al. Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop-livestock system under varying grazing intensities, **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 144, p. 141-149, 2014.

MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 11, p. 1513-1519, 2009.

MORAES, M. T. **Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema plantio direto e sua relação com a rotação de culturas**. 2013. 205 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MORAES, M. T. et al. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 351-362, 2016.

POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação de velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 19- 27, 2003.

PREVEDELLO, C. L.; REICHARDT, K. Modelo tridimensional para medida da condutividade hidráulica de solos não saturados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 121- 124, 1991.

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. **Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático**, KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L.C. Tópicos em Ciência do Solo, v. 7, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p. 1-54, 2011.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 133-137, 1998.

SAĞLAM, M. et al. Affects of different tillage managements on soil physical quality in a clayey soil. **Environmental monitoring and assessment**, v. 187, p. 1-12, 2015.

SANTOS, H. P.; LHAMBY, J. C. B.; SPERA, S. T. Rendimento de grãos de soja em função de diferentes sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 21-29, 2006.

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

SILVA, R. R. et al. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1585-1592, 2010.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p.

VILLELA, A. L. O. **Variabilidade espacial da qualidade físico-hídrica dos solos de uma unidade de pesquisa em produção agroecológica**. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.

VIEIRA, S. R. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. **O Agrônomo**, v. 47- 50, p. 32-33, 1998.

4 ARTIGO 2: RETENÇÃO DE ÁGUA E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO NÃO SATURADO EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO DE LONGA DURAÇÃO

4.1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do plantio direto e preparo convencional com diferentes planos de rotação na distribuição de poros e parâmetros de estimativa do movimento de água do solo e indicar a utilização de nova metodologia para avaliação da continuidade de poros em um Latossolo muito argiloso. O estudo foi realizado em um experimento de longa duração, implantado em 1993, em um Latossolo Vermelho Distroférrico muito argiloso. O experimento apresenta esquema fatorial 2x3 (preparo do solo *versus* planos de rotação), em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. O fator preparo do solo é composto por: I) preparo convencional (PC); e II) plantio direto (PD). O fator planos de rotação é composto por: I) sucessão soja/trigo (ST); II) rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo (ROT) e III) sucessão soja/milho+brachiaria (SM). Foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em oito camadas do solo (0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m) para cada uma das parcelas. A fração de água disponível, condutividade hidráulica de solo não saturado, a frequência e o volume de poros e a uniformidade de distribuição de classes de poros foram obtidos do ajuste do modelo de Van Genuchten. O plantio direto (PD) apesar de apresentar menor amplitude de umidade nas curvas de retenção e de disponibilidade de água em algumas camadas, apresentou menos camadas limitantes ao fluxo de água no solo, e apresentou melhor uniformidade de distribuição de poros de maior tamanho ao longo do perfil em comparação ao preparo convencional do solo. O índice de continuidade de poros no solo (ICP) desenvolvido neste trabalho corrobora com os demais atributos do solo, medidos e estimados, podendo então ser utilizado de forma rápida e eficiente para estimativa da continuidade de poros do solo.

Palavras-chave: Manejo do solo. Índice de continuidade de poros. Compactação do solo.

PAPER 2: WATER RETENTION AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF NON-SATURATED SOIL IN DIFFERENT LONG-TERM CULTURE SYSTEMS

4.2 ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effect of no-tillage and conventional tillage under different rotation plans in the pore distribution and soil water movement estimation parameters and to indicate the use of a new methodology to evaluate the continuity of pores in a very clayey Rhodic Eutrudox. The study was carried out in a long-term experiment, implemented in 1993, on a very clayey Rhodic Eutrudox. The experiment presented a 2x3 factorial scheme (tillage system versus rotation plans), in a randomized complete block design with four replications. The tillage factor is composed of: I) conventional tillage (CT); and II) no-tillage (NT). The rotation planes factor is composed of: I) soybean / wheat (SW) succession; II) corn/lupine-soybean/oat-soybean/wheat-wheat rotation (ROT) and III) soybean/Maize + brachiaria (SM) rotation. Soil samples with preserved structure were collected in eight soil layers (0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30, 0.30- 0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80 and 0.80-1.00 m) for each plot. The available water fraction, hydraulic conductivity of unsaturated soil, frequency and volume of pores and uniformity of distribution of pore classes were obtained from the fit of the Van Genuchten model. The no-tillage (NT), despite having a lower moisture amplitude in the retention curves and water availability in some layers, presented less restrictive layers to the water flow in the soil, and presented better distribution uniformity of larger pores along the profile compared to conventional soil preparation. The soil pore continuity index (PCI) developed in this work corroborates the other soil attributes, measured and estimated, and can be used quickly and efficiently to estimate soil pore continuity.

Keywords: Soil management, pore continuity index, soil compaction.

4.3 INTRODUÇÃO

Com a necessidade de produção de alimento em maior quantidade com menor custo e a conservação dos recursos naturais na agricultura, foram desenvolvidas algumas práticas de manejo com o objetivo de manter a qualidade do solo e água. De certa forma a qualidade do solo é de difícil mensuração, visto que é necessário o entendimento e associação dos mais variados processos que nele ocorrem como forma de esclarecer o efeito de diferentes sistemas de uso e manejo do mesmo.

Alterações nas propriedades físicas do solo em sistemas considerados conservacionistas nem sempre são verificadas através de metodologias mais usuais (MORAES, 2013; REICHERT et al., 2011; MUNKHOLM et al., 2013) para tanto é necessário o estudo mais aprofundado de características ou atributos que possam indicar diferentes condições da qualidade do solo. Em seu trabalho com finalidade de indicar a qualidade do solo, Moraes et al. (2016) faz uso das curvas de retenção de água associadas à distribuição de frequência e volume de poros do solo, além de criteriosa associação das formas de manejo deste com a disponibilidade de água às plantas. Bhattacharyya et al. (2006) utilizaram as curvas de retenção de água para estimar a distribuição das classes de poros e a condutividade hidráulica em solo não saturado. Ambos os autores verificaram em seus trabalhos que a avaliação das propriedades físicas do solo através de métodos tradicionais e de fácil mensuração, como a densidade do solo e porosidade total, são eficientes para verificar diferenças da estrutura do solo ocasionada por intervenção mecânica, porém pouco sensíveis para visualizar alterações utilizando fatores biológicos, como a rotação de culturas.

A decisão de optar entre os diferentes sistemas de preparo do solo deve ser levada em consideração a conservação da umidade do solo e neste sentido, o PD é importante alternativa para minimizar as perdas de umidade do solo por evaporação (BHATTACHARYYA et al., 2006). A condutividade hidráulica é um parâmetro importante no que diz respeito ao fluxo de água no solo, sendo este um parâmetro que expressa a facilidade com que a água se movimenta no solo e sofre grande influência do grau de saturação (BHATTACHARYYA et al., 2006), tortuosidade de poros (HILLEL, 2003), quantidade de poros de grande espessura (HILLEL, 2003; MORAES et al., 2016), continuidade de poros (REICHERT et al., 2011; MORAES et al., 2016), textura (BHATTACHARYYA et al., 2006; HILLEL, 2003) e estrutura do solo.

A continuidade de poros é um atributo do solo de difícil mensuração, porém, Moraes et al. (2016) e Bhattacharyya et al. (2006) avaliaram os efeitos de atributos, como a infiltração de água no solo, a condutividade hidráulica e a distribuição de poros do solo e utilizaram a continuidade de poros como forma explicativa para os resultados obtidos em tais atributos, como forma de indicar maior ou menor continuidade de poros no perfil do solo. Junior et al. (2012) associam a continuidade de poros à permeabilidade do solo ao ar, visto que esta representa a resistência imposta pelo solo à passagem do ar e é influenciada pela quantidade, forma, tamanho e continuidade do sistema de poros. A uniformidade da distribuição dos poros do solo pode ser um indicador da continuidade de poros do solo, visto que quando duas camadas vizinhas apresentam semelhante volume de determinada classe de poros, a tendência de maior continuidade desta classe de poros no perfil do solo aumenta. Tal teoria pode ser aplicada também à condutividade hidráulica do solo. Para tanto ainda não existem trabalhos que relacionam e comparam a condutividade hidráulica do solo e o volume de diferentes classes de

poros ao longo do perfil do solo como parâmetros que podem indicar maior ou menor continuidade de poros em um sistema.

As hipóteses deste trabalho são: 1) ocorre maior disponibilidade de água do solo sob plantio direto se comparado ao preparo convencional e, no plano de rotação de culturas em relação aos planos com sucessão; 2) o revolvimento do solo provoca maior heterogeneidade de poros do solo e conseqüente menor continuidade de poros ao longo de seu perfil, o que acarreta em menor condutividade hidráulica, tanto em solo saturado quanto em solo não saturado. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do plantio direto e preparo convencional com diferentes planos de rotação na distribuição de poros e parâmetros de estimativa do movimento de água do solo e indicar a utilização de nova metodologia para avaliação da continuidade de poros em um Latossolo muito argiloso.

4.4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.4.1 Experimento de campo

A descrição geral do experimento bem como a implantação e condução do experimento de campo foram apresentadas no item 4 desta dissertação.

4.4.2 Amostragem de solo

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em oito camadas do solo (0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m), usando anéis de aço inox com volume de 100 cm³ (5 cm de altura e 5 cm de diâmetro interno). Os anéis foram inseridos horizontalmente no solo, por meio de alavanca e suporte amostrador no centro de cada camada, sem que houvesse qualquer forma de impacto sobre a amostra. Foram coletados 20 anéis por tratamento para as camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m (cinco repetições por parcela) e 8 anéis por tratamento para as camadas 0,30-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m (duas repetição por parcela) nas entrelinhas não trafegadas da cultura de verão, totalizando 672 amostras.

Após a coleta a campo, as amostras foram revestidas na parte superior e inferior com uma tampa plástica, e acondicionadas em caixas com estrutura de proteção para o transporte até o laboratório de Física do Solo da Embrapa Soja, onde permaneceram sob refrigeração ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) como forma de inibir a atividade biológica, até sua análise.

4.4.3 Determinação das propriedades físicas e hídricas do solo

As 480 amostras de solo coletadas das camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m foram divididos em cinco grupos de 96 amostras, totalizando assim quatro amostras de solo para cada tratamento por camada avaliada. As 192 amostras restantes das camadas de 0,30-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m foram divididos em dois grupos de 96 amostras, totalizando também quatro amostras de solo para cada tratamento por camada avaliada.

Para a determinação da curva de retenção de água (CRA), todas as amostras foram saturadas e submetidas às tensões de 3 kPa na mesa de tensão, posterior cada grupo das camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 m foram submetidas à uma das seguintes tensões: 6, 10, 33, 100 e 500 kPa usando a mesa de tensão (6 kPa) e câmaras de Richards (10, 33, 100 e 500 kPa). Depois de alcançar o equilíbrio em cada tensão em que foram submetidas, as amostras de solo foram pesadas e secas em estufa a 105°C durante 48 h. O conteúdo gravimétrico de água no solo à tensão de 1500 kPa foi determinado usando um psicrômetro (modelo WP4-C) em amostras de solo deformadas que foram passados através de uma peneira de 2 mm. Assim, a θ na tensão de 1500 kPa foi estimada a partir do conteúdo gravimétrico de água no solo vezes a D_s .

