

SIMONE ANDREIA ROEHRS

MODELAGEM MATEMÁTICA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO  
E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM  
LATOSSOLO ARGILOSO SOB SISTEMAS DE MANEJO

CASCVEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO - 2019

SIMONE ANDREIA ROEHRS

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO  
E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM  
LATOSSOLO ARGILOSO SOB SISTEMAS DE MANEJO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra Aracéli Ciotti de Marins

Coorientador: Prof. Dr. Deonir Secco

Coorientador: Prof. Dr. Rogério Luís Rizzi

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO - 2019

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Roehrs, Simone Andreia

Modelagem matemática da infiltração de água no solo e distribuição espacial de atributos físicos de um Latossolo argiloso sob sistemas de manejo / Simone Andreia Roehrs; orientador(a), Aracéli Ciotti de Marins; coorientador(a), Deonir Secco, coorientador(a)II, Rogério Luís Rizzi, 2019. 85 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2019.

1. Sistema Plantio Direto. 2. Compactação do solo. 3. Modelos. I. Marins, Aracéli Ciotti de. II. Secco, Deonir. III. Rizzi, Rogério Luís. IV. Título.

## SIMONE ANDREIA ROEHRS

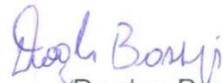
Modelagem matemática da infiltração de água no solo e distribuição espacial de atributos físicos de um Latossolo argiloso sob sistemas de manejo

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



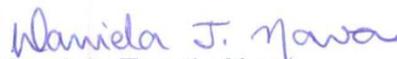
Orientador(a) - Araceli Ciotti de Marins

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



Douglas Bassegio

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



Daniela Trentin Nava

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Toledo (UTFPR)

Cascavel, 14 de março de 2019

*Dedico integralmente à minha mãe, Noeli Hubner.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir concluir mais esta etapa, estando sempre presente.

A minha família, especialmente minha mãe Noeli Hubner, por sempre incentivar meus estudos e não medir esforços para me apoiar.

Ao meu namorado, Allison Diego dos Santos, por compreender os momentos de ausência, sendo mais que um companheiro, suporte fundamental para conclusão deste trabalho.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra Aracéli Ciotti de Marins, pelos ensinamentos e conversas ao longo deste período.

Ao Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Deonir Secco, pela grande oportunidade.

Ao Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Rogério Luís Rizzi, pela paciência e grande conhecimento.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luciene Kazue Tokura, pelas orientações ao longo de todo este processo e, acima de tudo, pelas risadas no laboratório.

À equipe do Laboratório de Física do Solo, LAFIS, que auxiliou na coleta de dados no campo e análise em laboratório, em especial a sempre dedicada Bruna de Villa.

Aos meus amigos de graduação e, agora, pós-graduação Claudia Borgmann e Pablo Chang, por compartilharem os momentos vividos.

À Fundação Araucária pela concessão de bolsa de estudos.

A todos os funcionários do Instituto Agrônômico do Paraná, IAPAR, de Santa Tereza do Oeste, pelo auxílio durante o experimento.

Aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, pelo conhecimento compartilhado.

A todos aqueles que, mesmo não citados aqui, foram de grande ajuda para a elaboração deste trabalho.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Caracterização química do solo para nas camadas em estudo.....	21
<b>Tabela 2.</b> Composição granulométrica <sup>1</sup> do solo nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m da área experimental do IAPAR/Santa Tereza (valores médios de 3 repetições) .....	22
<b>Tabela 3.</b> Estatística descritiva para a infiltração acumulada (mm) nos tratamentos compactados (C) não compactados.....	33
<b>Tabela 4.</b> Análise de variância (ANOVA) para a Infiltração acumulada de água .....	34
<b>Tabela 5.</b> Teste de Tukey para a densidade do solo (Ds), Porosidade total (PT) macroporosidade (Ma) Microporosidade (Mi) e condutividade hidráulica saturada (Ksat).....	37
<b>Tabela 6.</b> Precipitação (mm) por data das coletas de água, seus respectivos tempos de ocorrência e intensidade de precipitação .....	39
<b>Tabela 7.</b> Intervalo das intensidades, baixa, média e alta (mm h <sup>-1</sup> ) .....	40
<b>Tabela 8.</b> Infiltração acumulada de acordo com os níveis de intensidade .....	41
<b>Tabela 9.</b> Valores do parâmetro "a" para os modelos de Philip e Kostiaikov.....	45
<b>Tabela 10.</b> Modelos de Kostiaikov e Philip com respectivos R <sup>2</sup> .....	47
<b>Tabela 11.</b> Estatística descritiva e espacial dos atributos físicos do solo nas três camadas analisadas.....	48
<b>Tabela 12.</b> Análise de variância (ANOVA) para a Infiltração de água de acordo com os níveis de intensidade de chuva .....	64
<b>Tabela 13.</b> Análise de variância (ANOVA) para a densidade do solo (Ds) .....	64
<b>Tabela 14.</b> Análise de variância (ANOVA) para a porosidade total do solo (PT) .....	64
<b>Tabela 15.</b> Análise de variância (ANOVA) para a macroporosidade do solo (Ma)....	65
<b>Tabela 16.</b> Análise de variância (ANOVA) para a Microporosidade do solo (Mi) .....	65
<b>Tabela 17.</b> Análise de variância (ANOVA) para a condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat).....	65
<b>Tabela 18.</b> Estatística descritiva para os atributos físicos do solo do Tratamento T5 .....	66
<b>Tabela 19.</b> Estatística descritiva para os atributos físicos do solo do Tratamento T11 .....	66

