

MAURÍCIO ANTÔNIO PILATTI

ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO SOB
SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO - 2018

MAURÍCIO ANTÔNIO PILATTI

**ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO SOB
SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Deonir Secco

COORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Junior
Prof^a. Dr^a. Araceli Ciotti de Marins

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Sistema de Bibliotecas - UNIOESTE)

P686a Pilatti, Maurício Antônio.
Atributos físicos de um latossolo argiloso sob sistemas de manejo do solo / Maurício Antônio Pilatti. --- Cascavel (PR), 2018.
56 f.:il.

Orientador: Prof. Dr. Deonir Secco
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Junior
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Araceli Ciotti de Marins. Dissertação
(Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2018, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura. Inclui Bibliografia

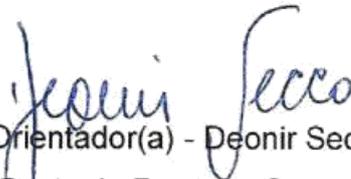
1. Física do solo. 2. Plantio direto. I. Secco, Deonir. II. Zanão Junior, Luiz Antônio. III. Marins, Araceli Ciotti de. IV. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. V. Título.

CDD 631.43

MAURÍCIO ANTÔNIO PILATTI

**“ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO ARGILOSO SOB
SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO”**

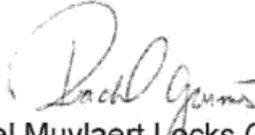
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biomassa e Culturas Energéticas, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:


Orientador(a) - Deonir Secco

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Luciene Kazue Tokura

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Rachel Muylaert Locks Guimarães

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Pato Branco (UTFPR)

Cascavel, 21 de fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós – Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura e à CAPES por ter possibilitado a realização do curso de pós-graduação.

No decorrer da pesquisa uma rede de amigos e colaboradores contribuiu à sua maneira para a concretização desta monografia, aos quais gostaria de citar o mais profundo agradecimento.

Aos meus pais Ivone Salete Cantele e Mario Francisco Asculi Pilatti, por sempre terem me apoiado e fazerem reconhecer o processo de ensino – aprendizagem, aos meus irmãos Taisa Pilatti, Leonardo Pilatti e Alex Pilatti, pelo incentivo.

Ao orientador professor Dr. Deonir Secco, pelos ensinamentos, amizade, paciência e auxílio durante o período do mestrado.

Há muitos mais a quem agradecer. A todos aqueles que, embora não nomeados, me apoiaram ao longo da caminhada, o meu reconhecimento e carinhoso muito obrigado.

LISTA DE SÍMBOLOS

- CV - Coeficiente de variação;
- Ds - Densidade do solo em (Mg m^{-3});
- Dms - Diferença mínima significativa;
- ET_o - Evapotranspiração da cultura;
- IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná;
- K_c - Coeficiente da cultura;
- Ksat - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1});
- LAFIS - Laboratório de física do solo;
- LVdf - Latossolo Vermelho Distroférrico típico;
- Macro - Macroporosidade do solo (%);
- SPDT - Sistema plantio direto tradicional;
- SPDE - Sistema plantio direto escarificado
- SPDG - Sistema plantio direto gessado
- SPDQ – Sistema plantio direto com qualidade;
- UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização textural da área experimental em estudo	15
Tabela 2. Histórico de safra dos últimos 4 anos da área experimental	16
Tabela 3. Coeficiente Kc em função do estágio de desenvolvimento da cultura da soja	21
Tabela 4. Valores médios da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro) e condutividade hidráulica saturada (Ksat) nas camadas de (0 – 0,10 m), (0,10 – 0,20 m) e (0,20 – 0,30 m) em função das espécies de cobertura do solo.....	29
Tabela 5. Valores médios da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro) e condutividade hidráulica saturada (Ksat) nas camadas de (0 – 0,10 m), (0,10 – 0,20 m) e (0,20 – 0,30 m) em função dos sistemas de manejo.....	31
Tabela 6. Produtividade da soja no período de 2016 e 2017 nos tratamentos	37

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Croqui com a distribuição dos tratamentos utilizados.....16
- Figura 2.** Precipitação pluviométrica, temperatura média e evapotranspiração (ET_o) da cultura no ciclo vegetativo da soja no período de outubro de 2016 a fevereiro de 2017.....18
- Figura 3.** Boxplot da Ds na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 - 0,30 m (C) para espécies de cobertura. 1(Aveia preta), 2(Aveia preta + nabo), 3(Crotalária juncea), 4(Feijão guandú), 5(Crotalária spectabilis), 6(Aveia preta + tremoço), 7(Aveia preta + ervilha).....21
- Figura 4.** Boxplot da Macro na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 - 0,30 m (C) para espécies de cobertura. 1(Aveia preta), 2(Aveia preta + nabo), 3(Crotalária juncea), 4(Feijão guandú), 5(Crotalária spectabilis), 6(Aveia preta + tremoço), 7(Aveia preta + ervilha).....22
- Figura 5.** Boxplot da Ksat na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 - 0,30 m (C) para espécies de cobertura. 1(Aveia preta), 2(Aveia preta + nabo), 3(Crotalária juncea), 4(Feijão guandú), 5(Crotalária spectabilis), 6(Aveia preta + tremoço), 7(Aveia preta + ervilha).....23
- Figura 6.** Boxplot da Ds na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 - 0,30 m (C) para os sistemas de manejo. 1(SPDE), 2(SP DG), 3(SPDT).....24
- Figura 7.** Boxplot da Macro na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 - 0,30 m (C) para os sistemas de manejo. 1(SPDE), 2(SP DG), 3(SPDT).....25
- Figura 8.** Boxplot da Ksat na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 - 0,30 m (C) para os sistemas de manejo. 1(SPDE), 2(SP DG), 3(SPDT).....26
- Figura 9.** Correlação linear múltipla do rendimento de grãos de soja em função da (Ds) e (Macro) (A) e (Macro) e (Ksat) (B).....36

PILATTI, Maurício Antônio. Me. UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Fevereiro de 2018. **Atributos físicos de um Latossolo argiloso sob sistemas de manejo do solo**. Orientador: Prof. Dr. Deonir Secco. Coorientadores: Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Junior e Prof^a. Dr^a. Araceli Ciotti de Marins.

RESUMO

As práticas de manejo do solo implicam em mudanças nas suas propriedades físico-hídricas. O conhecimento da taxa de infiltração da água no solo é de fundamental importância para definir as técnicas de conservação do solo. Este trabalho tem como objetivo avaliar a condutividade hidráulica do solo saturado em um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes culturas de cobertura e sistemas de manejo do solo. A área experimental localiza-se junto ao Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR, pólo regional de Santa Tereza do Oeste, Paraná, Brasil. Os tratamentos foram constituídos de quatro sistemas de manejo do solo, sendo estes: Sistema Plantio Direto Tradicional - SPDT, Sistema Plantio Direto Escarificado - SPDE -, Sistema Plantio Direto Gessado - SPDG e Sistema Plantio Direto com Qualidade – SPDQ, constituídos por espécies recuperadoras da estrutura do solo, sendo três espécies de verão: *Crotalaria juncea* (*Crotalaria juncea*), *Crotalaria spectabilis* (*Crotalaria spectabilis*), Feijão guandú (*Cajanus cajan*) e quatro espécies de inverno: Aveia preta (*Avena strigosa*), Aveia preta + Nabo forrageiro (*Avena strigosa* + *Raphanus sativus*), Aveia preta + Tremoço (*Avena strigosa* + *Lupinus albus*), Aveia preta + Ervilha forrageira (*Avena strigosa* + *Pisum sativum*). Os tratamentos foram distribuídos de modo inteiramente casualizados com dez parcelas de 20 x 25 m. Foram coletadas amostras de solo indeformadas com os anéis volumétricos para a determinação dos seguintes atributos: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade e condutividade hidráulica saturada. Para a condutividade hidráulica do solo saturado foi utilizado o permeâmetro de carga constante. Para a comparação de médias de tratamentos, foi utilizado o teste de Tukey a 5% de significância que foram executadas através do programa SISVAR versão 5.6. Para a geração dos modelos e gráficos de regressão, utilizou o programa estatístico R(R CORE TEAM, 2016). Houve maior correlação entre macro e ksat nas espécies de cobertura do solo. Na camada de 0,20 – 0,30 m os valores da ksat foram maiores devido aos maiores volumes de macro. A Ds, macro e ksat apresentaram maior influencia nas camadas superiores no SPD escarificado e SPD gessado. A produtividade da soja foi influenciada pela Ds. Os efeitos benéficos da escarificação do solo em área sob sistema plantio direto não foram superiores a 12 meses.

Palavras-chave: densidade do solo; condutividade hidráulica saturada; plantio direto.

PILATTI, Maurício Antônio. Me. UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. February. **Physical attributes of a loamy Haplorthox under soil management systems.** Adviser: Prof. Dr. Deonir Secco. Co-advisers: Prof. Dr. Luiz Antônio Zanão Junior and Prof^a. Dr^a. Araceli Ciotti de Marins.

ABSTRACT

Soil management practices imply changes in their physical properties hydropower. The knowledge of the rate of water infiltration in the soil is of fundamental importance to define the soil conservation techniques. This work aims to evaluate the availability of water in Haplorthox subjected to different cultures and soil management systems. The experiment was conducted in the experimental area of the Agronomic Institute of Paraná - IAPAR, regional center of Santa Tereza do Oeste, Paraná, Brazil. The experiment consisted of four soil management practices: Traditional Tillage System - SPDT - Scarified Tillage System - SPDE - Gypsum Agricultural Tillage System - SPDG - and Tillage System with Quality - SPDQ. The treatments were distributed in a manner entirely blocks in 12 plots of 20 m x 25 m. The Reclaimers species of soil structure are being deployed in no-tillage system, and consists of three species Reclaimers: *Crotalaria juncea* (*Crotalaria juncea*), *Crotalaria spectabilis* (*Crotalaria spectabilis*), guandú Bean (*Cajanus he*) and four species of winter: black Oats (*Avena strigosa*), Black Oats + forage Turnips (*Avena strigosa* + *Raphanus sativus*), black Oats + Lupin Oats (*Avena strigosa* + *Lupinus albus*), black Oats + field pea (*Avena strigosa* + *Pisum sativum*). Will be collected undisturbed soil samples with volumetric rings for the determination of the following attributes: particle size, soil density, total porosity, macro-and micropores. Laboratory evaluation of the hydraulic conductivity of the saturated soil will be used for the constant Permeâmetro. For the comparison of means of treatments, the Tukey test will be used at 5% of significance, which will be performed through the SISVAR version 5.3 program. For the generation of regression models and graphs, the statistical program R (R CORE TEAM, 2016) will be used. There was a higher correlation between macro and ksat in the soil cover species. In the 0.20 - 0.30 m layer the ksat values were higher due to higher macro volumes. The Ds, macro and ksat presented greater influence on the upper layers in the SPD and scarified SPD. Soya yield was influenced by Ds. The beneficial effects of soil scarification under no-tillage system were not higher than 12 months

Keywords: soil density; saturated hydraulic conductivity; no tillage.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS	iii
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.1.1. Objetivo Geral.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Indicadores de qualidade do solo.....	3
2.2. Sistemas de manejo do solo.....	4
2.2.1. Sistema plantio direto.....	4
2.2.2. Sistema plantio direto gessado.....	5
2.2.3. Sistema plantio direto escarificado.....	6
2.3. Plantas de cobertura.....	6
2.3.1. Plantas de cobertura e alterações em propriedades físico-hídricas do solo.....	9
2.4. Retenção e disponibilidade de água.....	10
2.5. Condutividade hidráulica do solo saturado.....	12
2.6. Demanda de água na cultura da soja.....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Localização e descrição da área em estudo.....	15
3.2. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos.....	16
3.2.1. Condução das culturas estudadas.....	17
3.3. Avaliações Climatológicas.....	17
3.4. Avaliações e determinações analíticas.....	18
3.5. Análise estatística.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1. Atributos físicos do solo.....	23
4.1.1. Espécies de cobertura do solo.....	23
4.1.2. Sistemas de manejo do solo.....	33
4.3. Rendimentos de grãos de soja.....	36
7. CONCLUSÕES	38
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

O solo é um dos mais importantes recursos naturais de nosso planeta e a sua conservação constitui um aspecto de grande relevância para uma produção mais sustentável. A disponibilidade de água é um dos principais fatores físicos que influenciam diretamente o desenvolvimento e a produção dos cultivos agrícolas (REICHERT et al., 2011; SERAFIM et al., 2013).

O solo possibilita armazenamento, retenção e disponibilidade de água conforme a ocorrência de chuvas. Entretanto, o fornecimento de água do solo para a planta é resultante de variáveis relacionadas a fatores físicos e químicos e, entre as propriedades físicas do solo, a exemplo da granulometria, estrutura e matéria orgânica, bem como a cobertura vegetal do solo, estão entre os parâmetros mais sensíveis tanto ao armazenamento quanto a disponibilidade de água no solo (NEVES et al., 2007).

A estrutura do solo é uma importante propriedade do solo, pois afeta os índices de retenção e transporte de água, gases e nutrientes no solo (ZHAO et al., 2016). Definida como o arranjo ou organização das partículas primárias do solo, ou seja, das frações argila, silte e areia, que formam os agregados e o sistema poroso, e matéria orgânica tem papel fundamental neste processo (CORRÊA et al., 2009).

A matéria orgânica é um dos principais agentes de formação e estabilização dos agregados. A sua influencia sobre as características do solo e a sensibilidade às práticas de manejo é umas das maiores causas de deterioração da estrutura do solo, afetando indiretamente as demais características físicas como densidade, porosidade, aeração, capacidade de retenção e infiltração de água (PACHECO; CANTALICE, 2011).

A disponibilidade de água às plantas não está ligada de forma direta à capacidade de armazenamento de água no solo. A armazenagem depende de aspectos como o espaço poroso e a profundidade do solo, enquanto a disponibilidade às plantas depende de fatores intrínsecos do solo e da capacidade das plantas em extrair água nos diferentes teores de umidade e níveis de energia de retenção (PETRY et al., 2007).