Ajustou-se o modelo de Van Genuchten (1980) para os pontos da CRA utilizando o software Soil Water Retention Curve (SWRC). A curva de disponibilidade de água (CDA) foi estimada a partir da diferença entre θ a partir da capacidade de campo (CC , -10 kPa) até a θ no ponto de murcha permanente (PMP, -1500 kPa). A curva de distribuição de tamanho de poros foi obtida a partir da primeira derivada da equação de van Genuchten, e o diâmetro de poro equivalente foi estimada usando a forma reduzida da equação da ascensão capilar (1) (MARSHALL; HOLMES, 1988).

$$DEP = \frac{300}{\varphi} \quad (1)$$

onde DEP é o diâmetro equivalente do poro menor (mm) drenado a sucção de água de Ψ (kPa).

Para as curvas da condutividade hidráulica do solo não saturado foram utilizados os parâmetros da CRA e a equação 2 proposta por Van Genuchten (1980) e baseado no modelo de Mualem (1976), para cada camada avaliada, para as curvas das camadas de 0-5 foram considerados os valores de K_s da camada 0,05-0,10 m; para as curvas das camadas de 0,40-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m foi considerado o valor de K_s da camada de 0,45-0,50 m.

$$K_{(\theta)} = K_s S_e^{0,5} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2; \text{ sendo: } (m=1-1/n); \text{ e } (0 < m < 1) \quad (2)$$

Onde: S_e = conteúdo de água efetivo; m = parâmetro empírico da CRA proposta por Van Genuchten (1980).

Visto que o conteúdo de água efetivo é dado pela seguinte equação:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

Onde: θ = umidade do solo; θ_r = umidade residual e θ_s = umidade de saturação do solo

4.4.4 Proposta de novo índice de continuidade de poros

4.4.4.1 Uniformidade de distribuição de classes de poros

A uniformidade de distribuição de classes de poros foi calculada utilizando o volume de poros de cada classe de poros em separado de uma determinada camada com a camada imediatamente abaixo ou acima na classe de poros desejada. Para tanto foi utilizada a seguinte equação:

$$UDP = 1 - \left(\frac{|VP_a - VP_b|}{VP_{Máx}} \right) \quad (4)$$

Onde: UDP= uniformidade de distribuição de classes de poros; VP_a = volume de poros de diâmetro x de uma camada qualquer; VP_b = volume de poros de diâmetro x de uma camada imediatamente abaixo ou acima de VP_a ; VP_{max} = Maior valor do volume de poros de diâmetro x de VP_a ou VP_b .

4.4.4.2 Uniformidade da condutividade hidráulica relativa do solo

A uniformidade da condutividade hidráulica relativa do solo foi calculada utilizando a diferença da K_ψ entre o intervalo do tamanho de poros desejado em separado de uma determinada camada com a camada imediatamente abaixo ou acima. Para tanto foi utilizada a seguinte equação:

$$UK_\psi = 1 - \left(\frac{|K_{\psi a} - K_{\psi b}|}{K_{\psi Máx}} \right) \quad (5)$$

Onde: UK_{Ψ} = uniformidade da condutividade hidráulica relativa do solo; $K_{\Psi a}$ = diferença da condutividade hidráulica relativa do solo dos poros com diâmetro x de uma camada qualquer; $K_{\Psi b}$ = diferença da condutividade hidráulica relativa do solo dos poros com diâmetro x de uma camada imediatamente abaixo ou acima de $K_{\Psi a}$; $K_{\Psi Máx}$ = Maior diferença de valor da condutividade hidráulica relativa do solo para a classe poros de diâmetro x de $K_{\Psi a}$ ou $K_{\Psi b}$.

4.4.4.3 Índice de continuidade de poros

Para a criação do índice de continuidade de poros do solo (ICP) foram utilizados os parâmetros UDP e UK_{Ψ} . Com base na teoria de Laplace, para que ocorra ascensão capilar de um tubo de menor diâmetro para um tubo de maior diâmetro é necessário que haja uma força externa que promova a ascensão da água, caso contrário a ascensão capilar deste tubo é interrompida. Apesar do solo não ser um feixe vascular perfeito esta teoria ainda sim pode ser utilizada, portanto quanto maior for a diferença do volume de classes de poros entre duas camadas maior serão os obstáculos para o movimento da água no solo, aumentando assim a tortuosidade do sistema poroso (LIBARDI, 2012; HILLEL, 2003). Quanto mais homogênea for a distribuição do volume de determinada classe de poros do solo maior é a tendência que estes sejam mais contínuos ao longo do perfil.

A condutividade hidráulica é influenciada pela quantidade, forma, tamanho, tortuosidade e continuidade do sistema de poros do solo, portanto, pode ser utilizada como indicador da continuidade de poros do solo (EHLERS, 1977; BALL et al., 1988; ROSEBERG; McCOY, 1990, HILLEL, 2003; JUNIOR et al., 2012).

Foi realizada a multiplicação da UDP pela UK_{Ψ} a fim de se obter um índice sempre dentro da faixa 0 e 1 (Equação 6). Para a obtenção do índice, as variáveis UDP e UK_{Ψ} recebem igual importância (peso). Os valores de ICP mais próximos a 1 indicam maior continuidade de poros no perfil avaliado.

$$ICP = UDP * UK_{\Psi} \quad (6)$$

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interação entre os preparos do solo e planos de rotação não foi significativa (teste de F, $p < 0,05$) para todos os atributos físicos do solo avaliados, independentemente da camada de solo (Item 3.5). Assim, para todas as variáveis, a análise estatística foi realizada separadamente para cada fator (preparo do solo e planos de rotação).

4.5.1 Efeito do preparo sobre as propriedades do solo

As curvas de retenção de água do solo para os efeitos simples do preparo do solo (PD e PC) mostraram a camada 0,00-0,05 m com maior amplitude do teor de água para PC, porém, parte da água presente nesta camada encontra-se na forma gravitacional (figura 1a) que não acarreta em diferenças na fração de água disponível às plantas (Figura 2a). A revolvimento mecânico através do preparo convencional do solo, é uma alternativa muito utilizada, por aumentar de forma rápida o espaço poroso do solo (BHATTACHARYYA et al., 2006; MORAES, 2013; ORTIGARA et al., 2014). Conseqüentemente, o aumento na quantidade de poros de maior diâmetro do solo, faz com que a fração da água gravitacional da curva de retenção de água do solo também aumente (Figura 1a).

As camadas de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m ocorre maior amplitude da θ nas curvas de retenção de água para PC sobre o PD (Figura 1b,c) e boa parte desta água está representada na faixa de tensões que compreendem a fração de água disponível do solo, sendo assim refletida na figura 2b,c. O estado de compactação de um solo influencia diretamente nas suas propriedades hídricas, motivo visto que todo o sistema poroso sofre alteração (BENJAMIN, 1993; BHATTACHARYYA et al., 2006; MORAES et al., 2016). Segundo Franchinni et al. (2011) e Moraes (2013) solos cultivados sob PD apresentam a camada de 0,08-0,15 m maior estado de compactação, já neste trabalho, o maior estado de compactação foi verificado nas camadas de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m do PD em relação ao PC (Tabela 1 no item 3.5.1). Enquanto que o PC apresentou maior estado de compactação para a camada de 0,20-0,30 m na comparação com o PD. O que proporciona maior capacidade de retenção de água em toda a amplitude de θ nas tensões da curva do PD sobre o PC (Figura 1d), porém, a influência sobre a disponibilidade de água nesta camada é mínima (Figura 2d).

Para camadas mais profundas as diferenças são pequenas ou inexistentes mostrando assim que o efeito do preparo do solo fica restrito até a profundidade de 0,40 m, para tanto, se assume os mesmos valores de condutividade hidráulica saturada avaliados na profundidade de 0,50 m para as camadas 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m para a plotagem das curvas de condutividade hidráulica (Figura 3).

Figura 1 – Retenção de água em cada sistema de preparo do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: PD= Plantio direto; PC= Preparo convencional.