**Tabela 20.** Estatística descritiva para os atributos físicos do solo do Tratamento T15  
.....67

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representação de semivariograma experimental e seus parâmetros.....	16
<b>Figura 2.</b> Representação do modelo teórico esférico. ....	17
<b>Figura 3.</b> Representação do modelo teórico exponencial.....	17
<b>Figura 4.</b> Representação do modelo teórico gaussiano. ....	17
<b>Figura 5.</b> Precipitação e temperatura média diária no período de 26/10/17 a 19/02/18 em Santa Tereza do Oeste/PR. ....	22
<b>Figura 6.</b> Croqui da disposição dos tratamentos após compactação. A faixa escura representa a faixa compactada pelo rolo compactador.....	24
<b>Figura 7.</b> (A) Calha coletora instalada; (B) Depósito de armazenamento de água da chuva.....	25
<b>Figura 8.</b> Representação da área da calha coletora.....	27
<b>Figura 9.</b> Calha entupida em dia de precipitação elevada. ....	28
<b>Figura 10.</b> Mapa de localização do tratamento 5.....	31
<b>Figura 11.</b> Detalhamento do espaçamento entre pontos para análise de variabilidade espacial. ....	31
<b>Figura 12.</b> Boxplot da infiltração acumulada para os tratamentos não compactados (A) e compactados (B). ....	35
<b>Figura 13.</b> Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelos modelos de Kostiakov e Philip para intensidade baixa.....	42
<b>Figura 14.</b> Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelos modelos de Kostiakov e Philip para intensidade alta. ....	43
<b>Figura 15.</b> Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelo modelo de Kostiakov para intensidade média.....	44
<b>Figura 16.</b> Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelo modelo de Philip para intensidade média. ....	44
<b>Figura 17.</b> Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelos modelos de Kostiakov e Philip para intensidade média. ....	46
<b>Figura 18.</b> Mapas de superfície da densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ) para os três tratamentos, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	50
<b>Figura 19.</b> Mapas de superfície da macroporosidade do solo (%) para os três tratamentos, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	51

<b>Figura 20.</b> Mapas de superfície da microporosidade do solo (%) para os três tratamentos, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.....	52
<b>Figura 21.</b> Semivariogramas teóricos para a Densidade.....	68
<b>Figura 22.</b> Semivariogramas teóricos para a Macroporosidade. ....	69
<b>Figura 23.</b> Semivariogramas teóricos para a Microporosidade.....	70

ROEHRS, Simone Andreia, Ma. UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Agosto de 2018. **Modelagem matemática da infiltração de água no solo e distribuição espacial de atributos físicos de um Latossolo argiloso sob sistemas de manejo**. Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Aracéli Ciotti de Marins. Coorientadores: Prof. Dr. Deonir Secco e Prof. Dr. Rogério Luís Rizzi.

## RESUMO

O uso e manejo inadequado do solo têm levantado questões sobre a sua qualidade e sustentabilidade. Um reflexo desta situação é a preocupação com a infiltração de água, visto que a água é um dos principais fatores de produção e grande responsável pela produtividade das culturas. Assim, este trabalho objetivou mostrar o comportamento da infiltração acumulada de água em sistemas de manejo por meio da modelagem matemática. Além disso, com análise geoestatística também verificar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo mediante mapas temáticos destes atributos. O experimento foi conduzido na área experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), polo regional de Santa Tereza do Oeste, Paraná, Brasil. O solo é um Latossolo argiloso no qual se avaliou a infiltração de água em 29 tratamentos que consistiram em sistemas de manejo: Sistema Plantio Direto tradicional, Sistema Plantio Direto gessado, Sistema Plantio Direto com escarificação e Sistema Plantio Direto com qualidade com espécies de cobertura em consórcio ou não, denominadas “recuperadoras” de estrutura do solo. Foi realizado delineamento experimental ao acaso, sendo os tratamentos T1 (Milheto), T2 (Aveia branca), T3 (Guandu anão), T4 (Aveia Preta), (T5 Sistema Plantio Direto com escarificação), T6 (Centeio), T7 (Aveia preta + nabo forrageiro), T8 (*Crotalaria juncea*), T9 (Feijão guandu), T10 (*Crotalaria spectabilis*), T11 (Sistema Plantio Direto com aplicação de 3 t ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície), T12 (Aveia preta + tremoço branco), T13 (Mucuna preta), T14 (Aveia preta + ervilha forrageira), T15, testemunha (Sistema Plantio Direto tradicional). Já os tratamentos T1C, T2C, T3C, T4C, T6C, T7C, T8C, T9C, T10C, T11C, T12C, T13C, T14C, T15C representam os mesmos tratamentos descritos com 3 passadas de rolo compactador, indicando tratamentos compactados artificialmente. Para a variabilidade espacial, foram analisadas as áreas com os sistemas de manejo: T15 (Sistema Plantio Direto tradicional), T11 (Sistema Plantio Direto gessado) e T5 (Sistema Plantio Direto com escarificação). A infiltração acumulada de água não diferiu significativamente a 5% de probabilidade entre os tratamentos, apenas entre intensidades de chuva. Os modelos matemáticos de Kostiaikov e de Philip são adequados para mensurar a infiltração de água acumulada em solos com mesmas características. A análise de variabilidade espacial revelou dependência espacial entre os dados, com o Sistema Plantio Direto com escarificação e Sistema Plantio Direto gessado apresentando maiores valores de densidade do solo e menor volume de macroporos.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