O desenvolvimento sustentável tem, por objetivo, a produção combinada com conservação dos recursos naturais, como a água e o solo, mediante adoção de

práticas conservacionistas dentre as quais se destaca o cultivo de espécies de plantas de cobertura que protegem o solo da redução da perda d'água por evaporação e também do impacto direto das gotas da chuva reduzindo o escoamento superficial e, conseqüentemente, o processo erosivo. Outro aspecto conservacionista relacionado ao uso de plantas de cobertura é a provável melhora dos atributos químicos e físicos do solo (STONE; SILVEIRA, 2001).

No Brasil, a abrangência dos Latossolos, ordem de solos de grande importância devido ao seu potencial produtivo, é extensa. Estes solos são muito intemperizados e com elevada estabilidade de agregados, decorrente da atuação dos óxidos de ferro e alumínio presentes na fração argila, que são responsáveis pela estruturação bem desenvolvida e alto volume de microporos.

Portanto, torna-se necessário verificar quais métodos avaliariam melhor a qualidade físico-hídrica desses solos para o estabelecimento de sistemas de manejo que objetivem a sustentabilidade agrícola.

O monitoramento da qualidade física do solo por meio dos atributos físicos é importante para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Esse monitoramento pode ser feito por meio de experimentos de longa duração sob sistemas de manejo e rotação de culturas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf) submetido a diferentes plantas de cobertura e sistema de manejo de solo e seus reflexos no rendimento de grãos de soja.

1.1.2. Objetivos Específicos

Identificar as plantas de cobertura e sistemas de manejo que apresentam características físico-hídrica positiva quanto ao rendimento de grãos de soja na região Oeste do Paraná.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Indicadores de qualidade do solo

O solo constitui um dos requisitos básicos tanto para as necessidades humanas, como para a conservação dos ecossistemas, sustentando campos, integrando a biodiversidade e acolhendo a água das chuvas (LEPSCH, 2010).

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade de um tipo específico de solo desempenhar suas funções, dentro dos limites dos ecossistemas naturais ou manejados, para sustentar a produtividade vegetal, animal e a saúde humana, proporcionando habitação e mantendo ou melhorando a qualidade da água e do ar (KARLEN et al., 1997). A deterioração de sua qualidade implica na perda de tais funções, agindo prejudicialmente sobre o fornecimento de suporte físico, água e nutrientes necessários para o crescimento das plantas.

No solo, existem diversas relações entre os atributos físicos, químicos e biológicos. Neste contexto, a qualidade do solo tem como indicadores básicos as suas características físicas (textura, temperatura, densidade do solo, água do solo e sua retenção), carbono orgânico total, características químicas e biomassa microbiana (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

Conforme Carvalho et al. (2004), uma das grandes preocupações dos cientistas que trabalham com física do solo é encontrar uma única propriedade capaz de caracterizar a maior parte das informações referentes a determinada classe de solo que está estudando.

A densidade do solo (D_s) é um dos atributos físicos mais influenciados pela degradação estrutural do solo, sendo afetada por cultivos que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e volume dos poros (KLEIN; LIBARDI, 2002). Esse processo altera parâmetros físicos responsáveis pelo desenvolvimento das plantas, tais como: porosidade de aeração, retenção de água no solo, disponibilidade de água às plantas e resistência do solo à penetração (TORMENA et al., 1998).

A estrutura do solo define a geometria de poros, que influencia decisivamente a movimentação da água e do ar no perfil do solo, pois a macroporosidade (macro) é responsável pela livre circulação da água e ar no solo e a microporosidade (micro) pela retenção da água.

Logo, a avaliação da qualidade física do solo pode ser feita diretamente pela análise da porosidade do solo, de modo que sua degradação ocasiona redução de volume de macroporos e mudanças na continuidade e distribuição dos poros (DEXTER, 2004).

2.2. Sistemas de manejo do solo

O solo é a base fundamental dos sistemas de produção agrícola, atua como substrato físico e nutritivo para as plantas, garantindo a disponibilidade de água, ar e demais elementos necessários ao crescimento (MAZOYER; ROUDART; 2010).

As práticas de manejo, especialmente os sistemas de preparo do solo, têm por objetivo, fornecer condições físicas adequadas para o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas. Entretanto, dependendo do solo, clima e da cultura, os sistemas de manejo podem proporcionar degradação da qualidade física do solo (TORMENA et al., 2004). Sendo assim, o sistema de cultivo é uma das práticas mais importantes que afetam as propriedades físicas e hídricas do solo (JABRO et al., 2009). De acordo com Cunha et al. (2011), os sistemas de manejo do solo mais utilizados são o preparo convencional, o cultivo mínimo e o plantio direto.

2.2.1. Sistema plantio direto

O sistema plantio direto (SPD), foi introduzido no início da década de setenta na região sul do Brasil, tinha como objetivo apresentar um método alternativo de manejo de solo para controlar a erosão em áreas submetidas a sucessivos cultivos.

O plantio direto ganhou mais visibilidade há alguns anos, por proporcionar economia dos custos de produção através da diminuição do tempo de preparo e semeadura, além de contribuir para o melhor ciclo de produtividade e proporcionando a conservação do solo (CRUZ; ALVARENGA; PEREIRA FILHO, 2006).

O plantio direto é um sistema de manejo em que a semeadura das culturas é feita sem o revolvimento do solo, mantendo os restos culturais dos ciclos anteriores na superfície. O solo é revolvido apenas no sulco onde são depositadas sementes e fertilizantes. Quando utilizado de forma correta, esse sistema é eficaz na proteção

da superfície do solo (CAPITAL DE CAMPO, 2012).

Geralmente o plantio direto apresenta na camada subsuperficial, maiores valores de Ds e menores de macro e porosidade total. Isto decorre, principalmente, do arranjo natural do solo, quando não é mobilizado, e da pressão provocada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas. Porém com o tempo, a deposição superficial de resíduos vegetais, resultando em um teor mais elevado de matéria orgânica, podendo contribuir para uma redução da Ds e um aumento no volume de poros. Conseqüentemente, o tempo de adoção do plantio direto vai definir a qualidade do solo, bem com as melhorias nos seus atributos físicos (GENNARO, 2011).

Conforme o estudo de Heid, Vitorino e Tirloni (2009), em um Latossolo Vermelho Distroférrico sob diferentes usos agrícolas, com plantio direto e convencional, observaram-se que a estabilidade dos agregados foi modificada ao longo dos anos de uso agrícola, porém com o uso do plantio direto parte dessa estabilidade pode ser recuperada. Segundo os autores um dos fatores influenciados pelo estado de agregação do solo for à retenção e armazenamento da água.

2.2.2. Sistema plantio direto gessado

Os solos brasileiros apresentam características químicas naturais, desfavoráveis ao pleno desenvolvimento das culturas, como os baixos teores de cátions básicos e elevada saturação por alumínio, caracterizando-se como um dos maiores importadores mundiais de fertilizantes fosfatados, potássio, nitrogênio e formulados (NPK) (SILVA, 2016).

Soma-se a isso o fato de que com a adoção do sistema de plantio direto, o calcário que anteriormente costumava ser incorporado ao solo passou a ser aplicado em superfície e, devido à sua baixa solubilidade, inúmeras lavouras começaram a apresentar toxidez por alumínio, assim como deficiência de cálcio nas camadas subsuperficiais, favorecendo a formação de uma “barreira química” ao desenvolvimento normal de raízes em profundidade, com diminuição da capacidade das plantas em absorver água, o que afeta negativamente a produtividade das culturas (LOPES et al., 2004).

Assim, surge a necessidade do aprimoramento de técnicas que possuam ação complementar àquela promovida pela calagem. Segundo Rosa Junior et al. (2006) a gessagem poderá atuar como condicionador das camadas inferiores do solo, especialmente das estruturas, contribuindo para a agregação e melhoria.

De acordo Costa et al. (2007), outros atributos físicos como densidade do solo e porosidade, poderão ser alterados pela combinação do sistema de manejo e a gessagem agrícola. Bonini e Alves (2012), avaliando a qualidade física de um Latossolo vermelho em recuperação, há 17 anos utilizando-se adubos verdes, calcário, gesso e pastagem, verificaram que o tratamento com feijão – guandu e braquiária com calagem e gesso proporcionou menor resistência do solo à penetração e menor densidade do solo numa profundidade até 0,30 m.

2.2.3. Sistema plantio direto escarificado

O uso inadequado de um sistema de manejo pode ocasionar compactação superficial ou subsuperficial do solo, induzindo a um processo de alteração das características físicas, químicas e biológicas. De acordo com Tormena et al. (2007), a compactação do solo modifica a distribuição dos poros, refletindo na qualidade física do solo. Desse modo, a utilização de escarificadores na técnica denominada Sistema Plantio Direto Escarificado (SPDE), é uma alternativa aos problemas de compactação atuais.

A eficiência da escarificação na redução das camadas compactadas, melhora as propriedades físicas do solo, porém os efeitos persistem por curto período. Além disso, a escarificação nem sempre favorece aumento na produtividade (KLEIN; CAMARA, 2007). Segundo Nunes et al. (2014), avaliando os efeitos positivos da escarificação nas propriedades físicas do solo, não foram perceptíveis por mais de 18 meses. Os efeitos da mobilização é temporário, pois a reconsolidação do solo aumenta com o volume cumulativo das precipitações (BUSSCHER; BAUER; FREDERICK, 2002).

2.3. Plantas de cobertura

A recuperação das propriedades físicas do solo pode ser feita através de métodos mecânicos, com máquinas e implementos agrícolas; assim como por

métodos denominados por biológicos, devido serem utilizadas plantas de cobertura.

As plantas de cobertura do solo entram no processo de rotação proporcionando efeitos positivos, como supressão de plantas espontâneas, conservação da umidade do solo, acúmulo de nutrientes na superfície e controle da erosão (SANTOS; REIS, 2010). A habilidade dessas plantas em melhorar a multifuncionalidade de sistemas agrícolas, principalmente em sistemas conservacionistas tem chamado atenção de novas pesquisas (BLANCO – CAQUI et al., 2015).

Estas plantas, também denominadas por adubos verdes, plantas protetoras e melhoradoras do solo ou simplesmente plantas de cobertura, que se caracterizam pela boa capacidade de produção de biomassa, e através da manutenção dos resíduos culturais em superfície, também é possível promover maior acúmulo de matéria orgânica no solo, ciclagem de nutrientes e melhorar as condições físicas do solo e a estrutura dos agregados do solo (DONEDA, 2010).

A princípio qualquer espécie vegetal pode ser utilizada como planta de cobertura do solo (SANTOS; SEDIYAMA; PEDROSA, 2013), porém, considerando-se as características desejadas, algumas espécies devem ser prioritárias para integrar um sistema de produção, destacando-se as características: sistema radicular profundo para facilitar a reciclagem de nutrientes; elevada produção de massa seca, tanto da parte aérea quanto radicular; velocidade de crescimento e de cobertura do solo; ser agressiva e rústica; possuir baixo custo de sementes ou apresentar facilidade em sua produção; possuir efeitos alelopáticos e/ou supressores em relação às plantas não cultivadas (FERREIRA, 2009).

Segundo Capeche, Macedo e Melo (2008), e Rossi, Valle e Valle (2002), os benefícios das plantas de cobertura podem ser ainda complementados, como na manutenção de elevadas taxas de infiltração de água pelo efeito combinado do sistema radicular e da cobertura vegetal; promoverem grande e contínuo aporte de massa vegetal ao solo, de maneira a manter, ou até mesmo elevar o teor de matéria orgânica; atenuarem a amplitude térmica e diminuírem a evaporação, e assim apresentando múltiplos usos na propriedade rural.

As plantas da família *Poaceae* (gramíneas), apresentam um rápido desenvolvimento inicial, sendo um dos aspectos relevantes à escolha de plantas de cobertura que se desenvolvam e cubram o solo o mais rápido possível.

O maior conteúdo de lignina, presente nos restos culturas das gramíneas, faz com que se mantenham mais tempo cobrindo o solo, promovendo assim uma melhor estruturação e estabilidade dos agregados do solo (GUIMARÃES et al., 2006). As raízes também estão ligadas direta ou indiretamente com a estrutura e estabilidade do solo, as gramíneas embora não apresentem um sistema radicular que se desenvolva em profundidade, possuem sistema radicular abundante possibilitando a estruturação do solo e diminuindo assim a suscetibilidade do solo à erosão (WOLSCHICK, 2014).

Conforme Bortolini, Silva e Argenta (2000), a aveia preta é bastante aceita, em função da fácil aquisição de sementes e instalação do cultivo, rápido crescimento inicial e grande rendimento de fitomassa.

As *Poaceae* proporcionam rapidamente melhorias na qualidade física do solo, aumento na porosidade, maior estabilidade de agregados (KONDO et al., 2012), melhor reestruturação da camada arável (FERRERIA; TAVARES; 2010), além de sua periódica renovação.

As plantas da família *Fabaceae* (leguminosas), são caracterizadas por apresentarem maior estabilidade dos agregados em menor período de tempo e maior produtividade de biomassa (MATHEIS; AZEVEDO; FILHO, 2006). Apresentam rápida disponibilidade de nutrientes a cultura em sucessão em função da baixa relação carbono/nitrogênio, o que faz com que elas se decomponham rapidamente.

Devido à capacidade de proporcionar boa cobertura ao solo, a exploração que o sistema radicular promove nas camadas do solo, as leguminosas podem servir como boa alternativa para auxiliar na recuperação de áreas degradadas.

Uma opção de leguminosa é a crotalária juncea com grande capacidade de fixação de nitrogênio, com crescimento rápido, capaz de crescer em camadas de solo compactado e desenvolver maior número de raízes contribuindo assim para a formação de bioporos e melhorando as condições físicas do solo (FOLONI et al., 2006).

O feijão guandú pertence a família das leguminosas, apresenta sistema radicular agressivo, com bom potencial na absorção de água e possibilidade de reciclagem de nutrientes das camadas mais profundas (TEIXEIRA et al., 2005). Sendo que Genro Júnior (2002), observou em solo argiloso, tendência de aumento da ksat após a inclusão de guandu em esquemas de rotação de culturas com milho,

soja e trigo.