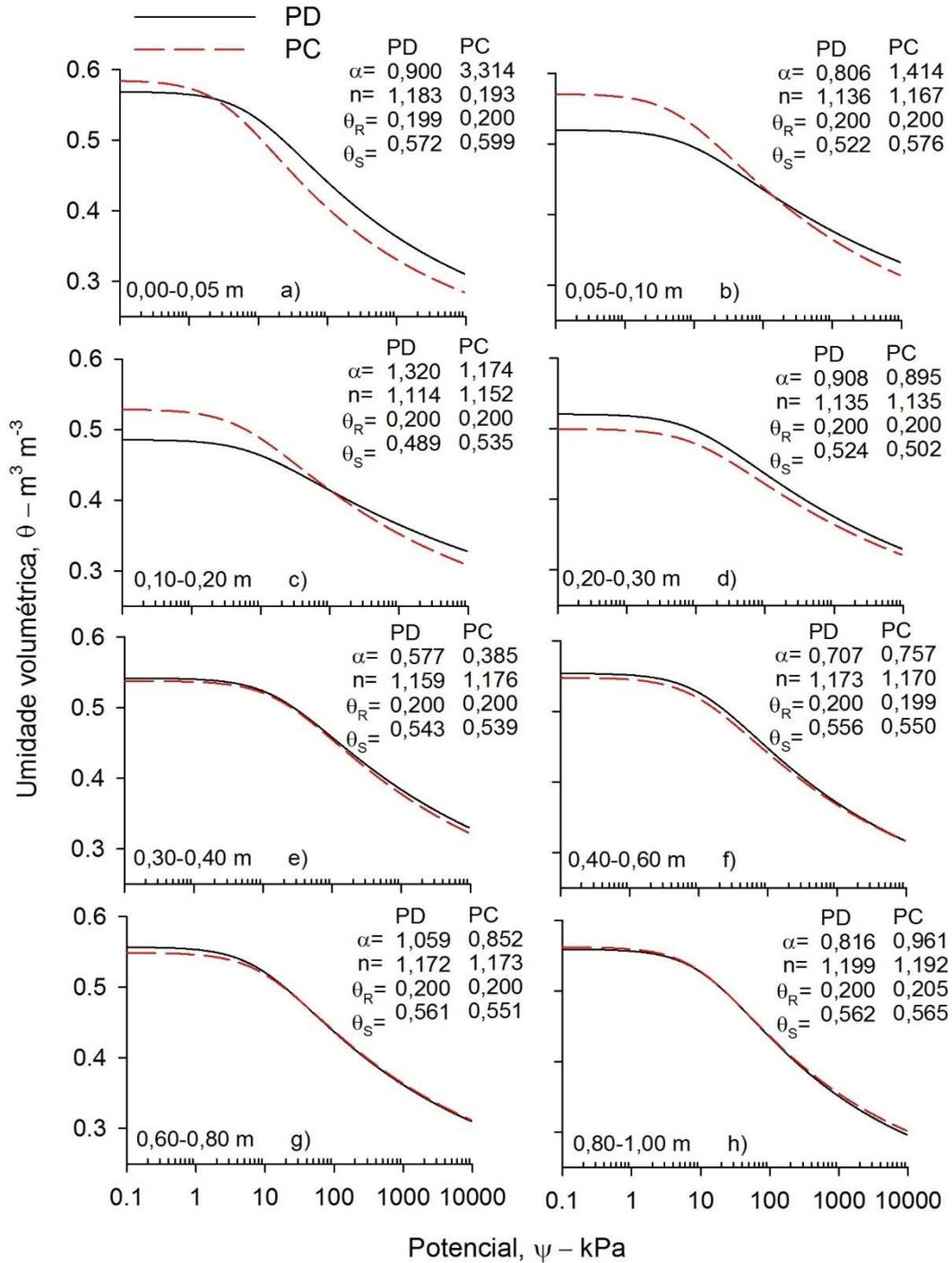
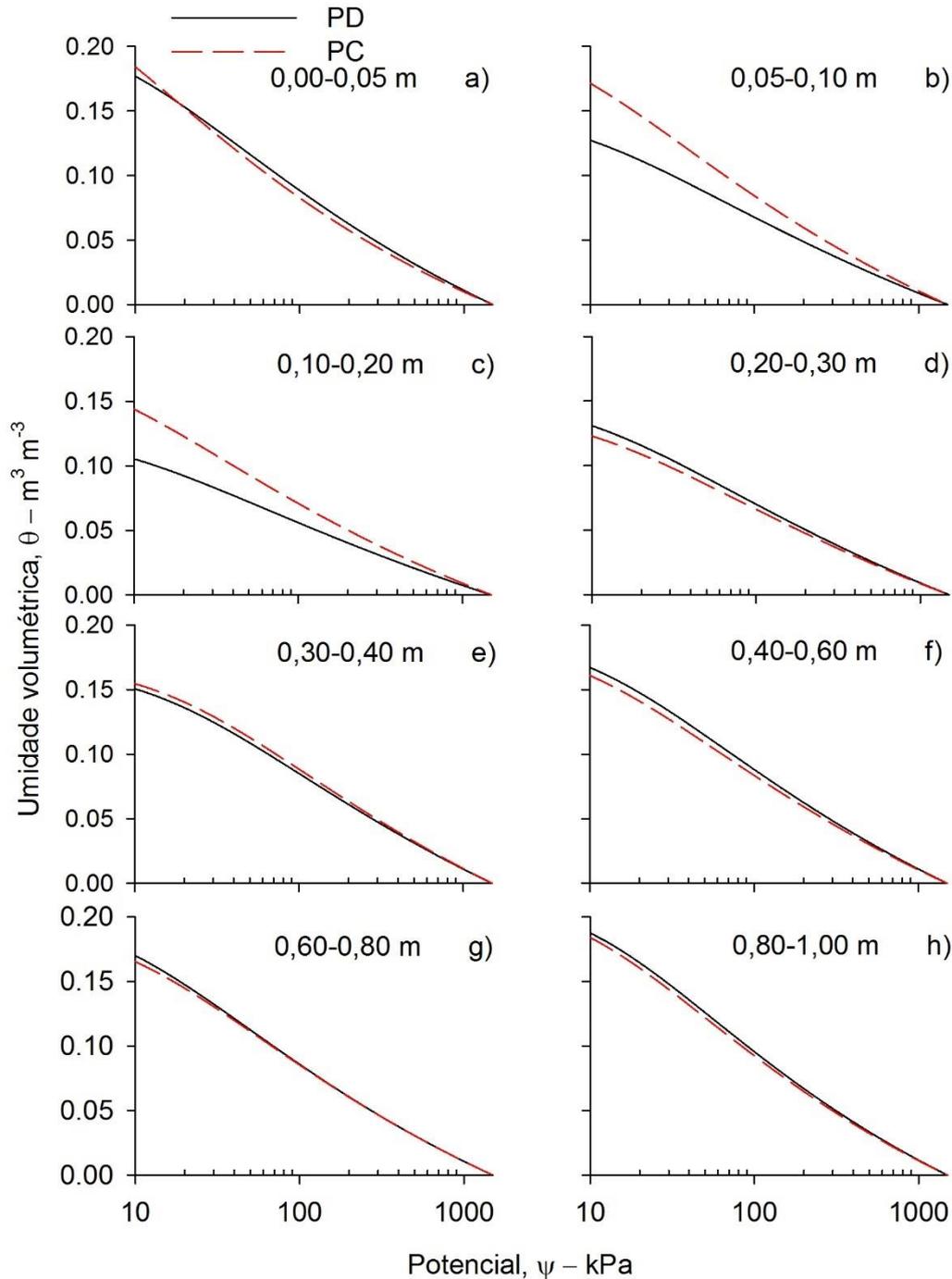


Figura 2 – Fração de água disponível em cada sistema de preparo do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional.



As camadas superiores do solo até a profundidade de 0,20 m para o PD e até 0,30 m para o PC apresentaram menor condutividade hidráulica em solo não saturado (K_{ψ}) em relação às demais (Figura 3). A K_{ψ} foi igual ou menor para PC em todas as camadas avaliadas e conforme ocorreu a secagem do solo, ocorreu também o aumento das diferenças a favor do PD em detrimento do PC. Apesar do PC

apresentar maior frequência (Figura 4) e volume (Figura 5) de poros de maior diâmetro até a profundidade de 0,20 m e estes poros serem mais condutivos (HILLEL, 2003; CASTELINI; VENTRELLA, 2012) estes resultados não influenciam na condutividade hidráulica entre os preparos do solo (Figura 3a,b,c). Portanto é evidente que a continuidade de poros é tão ou mais importante que o volume de poros de maior diâmetro do solo (BENJAMIN, 1993; BHATTACHARYYA et al., 2006; REICHERT et al., 2011).

O valor de K_{ψ} na capacidade de campo para a camada de 0,05-0,10 m é 8 % maior para o PD ($11,5 \text{ mm h}^{-1}$) em relação ao PC ($10,5 \text{ mm h}^{-1}$), já no ponto de murcha permanente, a diferença é de 42 % do PD ($2,81 \text{ mm h}^{-1}$) para o PC ($1,63 \text{ mm h}^{-1}$) (Figura 3b). Se considerado o K_{ψ} médio na capacidade de campo para todas as camadas avaliadas, o PD apresenta fluxo de $23,1 \text{ mm h}^{-1}$ enquanto que o fluxo médio no PC é de $18,3 \text{ mm h}^{-1}$, ou seja, em PD a K_{ψ} é 26 % superior ao PC. O PC além de apresentar menor condutividade hidráulica, apresenta redução ainda maior da K_{ψ} que o PD conforme ocorre a secagem do solo, corroborando com Bhattacharyya et al. (2006). Os valores de K_{ψ} a partir da camada de 0,30-0,40 m não sofrem restrição pela ação do manejo do solo (Figura 3e,f,g,h).

A maior frequência (Figura 4 a,b,c) e volume (Figura 5) de poros de maior diâmetro do PC para o PD nas camadas superiores do solo, podem ser a explicação para tais resultados. Quando o solo se encontra saturado com água, a condutividade hidráulica é máxima (HILLEL, 2003). No momento em que a água começa a ser drenada do solo, seja por drenagem, absorção radicular ou evaporação, os espaços que antes eram preenchidos por água passam a ser preenchidos com ar e conseqüentemente, a condutividade hidráulica deste solo é reduzida (BHATTACHARYYA et al., 2006, HILLEL, 2003). Associado a isso, os mesmos autores afirmam que, no processo de drenagem, os primeiros poros a se esvaziar são os de maior diâmetro, com maior condutividade. Desta forma o fluxo passa para os poros menores e a tortuosidade aumenta, pois, o fluxo precisa contornar poros preenchidos com ar, aumentando a resistência ao fluxo de água em solo não saturado.

É possível verificar a maior frequência de poros de tamanho entre 100 e 1000 μm até a profundidade de 0,20 m do PC em relação ao PD (Figura 4a,b,c), enquanto que para as demais camadas as diferenças entre preparo do solo tornam-se pequenas ou inexistentes (Figura 4d,e,f,g,h) reafirmando assim uma menor continuidade de volume de poros do PC em relação ao PD.

Figura 3 – Condutividade hidráulica do solo em cada sistema de preparo do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional.