**PALAVRAS-CHAVE:** Plantio direto, densidade do solo, compactação.

ROEHRS, Simone Andreia, Ma. UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Agosto de 2018. **Mathematical modeling of soil water infiltration and spatial distribution of physical attributes of a clayey Oxisol under management systems.** Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Aracéli Ciotti de Marins. Coorientadores: Prof. Dr. Deonir Secco e Prof. Dr. Rogério Luís Rizzi.

## ABSTRACT

The inadequate use and management of the soil has raised questions about its quality and sustainability. A reflection of this situation is the concern with the soil water infiltration, since water is one of the main factors of production and great responsible for the grain yield cultures. Thus, this study aimed to show the behavior of accumulated infiltration in management systems through mathematical modeling. Also, with geostatistical analysis, verify the spatial variability of soil physical attributes through thematic maps of these attributes. The experiment was conducted in the experimental area of the Paraná Agronomic Institute (IAPAR), regional pole of Santa Tereza do Oeste, Paraná, Brazil. The soil is a clay Oxisol in which the water infiltration was evaluated in 29 treatments that consisted of management systems: traditional no tillage system, planted no tillage system, no tillage system with scarification and no-tillage system with quality cover species in consortium or not, termed "retrievers" of soil structure. A randomized experimental design was carried out, with treatments T1 (Pearl millet), T2 (Common oat), T3 (Dwarf pigeon pea), T4 (Black Oat), T5 (Tillage system whit soil scarification), T6 (Cereal rye), T7 (Black oat + cultivated radish), T8 (*Crotalaria juncea*), T9 (Pigeon pea), T10 (*Crotalaria spectbilis*), T11 (Tillage system with application of 3 t ha<sup>-1</sup> of gypsum), T12 (Black oat + white lupine), T13 (Velvet bean), T14 (Black Oat + Garden Pea), T15, Control (Traditional tillage system). The treatments T1C, T2C, T3C, T4C, T7C, T8C, T9C, T10C, T11C, T12C, T13C, T14C, T15C represent the same treatments described with 3 passes of compactor roller, indicating treatments artificially compacted. For the spatial variability, the areas with the management systems were analyzed: T15 (Traditional tillage system), T11 (Tillage system with application of 3 t ha<sup>-1</sup> of gypsum) and T5 (Tillage system whit soil scarification). The accumulated infiltration of water did not differ significantly at 5% of probability between treatments, only between rain intensities. The mathematical models of Kostiakov and Philip are suitable for measuring the infiltration of water accumulated in soils with the same characteristics. The analysis of spatial variability revealed spatial dependence between the data, with the planted no tillage system and no-tillage system with scarification, presenting higher values of soil density and lower volume of macropores.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

**KEYWORDS:** No-tillage, soil density, compaction.

## ÍNDICE

LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1 Infiltração de água no solo .....	3
2.1.1 Atual Sistema Plantio Direto .....	5
2.1.2 Latossolos argilosos x compactação do solo .....	6
2.1.3 Infiltração de água x compactação do solo .....	7
2.1.4 Impacto da má infiltração de água no solo no desenvolvimento e rendimento de grãos de cultivos agrícolas.....	9
2.1.5 Modelagem matemática da infiltração de água no solo.....	10
2.1.6 Aplicações da modelagem matemática da infiltração de água no solo na otimização dos cultivos agrícolas .....	12
2.2 Estatística espacial .....	13
2.2.1 Semivariogramas .....	15
2.2.1.1 Modelos teóricos .....	16
2.2.2 Validação cruzada .....	18
2.2.3 Geoestatística aplicada a atributos físicos do solo .....	19
2.2.3.1 Variabilidade espacial dos atributos do solo relacionados com a infiltração de água.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	21
3.1 Infiltração de água no solo .....	21
3.1.1 Localização e caracterização da área de estudo .....	21
3.1.2 Precipitação .....	22
3.1.3 Tratamentos e delineamento experimental.....	23
3.1.4 Propriedades físicas do solo.....	25
3.1.5 Infiltração de água.....	26
3.1.6 Semeadura e colheita.....	28