2.3.1. Plantas de cobertura e alterações em propriedades físico-hídricas do solo

As plantas de cobertura influenciam diretamente nas condições físicas do solo, por serem rústicas e capazes de se desenvolverem e proporcionar um melhoramento e reestruturação dos atributos químicos e físicos do solo, e também pelo acúmulo de biomassa na superfície ao longo dos anos (SILVA et al., 2005).

Os benefícios proporcionados pelas plantas de cobertura no solo podem ser expressos através da avaliação de alguns parâmetros do mesmo, como a densidade, porosidade, macro e taxa de infiltração.

A Ds tem sido o atributo mais utilizado para observar a ocorrência de camadas compactadas no perfil do solo e, é inversamente proporcional a porosidade do solo (DRESCHER, 2011). Tendo em vista que a compactação do solo tem afetado muitas áreas sob plantio direto (KAISER, 2010), a utilização de plantas de cobertura pode aliviar a compactação e reduzir a susceptibilidade do solo à compactação. O resultado deste benefício irá depender da espécie cultivada, do crescimento da cultura, das características e aporte de biomassa, principalmente das raízes.

Entre as diferentes propriedades do solo que podem ser utilizadas para avaliar a estrutura do solo, a infiltração de água é umas das propriedades mais importantes, visto que integra diferentes fatores, como a distribuição do tamanho e continuidade de poros (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003).

O solo é composto por partículas sólidas, sendo que o arranjo destas partículas originam-se espaços de diferentes tamanhos, denominados poros. Segundo Curi et al. (2013), a porosidade do solo corresponde ao volume do solo não ocupado por partículas sólidas, incluindo todo o espaço poroso ocupado pelo ar e água. Este volume resulta na porosidade total do solo, subdividida em macroporos e microporos.

Segundo Lima e Lima (2009), os macroporos são responsáveis pela aeração, movimentação de água e penetração de raízes, e os microporos pela retenção de água no solo. Para Reinert e Reichert (2008), a porosidade é responsável por um

conjunto de fenômenos e desenvolve uma série de mecanismo de importância na física de solos, tais como a retenção e fluxo de água e ar.

A porosidade do solo e a relação entre a macro e microporos são fatores importantes para a avaliação da estrutura do solo. Espécies com raízes profundas, com alta densidade e que possuem capacidade de romper camadas compactadas são preferíveis por formar bioporos, os quais são responsáveis por aumentar a k_{sat} e reduzir o potencial de gerar escoamento (YU et al., 2016).

Segundo Beutler e Centurion (2012), a quantidade de macroporos influencia no crescimento das raízes e na absorção de água e nutrientes, e sua redução induz ao crescimento lateral de raízes, que diminuem seu diâmetro a fim de penetrarem nos poros menores.

As plantas de cobertura, juntamente com o manejo conservacionista, agem de forma a reverter os processos de compactação e degradação do solo, modificando suas propriedades físicas, químicas e biológicas, melhorando as condições estruturais do solo e mantendo o solo produtivo. Um solo bem estruturado e manejado garante sucesso da produtividade, propiciando o desenvolvimento das raízes das culturas, devido a melhor aeração e capacidade de infiltração e armazenamento de água no perfil do solo (CARVALHO; DECHEN; DUFRANC, 2004). O acúmulo de material orgânico no solo promove o aumento da infiltração e o armazenamento de água, garantindo a capacidade de estabelecimento das culturas, bem como o seu desenvolvimento.

2.4. Retenção e disponibilidade de água

O conhecimento do movimento da água no perfil de um solo é de fundamental importância para a solução de problemas envolvendo armazenamento e transporte de água e nutrientes, bem como o escoamento superficial e o controle da infiltração (PAIXÃO et al., 2004).

A infiltração da água no solo é um processo dinâmico da entrada de água no solo pela camada superficial, que pela ação da gravidade desce até atingir uma barreira impermeável, formando os lençóis de água (GONDIM et al., 2010). Inicialmente, seu valor é elevado, diminuindo com o tempo, até se tornar constante no momento em que o solo ficar saturado.

O manejo do solo tem forte influência na infiltração, geralmente o

revolvimento do solo aumenta a entrada de água no perfil devido a maior rugosidade na superfície e menor escoamento. O não revolvimento do solo, no sistema de plantio direto, tende a ocasionar compactação do solo pelo tráfego intensivo de máquinas, o que pode diminuir consideravelmente a infiltração. As taxas de infiltração variam de acordo com o uso do solo (MANCUSO et al., 2014). Portanto, o escoamento, transporte de sedimentos e o armazenamento de água do solo são fenômenos complexos, que envolvem vários processos interdependentes.

Brandão et al. (2006), salientam que a infiltração depende, em maior ou menor grau, de fatores relacionados ao solo, que incluem a textura do solo, massa específica, teor de matéria orgânica, porosidade e tipo de argila, além do manejo, preparo e das características da própria precipitação (capacidade de retenção de água e a k_{sat}).

Santos e Pereira (2013), evidenciam que a textura e a estrutura são propriedades determinantes na movimentação de água no perfil do solo, uma vez que determinam a quantidade e disposição dos poros.

A distribuição dos mesoporos, responsáveis pela retenção de água, em plantio direto determina menor energia de retenção de água as plantas que em preparo convencional. Esta tendência pode ocorrer devido ao maior teor de matéria orgânica, a qual proporciona maior agregação ao solo, mantendo uma estrutura mais estável e agregados mais resistentes possibilitando, a redução da densidade do solo (RAZAFIMBELO et al., 2008)

O relevo também pode influenciar esta dinâmica, uma vez que áreas planas tendem a absorver a maior parte da água, e áreas inclinadas tendem a propiciar maior escoamento e baixas taxas de infiltração. A presença de restos culturais é de fundamental importância no processo de percepção da precipitação, evitando o processo de escoamento.

Dalmago et al. (2009), observaram que a retenção de água em solo (Argissolo Vermelho) sob sistema plantio direto é maior do que no preparo convencional, especialmente nas camadas superficiais, bem como a disponibilidade de água as plantas. Segundo Fagundes et al. (2012), este processo ocorre porque o potencial total de água da chuva ou irrigação, na superfície do solo é aproximadamente nulo e a água no perfil do solo apresenta um potencial negativo, sendo que quanto mais negativo este potencial mais seco estará o solo.

2.5. Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica saturada do solo representa um parâmetro chave para análise da intensidade do deslocamento da água no solo. Essa propriedade representa o volume de um fluido que passa por um corpo sólido em um determinado tempo (LIBARDI, 2000). No caso do sistema solo, o fluido é a solução tratada aqui simplesmente como água do solo e o corpo sólido são as partículas minerais e orgânicas. Portanto, uma vez alterada a distribuição e o arranjo dos poros do solo, a k_{sat} também varia (BAGARELLO, 1997).

A forte associação entre a macro e a K_{sat} faz com que pequenas mudanças no valor daquela alterem consideravelmente os valores dessa, tendo em vista que a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro (REICHERT et al., 2007).

Segundo Mesquita e Moraes (2004), a geometria e a continuidade dos poros preenchidos com água são fatores determinantes da K_{sat} , o que caracteriza sua maior dependência da estrutura do que da textura do solo. As práticas culturais que alteram a estrutura do solo influenciam diretamente na K_{sat} , mais até do que nos processos de gênese e formação da estrutura desses solos.

Em um Latossolo Vermelho-Amarelo, Silva et al. (2010), constatou diferenças importantes na camada de 2,0 a 8,0 cm para a K_{sat} quando o solo foi manejado sob plantio direto e preparo convencional. Foi verificado pelos autores que pequenas diferenças na macro foram acompanhadas por elevadas diferenças de valores de K_{sat} , cujos valores foram de 127 mm h^{-1} na área de plantio direto e de 227 mm h^{-1} na área de preparo convencional. Segundo Tavares-Filho et al. (2006), a K_{sat} do solo escarificado foi 1,67 vezes maior que a do solo sob plantio direto, indicando que, após a escarificação, ocorreu uma elevação de 52 mm h^{-1} na k_{sat} em relação ao solo sob plantio direto há 20 anos.

Por outro lado, Vieira e Klein (2007), obtiveram menores valores de K_{sat} para o sistema de preparo convencional do solo em relação ao plantio direto, estando essa redução relacionada ao comprometimento da continuidade dos poros e a menor eficiência na transmissão de água em preparo convencional.

2.6. Demanda de água na cultura da soja

A produtividade das culturas agrícolas é limitada pela água e depende da quantidade deste recurso e da eficiência do seu uso pelo organismo. A produção da soja esta intimamente ligada às condições climáticas anuais variando a produtividade em função da disponibilidade de chuvas no ano (MORANDO et al., 2014).

Segundo a Embrapa (2009), a água constitui aproximadamente 90% do peso da cultura da soja, atuando em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos. A disponibilidade da água é importante, principalmente, em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. A semente de soja necessita absorver, no mínimo, 50% de seu peso em água para assegurar uma boa germinação. Nesta fase, o conteúdo de água no solo não deve exceder a 85% do total de água disponível nem ser inferior a 50%.

Borrmann (2009), em estudos sobre as respostas fisiológicas da cultura da soja sob déficit hídrico, afirma que na fase de enchimento dos grãos na soja o estresse hídrico pode causar redução no tamanho e peso dos grãos além da retenção da cor verde, pois à falta de água prejudica a atividade das enzimas responsáveis pela degradação da clorofila, o que resulta em alto teor de grãos verdes.

Segundo Camara (2009), a expansão do sistema radicular é influenciada pelas propriedades físicas do solo relacionadas à disponibilidade hídrica. Como a soja requer grandes quantidades de águas para a produção sendo que para cada quilograma de matéria seca produzida através da fotossíntese, a soja necessita transpirar cerca de 580 Kg de água.

O uso total da água pelas plantas está relacionado com a transpiração e evaporação da água no solo. A evapotranspiração é um dos principais fatores da relação solo, planta, água e atmosfera, pois o padrão de água utilizado pela cultura é diretamente relacionado ao desenvolvimento de estresse nas plantas. A ET_0 da cultura da soja é estudada nos mais diversos climas do país sendo de extrema importância seu estudo para amenizar o efeito de déficit hídrico nas regiões produtoras. Fietz e Rangel (2008) estudando a época mais adequada de semeadura da soja para a região de Dourados - MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo, observaram a menor deficiência hídrica nas semeaduras de novembro e, principalmente, dezembro deve-se aos estádios da fase reprodutiva da soja, com

maior exigência hídrica, ocorrerem em fevereiro e março, meses de menor demanda de água para o processo de transpiração que dezembro e janeiro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e descrição da área em estudo

O experimento foi desenvolvido na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR polo regional de Santa Tereza do Oeste, Paraná.

O relevo local é suavemente ondulado com declividade média de 3 % no sentido sudoeste – nordeste e, 8 % no sentido sudeste – nordeste em relação ao norte geográfico. O solo da área experimental é classificado em Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf), de textura argilosa (EMBRAPA, 2013).

Na Tabela 1 apresenta-se a caracterização textural do solo da área experimental de acordo a norma da Embrapa 2013.

Tabela 1. Caracterização textural da área experimental em estudo

Profundidade (m)	Granulometria			Classe Textural
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	
0,0 - 0,1	4,1	37,4	58,5	Argilosa
0,1 - 0,2	2,8	38,3	58,9	
0,2 - 0,3	2,2	38,5	59,3	
Média	3,03	38,07	58,9	

/A região apresenta coordenadas geográficas: longitude W 53 ° 29 '37 " e latitude S 24° 50 '42 ", altitude de 750 metros. A caracterização climática da região segundo a classificação de Koppen é mesotérmico subtropical úmido, com precipitação média anual de 1840 mm e umidade relativa do ar entre 75 a 80 % (IAPAR, 2000).

As avaliações do presente estudo foram realizadas em área de ensaios experimentais do instituto, anteriormente utilizada para cultivos agrícolas, no sistema plantio direto, a pelo menos 18 anos. Na Tabela 2 são apresentados dados referentes aos últimos quatro anos de safras e culturas.

Tabela 2. Histórico de safra dos últimos 4 anos da área experimental

Safra	Cultura de Verão	Cultura de Inverno
2014	Espécies de verão + Soja	AP – (AP + Nabo) – (AP + Tremoço) – (AP + Ervilha)
2015	Espécies de verão + Soja	AP – (AP + Nabo) – (AP + Tremoço) – (AP + Ervilha)
2016	Espécies de verão + Soja	Crambe
2017	Espécies de verão + Soja	Crambe

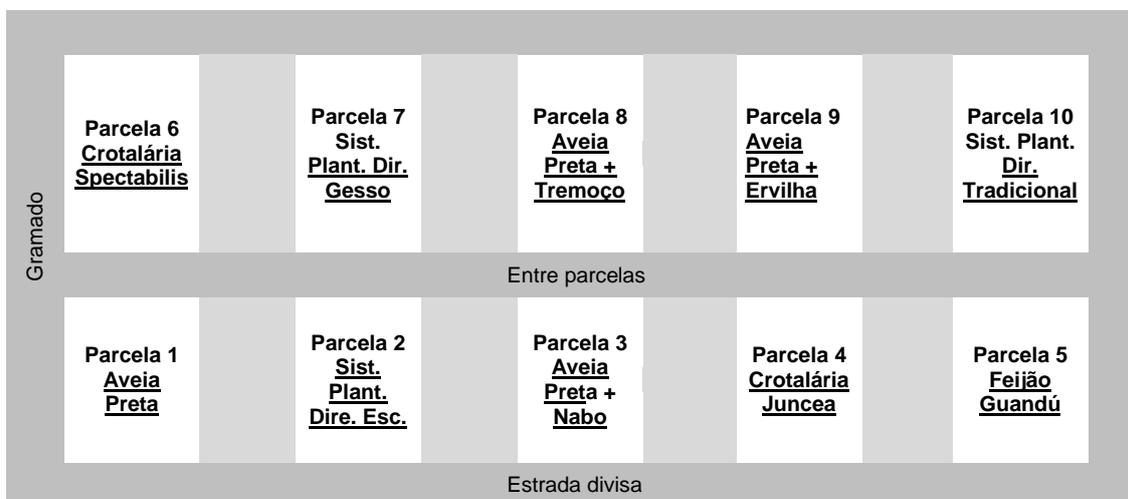
AP: aveia preta

Fonte: IAPAR (2015).