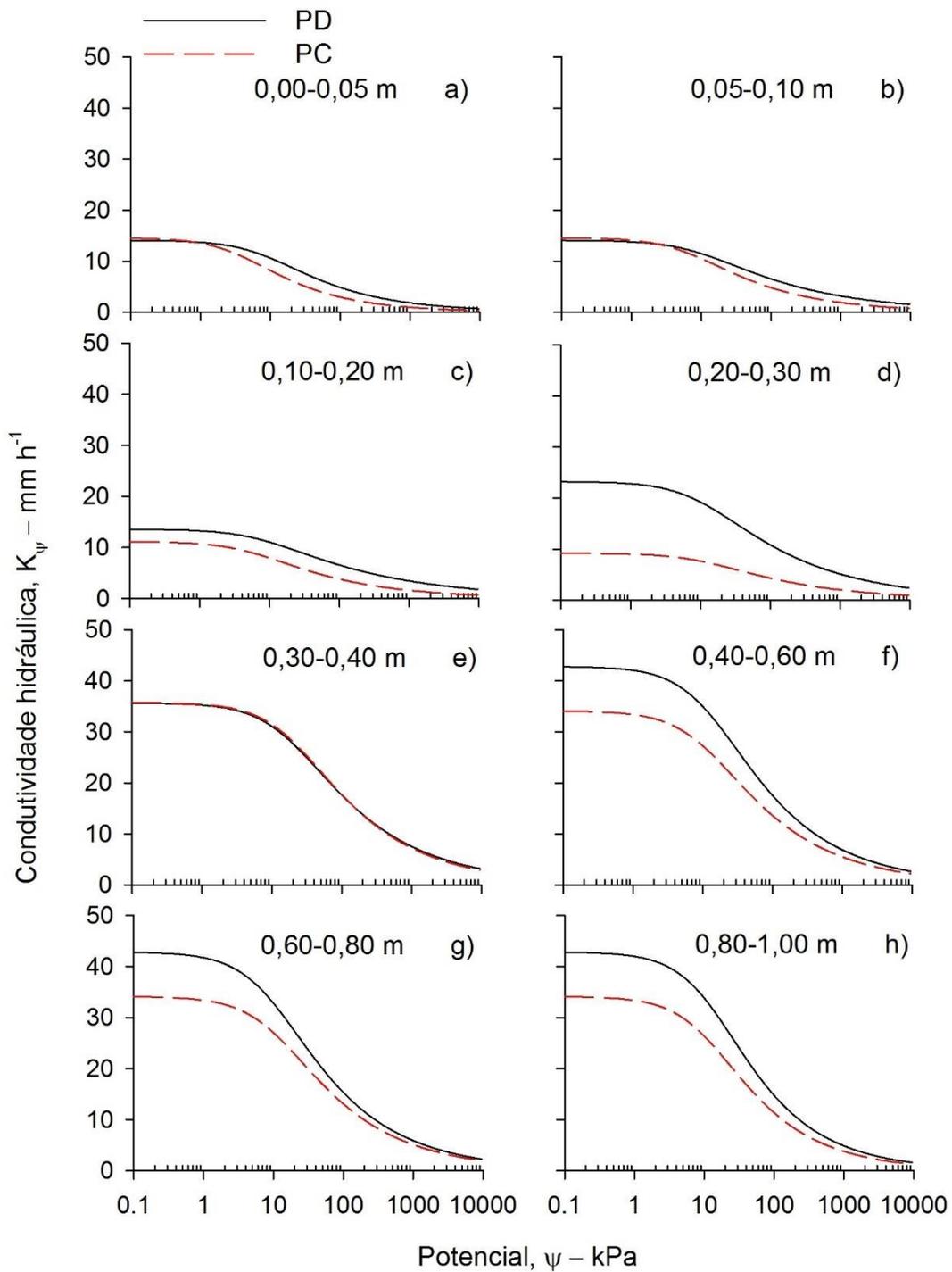
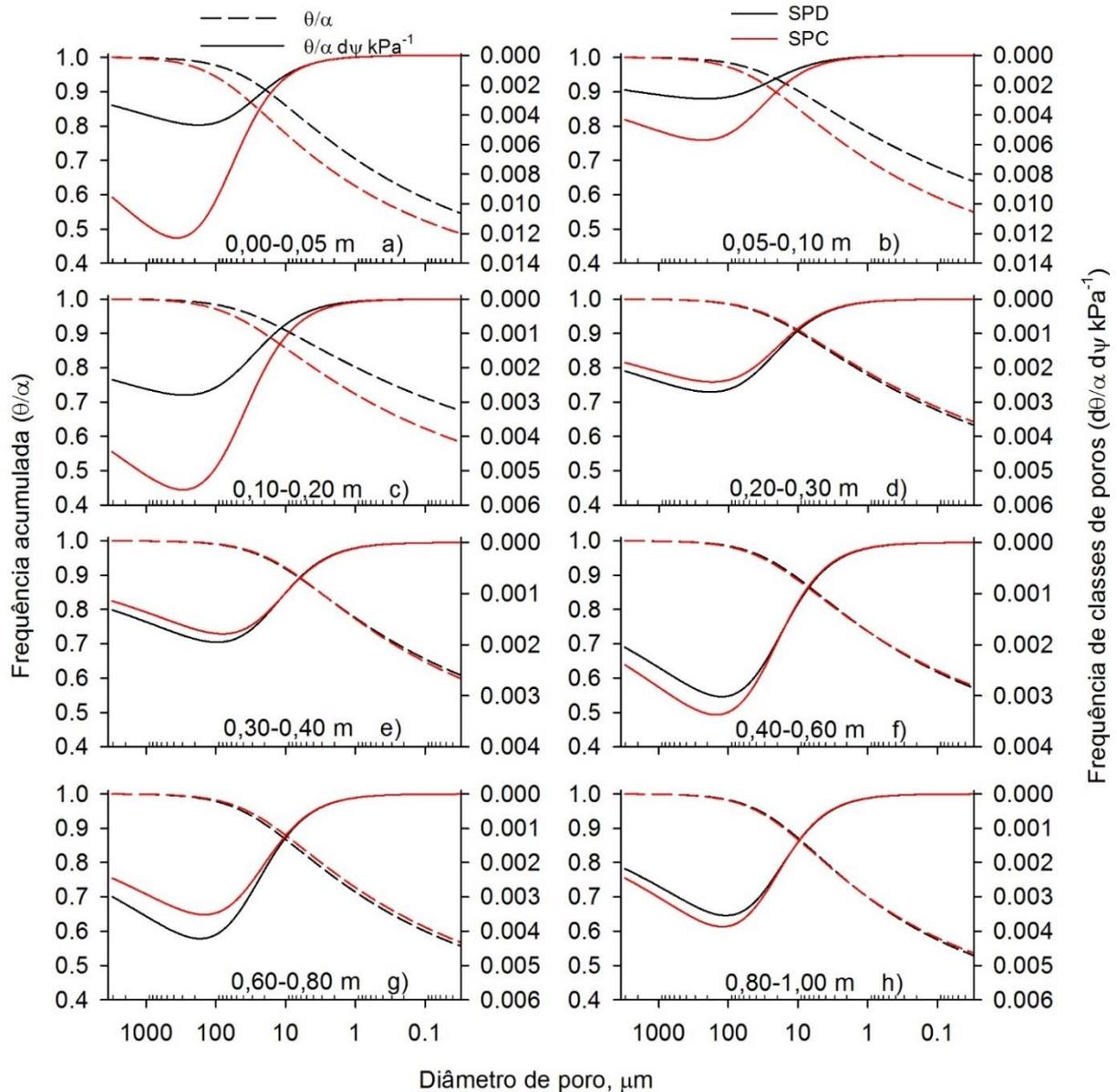


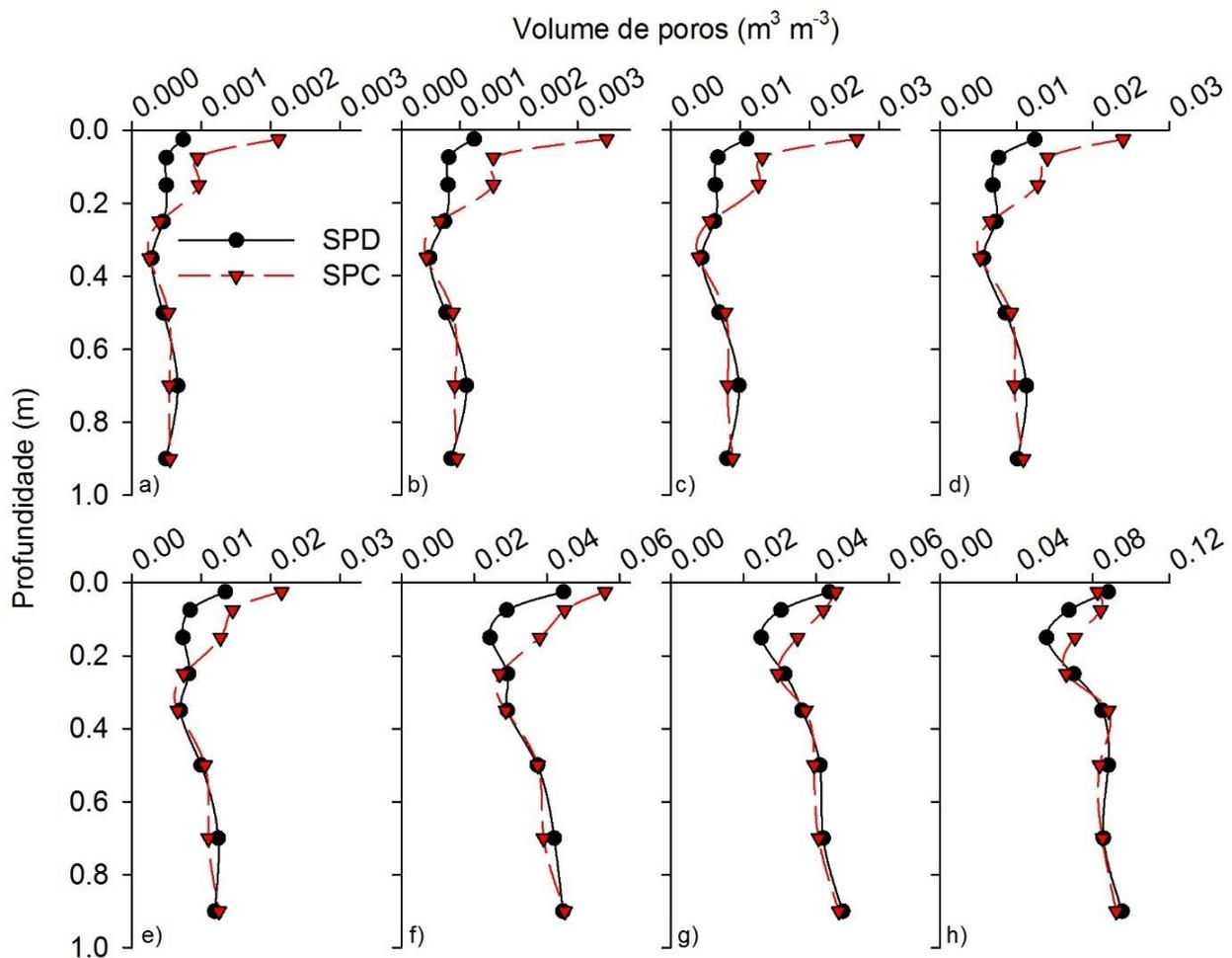
Figura 4 – Frequência acumulada (linha contínua) e frequência das classes de poros (linha tracejada) nas camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional.



A K_{ψ} na capacidade de campo até a profundidade de 0,30 m fica entre $10,6 \text{ mm h}^{-1}$ (0,00-0,05 m) e $23,3 \text{ mm h}^{-1}$ (0,20-0,30 m) para PD e $7,7 \text{ mm h}^{-1}$ (0,20-0,30 m) e $10,5 \text{ mm h}^{-1}$ (0,05-0,10 m,) para o PC. Quando a K_{ψ} estimada próxima ao ponto de murcha permanente os valores variaram de $1,6 \text{ mm h}^{-1}$ (0,00-0,05 m) a $4,5 \text{ mm h}^{-1}$ (0,20-0,30 m) para PD e $0,8 \text{ mm h}^{-1}$ (0,00-0,05 m) a $1,7 \text{ mm h}^{-1}$ (0,05-0,10 m) para PC (Figura 3). Isso mostra que a camada de 0,20-0,30 m apresenta a maior limitação para o fluxo de água para PC. Quando atribuímos esta condição para o fluxo ascendente de água no solo percebemos que toda a camada de 0,00-0,30 m pode ser comprometida com redução da ascensão capilar. A ausência de variação no volume de poros maiores para a camada de 0,20-0,30 m associado

maior K_{ψ} para o PD em relação ao PC corrobora com a teoria de maior continuidade de poros do solo (Tabela 1) para essa camada (BENJAMIN, 1993; BHATTACHARYYA et al., 2006). A destruição dos poros contínuos aumenta a tortuosidade de poros do solo, provocando interrupção de fluxo contínuo de água e consequente a velocidade de fluxo é reduzida (EHLERS, 1977; BALL et al., 1988).

Figura 5 – Volume de poros para as classes >1000 (a); 500-1000 (b); 100-500 (c); 50-100 (d); 30-50 (e); 9-30 (f); 3-9 (g); 0,2-3 μm (h) nas diferentes camadas de solo avaliadas. Onde: PD= plantio direto; PC; preparo convencional.



A camada de solo de 0,20-0,30 m foi a que apresentou as maiores diferenças na K_{ψ} , quando próxima a capacidade de campo (10 kPa) ou ao ponto de murcha permanente (1500 kPa) a K_{ψ} é 60 % superior para o PD em relação ao PC, demonstrando assim a formação do “pé-de-arado” para esta camada. O PC, além de promover a desestruturação do solo, ocasiona o rompimento de poros contínuos, restringindo assim o fluxo de água no perfil do solo (EHLERS, 1977; BALL et al., 1988; BENJAMIN, 1993; BHATTACHARYYA et al., 2006; SORACCO et al., 2012). A continuidade de poros é de grande importância no que diz respeito às trocas gasosas e principalmente à infiltração de água no solo (EHLERS, 1977; BALL et al., 1988; BENJAMIN, 1993; BHATTACHARYYA et al.,

2006; REICHERT et al., 2011, MORAES, 2013), bem como na ascensão capilar (REICHERT et al., 2011; LIBARDI, 2012), para tanto, possivelmente, esta camada é limitante ao fluxo de água ascendente do solo em PC.