<b>3.1.7 Análise estatística .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.8 Modelagem matemática .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Análise geoestatística .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.2 Propriedades físicas .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.3 Estatística descritiva e análise espacial.....</b>	<b>32</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Infiltração Acumulada .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 Propriedades físicas do solo.....</b>	<b>36</b>
<b>4.3 Precipitação e Intensidade de chuva.....</b>	<b>39</b>
<b>4.3.1 Infiltração acumulada para os intervalos de intensidade .....</b>	<b>40</b>
<b>4.4 Modelos matemáticos de infiltração acumulada .....</b>	<b>41</b>
<b>4.5 Mapas de variabilidade espacial .....</b>	<b>47</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>
<b>Anexo 1 .....</b>	<b>64</b>
<b>Anexo 2 .....</b>	<b>66</b>
<b>Anexo 3 .....</b>	<b>68</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A maior parte da superfície do nosso planeta é coberta por água. Apesar disto, apenas uma pequena quantidade está disponível em fontes subterrâneas para uso na agricultura e consumo. A água configura-se como um fator limitante a produção e está relacionada diretamente com os resultados de produtividade das culturas agrícolas.

Desta forma, o conhecimento sobre as reservas de água no solo torna-se essencial, visando cumprir a exigência específica de cada cultura. A quantidade de água no solo também é determinante para o momento de realizar as ações de revolvimento no mesmo, uma vez que, para que as ações de uso e manejo ocorram com máxima eficácia, é necessário respeitar sua condição de umidade.

No ciclo da água, é a infiltração que vai permitir o abastecimento das recargas subterrâneas, garantindo a continuidade deste processo. Vários são os fatores que determinam ou influenciam a infiltração de água no solo, dentre os quais destacam-se a densidade e a macroporosidade do solo (BONO; MOTTA MACEDO; TORMENA, 2013). Bertol et al. (2015) também relatam a influência do tipo de solo, assim como as condições de uso e manejo que causam mudanças na superfície e na subsuperfície do solo.

Nestes cenários, é imprescindível melhorar a eficiência da infiltração de água no solo. Cunha et al. (2015) afirmam essa necessidade para o desenvolvimento de projetos agrícolas de irrigação, drenagem e conservação de solo e água. Além disso, a partir de estudos sobre a infiltração de água no solo é possível estimar a enxurrada e o volume total de água que ficará disponível no solo para o desenvolvimento das plantas (ZHAO et al., 2018).

A consequência da ineficiência da infiltração de água acompanhada de períodos de estiagem pode ser percebida no rendimento de grãos das culturas agrícolas. Neste sentido, propiciar maiores taxas de infiltração de água no solo pode resultar em maiores produtividades, principalmente para as culturas energéticas em ascensão.

Assim sendo, este estudo objetiva mostrar o comportamento da infiltração de água em sistemas de manejo por meio da modelagem matemática. E, a partir de análise geoestatística, verificar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo

que mais contribuem para infiltração de água mediante uso de mapas temáticos destes atributos.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Infiltração de água no solo

O processo de passagem de água pela superfície do solo é conhecido como infiltração, sendo a quantidade de água infiltrada por unidade de tempo definido como taxa de infiltração (LIBARDI, 1999). Sobrinho et al. (2003) afirmam que nos momentos iniciais de um evento, chuva ou irrigação, a infiltração ocorre de maneira mais acelerada, tendendo a diminuir e estabilizar com o passar do tempo. Este valor constante é conhecido na literatura como Taxa de Infiltração Estável (TIE) (ZONTA et al., 2012), Velocidade de Infiltração Básica (VIB) (POTT; MARIA, 2003) ou Taxa de Infiltração Básica (TIB) (SOBRINHO et al., 2003).

Este importante componente do ciclo hidrológico é fundamental para a determinação do escoamento superficial e suas consequências, a exemplo da erosão hídrica, que é a perda da água que não infiltra, nem fica armazenada de forma permanente ou temporária (PORTELA et al., 2010). A complexidade com que o processo de infiltração de água ocorre está diretamente relacionada com alguns fatores, como as características da precipitação, propriedades físicas do solo, ações de uso de manejo, condições de umidade inicial, além dos fatores relacionados com a superfície, como a cobertura vegetal que protege o solo (SANTOS et al., 2014).

Dentre as propriedades físicas do solo, a textura e a estrutura são as mais importantes no que se refere a infiltração de água, pois estão diretamente ligadas a quantidade de macroporos do solo, responsáveis pela condução de água (COSTA; ALVES; SOUSA, 2015).