3.2. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso, constituído a partir de quatro sistemas de manejo: sistema plantio direto tradicional (SPDT), sistema plantio direto escarificado (SPDE), Sistema Plantio Direto Gessado (SPDG) e Sistema Plantio Direto com Qualidade (SPDQ).

Os tratamentos foram implantados conforme Figura 1 em parcelas experimentais de 20 m de largura por 25 m de comprimento, totalizando dez parcelas com as espécies de cobertura.

**Figura 1.** Croqui com a distribuição dos tratamentos utilizados.

As espécies recuperadoras da estrutura do solo foram implantadas em SPDQ e consistem em três espécies recuperadoras de verão: *Crotalaria juncea* (*Crotalaria juncea*), *Crotalaria spectabilis* (*Crotalaria spectabilis*), Feijão guandú (*Cajanus cajan*) e quatro espécies de inverno: Aveia preta (*Avena strigosa*), Aveia preta + Nabo forrageiro (*Avena strigosa* + *Raphanus sativus*), Aveia preta + Tremoço (*Avena strigosa* + *Lupinus albus*), Aveia preta + Ervilha forrageira (*Avena strigosa* + *Pisum sativum*). Para o sistema plantio direto escarificado (SPDE), foi realizada a

escarificação da parcela a profundidade de até 0,30 m, e por fim, para o tratamento sistema plantio direto gessado (SPDG), foi realizado a aplicação de 3 ton ha⁻¹ de gesso agrícola um mês após início do experimento.

3.2.1. Condução das culturas estudadas

Em março de 2016 foi realizada a semeadura das três espécies de cobertura do ciclo de verão *Crotalaria juncea* (*Crotalaria juncea*), *Crotalaria spectabilis* (*Crotalaria spectabilis*), Feijão guandú (*Cajanus cajan*). A semeadura das coberturas foi realizada sem nenhuma adubação para os tratamentos.

Em junho de 2016 as espécies foram manejadas com triton em pleno florescimento.

As espécies de cobertura de inverno foram semeadas em maio de 2016, e após seu ciclo foram manejadas com triton e posteriormente implantado a cultura da soja em novembro de 2017 em toda a área experimental. A cultura utilizada foi a Vmax RR - NK7059, com espaçamento de 0,45 m entre linhas e 16 sementes por metro linear.

3.3. Avaliações Climatológicas

Os dados sobre a precipitação pluviométrica, temperatura e evapotranspiração da cultura dos meses referentes aos estádios vegetativo e reprodutivo da soja, nos dois últimos períodos de avaliação (outubro de 2015 a fevereiro de 2016 e outubro de 2016 a fevereiro de 2017) são apresentados na Figura 2.

Para determinação das temperaturas foi utilizado termômetro de bulbo seco, já para a precipitação a determinação foi realizada com pluviômetro de campo na estação experimental do IAPAR – Santa Tereza do Oeste.

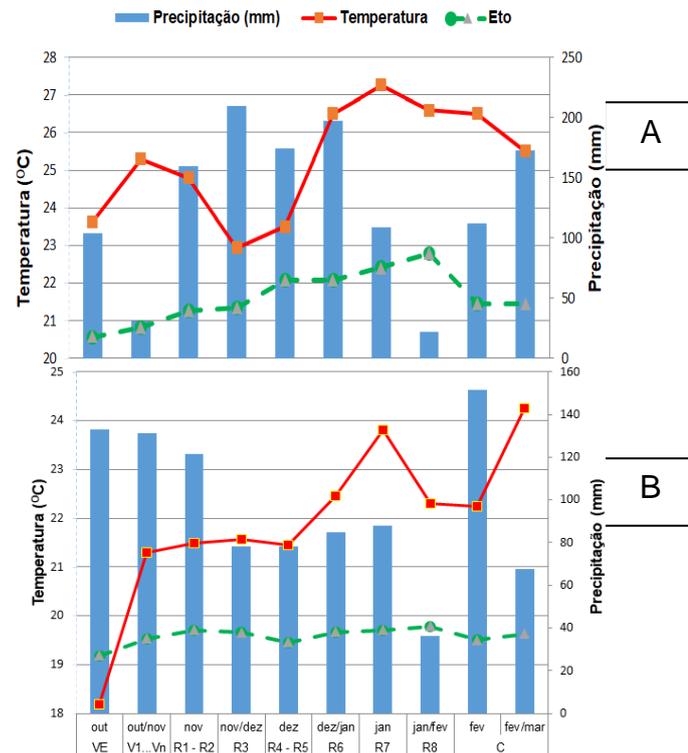


Figura 2. Precipitação pluviométrica, temperatura média e evapotranspiração (ET_0) da cultura da soja no período de outubro a fevereiro nos anos de 2016 (A) e 2017 (B).

3.4. Avaliações e determinações analíticas

Antes da implantação das plantas de cobertura e após a colheita da soja foram realizadas as coletas de amostras de solo. Para as análises de D_s , macro do solo e k_{sat} , foram abertas trincheiras em cada unidade experimental e coletadas amostras em triplicata indeformadas em anéis volumétricos de aço inox com volume de aproximadamente 98 cm^3 (5 cm de diâmetro e 5 cm de altura), em três camadas do solo (0,0 - 0,10; 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,30 m), com auxílio de martelo pedológico e extrator de solo.

Na sequência, as amostras foram colocadas em latas de alumínio e transportadas para o Laboratório de Física do Solo (LAFIS) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná Campus de Cascavel. O volume de solo nas amostras foi devidamente ajustado e estas foram saturadas em água por 24 horas em bandeja com lâmina de água a 2/3 de sua altura. As amostras saturadas foram pesadas e alocadas em coluna de areia a 0,6 m.c.a, na qual permaneceram por 4 dias drenando a água contida nos macroporos (REINERT; REICHERT, 2006).

Posteriormente as amostras foram pesadas e saturadas novamente por 24 horas para a determinação da k_{sat} em permeâmetro de carga constante. Os cálculos para obtenção da condutividade hidráulica do solo foram realizadas conforme metodologia preconizada por EMBRAPA (1997).

Posterior à determinação da k_{sat} , as amostras foram alocadas em estufa a $105^{\circ} C$ por 48 horas para determinação da massa de solo seco. Para calcular a densidade do solo, dividiu-se a massa das amostras secas a $105^{\circ} C$ pelo volume do anel volumétrico, conforme equação:

$$D_s = \frac{M_{SS}}{V_T}$$

Em que:

D_s : densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

M_{ss} : massa da amostra de solo seco a $105^{\circ} C$;

V_t : volume total do anel (%).

O cálculo da macroporosidade (CAMARGO et al., 2009), foi realizado de acordo com a equação:

$$Macro = P_t - Micro$$

Em que:

Macro: macroporosidade do solo (%);

P_t : porosidade total (%);

Micro: microporosidade (%).

O cálculo da porosidade total do solo foi obtido através da relação existente entre a densidade do solo e a densidade de partículas, conforme a equação:

$$P_t = \frac{(1 - D_s)}{D_p} \times 100$$

Em que:

P_t : porosidade total (%);

D_s : densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

D_p : densidade de partículas ($Mg\ m^{-3}$).

A microporosidade foi determinada utilizando o teor de água retirada nas amostras em equilíbrio com a tensão de 0,6 m.c.a, considerando que essa tensão é suficiente para retirar toda a água contida nos macroporos, sendo que a água

restante representa o volume de microporos, obtida pela equação:

$$Micro = \frac{(M_{su} - M_{ss})}{M_{ss}} \times 100$$

Em que:

Micro: microporosidade (%);

M_{su}: massa de solo após a tensão de 0,6 m.c.a;

M_{ss}: massa de solo seco (Mg).

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura da soja foi usado o método de Thornthwaite, com temperatura efetiva, adaptado por Camargo et al. (1999). Este método pode ser empregado para qualquer condição climática. Utiliza-se temperatura efetiva (T_{ef}), que expressa a amplitude térmica local, ao invés da temperatura média do ar. Há necessidade de calcular os dados de T_{max} e T_{min}.

Assim como no método original de Thornthwaite, esse método parte de uma evapotranspiração padrão (ET_p), a qual é a evapotranspiração para um mês de 30 dias e com N = 12h que é o fotoperíodo do mês em questão. A formulação do método é a seguinte: o mês que deseja calcular a evapotranspiração utiliza-se a T_{max} = ° C e T_{min} = ° C, N = h, NDP = dias, T_a = temperatura média anual.

Para calcular a evapotranspiração da cultura (ET_o) encontramos a temperatura efetiva (T_{ef}), para isso é necessário a temperatura máxima e mínima do local em estudo, através da equação (1). Em seguida calculamos a média da temperatura anual (T_a) que é a soma da temperatura mínima e máxima dividida por dois para encontrar o índice térmico anual ou índice de calor anual (I), através da equação (2). Após calculamos o valor da constante que varia de local para local com base na latitude local (a), através da equação (3). Após calcula-se a evapotranspiração da cultura (E_{to}) através da equação (4). Na equação (5) usam-se os dados para determinar a correção do foto período e dias em questão; Assim, multiplicando a equação (5) pela equação (4) teremos o valor da evapotranspiração potencial da cultura através da equação (6). Finalmente calculamos evapotranspiração da cultura (ET_c), através da equação (7), em que multiplicamos a equação (4) pelo K_c da cultura que é um valor constante. O coeficiente K_c é um valor determinado em função do estágio de desenvolvimento da cultura da soja (Tabela 3).

$$T_{ef} = 0,36(3 \times T_{m\acute{a}x} - T_{min}) \dots\dots\dots \text{equa\c{c}\~{a}o (1);}$$

$$I = 12 \left(0,2 T_a^{1,514} \right), \text{ sendo } T_a = \text{temp. m\acute{e}dia anual normal} \dots\dots\dots \text{equa\c{c}\~{a}o (2);}$$

$$a = 0,49239 + 1,7912 \times 10^{-2} I - 7,71 \times 10^{-5} I^{-2} + 6,75 \times 10^{-7} I^{-3} \dots\dots\dots \text{equa\c{c}\~{a}o (3);}$$

$$E_{To} = 16 \left(10 \frac{T_{ef}}{I} \right)^a, \quad (0 \leq T_{ef} \leq 26,5 \text{ } ^\circ \text{C}) \dots\dots\dots \text{equa\c{c}\~{a}o (4);}$$

$$COR = \frac{N}{12} \times \frac{NDP}{30} \dots\dots\dots \text{equa\c{c}\~{a}o (5);}$$

$$E_{Tp} = E_{To} \times Cor \text{ (mm/m\^e}s) \dots\dots\dots \text{equa\c{c}\~{a}o (6);}$$

$$E_{Tc} \text{ (mm)} = E_{To} \times Kc \dots\dots\dots \text{equa\c{c}\~{a}o (7).}$$

em que:

a: constante que varia de local para local;

I: \u00edndice t\u00e9rmico anual ou \u00edndice de calor anual;

N: fotoper\u00edodo do m\u00eas em quest\u00e3o;

NDP: dias do per\u00edodo em quest\u00e3o.

Tabela 3. Coeficiente KC em fun\u00e7\u00e3o do est\u00e1dio de desenvolvimento da cultura da soja

Est\u00e1dios de desenvolvimento vegetativo da cultura da soja				
I	II	III	IV	V
0,35	0,75	1,075	0,75	0,45

No est\u00e1dio I \u00e9 determinado quando a cultura completa 10 % da fase desenvolvimento vegetativo com o valor de Kc 0,35; para o est\u00e1dio II corresponde a 80% do desenvolvimento vegetativo com o valor de Kc 0,75; no est\u00e1dio III apresenta a fase do florescimento da cultura com o valor de Kc 1,075; em seguida o est\u00e1dio IV que \u00e9 a fase de ponto de maturidade fisiol\u00f3gica com valor de Kc 0,75 e finalmente o est\u00e1dio V que \u00e9 a fase de colheita da cultura com Kc de 0,45. A import\u00e2ncia do coeficiente da cultura \u00e9 saber a raz\u00e3o entre a evapotranspira\u00e7\u00e3o m\u00e1xima ou potencial da cultura (ETc) e a evapotranspira\u00e7\u00e3o de refer\u00eancia (ETo), para determinar modo de racionalizar \u00e1gua de irriga\u00e7\u00e3o e estimar o quanto de \u00e1gua s\u00e3o necess\u00e1rio para o desenvolvimento da cultura

3.5. Análise estatística

Os resultados das análises físico-hídricas e rendimento de grãos de soja foram analisados por meio de estatística descritiva, calculando média, coeficiente de variação (CV) e diferença mínima significativa (DMS).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância ANOVA e quando significativo foi realizado a comparação das médias pelo teste de Tukey a 5 % de significância pelo programa SISVAR versão 5.6. Também se realizou análises de correlação linear entre os fatores avaliados utilizando a Planilha Eletrônica *Microsoft Excel* versão 16.0 – Office 2016. Foram construídos modelos de regressão linear múltipla e gráficos utilizando o programa R(R CORE TEAM, 2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Atributos físicos do solo

4.1.1. Espécies de cobertura do solo

As Figuras 3,4 e 5 apresentam os boxplot para a Ds, macro e ksat para as diferentes espécies de plantas de cobertura nas três profundidades.