O PC proporciona maior volume de poros de maior tamanho até a camada de 0,20 m em relação ao PD (Figura 5). Porém, sua distribuição ao longo do perfil do solo é menos homogênea fazendo com que o índice de continuidade de poros para as camadas superiores do solo seja menor (Tabela 1). A maior diferença entre os preparos do solo com relação ao índice de continuidade de poros (ICP) no perfil se dá entre as camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para todas as classes de poros com diâmetro acima de 30 μm onde os valores médios para tais classes é de 0,54 para PC e 0,98 para PD (Tabela 1). Conforme já abordado anteriormente, a menor K_{Ψ} para a camada de 0,20-0,30 m (Figura 3d) se correlaciona ao menor ICP, sendo esta a camada que ocorre a ação do disco da grade sobre o solo, promovendo assim a quebra dos poros contínuos.

Tabela 1 – Índice de continuidade de poros para cada classe de poros entre as diferentes camadas comparadas para preparo do solo.

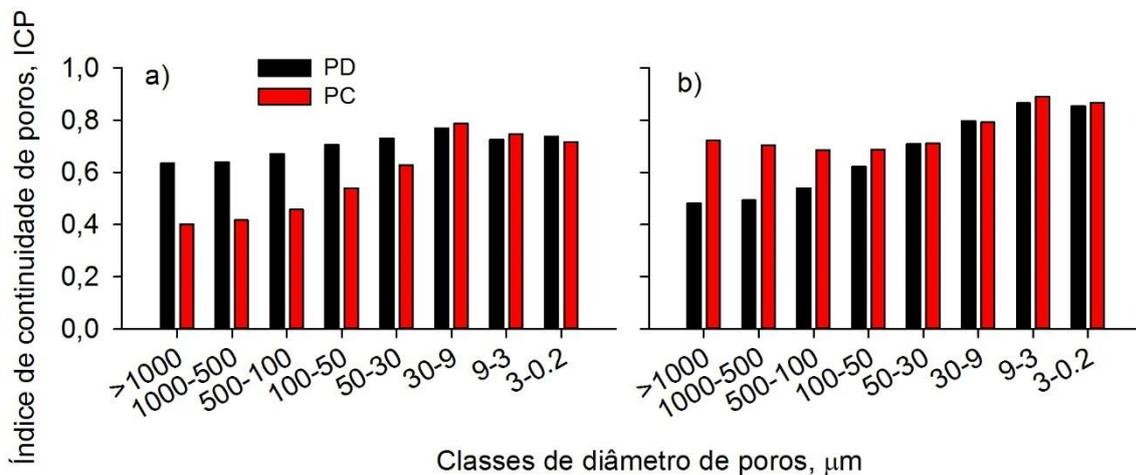
Camadas comparadas (m)	Trat.	Classes de poros (μm)							
		>1000	1000-500	500-100	100-50	50-30	30-9	9-3	3-0,2
0,00-0,05/	PD	0,78	0,75	0,73	0,73	0,75	0,81	0,93	0,88
0,05-0,10	PC	0,47	0,47	0,53	0,67	0,80	1,00	0,81	0,67
0,05-0,10/	PD	0,90	0,91	0,95	0,99	0,98	0,94	0,93	0,97
0,10-0,20	PC	0,87	0,89	0,93	0,98	0,98	0,95	0,95	0,99
0,10-0,20/	PD	0,81	0,83	0,88	0,95	1,00	0,93	0,90	0,94
0,20-0,30	PC	0,45	0,46	0,50	0,59	0,69	0,88	0,91	0,78
0,20-0,30/	PD	0,60	0,62	0,67	0,74	0,82	0,97	0,89	0,87
0,30-0,40	PC	0,56	0,58	0,63	0,72	0,80	0,98	0,87	0,86
0,30-0,40/	PD	0,66	0,66	0,67	0,70	0,75	0,85	1,00	0,88
0,40-0,60	PC	0,49	0,50	0,53	0,59	0,67	0,85	0,92	0,81
0,40-0,60/	PD	0,69	0,70	0,72	0,78	0,84	0,95	0,94	0,88
0,60-0,80	PC	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,99	0,98
0,60-0,80/	PD	0,74	0,76	0,82	0,90	0,97	0,94	0,90	0,96
0,80-1,00	PC	1,00	0,97	0,94	0,91	0,90	0,91	0,95	0,94
Média	PD	0,74	0,75	0,78	0,83	0,87	0,91	0,93	0,91
	PC	0,69	0,69	0,72	0,77	0,83	0,93	0,91	0,86

*Valores próximos à 1 indicam maior continuidade de poros entre as duas camadas avaliadas. Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional.

O índice de continuidade de poros (ICP) ao longo do perfil do solo é aumentado quanto menor for o tamanho de poro para o PC, independente da camada de solo avaliada (Tabela 1 e Figura 6). Já para PD ocorre distribuição mais homogênea de poros do solo para poros de maior diâmetro, nas camadas até 0,40 m (Figura 6a), enquanto que, para camadas mais profundas à 0,40 m (Figura 6b) a

uniformidade de poros do solo tende a aumentar conforme a redução do tamanho destes. Castelini; Ventrella (2012) afirmam que os macroporos ($r > 375 \mu\text{m}$) normalmente são poros “interagregados”, formados por meio do crescimento radicular ou atividade biológica, os quais apresentam maior continuidade e estabilidade. Estes poros são presentes em maior escala em PD promovendo assim maior estabilidade de distribuição de poros do solo (Figura 6a). Enquanto que mesoporos ($375 > r > 150 \mu\text{m}$), normalmente “intra-agregados”, apresentam menor continuidade e maior tortuosidade (CASTELINI; VENTRELLA, 2012).

Figura 6 – Média do índice de continuidade de poros para as comparações até a camada de 0,40 m (a) e a partir da camada de 0,30 até 1,00 m (b). Onde: PD= plantio direto; PC= preparo convencional.



*Valores próximos à 1 indicam maior continuidade de poros entre as duas camadas avaliadas.

O melhor ICP para camadas mais profundas e para poros do solo de menor diâmetro já era esperada devido a pequena influência do preparo do solo nesta profundidade. Os poros de maior diâmetro são mais afetados pelo manejo do solo (MORAES et al., 2016) para tanto o estudo da continuidade de poros em diferentes preparos do solo torna-se importante em classes de maior diâmetro até a profundidade em que as práticas de manejo têm influência. Para este trabalho, comparando os sistemas de preparo, o ICP foi influenciado até a profundidade de 0,40 m. Torna-se evidente que a continuidade de poros é tão ou mais importante que o volume de poros de maior diâmetro do solo (BENJAMIN, 1993; BHATTACHARYYA et al., 2006; REICHERT et al., 2011; MORAES et al., 2016) e a representação deste parâmetro na forma de índice auxilia na explicação de atributos hidráulicos do solo.

4.5.2 Efeito do plano de rotação sobre as propriedades do solo

Outra forma de intervenção no solo como forma de eliminar ou reduzir a ocorrência de camadas compactadas é a utilização de plantas com diferentes sistemas radiculares. A sucessão soja/trigo (ST) na camada superior (0,00-0,05 m) apresentou maior amplitude da θ sob a CRA (Figura 7a), o mesmo é refletido na CDA (Figura 8a), mesmo que tal efeito seja pouco pronunciado.

As maiores diferenças para as demais camadas estão no que se refere à água gravitacional do solo, fazendo com que algumas vezes a maior ou menor amplitude das CRA (Figura 7) não seja visualizada na CDA (Figura 8). A exceção está nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m onde o plano com milho safrinha no outono/inverno (SM) apresentou maior amplitude da θ na CRA (Figuras 7c,d) e maior volume de água disponível às plantas (Figura 8 c,d) em relação ao ST e ROT. Normalmente o efeito de diferentes planos de rotação nas propriedades físicas do solo é mais lento e pouco pronunciado (MORAES et al., 2016), muitas vezes as avaliações tradicionais da condição física do solo, como a D_s e P_t para diferentes planos de rotação não são sensíveis à ponto de detectar alterações possíveis ocasionadas pelo crescimento radicular das culturas (BALL et al., 1988; REICHERT et al., 2011; MUNKHOLM et al., 2013; MORAES et al., 2016; DRESCHER et al., 2016).

A condutividade hidráulica do solo não saturada é afetada pelos planos de rotação avaliados basicamente na camada de 0,20-0,30 m (Figura 9d). Nesta camada, o plano composto por sucessão soja/trigo (ST) apresenta maior condutividade se comparado ao plano composto pela sucessão soja/milho (SM), a proporção da K_{ψ} é ampliada a favor do ST em relação ao SM quando avaliada próxima à capacidade de campo e próxima ao PMP (de 41 para 70 %, respectivamente, mais condutivo no plano ST). O sistema radicular mais denso e fasciculado do trigo cria maior quantidade de bioporos contínuos, sendo estes, caminhos preferenciais para o fluxo de água, tanto em solo saturado como em solo não saturado (HILLEL, 2003), sendo assim promovem maior fluxo de água para esta camada em comparação ao plano composto pela sucessão soja/milho. Benjamin (1993) conclui que a condutividade hidráulica foi o melhor indicador das alterações ocasionadas pelo preparo do solo e planos de rotação. Outro fator que deve ser levado em consideração é a decomposição das raízes das plantas de cobertura, onde as mesmas permanecem por período de tempo obstruindo os poros do solo.

Figura 7 – Retenção de água de cada plano de rotação do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha.