A textura do solo evidencia a distribuição do tamanho das partículas, areia, silte e argila, sendo que em solos mais arenosos a infiltração tende, em geral, a apresentar taxas mais elevadas em comparação com solos mais argilosos. No entanto, solos argilosos bem estruturados podem apresentar taxas de infiltração semelhantes ou até maiores que solos arenosos (DALRI et al., 2010). Isto ocorre porque a estrutura, por referir-se ao arranjo e organização de suas partículas umas às outras em agregados, pode influenciar as condições da relação solo-água de acordo com o estado em que se encontra, já que este pode ser modificado pelas condições de uso e manejo (STEFANOSKI et al., 2013; OLIVEIRA; LIMA; VERBURG, 2015).

A precipitação é um fator natural que influencia diretamente a infiltração de água, principalmente no que se refere à intensidade. Chuvas com intensidade maior que a taxa de infiltração provocam alterações na superfície do solo, iniciando o processo de escoamento superficial (ZHAO et al., 2018), contribuindo fortemente para a erosão hídrica.

Além disso, precipitações de maior intensidade podem provocar a compactação das camadas mais superficiais e a formação de selos que causam o encrostamento da superfície, impedindo ou dificultando a entrada de água (ZONTA et al., 2012).

A cobertura do solo é fator determinante para a infiltração, pois atua como uma proteção, ao desempenhar o papel de dissipar a energia erosiva das gotas de chuva (DECHEN et al., 2015). Sob a influência da cobertura há uma redução do processo de desagregação das partículas do solo e de selamento de sua superfície contribuindo para maiores taxas de infiltração de água. Santos et al. (2014) verificaram a relação positiva entre cobertura vegetal e taxa de infiltração de água, pois no experimento realizado constataram um aumento na taxa de infiltração em solo com cobertura de resíduo acima de  $6 \text{ Mg ha}^{-1}$  no sistema plantio direto.

Visando a conservação do solo, as ações de manejo sofreram modificações ao longo do tempo, passando pelo sistema convencional, cultivo mínimo e o atual sistema plantio direto. De forma geral, a infiltração é afetada pelas ações de manejo, visto que estas refletem diretamente na alteração da estrutura do solo, assim como nas condições de superfície (CUNHA et al., 2015).

Ações com maior revolvimento do solo, no caso do plantio convencional, tendem a promover um aumento na taxa de infiltração, porém este efeito é passageiro, já que a ausência de cobertura promove o selamento da superfície pelo impacto direto das gotas de chuva (ALMEIDA et al., 2018).

Já as ações com menor revolvimento, como no sistema plantio direto, propiciam maior taxa de infiltração em razão da cobertura com os restos culturais (SOUZA; BERTOL; WOLSCHICK, 2017). Contudo, há um aumento na densidade do solo ao longo do tempo, pelo tráfego de máquinas culminando em compactação na camada superficial a qual reduz a taxa de infiltração de água (NUNES et al., 2015).

### 2.1.1 Atual Sistema Plantio Direto

O Sistema Plantio Direto (SPD) data de muitos anos, mas foi introduzido no Brasil de forma gradativa recentemente. Os primeiros procedimentos adotados aconteceram em meados dos anos 70, sendo intensificados no início dos anos 90, como alternativa para solucionar problemas de erosão aparentemente irreversíveis que estavam ocorrendo nos solos agrícolas (ROSA, 2009). Este sistema, conhecido como sistema conservacionista (SOUZA; BERTOL; WOLSCHICK, 2017) caracteriza-se pela ausência quase total das ações de revolvimento e preparo desde a semeadura até a colheita, bem como preconiza a máxima quantidade de restos culturais na superfície e a rotação de culturas (FASINMIRIN; REICHERT; 2011; TELLES; REYDON; MAIA, 2018).

A utilização do SPD objetiva a conservação do solo, para que seja mais produtivo e possa também garantir a produtividade futura. O SPD diminui a erosão, a produção de sedimentos, bem como a perda de água e nutrientes, isto porque promove a estabilização dos agregados pelo aumento da matéria orgânica do solo (REICHERT et al., 2016). Os restos culturais deixados sobre a superfície também atuam como uma proteção, absorvendo a energia cinética da gota de chuva (SOUZA; BERTOL; WOLSCHICK, 2017; TELLES; REYDON; MAIA, 2018), promovendo um aumento da resistência à desagregação. Telles, Reydon e Maia (2018) ressaltam o efeito da tortuosidade da superfície do solo, resultado dos restos culturais, que diminuem a velocidade do escoamento ao atuarem como uma barreira que impede que a água saia da lavoura.

No entanto, é importante salientar as modificações causadas na estrutura do solo ao longo do tempo de implantação deste sistema. Muitos estudos apresentam resultados que indicam um estado de compactação em solos no SPD (CÁSSARO et al., 2011; SUZUKI; REICHERT; REINERT, 2013; DIDONÉ et al., 2014; SORACCO et al., 2018), derivada do elevado tráfego de máquinas e arranjo natural das partículas. Para Gubiani et al. (2015), a ausência quase total de intervenção mecânica, que acontece somente na linha de semeadura, aliada ao consecutivo tráfego de implementos agrícolas, sugere que a compactação no SPD pode ser um problema maior do que no sistema convencional de cultivo.