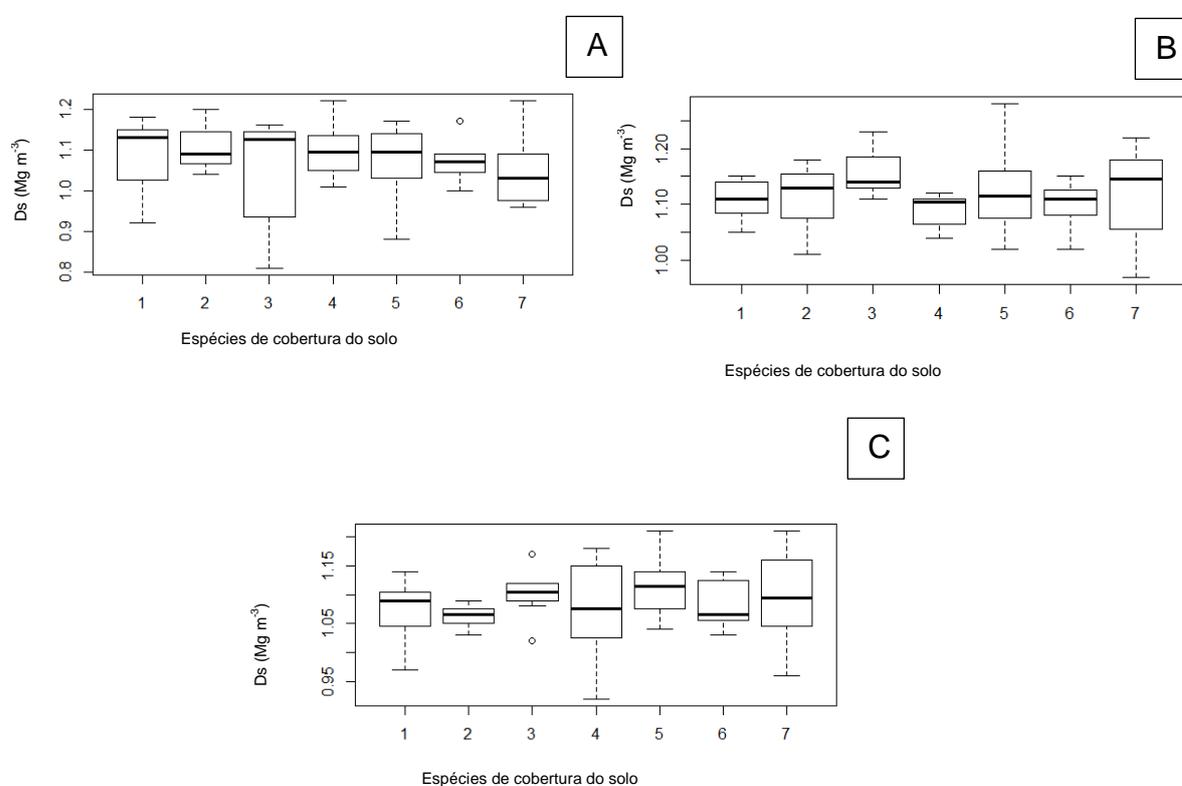


Figura 3. Boxplot da Ds na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 – 0,30 m (C) para as espécies de cobertura. 1 (Aveia preta), 2 (Aveia preta + nabo), 3 (Crotalária juncea), 4 (Feijão guandú), 5 (Crotalária spectabilis), 6 (Aveia preta + tremoço), 7 (Aveia preta + ervilha).

Na Figura 3 (A e C), observam-se os dados de Ds para as espécies de cobertura, para a camada de 0 – 0,10 m (A) e camada 0,20 – 0,30 m (C), apresentam pontos discrepantes em torno das médias e sua distribuição. Na camada 0 – 0,10 m (A), a espécie aveia preta + tremoço apresentaram variabilidade.

Já na camada 0,20 – 0,30 (C), a espécie crotalária juncea apresentou grande variabilidade, o que é ilustrado pelos tamanhos dos boxes e barras e pelos pontos discrepantes.

A Figura 4 (A; B e C), apresentam os resultados de macro, onde se verifica uma discrepância para a camada de 0,10 – 0,20 m (B), para a espécie crotalária juncea, o que pode ter influenciado a condutividade quando analisamos a Figura 5.

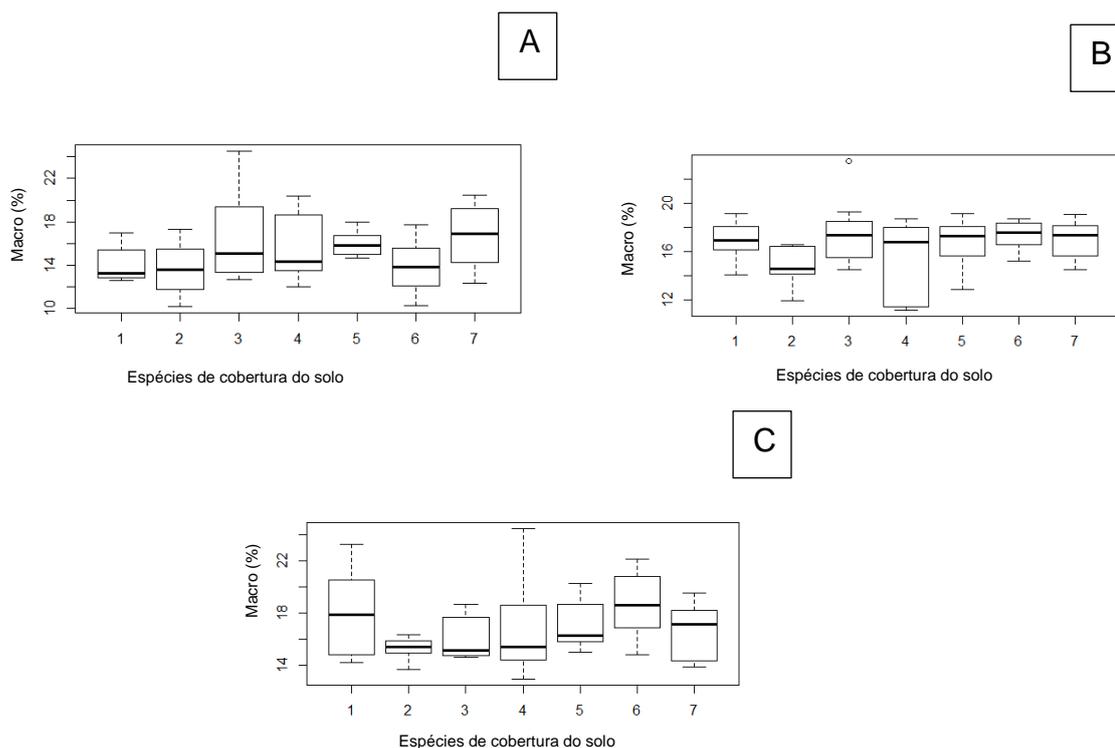


Figura 4. Boxplot da Macro na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 – 0,30 m (C) para as espécies de cobertura. 1 (Aveia preta), 2 (Aveia preta + nabo), 3 (Crotalária juncea), 4 (Feijão guandú), 5 (Crotalária spectabilis), 6 (Aveia preta + tremço), 7 (Aveia preta + ervilha).

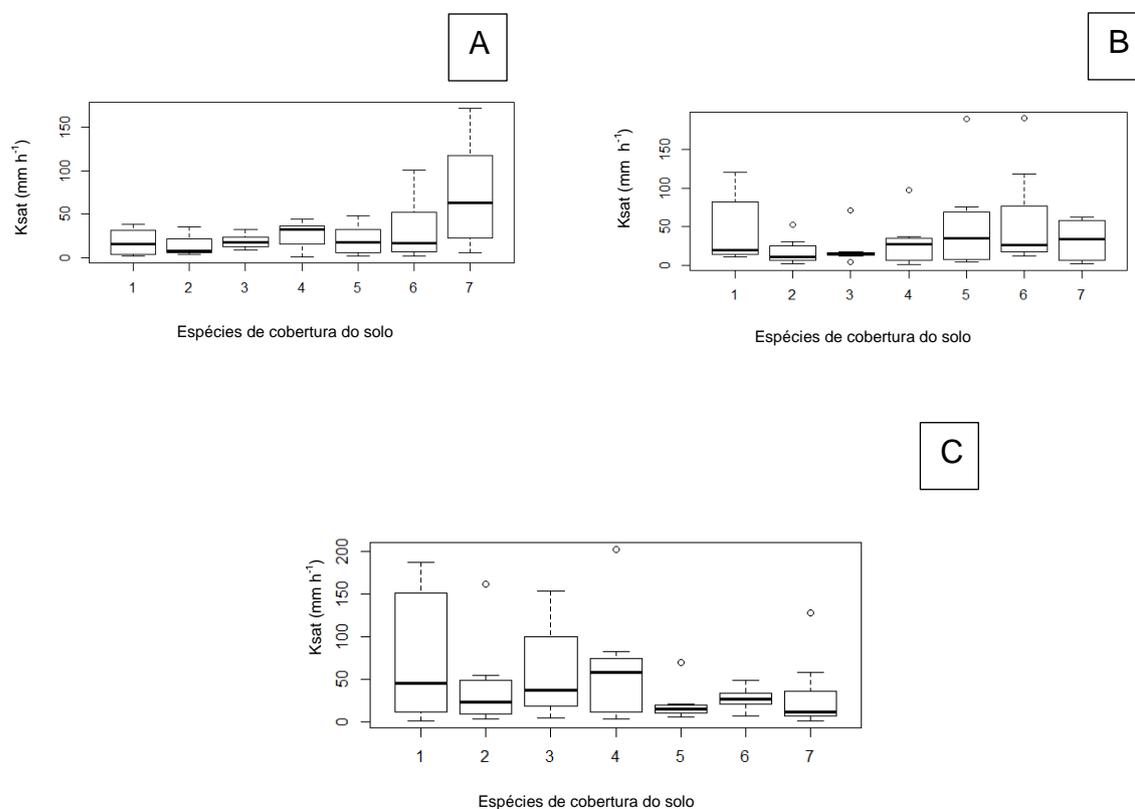


Figura 5. Boxplot da K_{sat} na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 – 0,30 m (C) para as espécies de cobertura. 1 (Aveia preta), 2 (Aveia preta + nabo), 3 (Crotalaria juncea), 4 (Feijão guandú), 5 (Crotalaria spectabilis), 6 (Aveia preta + tremço), 7 (Aveia preta + ervilha).

Observam-se pontos discrepantes e uma concentração de resultados próximos aos valores mais baixos, pois o retângulo, limitado pelos quartis superior e inferior, se encontra mais próximo ao valor mínimo, evidenciando assimetria. Nas camadas 0,10 – 0,20 m (B) e 0,20 – 0,30 m (C), as espécies que mais apresentaram pontos discrepantes foram: aveia preta + nabo; feijão guandú; crotalaria juncea e aveia preta + ervilha.

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam os boxplot para a D_s , macro e k_{sat} para os sistemas de manejo nas três profundidades.

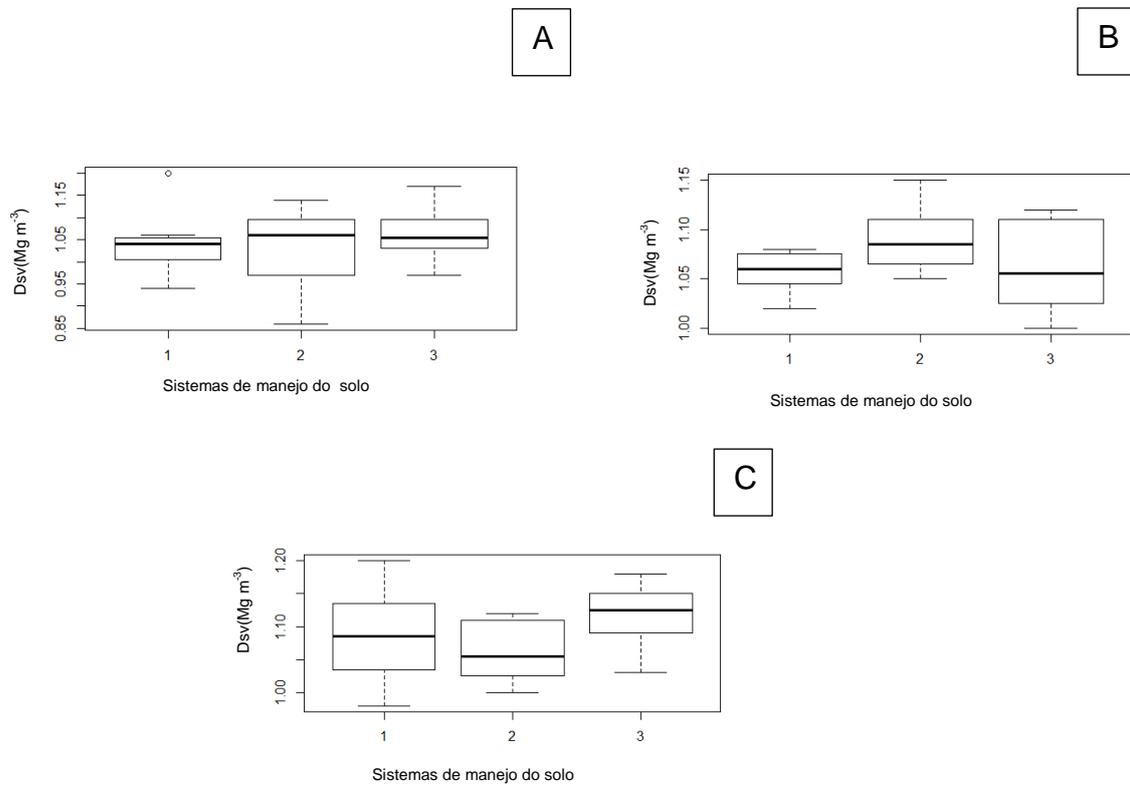


Figura 6. Boxplot da Ds na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 – 0,30 m (C) para os sistemas de manejo. 1 (SPDE), 2 (SPDG), 3 (SPDT).

Os dados apresentados nos mostram que houve dados discrepantes para o sistema plantio direto escarificado na camada de 0 – 0,10 m (A), embora não havendo diferença significativa quando realizada a análise de variância, evidenciando que este sistema influenciou na Ds quando comparado aos demais sistemas.

Observa-se que a macro apresentou ponto discrepantes no sistema escarificado na camada 0,10 – 0,20 m (B), influenciando na condutividade quando comparado os boxes na Figura 7.