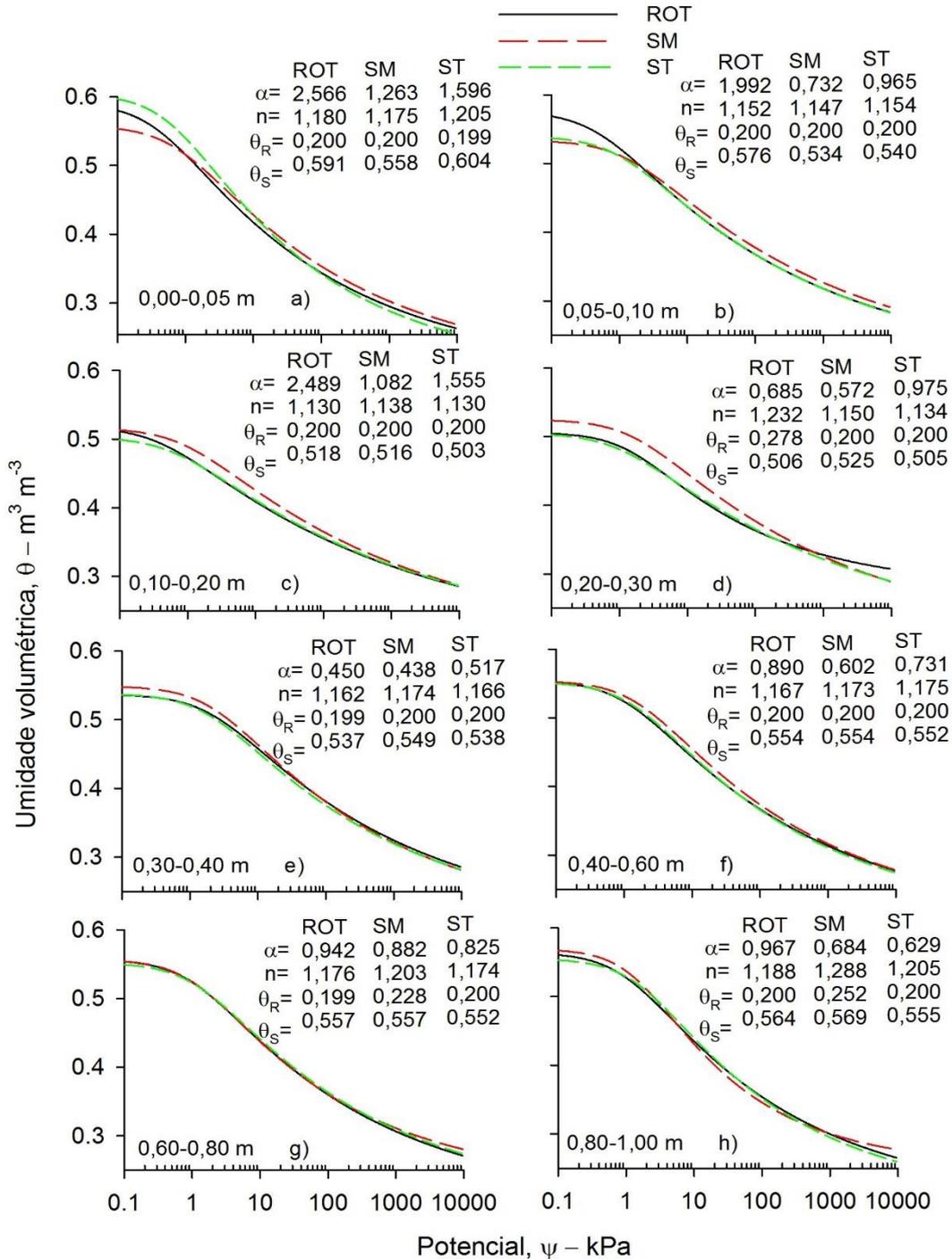


Figura 8 – Fração de água disponível de cada plano de rotação do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha.

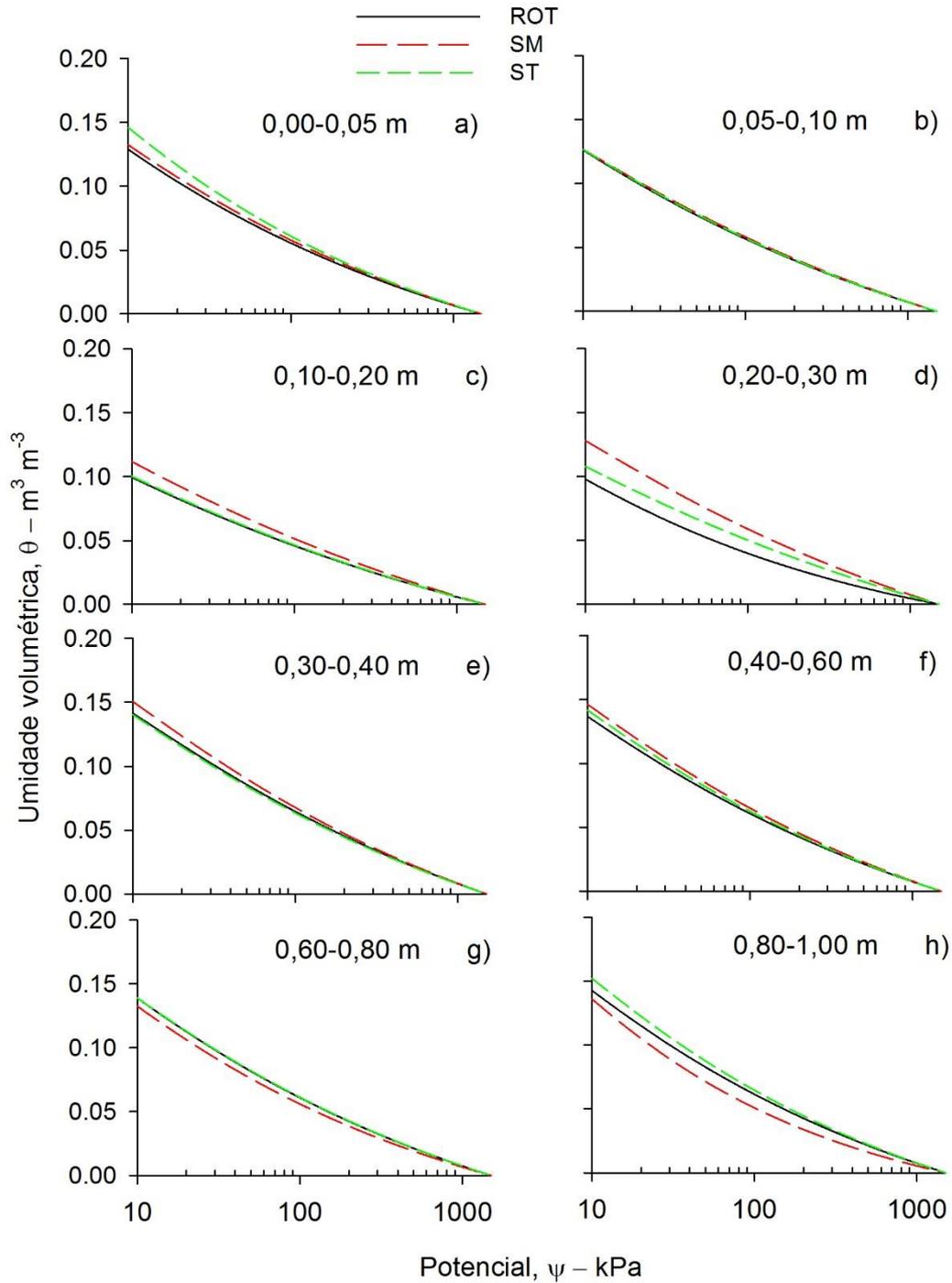
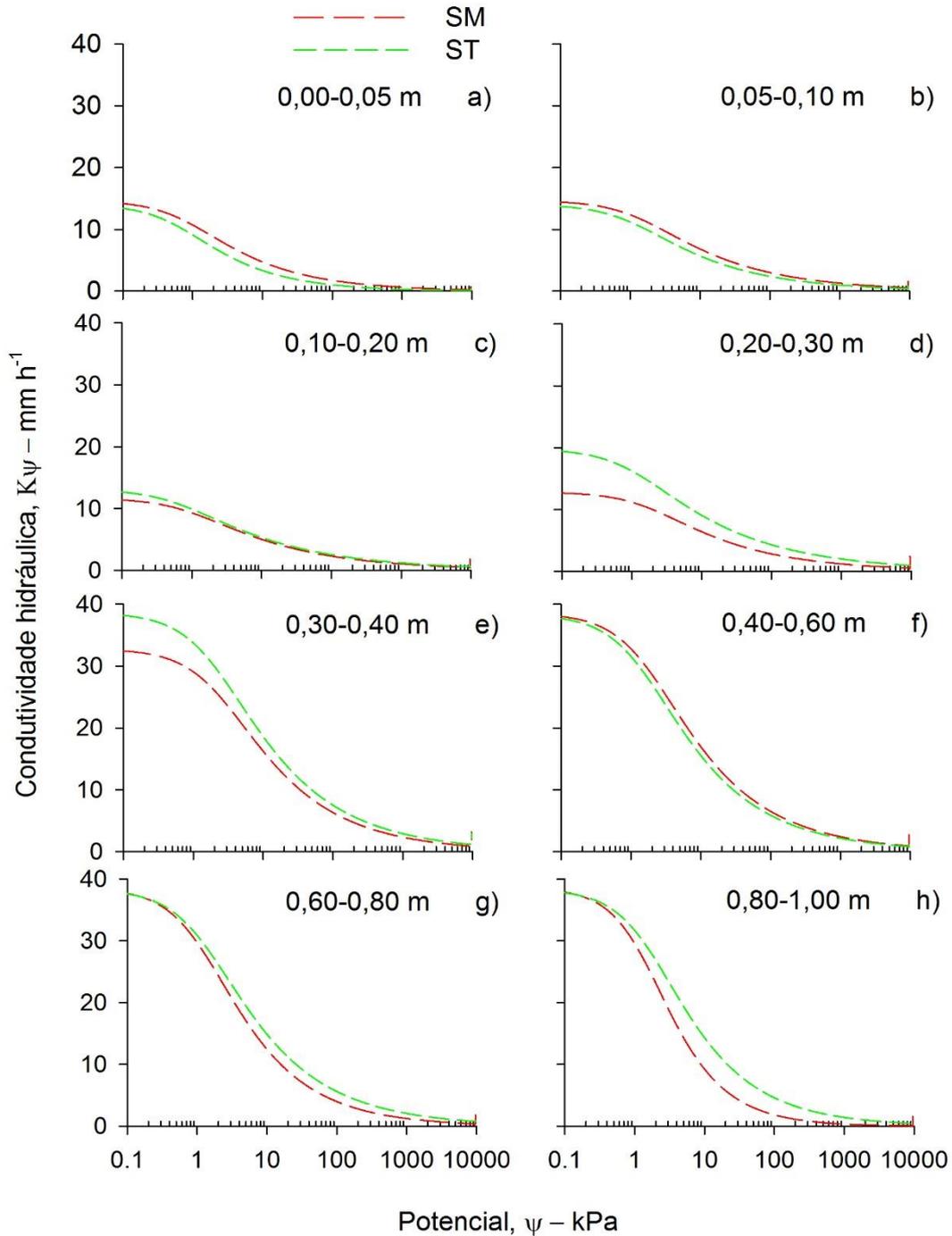


Figura 9 – Condutividade hidráulica do solo de cada plano de rotação do solo para as camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha.