Didoné et al. (2014) destacam ainda outros problemas sobre a adoção incorreta do SPD, como o abandono do terraceamento para contenção do escoamento superficial, rotação de culturas de forma inadequada, pouca produção de resíduo vegetal pelo manejo inadequado, além do já citado tráfego excessivo e descontrolado de máquinas e equipamentos agrícolas, causando a compactação do solo. A alta rentabilidade obtida com determinadas culturas como a soja e o milho no cenário brasileiro, levou os produtores a pouca diversificação na rotação de culturas, principalmente no que se refere as plantas de cobertura, reduzindo, assim, a permanência de cobertura por resíduos na superfície (MERTEN; MINELLA, 2013).

Apesar do grande desenvolvimento das técnicas conservacionistas do solo, bem como a grande aderência deste sistema em solos do sul do país, a capacidade de solucionar os problemas ambientais ainda é menor que o esperado (DIDONÉ et al., 2014), pois há uma tendência ao abandono das práticas corretas de conservação do solo.

Como alternativa a este impasse, têm-se a adoção do SPD com qualidade, que inclui a rotação de culturas com plantas cujo sistema radicular profundo e agressivo é capaz de romper as camadas compactadas (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004; NICOLOSO et al., 2008), melhorando a estrutura do solo e formando uma rede de bioporos estáveis com condições favoráveis (JUNIOR, et al., 2012) para o desenvolvimento das próximas culturas.

### **2.1.2 Latossolos argilosos x compactação do solo**

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2007), o Paraná possui aproximadamente 31% de seu solo classificado como Latossolo. Este tipo de solo caracteriza-se por uma fertilidade natural menor (distróficos), com textura argilosa ou muito argilosa (PEREIRA et al., 2010), além de profundos e com perfil uniforme. Ainda de acordo com estes autores, o argilomineral de origem e de maior quantidade neste tipo de solo é a caulinita, que proporciona uma consistência mais rígida e coesa quando secos, além do adensamento natural em determinadas situações.

De maneira geral, os tipos de solo têm comportamentos diferentes quando compactados, que são ditados em sua maioria pela textura, tipo de mineral, grau de intemperização, teor de umidade e manejo. Suzuki et al. (2008) destacam que, apesar de Latossolos apresentarem maior densidade em razão do comportamento de ajuste da caulinita, estudos apontam a textura como maior responsável pelo aumento da densidade.

A composição do solo, aliada ao grande aporte de matéria orgânica pelos restos culturais permanentes por conta do SPD, promove uma maior cimentação dos agregados. Em Latossolos, especialmente onde o teor de argila é maior, a dispersão dos microagregados de argila tem sido problemática em razão das fortes forças de interação causadas pela ligação de óxidos de alumínio e ferro, além da matéria orgânica (LEÃO, 2016).

Assim sendo, percebe-se o favorecimento na elevação do estado de compactação nos Latossolos, seja pelo adensamento natural, ou pela origem antrópica, pelo uso de máquinas e equipamentos ou até pisoteio animal. No caso da origem antrópica, a compactação é facilitada quando as condições de umidade do solo não são respeitadas no momento do manejo do mesmo. Luciano et al. (2012) afirmam que a principal causa de compactação é o tráfego de máquinas em solos com umidade próxima ao limite de plasticidade, pois um solo com mais umidade e maior coesividade é mais susceptível ao deslize e adesão das partículas quando expostos a determinado tipo de pressão, elevando o estado de compactação.

A maior umidade de Latossolos argilosos deve-se ao maior teor de argila, apresentando, assim, poros com menor diâmetro, responsáveis pela retenção de água. Essa maior retenção de água, dada pelo elevado número de microporos, torna o solo argiloso susceptível a um estado de compactação mais elevado (SECCO et al., 2009).

### **2.1.3 Infiltração de água x compactação do solo**

A compactação do solo é caracterizada, dentre outros fatores, pelo aumento da densidade e redução do espaço poroso. Ocorre uma diminuição do volume de macroporos, responsáveis pela infiltração de água, o que acarreta em algumas

consequências como o aumento do escoamento superficial, empecilho ao crescimento das raízes das plantas, redução da absorção de nutrientes e com isso, alterações no rendimento das culturas (LUCIANO et al., 2012).

A infiltração é o mais importante processo do ciclo hidrológico, seu comportamento afeta diretamente a qualidade do solo, pois, de acordo com Reichert, Reinert e Braida (2003), a infiltração e a densidade são indicadores físico-hídricos, bem como estão relacionados inteiramente com o potencial de lixiviação, erodibilidade e produtividade.

Um atributo muito importante a ser mencionado, quando o assunto é o fluxo de água em um meio poroso é a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) que representa a capacidade com que o solo transmite água e solutos (MESQUITA; MORAES, 2004), estando relacionada, portanto, com o volume de macroporos. Assim, em um solo compactado há uma diminuição da  $K_{sat}$  e, conseqüentemente, da infiltração de água. Na literatura, são encontrados trabalhos que investigam a taxa de infiltração ou a  $K_{sat}$  tanto para problemas que envolvam o movimento da água no solo, como a irrigação, drenagem e o escoamento superficial, quanto para avaliar o efeito de estados de compactação (OLIVEIRA et al., 2013a; DRESCHER et al., 2016).