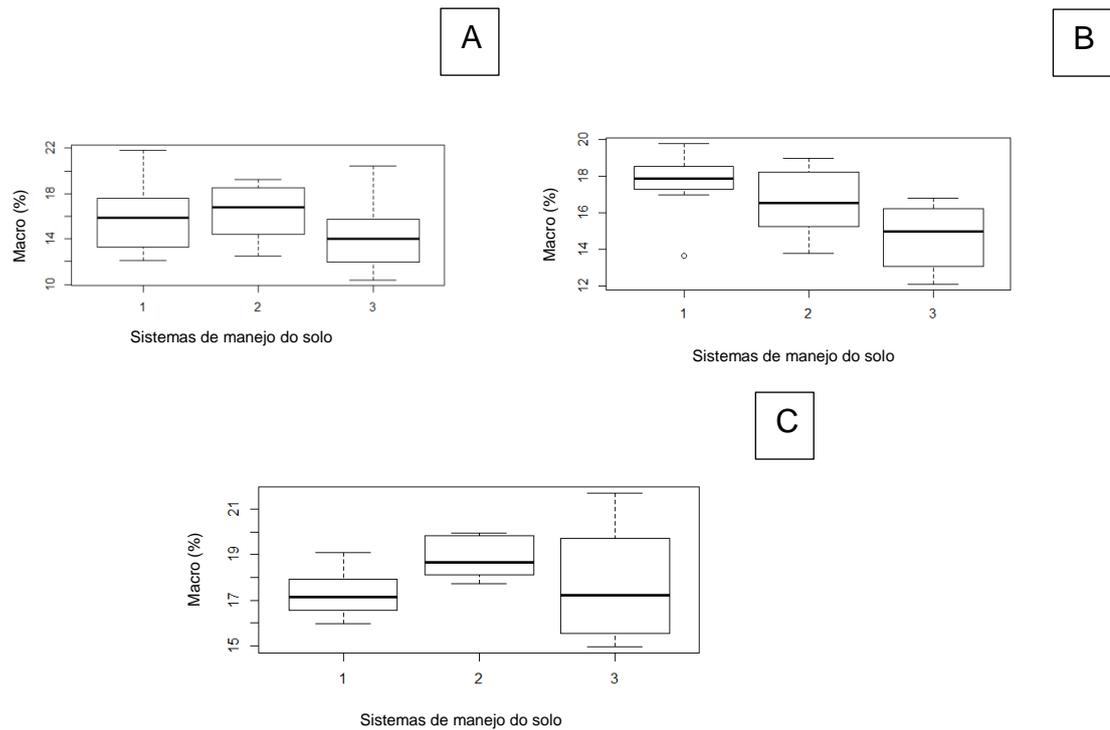
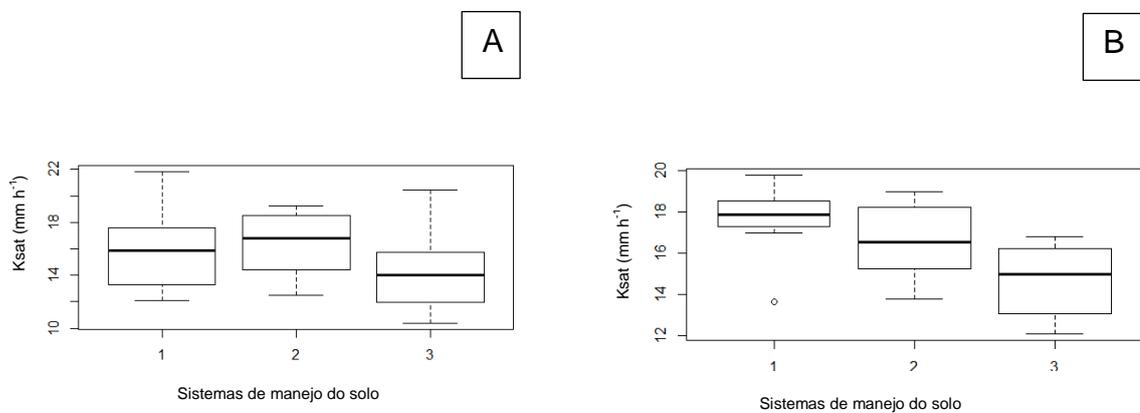


Figura 7. Boxplot da Macro na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 – 0,30 m (C) para os sistemas de manejo. 1 (SPDE), 2 (SPDG), 3 (SPDT).

Observa-se pontos discrepantes no sistema escarificado na camada de 0,10 – 0,20 m (B) para a Ksat. Já na camada de 0,20 – 0,30 m (C), os sistemas plantio direto gessado e tradicional apresentaram grande variabilidade (Figura 8).



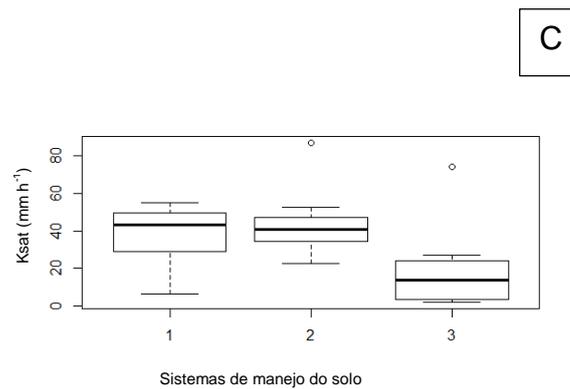


Figura 8. Boxplot da Ksat na camada 0 – 0,10 m (A); camada 0,10 – 0,20 m (B) e camada 0,20 – 0,30 m (C) para os sistemas de manejo. 1(SPDE), 2(SPDG), 3(SPDT).

As análises de variância para a Ds, macro e ksat para as diferentes espécies de plantas de cobertura no período de 2016 e 2017 nas três profundidades estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro) e condutividade hidráulica saturada (Ksat) nas camadas de (0 – 0,10 m), (0,10 – 0,20 m) e (0,20 – 0,30 m) em função das espécies de cobertura do solo

Tratamento	DS (Mg m ⁻³)		Macro (%)		Ksat (mm h ⁻¹)	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017
Camada 0,0 - 0,10 m						
Aveia preta	1,14	1,04	14,87 A	13,33 Ba	17,8 b	17,76
Aveia preta + nabo	1,12	1,00	13,91 B	19,31 Aa	22,12 ab	15,61
Aveia preta + tremoço	1,09	1,11	17,79 A	13,54 Bab	27,93 ab	25,86
Aveia preta + ervilha	1,14	1,07	13,87 A	13,44 Aab	10,82 b	16,02
Crotalária juncea	1,1	1,04	15,82 A	16,13 Aab	31,16 ab	9,1
Feijão guandú	1	1,09	18,03 A	15,31 Aab	90,31 a	55,68
Crotalária spectabilis	1,06	1,09	14,71 A	13,06 Ab	18,19 ab	45,3
DMS coluna	0,184		5,96		72,26	
DMS linha	0,119		3,9		47,23	
CV (%)	7,85		18,03		115,29	
Camada 0,10 - 0,20 m						
Aveia preta	1,11A	1,10 A	15,98	17,82	15,72 B	75,06 A
Aveia preta + nabo	1,14 A	1,17 A	16,82	18,29	27,39 A	13,93 A
Aveia preta + tremoço	1,08 A	1,10 A	15,46	15,07	20,06 A	39,69 A
Aveia preta + ervilha	1,13 A	1,09 A	14,95	14,67	7,05 A	28,45 A
Crotalária juncea	1,07 B	1,17 A	15,5	17,98	38,73 A	65,94 A
Feijão guandú	1,07 B	1,16 A	16,53	17,38	35,72 A	29,96 A
Crotalária spectabilis	1,07 A	1,13 A	16,76	17,92	21,34 B	89,51 A
DMS coluna	0,12		5,09		90,37	
DMS linha	0,08		3,33		59,07	
CV (%)	4,95		14,19		114,44	
Camada 0,20 - 0,30 m						
Aveia preta	1,09	1,06	16,35	19,6	13,14 B	138,28 Aa
Aveia preta + nabo	1,07	1,13	15,42	16,63	24,06 B	93,24 Aab
Aveia preta + tremoço	1,03	1,11	18,58	14,92	73,52 A	49,63 Aab
Aveia preta + ervilha	1,07	1,06	14,99	15,54	9,27 A	72,48 Aab
Crotalária juncea	1,09	1,14	16,35	17,78	25,73 A	16,75 Ba
Feijão guandú	1,06	1,13	16,02	17,14	50,25 A	9,49 Ab
Crotalária spectabilis	1,07	1,09	17,92	19,42	24,40 A	30,75 Ab
DMS coluna	0,12		5,71		98,99	
DMS linha	0,08		3,73		64,7	
CV (%)	5,31		15,55		101,05	

Médias seguidas de letras maiúsculas na linha e letras minúsculas na coluna não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Ausência de letra na linha e coluna indica que não houve diferença significativa.

4.1.1.1. Densidade do solo

A D_s é um importante atributo físico do solo que influencia no desenvolvimento de raízes, infiltração de água, sendo muito utilizado na avaliação da compactação dos solos. Em áreas manejadas sob SPD, os maiores valores são encontrados na camada de 0,10 - 0,20 m, devido ação de pressão externa pelas máquinas e implementos agrícolas, resultando na redução do fluxo de água e trocas gasosas nas camadas inferiores do mesmo, prejudicando assim, a produtividade das culturas (LAL; SHUKLA, 2004).

De acordo com os resultados encontrados na Tabela 4, a D_s na camada de 0,0 - 0,10 m e 0,20 - 0,30 m não diferiu significativamente entre os tratamentos e períodos, já para a camada de 0,10 - 0,20 m houve diferença significativa entre os períodos.

Os valores calculados de coeficiente de variação foram de $CV = 7,85 \%$ (camada 0,0 - 0,10 m); $CV = 4,95 \%$ (camada 0,0 - 0,20 m) e $CV = 5,31 \%$ (camada 0,20 - 0,30 m) podemos observar que os valores são homogêneos.

Pode-se observar que nas camadas de 0,0 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, todos os tratamentos obtiveram resultados semelhantes para a D_s , demonstrando que as espécies utilizadas, nos dois períodos de cultivo, não proporcionaram efeitos significativos devido ao bom estado estrutural do solo, não havendo possibilidades de diferenciar as espécies mais efetivas na melhoria deste atributo físico (BERTOL et al., 2004).

Cunha et al. (2011), avaliaram o efeito de diferentes coberturas vegetais em atributos físicos do solo, não encontraram diferenças na D_s solo após um ano de cultivo com plantas de cobertura de estação fria em um Latossolo Vermelho. Lanzasova et al (2016), em período de maior avaliação, observaram diferenças com maiores valores de D_s em sistemas que incluem plantas de cobertura principalmente plantas de estação quente.

Menores valores de densidade nas camadas superficiais foram observadas por Genro Junior, Reinert e Reichert (2004), em Latossolo Vermelho Distroférico típico argiloso. As menores densidades podem estar relacionadas à maior densidade de raízes das culturas utilizadas, e ao maior teor de M.O.

Observa-se que na camada de 0,10 - 0,20 m verificou-se que os tratamentos com crotalaria juncea e feijão guandú, apresentaram diferenças significativas entre

os períodos avaliados. A D_s acima dos valores de 1,30 – 1,40 Mg m⁻³ para solos com mais de 55 % de argila, são considerados críticos (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). Por outro lado, Reinert e Reichert (2001), consideraram como densidade crítica valores acima de 1,45 Mg m⁻³.

Os valores considerados críticos de D_s , são relacionados a condições restritivas ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, à infiltração e ao transporte de água e às trocas gasosas (FONSECA et al., 2007).

Embora os valores obtidos confirmem que não houve uma redução na D_s , as plantas de cobertura se desenvolveram em todos os tratamentos.

4.1.1.2. Macroporosidade

Na Tabela 4 é possível verificar diferença entre os tratamentos quanto a macro na profundidade de 0,0 – 0,10 m, onde o tratamento com aveia preta + nabo diferiu significativamente durante o período de 2016, não mantendo essa diferença no ano seguinte (SANCHEZ 2012).

Macroporos são resultados da disposição dos agregados, da ação da mesofauna e raízes, da expansão e contração da massa do solo, tendo papel fundamental na movimentação de gases no solo, e ao fluxo de água: infiltração, drenagem e transporte de solutos (EMBRAPA, 2013).

No presente estudo, observou-se que os percentuais encontrados de macro estão acima de 10 % para todas as espécies de cobertura do solo, considerada adequada de acordo com Seidel et al. (2015), pois valores inferiores interferem na demanda respiratória das raízes no crescimento e atividade de microrganismos na drenagem e aeração do solo e na absorção de água e nutrientes.

A macro do solo tem sua particularidade que é a de permitir aeração e água gravitacional, difusão de gases, e os efeitos das diferentes plantas de cobertura sobre a macro pode ser atribuído as diferentes formas das estruturas radiculares de cada uma das famílias, sendo nas *Poaceae* os sistema radicular é do tipo fasciculado e nas *Fabaceae* pivotante.

A maior macro do solo (19,60 %) foi encontrado no tratamento cultivado com crotalária *spectabilis*. Portanto, o sistema radicular do tipo pivotante promoveu maior volume de macroporos (FIDALKI; TORMENA, 2007). Os autores justificam esse

resultado em função da decomposição das raízes, e ao maior volume de microporos nas *Poaceae* pela produção de raízes muito finas.

4.1.1.3. Condutividade hidráulica saturada (K_{sat})

De acordo com os resultados encontrados na Tabela 4 a K_{sat} em todas as camadas estudadas diferiram significativamente.

Os coeficientes de variação calculados foram de CV = 115,29 % (camada 0,0 – 0,10 m); CV = 114,44 % (camada 0,10 – 0,20 m); CV = 101,05 % (camada 0,20 – 0,30 m). Os resultados obtidos para a K_{sat} revelam alta dispersão nos dados, devido à variação de espaço poroso em função das variações estruturais do solo. Gianello; Bueno (2015), afirmaram que resultados maiores que 65 % para CV indicam alta heterogeneidade dessa variável na área. Atributos que apresentam os maiores valores de CV tem uma grande amplitude entre valor mínimo e máximo, demonstrando um quadro bastante variável.

A K_{sat} nada mais é que a capacidade do solo em conduzir água da camada superior até as camadas mais profundas, de modo geral, ela é alta nas primeiras camadas, diminuindo em profundidade e é influenciada pela D_s , macro e micro.

Pereira et al. (2008), afirmam que a K_{sat} comporta-se de maneira diferente em cada horizonte do perfil do solo, como na Tabela 4, onde a camada 0,20 – 0,30 m apresentou uma condutividade superior até mesmo a camada mais superficial para a maioria dos tratamentos. Este maior valor de K_{sat} está associado ao maior volume de macroporos nesta camada.