Para camadas mais profundas (0,30-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m) a condutividade hidráulica é elevada (Figura 9e,f,g,h), podendo ser considerada como não limitante ao fluxo de água no solo. A redução dos valores de K_{ψ} à medida em que a água do solo é drenada ficaram próximos à 60 % (de 50 a 73%) quando considerada da saturação à capacidade de campo e quando considerada

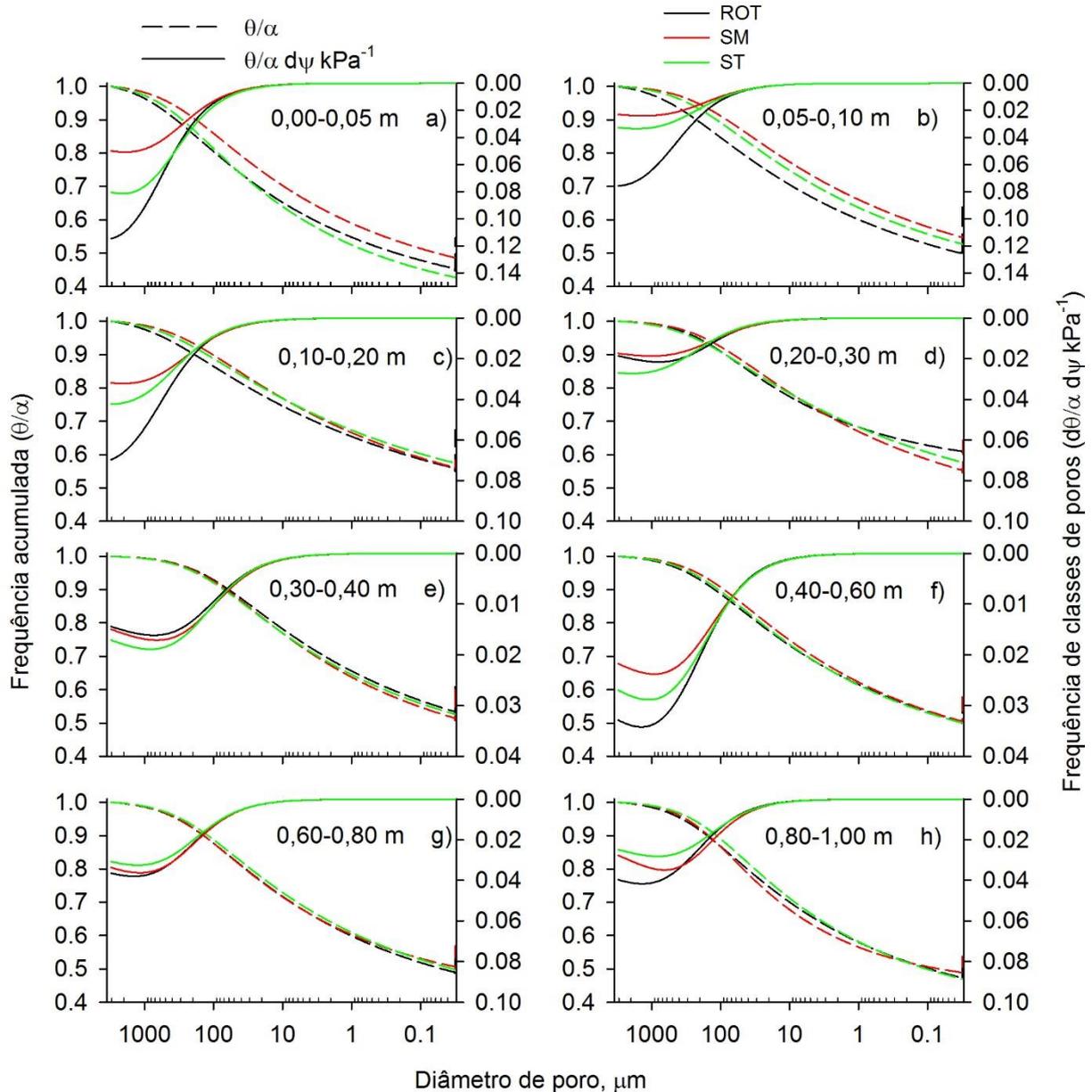
da saturação ao PMP a redução ficou próxima à 95 %. A fim de justificar reduções drásticas da K_{Ψ} Hillel (2003) atribui à descontinuidade de poros e ocorrência de espaços inter-agregados que facilitam a formação de bolhas de ar, que quando saturados conferem alta K_{Sat} , e quando vazios podem se tornar obstáculos ao fluxo de água de um agregado para outro. Benjamin (1993) estudando diferentes preparos do solo (PD, PC e PD com escarificação) e diferentes planos de rotação, atribui a superioridade do fluxo de água em meio saturado e não-saturado à continuidade de poros do PD sobre o PC.

As camadas até a profundidade de 0,20 m, é encontrada maior frequência de poros para as classes de poros de tamanho acima de 1000 μm (Figura 10a,b,c). O plano de rotação ROT (milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo) apresentou maior frequência desta classe de poros sobre os demais planos de rotação para as camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (Figura 10a,b,c), enquanto que para as demais camadas as diferenças entre preparo do solo foram pequenas ou inexistentes (Figura 10e,f,g,h). Isso mostra que este sistema, apesar de ter o plano de rotação mais complexo, o mesmo não reflete em melhor qualidade do sistema, demonstrando menor continuidade de poros de maior tamanho (poros maiores de 500 μm), evidenciados na figura 10 e na tabela 2.

Entre os planos ST e SM as diferenças de frequência (Figura 11) e volume de poros (Figura 12) são praticamente inexistentes, reforçando assim a ideia de que ocorre maior continuidade de poros na sucessão ST que em comparação à SM. Na Tabela 2 e figura 12b é possível observar maior valor do índice de continuidade de poros para a sucessão ST em relação à SM para camadas mais profundas, fazendo com que ocorra menos restrição do fluxo de água para as camadas de 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. Tais resultados corroboram com diversos autores (EHLERS, 1977; BALL et al., 1988; BENJAMIN, 1993; HILLEL, 2003; REICHERT et al., 2011) onde os mesmos atribuem à manutenção das galerias contínuas formadas pelas raízes das plantas ou pela fauna do solo à maior condutividade hidráulica, tanto em superfície quanto em camadas mais profundas, ligando diferentes horizontes.

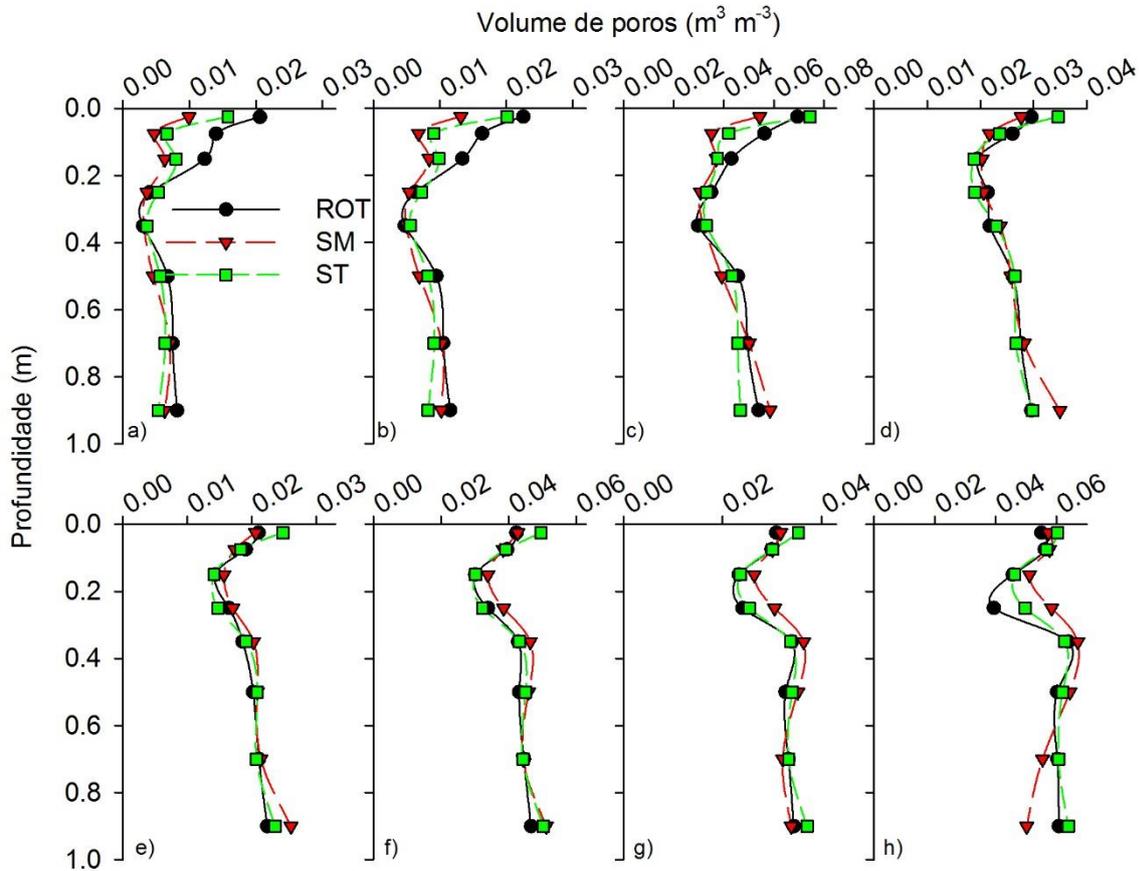
A continuidade de poros proporcionada pelo crescimento radicular das culturas, é refletida no fluxo de água do solo. A camada de 0,20-0,30 m pode ser considerada como a que apresentou as restrições mais severas ao fluxo de água no solo. A sucessão soja/trigo apresentou maior eficiência na formação de galerias contínuas (Figura 12). Benjamin (1993) cita que o maior fluxo de água em PD pode ser causada por uma maior continuidade dos poros ou por uma diferença na distribuição dos poros da classe de poros $>150\mu\text{m}$. Corroborando com os dados deste trabalho onde é verificada maior frequência de poros de maior diâmetro ($>1000\mu\text{m}$) para ST (sucessão soja/trigo) em comparação ao SM (sucessão soja/milho) (poros entre 500 e 1000 μm) (Figura 10d).

Figura 10 – Frequência acumulada (linha contínua) e frequência das classes de poros (linha tracejada) nas camadas de 0,00-0,05 (a); 0,05-0,10 (b); 0,10-0,20 (c); 0,20-0,30 (d); 0,30-0,40 (e); 0,40-0,60 (f); 0,60-0,80 (g); e 0,80-1,00 m (h). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM=sucessão das culturas soja/milho safrinha.



O plano de rotação milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo (ROT) apresentou maior volume de poros de maior tamanho, superiores a 100 μm , em superfície (Figura 11 a,b,c), a classe de poros entre 100-500 μm apresentou volume bastante expressivo, principalmente para a camada superior do solo. Castelini e Ventrella (2012) atribuem aos macroporos (375 μm) do solo a maior estabilidade quando comparado aos mesoporos (375 > r > 150 μm), quando os macroporos forem formados a partir do crescimento radicular das culturas e atividade biológica do solo.

Figura 11 – Volume de poros para as classes >1000 (a); 500-1000 (b); 100-500 (c); 50-100 (d); 30-50 (e); 9-30 (f); 3-9 (g); 0,2-3 μm (h) nas diferentes camadas de solo avaliadas. Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM= sucessão das culturas soja/milho safrinha.



Os poros formados pelas raízes das plantas apresentaram normalmente maior diâmetro, o que é representado pela maior frequência de poros de tamanho em torno de 1000 μm até a profundidade de 0,20 m (Figura 10) e maior volume de poros entre 100 e 500 μm (Figura 11c). Tais poros constituem a fração dos macroporos do solo (GRABLE; SIEME, 1968), aos quais apresentam menor capacidade de retenção de água (BHATTACHARYYA et al., 2006), e maior capacidade de infiltração (BONO et al., 2012), provocando maiores diferenças na fração da água gravitacional da curva de retenção de água do solo (BHATTACHARYYA et al., 2006).