Oliveira et al. (2013a) avaliaram a qualidade estrutural de um Latossolo submetido aos estados de compactação, comparando mata natural (considerada testemunha) com níveis de compactação de acordo com o número de passadas de um trator. Os autores observaram que entre os tratamentos com passadas do trator não houve diferença significativa para a condutividade hidráulica, porém, o tratamento testemunha apresentou valor consideravelmente maior. A redução deste atributo foi explicada pelos autores por conta da deformação na estrutura do solo, que ocasionou a diminuição do volume de macroporos. Resultado semelhante ao encontrado por Millan et al. (2014) também em solos artificialmente compactados.

O manejo e cobertura inadequados também podem ocasionar alterações na infiltração de água. Em seu trabalho, Almeida et al. (2018) investigaram os efeitos dos tipos de manejo e cobertura na estrutura do solo e na taxa de infiltração. O experimento dos autores constatou que, para o tratamento de solo exposto, nas camadas subsuperficiais, os valores de macroporosidade e densidade ultrapassaram os limites críticos de compactação, corroborando com uma redução aproximada de

50% na taxa de infiltração deste tratamento comparado com o tratamento do solo coberto com pastagem, cujo valores de densidade foram estatisticamente inferiores.

É possível também verificar os efeitos positivos de um solo em recuperação por meio do aumento da taxa de infiltração ou  $K_{sat}$ , pois tais atributos são importantes indicadores da qualidade física do solo. Drescher et al. (2016) avaliaram a duração do efeito da descompactação do solo por meio da escarificação em solo sob sistema plantio direto há 27 anos. Os autores mensuraram alguns atributos físicos a cada seis meses, durante três anos, e constataram que a avaliação da duração dos efeitos depende das propriedades avaliadas, chegando a 24 meses quando a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no solo foram levadas em consideração, concluindo que estas são as mais adequadas para avaliar a duração da descompactação mecânica. Vale ressaltar também que, no experimento, a taxa de infiltração estável no tratamento testemunha, que não recebeu escarificação, apresentou valor menor que no solo recém-escarificado. Resultado análogo ao encontrado por Prando et al. (2010) quando avaliaram o efeito da descompactação por escarificação mecânica e rotação de culturas.

De forma geral, a redução na taxa de infiltração está atrelada às alterações estruturais no solo.

#### **2.1.4 Impacto da má infiltração de água no solo no desenvolvimento e rendimento de grãos de cultivos agrícolas**

Na busca por maiores rendimentos de grãos dos cultivos agrícolas e consequente maior lucratividade, muitos produtores têm feito uso e manejo inadequados do solo, ocasionando um efeito oposto ao pretendido. Como já mencionado, a compactação do solo é uma séria consequência que tem afetado diretamente a produtividade das culturas (DALVAN et al., 2006). Isto ocorre porque em um solo compactado há uma redução do espaço poroso total do solo, aumento da densidade e consequente tendência para a redução da taxa de infiltração (SUZUKI; REICHERT; REINERT, 2013), refletindo negativamente no desenvolvimento e produtividade das culturas (PRANDO et al., 2010), já que a água é o principal fator de produção agrícola.

A redução na infiltração de água implica em um aumento do escoamento superficial, além da redução no armazenamento de água (KUNZ et al., 2013), submetendo as culturas a um estado de déficit hídrico.

O estudo sobre o comportamento das culturas em situações de estresse hídrico é fundamental para entender seu desenvolvimento e produtividade. Vivan et al. (2013) estudaram o rendimento relativo da soja em relação a lâmina de irrigação, em duas épocas de plantio. A pesquisa revelou reduções no rendimento de grãos nos dois casos, no tocante à lâmina aplicada, pois a planta não teve suas necessidades hídricas supridas. Resultados semelhantes foram obtidos por Bell et al. (2018) ao estudarem diferentes disponibilidades de água com irrigação, na cultura do sorgo.

Alterações na produtividade de uma cultura podem ser resultado de uma combinação de fatores, mas a infiltração é determinante neste caso. Santi et al. (2012) analisaram os componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes a produtividade de grãos (soja e milho), concluindo que, no caso dos atributos físicos, a infiltração de água é o fator que afeta mais a produtividade de grãos. Bonini et al. (2011) verificaram, ao avaliar a produtividade do trigo em solo sob diferentes estados de compactação, redução de 97% na taxa de infiltração no tratamento com cinco de passadas do rolo compactador, refletindo em uma redução de 23% na produtividade de trigo, em comparação com o tratamento sem passadas do rolo compactador.