Aimrun, Amim e Eltaib (2004), em seus estudos mencionam um aumento da K_{sat} com o aumento da macro do solo. A decomposição das raízes produzem macroporos contínuos e com maior estabilidade, o que favorece a infiltração de água e as trocas gasosas e reduz o escoamento superficial. Espécies com raízes profundas, com alta densidade e que possuem capacidade de romper camadas compactadas são preferíveis por formar bioporos, o quais são responsáveis por aumentar a $ksat$ (YU et al., 2016).

Resultados obtidos por Wang et al. (2016) e Mitchell et al. (2017), em diferentes locais de avaliação, com culturas e solos dos Estados Unidos verificaram resultados satisfatórios na redução superficial e no aumento da infiltração

acumulada e da taxa de infiltração estável, chegando a duplicar em alguns tratamentos avaliados.

4.1.2. Sistemas de manejo do solo

Os valores médios da Ds, macro e ksat nas camadas amostradas de 0 - 0,10; 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,30 m são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores médios da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro) e condutividade hidráulica saturada (Ksat) nas camadas de (0 – 0,10 m), (0,10 – 0,20 m) e (0,20 – 0,30 m) em função dos sistemas de manejo

Tratamento	DS (Mg m ⁻³)		Macro (%)		Ksat (mm h ⁻¹)	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017
Camada 0 - 0,10 m						
SPD escarificado	1,02	1,07	18,32 A	13,53 B	100,44	14,16
SPD gessado	1,00	1,07	18,17 A	14,60 A	146,36	66,77
SPD tradicional	1,06	1,06	14,70 A	13,68 A	38,73	133,14
DMS linha	0,14		5,37		151,51	
DMS coluna	0,11		4,42		124,95	
CV (%)	7,59		19,39		102,04	
Camada 0,10 - 0,20 m						
SPD escarificado	1,05	1,06	18,46	16,74	52,18 A	16,82 Ab
SPD gessado	1,09	1,09	17,96	15,25	20,15 B	132,95 Aa
SPD tradicional	1,06	1,06	14,73	14,66	23,54 A	58,37 Aab
DMS coluna	0,07		3,84		105,61	
DMS linha	0,05		3,16		87,10	
CV (%)	3,60		13,21		116,89	
Camada 0,20 - 0,30 m						
SPD escarificado	1,04	1,12	17,36	17,20	29,86	46,37
SPD gessado	1,06	1,06	18,80	18,92	35,91	52,62
SPD tradicional	1,11	1,12	17,63	17,78	16,89	22,81
DMS coluna	0,1		3,19		40,95	
DMS linha	0,08		2,63		33,77	
CV (%)	5,34		9,97		67,39	

Médias seguidas de letras maiúsculas na linha e letras minúsculas na coluna não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

4.1.2.1. Densidade do solo

De acordo com os resultados encontrados na Tabela 5, a Ds é um atributo que apresenta baixa variabilidade e um coeficiente de variação (CV) inferior a 15 % (WARRICK, 1998; PIMENTEL GOMES; GARCIA, 2002). Os resultados obtidos são condizentes com essa afirmação, pois o CV encontrados foram: CV = 7,59 % (camada 0,0 – 0,10 m); CV = 3,6 % (camada 0,10 – 0,20 m) e CV = 5,34 % (camada 0,20 – 0,30 m), e a maior variabilidade dos dados ocorreu na camada mais

superficial do solo, de 0,0 - 0,10 m, embora não tendo diferença significativa entre os tratamentos, é uma camada mais explorada pelo sistema radicular.

Os tratamentos que apresentaram os maiores valores de D_s considerando-se todas as profundidades, não diferindo significativamente entre si, foram o SPD escarificado, SPD gessado e SPD tradicional. Os tratamentos SPD escarificado e tradicional apresentaram os maiores valores, enquanto o SPD gessado foi o que obteve a menor D_s , conforme resultados apresentados na Tabela 5.

Todos os sistemas de manejo avaliados alcançaram o seu valor médio máximo de D_s na camada de 0,20 – 0,30 m, conforme pode ser visto na Tabela 5, embora não tenha diferido das demais camadas. Diversas características do solo, planta, clima, que interferem na dinâmica das transformações que o recurso natural possa apresentar a um mesmo sistema de manejo tem sido encontrado na literatura (MEDEIROS; CALEGARI, 2006).

Cavalieri et al. (2006) e Jorge et al. (2012), relacionam à influência de sistemas de manejo sobre características físicas do solo, têm apontado para uma compactação na camada superficial em áreas manejadas com o sistema de plantio direto. Esse aumento da densidade na camada superficial tem sido associado a trânsito de máquinas agrícolas e ao não revolvimento do solo no sistema plantio direto. Já Costa et al. (2003) comparando o efeito prolongado, após 21 anos, do uso do plantio direto com o convencional de arado de disco em um Latossolo Bruno, verificaram que o plantio direto proporcionou uma redução de 9 % na D_s em superfície em relação ao plantio convencional.

4.1.2.2. Macroporosidade

Conforme Tabela 5, a macro do solo não diferiu entre os tratamentos nas três camadas avaliadas. Entre os períodos avaliados, apenas na camada de 0 – 0,10 m foi verificado diferença no SPD escarificado. A maior diferença relativa nos valores de densidade ocorreu no plantio escarificado, atingindo $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$ no período de 2017 na camada de 0,20 - 0,30 m, o que pode ter levado à maior variação relativa na macro entre os tratamentos.

Assim como na densidade, a macro não foi influenciada pelo cultivo de plantas de cobertura após dois ciclos estudados nas camadas de 0 - 0,30 m.

Para o solo ser fisicamente adequado ao crescimento de plantas, este deve possuir, no mínimo, 10 % de macroporos para manter em níveis adequados a aeração e as trocas gasosas (DREWRY; CAMERON; BUCHAN, 2008). Desta forma todos os tratamentos apresentam macro acima da faixa aceitável e recomendável para o bom desenvolvimento das plantas.

Aratani et al. (2009), relata que a quantidade de macroporos destaca-se com uma das propriedades mais importantes em relação ao desempenho dos sistemas de manejo sobre a produtividade das culturas.

Bertol et al. (2004) em experimento com sistema de cultivo em rotação e sucessão de culturas, sob semeadura direta e preparo convencional ao longo de seis anos, concluíram ser necessário um período de tempo maior de avaliações para que a rotação de culturas expresse seus benefícios, em relação à sucessão, sobre a porosidade do solo.

4.1.2.3. Condutividade hidráulica saturada (Ksat)

A k_{sat} é afetada tanto por características do solo quanto por características do fluido. A medida da K_{sat} e macro do solo são provenientes do mesmo espaço poroso, portanto, entre estas variáveis, é esperado que haja uma correlação (MESQUITA; MORAES, 2004).

A infiltração de água é um dos processos que melhor refletem as condições físicas - hídricas do solo, pois a qualidade estrutural condiciona a geometria dos poros, refletindo na qualidade da água (RAMOS et al., 2015).

Os coeficientes de variação calculados foram de $CV = 102,04\%$ (camada 0,0 – 0,10 m); $CV = 116,89\%$ (camada 0,10 – 0,20 m); $CV = 67,39\%$ (camada 0,20 – 0,30 m). Os resultados obtidos para a K_{sat} revelam alta variabilidade, com valores acima de 100 % para as camadas de 0,0 – 0,20 m.

A k_{sat} (Tabela 5) não diferiu entre os tratamentos avaliados nas profundidades de (0,0 – 0,10 m) e (0,20 - 0,30 m). Embora não tenha ocorrido essa diferenças entre os tratamentos nos períodos estudados, cabe destacar a redução nos tratamentos SPD escarificado e gessado na camada mais superficial, o que deve-se principalmente a redução da macro e o aumento da D_s

No tratamento SPD tradicional, observa-se um aumento da Ksat embora não ocorrendo diferenças significativas nos períodos e nem uma considerada mudança nas variáveis macro e Ds. O aumento da Ksat tem-se mostrado eficiente com a utilização de plantas de cobertura com raízes pivotantes, principalmente por criar poros contínuos no solo (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004).

4.3. Rendimentos de grãos de soja

A Figura 8 (A) e (B), apresentam as correlações entre as variáveis rendimentos de grãos de soja, Ds, macro e ksat.

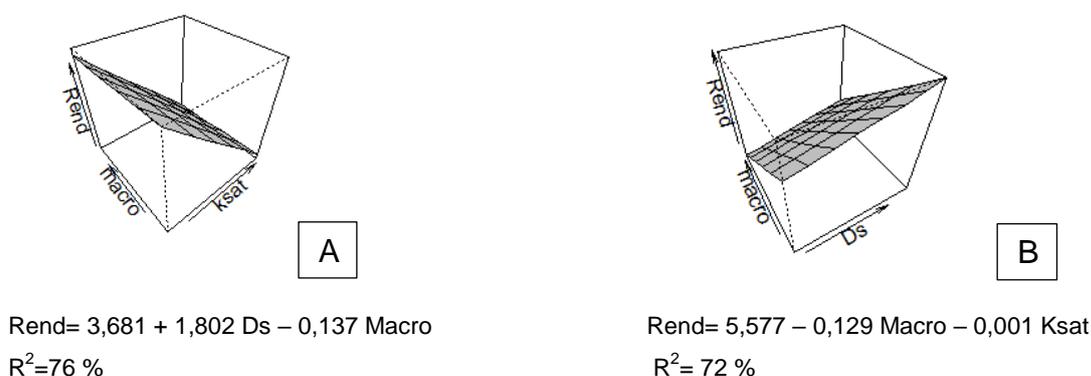


Figura 8. Correlação linear múltipla do rendimento de grãos de soja em função da (Ds) e (Macro) (A) e (Macro) e (Ksat) (B).

Observa-se na Figura 8(A), que um aumento significativo na Ds quando as densidades variam entre os valores de mínimos nos tratamentos (aveia preta + nabo) e de máximos (aveia preta + nabo e crotalária juncea) e uma redução da macro ocasionam um maior rendimento de grãos. Pela estreita relação com outros atributos, a grande maioria das pesquisas converge para fato de que, com o aumento da densidade, ocorre uma diminuição da porosidade total, macro e ksat, absorção iônica, e conseqüente aumento da micro e da resistência à penetração do solo (ROSA FILHO et al., 2009). Já a Figura 8 (B), uma redução da macro e da ksat contribuíram para um aumento no rendimento de grãos.

Os resultados da análise para o rendimento de grãos de soja para os diferentes tratamentos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Produtividade da soja no período de 2016 e 2017 nos tratamentos envolvendo espécies de cobertura e sistemas de manejo

Tratamento	Produtividade (kg ha ⁻¹)	
	2016	2017
Aveia preta	1938,60 B	3296,30 A
SPD escarificado	1769,51 B	3382,64 A
Aveia preta + nabo	1735,72 B	3097,29 A
Crotalária juncea	2440,91 A	2896,95 A
Feijão guandú	2065,23 B	3483,56 A
Crotalária spectabilis	1789,23 B	3462,67 A
SPD gessado	1810,48 B	3633,01 A
Aveia preta + tremoço	1780,69 B	3565,21 A
Aveia preta + ervilha	1617,41 B	3685,09 A
SPD tradicional	1668,10 B	3356,00 A
DMS linha	1196,1	
DMS coluna	1960,15	
CV	32,33	

Médias seguidas de letras maiúsculas na linha e letras minúsculas na coluna não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

Ausência de letras minúsculas na coluna indica que não houve diferença significativa.

O rendimento das culturas é função de vários fatores, como propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além do fator climático. Durante o estágio inicial a cultura da soja obteve um índice pluviométrico de 264.3 mm conforme Figura 2 para o ciclo de 2016 – 2017. Assim sendo, o volume ideal para atender as necessidades durante a fase vegetativa.

A precipitação em todos os meses do ciclo vegetativo e reprodutivo da soja na estação experimental do IAPAR foi de aproximadamente 1.118 mm no período de 2015 - 2016 e de 970 mm no período de 2016 - 2017.

De acordo com Albrecht et al. (2009), Farias, Neumaier e Nepomuceno (2015), para um bom desenvolvimento e produtividade a soja necessita de 500 a 700 mm de precipitação durante seu ciclo. A precipitação pluviométrica para o estágio reprodutivo foi favorável para o sucesso da cultura.

Durante o estágio de desenvolvimento reprodutivo da soja que inicia na floração (estádio R1) até o enchimento de grãos (estádio R5) constatou que a distribuição de chuvas durante o ciclo contribuiu para o armazenamento e disponibilidade de água no solo, contribuindo para uma boa uniformidade de água na população de plantas e conseqüentemente um aumento da produtividade (Figura 9).

7. CONCLUSÕES

1. As espécies de cobertura do solo apresentaram uma maior correlação com a macro e a Ksat.
2. Maiores valores de Ksat foram encontradas nas camadas de 0,20 -0,30 m em ambos os períodos estudados para a maioria das espécies estando associado aos maiores volumes de macroporos.
3. Os parâmetros da Ds, macro e ksat sob os sistemas de manejo apresentaram maior influencia nas camadas superiores nos sistemas SPD escarificado e SPD gessado.
4. A produtividade da soja foi influenciada pela Ds, apresentando maiores valores de rendimento quando ocorreu redução na Ds.
5. Os efeitos benéficos da escarificação do solo em área com sistema plantio direto não foram superiores a 12 meses.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AIMRUN, W.; AMIM, M. S. M.; ELTAIB, S. M. **Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity**. *Geoderma*, v. 121, n. 3-4, p.197-203, 2004.

ALBRECHT, L. P; BRACCINI, A. L; MARIZANGELA, R. A; SCAPIM, C. A; BARBOSA, M. C; et al. Sementes de soja produzidas em épocas de safrinha na região oeste do Estado do Paraná - **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, 2009, v. 31, n. 1, p. 121- 127.

ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um latossolo vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n.3, Viçosa, Mar/Jun, 2009.

BAGARELLO, V. **Influence of well preparation on field-saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph permeameter**. *Geoderma*, Amsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 169-180, oct. 1997.