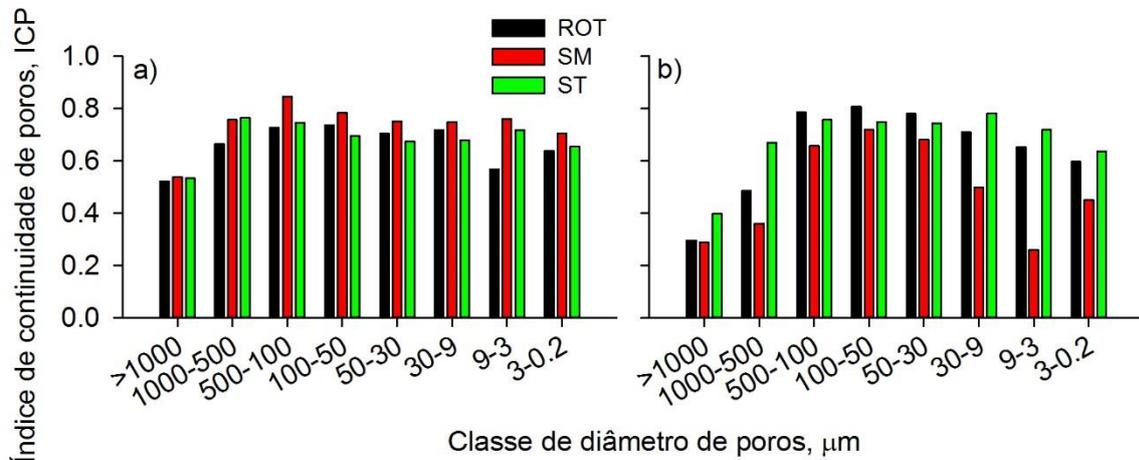
Tabela 2 – Índice de continuidade de poros para cada classe de poros entre as diferentes camadas comparadas para os planos de rotação avaliados.

Camadas comparadas (m)		Classes de poros (μm)							
Trat.	>1000	1000-500	500-100	100-50	50-30	30-9	9-3	3-0.2	
0,00-0,05/ 0,05-0,10	ROT	0,49	0,58	0,75	0,83	0,80	0,78	0,74	0,66
	SM	0,25	0,30	0,50	0,78	0,76	0,73	0,69	0,64
	ST	0,21	0,26	0,44	0,66	0,62	0,58	0,53	0,47
0,05-0,10/ 0,10-0,20	ROT	0,85	0,79	0,70	0,68	0,70	0,74	0,75	0,71
	SM	0,54	0,63	0,88	0,88	0,82	0,79	0,79	0,82
	ST	0,61	0,78	0,86	0,69	0,66	0,67	0,72	0,80
0,10-0,20/ 0,20-0,30	ROT	0,16	0,33	0,67	0,58	0,56	0,65	0,92	0,60
	SM	0,32	0,41	0,71	0,92	0,79	0,73	0,72	0,75
	ST	0,45	0,56	0,82	0,92	0,86	0,82	0,81	0,82
0,20-0,30/ 0,30-0,40	ROT	0,39	0,39	0,54	0,82	0,88	0,65	0,46	0,29
	SM	0,74	0,81	0,94	0,80	0,76	0,76	0,80	0,83
	ST	0,42	0,53	0,92	0,72	0,64	0,61	0,65	0,78
0,30-0,40/ 0,40-0,60	ROT	0,22	0,27	0,48	0,83	0,82	0,80	0,73	0,69
	SM	0,50	0,54	0,70	0,91	0,92	0,89	0,85	0,84
	ST	0,43	0,47	0,63	0,85	0,87	0,86	0,84	0,80
0,40-0,60/ 0,60-0,80	ROT	0,82	0,83	0,88	0,93	0,95	0,94	0,93	0,91
	SM	0,40	0,43	0,61	0,89	0,91	0,81	0,69	0,57
	ST	0,78	0,82	0,92	0,98	0,96	0,94	0,93	0,93
0,60-0,80/ 0,80-1,00	ROT	0,85	0,84	0,87	0,91	0,94	0,93	0,91	0,88
	SM	0,82	0,96	0,73	0,69	0,75	0,82	0,71	0,48
	ST	0,70	0,80	0,95	0,81	0,79	0,82	0,90	0,84
Media	ROT	0,54	0,58	0,70	0,80	0,81	0,78	0,78	0,68
	SM	0,51	0,58	0,72	0,84	0,82	0,79	0,75	0,70
	ST	0,52	0,60	0,79	0,80	0,77	0,76	0,77	0,78

*Valores próximos à 1 indicam maior semelhança no volume de poros entre as duas camadas avaliadas. Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM=sucessão das culturas soja/milho safrinha;

Apesar do plano de rotação ROT (tremoço/milho – aveia preta/soja – trigo/soja – trigo/soja) apresentar maior volume de poros, o mesmo apresentou baixo índice de continuidade de poros (0,16) entre algumas camadas do solo e, principalmente, para classes de poros maiores do solo (comparação ente 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) (Tabela 2). É natural que ocorram menores valores do índice de continuidade de poros para poros maiores do solo em relação à poros de menor diâmetro, visto que no processo de compactação, são os macroporos, formados pelo revolvimento mecânico do solo, que sofrem as primeiras alterações (BHATTACHARYYA et al., 2006; MORAES, 2013).

Figura 12 – Média do índice de continuidade de poros para as comparações até a camada de 0,40 m (a) e da camada de 0,30 até 1,00 m (b). Onde: ST=sucessão das culturas soja /trigo; ROT=rotação das culturas milho/tremoço-soja/aveia-soja/trigo-soja/trigo; SM=sucessão das culturas soja/milho safrinha.



*Valores próximos à 1 indicam maior semelhança no volume de poros entre as duas camadas avaliadas.

A maior continuidade de poros é vista para camadas mais superficiais (0,00-0,40 m) (Figura 12a) em relação à distribuição de poros para camadas inferiores (0,30-1,00 m) (Figura 12b). Apesar das camadas superficiais serem mais suscetíveis às operações e manejo do solo, existe desenvolvimento mais acentuado de raízes (Tabela 6 do item 3.5.2), fazendo com que ocorra maior quantidade de poros contínuos para as camadas superiores do solo.

4.6 CONCLUSÕES

O plantio direto (PD) apesar de apresentar menor amplitude de umidade nas curvas de retenção e de disponibilidade de água em algumas camadas, apresenta menos camadas limitantes ao fluxo de água no solo, assim como maiores valores do índice de continuidade de poros, principalmente para poros de maior tamanho ao longo do perfil em comparação ao preparo convencional.

A rotação de culturas apresentou maior volume e frequência de poros de maior diâmetro do solo quando comparado aos planos com sucessão de culturas incluindo valores maiores do índice de continuidade de poros para camadas mais profundas do solo.

O índice de continuidade de poros no solo (ICP) desenvolvido neste trabalho corrobora com os demais atributos do solo, medidos e estimados, podendo então ser utilizado de forma rápida e eficiente para estimativa da continuidade de poros do solo.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALL, B. C.; O'SULLIVAN, M. F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v. 39, p. 327-339, 1988.

BENJAMIN, J. G. Tillage effects on near-surface soil hydraulic properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 26, p. 277-288, 1993.

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 & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 129-140, 2006.

BONO, J. A. M. et al. Infiltração de água no solo em um Latossolo Vermelho da região sudoeste dos cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1845-1853, 2012.

CASTELLINI, M.; VENTRELLA, D. Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy, **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 47-56, 2012.

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, p. 159-168, 2016.

EHLERS, W. Measurement and calculation of hydraulic conductivity in horizons of tilled and untilled loess-derived soil, Germany. **Geoderma**, Amsterdam, v. 19, p. 293-306, 1977.

FRANCHINI, J. C. et al. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p. (Documentos, 327).

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

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. 1 ed. New York: Academic, 2003. 392p.

JUNIOR, S. D. S. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1854-1867, 2012.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**, São Paulo, v. 61. Edusp, 2012.

MARSHALL, T. J.; HOLMES, J. W. **Soil Physics**, (2. ed.) Cambridge University Press, Cambridge, 1988, 139p.

MORAES, M. T. **Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema plantio direto e sua relação com a rotação de culturas**. 2013. 205 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

- MORAES, M. T. et al. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 351-362, 2016.
- MUALEM, Y. A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v. 12, p. 513-522, 1976.
- MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield, **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 127, p. 85-91, 2013.
- 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.
- REICHERT, J. M. et al. **Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático**, KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L.C. Tópicos em Ciência do Solo, vol. 7, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 1-54, 2011.
- ROSEBERG, R. J.; McCOY, E. L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 54, p. 969-974, 1990.
- SORACCO, C. G. et al. Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1149-1155, 2012.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils, **Soil Science Society of America**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O plantio direto em comparação ao preparo convencional do solo proporciona maior estabilidade na produtividade de grãos de soja ao longo dos anos, principalmente em anos com ocorrência de déficit hídrico com maior severidade. Desde os primeiros centímetros do solo ocorrem condições adequadas ao crescimento radicular da cultura da soja no plantio direto.

A avaliação isolada de atributos físicos básicos do solo pode fornecer informações limitadas e errôneas da real condição de sua estrutura. Para tanto é importante o confronto de tais atributos e o entendimento de sua relação nos mais diferentes processos do solo. Para este trabalho, torna-se evidente que a condutividade hidráulica do solo, infiltração de água do solo e frequência de poros do solo foram eficazes para explicar de forma mais adequada a produtividade da soja.

O índice de continuidade de poros do solo (ICP) desenvolvido neste trabalho corrobora com os demais atributos do solo inclusive com a produtividade da cultura da soja podendo então ser utilizado de forma rápida e eficiente para estimativa da continuidade de poros do solo. Para tanto é importante o desenvolvimento de novos trabalhos a fim de correlacionar este índice com outros de maior uso na pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENJAMIN, J. G. Tillage effects on near-surface soil hydraulic properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 26, p. 277-288, 1993.
- 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 & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 129-140, 2006.
- DORAN, J. W.; ELLIOT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil microbial activity, nitrogen cycling, and long-term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 3-18, 1998.
- FRANCHINI, J. C. et al. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina, Embrapa Soja, 2009. 39p. (Documentos, 314).
- FRANCHINI, J. C. et al. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178-185, 2012.
- HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. New York: Academic, 2003. 392p.
- LÓPEZ-FANDO, C.; DORADO, J.; PARDO, M. T. Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 95, p. 266-276, 2007.
- LUZ, F. B. **Indicadores da qualidade do solo em função do uso da terra**, 2017. 75 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2017.
- MESSIGA, A. J. et al. Tillage practices of a clay loam soil affect soil aggregation and associated C and P concentrations, **Geoderma**, Amsterdam, v. 164, p. 225-231, 2011.
- MORAES, M. T. **Modelagem do crescimento radicular de milho e soja sujeito a estresses hídrico e mecânico em Latossolo**. 2017. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- MORAES, M. T. **Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema plantio direto e sua relação com a rotação de culturas**. 2013. 205 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- PITTELKOW, C. M. et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. **Nature**, Londres, v. 517, p. 365-368, 2015.
- REICHERT, J. M. et al. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. **Tópicos em Ciência do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 7, p. 1-54, 2011.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

TIECHER, T. **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no Sul do Brasil: contextualizando as atividades agropecuárias e os problemas erosivos** – Frederico Westphalen/RS: URI, 2015. 152 p.

Zhao, G. et al. Soil erosion, conservation, and ecoenvironment changes in the loess plateau of China. **Land Degradation & Development**, v. 24, p. 499-510, 2013.