Blanco, C. H. ; Shaver, T. M.; Lindquist, J. L.; Shapiro, C. A.; Elmore, Roger Wesley; Francis, Charles A.; and Hergert, Gary W. Cover crops and ecosystem services: insights from studies in Temperate soils. **Agronomy Journal**. v. 107, n. 6, p. 2449 – 2474, 2015.

BEUTLER A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solona produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 849 - 856, 2012.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J. e ZOLDAN JR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas as do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.155-163, 2004.

BORRMANN, D. **Efeito do déficit hídrico em características químicas e bioquímicas da soja e na degradação da clorofila, com ênfase na formação de metabolitos incolores**. Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 107, 2009.

BORTOLINI, C. G.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G. Sistemas consorciados de aveia preta e ervilhaca comum como cobertura de solo e seus efeitos na cultura do milho em sucessão. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 897- 903, 2000.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Infiltração de água no solo. **Editora UFV**, Viçosa, p.120, 2006.

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

CÂMARA, G. M. S. Fisiologia da produção de soja. **Soja & Cia**. Piracicaba: EdUSP, p.150-177, 2009.

CAMARGO, A. P. de.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.251-257, 1999.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, São Paulo, p. 132, 2009.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S.; Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas: **Instituto Agrônomo**, p. 77, 2009. (IAC. Boletim técnico, 106).

CAPITAL DE CAMPO. **Plantio Direto x Plantio Convencional**. Disponível em: > <http://capitaldocampo.com.br/plantio-direto-x-plantio-convencional><. Acesso em: 19 mai. 2017.

CARVALHO, J. R. P. DE; DECHEN, S. C. F.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial da agregação do solo avaliada pela geometria fractal e geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 1 - 9, 2004.

CAPECHE, C. L.; MACEDO, J. R.; MELO, A. S. **Estratégias de recuperação de áreas degradadas**. In: **Embrapa Solos**. Curso de Recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. Rio de Janeiro, 2008. cap. 6, p. 165.

CÁSSARO, F. A. M., BORKOWSKI, A. K.; PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; SAAB, S. C. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 175-179, 2011.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. da. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p.137 - 147, 2006.

CORRÊA, J. C.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MORAES, M. H. Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama

cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 263 - 272, 2009.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 527-535, maio/jun. 2003.

CRUZ, J. C.; ALVARENGA, H. C.; PEREIRA FILHO, I. A. **Plantio Direto x Convencional**. Anais da I Semana de Ciências Agrárias de Diamantina SECAD - Diamantina, MO - 15 a 19 de maio de 2006.

CUNHA, E. de Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E.P de B.; DIDONET, A. F.; MOREIRA, A.A.; LEANDRO, W.M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 35, n. 2, p. 589 – 602, 2011.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KAMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, M. E. F. Vocabulário da ciência do solo, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, p. 90, 2013.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRUGER, C. A. M.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13 (suplemento), p. 855–864, 2009.

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

DONEDA, A. **Plantas de cobertura de solo consorciadas e em cultivo solteiro: decomposição e fornecimento de nitrogênio ao milho**. Dissertações. Santa Maria, RS, Brasil. 2010.

DREWRY, J.J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN, G.D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing a review. **Australian Journal of Soil Research**. v. 46, p. 237 - 256, 2008.

DRESCHER, M. **Efeito residual de intervenções mecânicas para descompactação do solo manejado sob sistema plantio direto**. Santa Maria, RS. 2011.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2º ed. Rio de Janeiro, **Embrapa Solos**, p. 212, 1997.

EMBRAPA - Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 2ª Edição. Brasília, DF. 2009.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Brasil, 3. ed., 2013.

FAGUNDES, A. A. E.; KOETZ, M.; RUDEL, N.; SANTOS, S. T.; PORTO, R. Determinação da infiltração e velocidade de infiltração de água pelo método de infiltrômetro de anel em solo de cerrado no município de Rondonópolis-MT. **Enciclopédia Biosfera**, v.8, n. 14, p. 369 - 378, 2012.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Exigências climáticas. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - SECA: soja em carência de água. Londrina: **Embrapa Soja**, 2015.

FIETZ, C. R.; RANGEL, M. A. S. **Época de semeadura da soja para a região de Dourados - MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.28, n.4, p.666-672, 2008.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranjeira com sistemas de manejo da vegetação permanente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 637 – 645, 2007.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES, J. Effects of pasture system management on physical properties. **Semina** - Ciências Agrárias, Londrina, v. 31, n. 4, p. 913 – 932, 2010.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n.1, p. 49 - 57, 2006.

FONSECA, G. C.; CARNEIRO, M. A. C.; COSTA, A. R.; OLIVEIRA, G. C.; BALBINO, L. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de Latossolo Vermelho Distroférico de Cerrado sob duas rotações de cultura. **Revista Agropecuária Tropical**. Goiânia, v. 37, n. 1, p. 22-30, 2007.

GENNARO, L. A. **Estrutura, micromorfologia e microbiologia do solo em dois sistemas de manejo**. 2011. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)–Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, 2011.

GENRO JÚNIOR, S. A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. Santa Maria: UFSM, p. 90, 2002.

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

GIANELLO, E. M.; BUENO, C. R. P. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiânia, v. 45, n. 1, p. 18-28, jan./mar. 2015.

GONDIM, T. M. S.; WANDERLEY, J. A. C.; SOUZA, J. M.; FEITOSA FILHO, J. C.; SOUSA, J. S.; Infiltração e velocidade de infiltração de água pelo método do infiltrômetro de anel em solo areno-argiloso. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 64 - 73, 2010.

GUIMARÃES, G. L.; BUZETTI, S.; LAZARINI, E.; SÁ, M.E.; ARF, O.; ANDRADE, J.A da C. Efeitos de culturas de verão e de inverno na implantação do plantio direto. **ActaSci. Agron.** Maringá, v. 28, n. 4, p. 471-477, Oct. /Dec., 2006.

HEID, D. M.; VITORINO, A. C. T.; TIRLONI, C. Frações orgânicas e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho Distroférico sob diferentes usos. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 51, n. 1, p. 149-171, 2009.

IAPAR - INSTITUTO AGRONOMICO DO PARANÁ. Cartas Climáticas do Estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 2000.

JABRO, J. D.; STEVENS, W. B.; EVANS, R. G.; IVERSEN, W. M. Tillage effects on physical properties in two soils of the Northern Great Plains. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 25, n. 3, p. 377 – 382, 2009.

JORGE, R.F.; ALMEIDA, C.X.; BORGES, E.N.; PASSOS, R.R. Distribuição de poros e densidade de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, v. 28, supl.1, p.159-169, 2012.

KAISER, D.R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. Santa Maria, RS, 2010.

KONDO, M. K.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; WENDLING, B.; SILVA, P. B., CARDOSO, M. M. Efeito de coberturas vegetais sobre os atributos físicos do solo e características agronômicas do sorgo granífero. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, suplemento 1, p. 33 - 40, 2012.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 61, p. 4 - 10, 1997.

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

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

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of soil physics**. Ohio, U.S.A., The Ohio University Columbus, ISBN: 0-203-02123, 2004.

LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. Residual effect of soil tillage on water erpsion from a tucic Paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34, p.1333-1342. 2016.

LEPSCH, I. F. **Formação dos Solos**.2.ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010. 1567 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba, 2000. 509 p.

LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. **Introdução à pedologia**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Dep. de Solos e Engenharia Agrícola, 2009.

LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: Anda, 2004. 110p.

MANCUSO, M. A.; FLORES, B. A.; ROSA, G. M. SCHROEDER, J. K.; PRETTO, P. R. P. **Características da taxa de infiltração e densidade do solo em distintos tipos de cobertura de solo em zona urbana**. Santa Maria, 2014.

MATHEIS, H. A. S. M.; AZEVEDO, F.A.; VICTÓRIA FILHO, R. **Adubação verde no manejo de plantas daninhas na cultura de citros**. Laranja, Cordeirópolis, v. 27, n. 1, p. 101-110. 2006.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**; [tradução de Cláudia F. Falluh Balduino Ferreira. – São Paulo: Editora UNESP; Brasília, DF: NEAD, 2010. 568p.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, maio/jun. 2004.

MEDEIROS, G.B.; CALEGARI, A. **ROTAÇÃO DE CULTURAS. PLANTIO DIRETO COM QUALIDADE**. IAPAR; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2006.

MITCHELL, J. P., SHRESTHA, K. MATHESIUS, K. M. SCOW, R. J. SOUTHARD, R. L. HANEY, R. SCHMIDT, D. S. MUNK, W. R. HORWATH. Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA. **Soil and Tillage Research**. v. 165, p. 325-335. 2017.

MORANDO, R.; SILVA, A. O.; CARVALHO, L. C.; PINHEIRO, P. M. A.; DÉFICIT HÍDRICO: EFEITO SOBRE A CULTURA DA SOJA. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 3, n. especial, p.114 - 129, 2014.

NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um latossolo argiloso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 5, 1410 - 1415, 2007.

NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S.; SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 7, p. 531-539, 2014.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 35, p. 417- 428, 2011.

PAIXÃO, F. J. R.; ANDRADE, R. S.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, J. M.; COSTA, T. L. FEITOSA, R. M. Estimativa da Infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v5- n, 2004.

PEREIRA, T. I.; UHDE, L. T.; GUBIANI, P. I.; REICHERT, L. M, D. J.; VOGELMANN, E. S. **Condutividade Hidráulica Saturada e propriedades físicas do solo em área de pastagem degradada em Argissolo na Depressão Central do RS**. Grupo de física do solo da UFSM. 2008.

PETRY, M. T.; ZIMMERMANN, F. L.; CARLESSO, R.; MICHELON, C. J.; KUNZ, J. H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 531 - 539, maio/jun. 2007.

PIMENTEL-GOMEZ, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, P. 309, 2002.

RAZAFIMBELO, T. M.; ALBRECHT, A.; OLIVER, R.; CHEVALLIER, T.; CHAPUIS-LARDY, L.; FELLER, C. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v. 98, p. 140 - 149, 2008.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.Rproject.org/>, 2016.

RAMOS, M. R.; FAVARETTO, N.; UHLMANN, A.; DIECKOW, J.; VEZZANI, F. M.; ALMEIDA, L. Produção de hortaliças no sistema orgânico: efeito nos atributos físicos do solo. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 58, p. 45 - 51, 2015.

REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; GUBIANI, P. I.; KAISER, D. R.; MINELLA, J. P. G.; REINERT, D. J. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2011, v. VII. p. 1-54.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L, E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação.

In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS. v. 5, p. 49-134, 2007.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. **Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado**, Santa Maria. p. 114-131, 2001.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Universidade Federal de Santa Maria, p. 18, 2008.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Universidade Federal de Santa Maria, p. 18, 2006.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, v. 27, p. 29 - 48, 2003.

ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F. F. S.; GIOIA, M. T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 283-293, 2009.

ROSSI, F.; VALLE, J. C. V.; VALLE, C. R. P. **Como tornar sua fazenda orgânica**, Viçosa MG, CPT, p. 364, 2002.

SANCHEZ, E, **Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno**. Guarapuava, v. 59, 2012.

SANTOS, H. P.; REIS, E. M., Rotação de culturas em plantio direto. Passo Fundo: **Embrapa Trigo**, p. 212, 2010.

SANTOS, J. N.; PEREIRA, E. D. Carta de susceptibilidade a infiltração da água no solo na sub-bacia do rio Maracanã-MA. **Cadernos de Pesquisa**, São Luís, v. 20, n. especial, julho 2013.

SANTOS, I. C.; SEDIYANA, M. A. N.; PEDROSA, M. W. Adubação verde no cultivo de hortaliças. **Circular Técnica**, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, v.1, n. 179, p. 1 - 6, 2013.

SEIDEL, E. P.; MATTIA, V.; MATTEI, E.; CORBARI, F. Produção de matéria seca e propriedades físicas do solo na consorciação milho e braquiária. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 14, n.1, p. 18 - 25, 2015.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G.C.; LIMA, J.M.; SILVA, B.M.; ZEVIANI, W.M.; LIMA, V.M.P. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.4, p. 362 – 370, abril. 2013.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JUNIOR, M.; IMHOFF, KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: JONG van LIER, Q. Física do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 208, 2010.

SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; AMORIM, R.S.S.; PAIVA, K.W.N. Efeito da cobertura nas perdas de solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo utilizando simulador de chuva. **Eng. Agríc.**, v. 25: p. 409 - 419, 2005.

SILVA, P. R., ARGENTA, G., SANGOI, L., STRIEDER, M. L., SILVA A. A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema semeadura direta. **R. Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 1011 - 1020, mai-jun, 2006.

STONE LF, SILVEIRA PM. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **R Bras Ci Solo**. V. 25, p. 395 – 401, 2001.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. de C., RIBON, A.A. Atributos físicos de Latossolo distrófico psamítico sob diferentes usos agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 925 - 933, 2006.

TEIXEIRA, C. M.; CARVALHO, G. J.; FURTINE NETO, A. E.; ANDRADE, M. J. B.; MARQUES, E. L. S. Produção de biomassa e teor de macronutrientes do milheto, feijão de porco e guandu anão em cultivo solteiro e consorciado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, p. 93 - 99, 2005.

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

TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; ARAÚJO, M. A.; PINTO, J. C. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distroférico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 65 - 71, 2004.

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

VEZZANI, F.; MIELNICZUK, M. J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 31, p. 1271 - 1280, 2007.

WARRICK, A. W. Spatial variability. In: HILLEL, D. (Ed.) *Environmental soil physics*, **Academic Press**, p. 655 - 675, 1998

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. **Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010**. *Catena*, v. 137, p. 256-268, 2016.

WOLSCHICK, N.H. **Desempenho de plantas de cobertura e influência nos atributos do solo e na produtividade de culturas em sucessão**. Lages, p. 93, 2014.

Yu Y, Loiskandl W, Kaul H, Himmelbauer M, Wei W, Chen L, et al. Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems. **J Hydrol.** v. 538, p. 667 – 676, 2016.

ZHAO, D.; XU, M.; LIU, G.; YAO, X.; TUO, D.; ZHANG, R.; XIAO, T.; PENG, G. Quantification of soil aggregate microstructure on abandoned cropland during vegetative succession using synchrotron radiation-based micro-computed tomography. **Soil & Tillage Research**, v. 165, p. 239–246, 2016.