### **2.1.5 Modelagem matemática da infiltração de água no solo**

Para modelar formalmente o movimento da água no solo, são necessárias algumas informações que quantifiquem este processo, visto que a infiltração de água é resultado de uma grande quantidade de fatores. Para uma modelagem satisfatória, capaz de prever de forma eficiente o comportamento da infiltração da água, faz-se necessário a compreensão de sua relação com as propriedades do solo, o que pode ser complexo, pois a magnitude com que isso ocorre não é bem definida em alguns casos (CECÍLIO et al., 2013).

Os modelos matemáticos de infiltração podem ter base física, semiempírica ou puramente empírica, sendo estes últimos mais utilizados, pela simplicidade e

capacidade de ajuste aos dados (MOHAMMADZADEH-HABILI; HEIDARPOUR, 2015). Em tal classificação, é possível citar os modelos físicos de Green-Ampt (1911), Richards (1931) e Philips (1957); semiempíricos de Holtan (1961) e Singh e Yu (1990); e os modelos empíricos de Kostiaikov (1932) e Horton (1941). Os modelos de base física são deduzidos da lei de conservação de massa e da lei de Darcy, enquanto que os modelos empíricos são baseados em dados de campo e experimentos de laboratório (SIHAG; TIWARI; RANJAN, 2017).

A precisão e acurácia dos modelos exige constantes pesquisas e atualizações neste campo. Desta forma, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos, utilizando a modelagem matemática para explicar a infiltração de água, principalmente para mensurar a influência das ações de uso e manejo neste importante atributo (BERTOL et al., 2015; CUNHA et al., 2015; ALMEIDA et al., 2018), bem como suas implicações na erosão hídrica (CARVALHO et al., 2015).

Trabalhos recentes também buscam a apresentação de novos modelos, adaptados aos modelos já existentes. Sihag, Tiwari e Ranjan (2017) propuseram um novo modelo, adaptado ao modelo de Kostiaikov, a partir de dados de testes de campo usando modelagem de regressão não linear, sugerindo um melhor desempenho que os outros modelos comparados. Trabalho semelhante foi desenvolvido por Mao et al. (2016), quando sugeriram uma alteração acerca do modelo de Green-Ampt, modificando ainda uma hipótese do modelo original, para uma apresentação mais realista da distribuição da água no solo.

A utilização do modelo de Green-Ampt requer o conhecimento de uma condição mais específica, isto é, o tempo de início do empoçamento, que ocorre quando a intensidade de precipitação é maior que a taxa de infiltração (MOHAMMADZADEH-HABILI; HEIDARPOUR, 2015). Desta forma, muitos trabalhos utilizam a adaptação do modelo de Green-Ampt por Mein e Larson (1973), chamado de Green-Amp-Mein-Larson (GALM) em que a infiltração durante um evento de precipitação constante pode ser simulada, como no trabalho de Van Den Putte et al. (2013).

Existem também pesquisas que buscam solucionar problemas de adequação de parâmetros dos modelos, pois, em alguns casos, estes não refletem as condições reais de infiltração a campo, como é o caso do trabalho de Cecílio et al. (2013) e Zonta

et al. (2010), ao avaliarem uma combinação de alterações de parâmetros do modelo GALM, para melhor estimativa dos dados.

Assim, o uso de modelos é muito útil para a predição de determinados comportamentos, para indicar possíveis alterações no uso e manejo do solo. A modelagem de previsão pode ser empregada para gerar cenários em situações de desastres como enchentes, ou mais comumente nos casos de erosão hídrica e poluição da água em rios e recargas subterrâneas (CECÍLIO et al., 2013), configurando-se como uma ótima ferramenta para gestão dos recursos hídricos.

No tocante à disponibilidade de literatura sobre o tema, ressalta-se que todos os experimentos citados envolvendo infiltração de água foram realizados com simuladores de chuva ou infiltrômetros não representando, portando, com fidelidade, as condições de campo, dada as alterações naturais como a intensidade de chuva inconstante durante uma precipitação. Isto pode explicar a necessidade de alterações nos parâmetros e nos modelos na busca de melhores representações dos fenômenos naturais no campo.

#### **2.1.6 Aplicações da modelagem matemática da infiltração de água no solo na otimização dos cultivos agrícolas**

Em vista da necessidade de mudanças nas ações de manejo para melhoria da qualidade físico-hídrica do solo, a modelagem matemática pode auxiliar neste processo, ao viabilizar ações de uso e manejo do para melhorar os atributos físicos envolvidos na infiltração de água. A infiltração de água pode ser medida no campo ou estimada por modelos matemáticos, pois eles são capazes de explicar o comportamento da taxa de infiltração em virtude de fatores que atuam na superfície, bem como das propriedades físicas do solo (SANTOS et al., 2014).

O trabalho realizado por Santos et al. (2014) avaliou a taxa de infiltração de água comparando os modelos matemáticos de Kostikov-Lewis, Horton, e Philip, em três tipos de manejo: preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto, sendo este último com quatro níveis de resíduo vegetal na superfície: 0, 3, 6 e 9 Mg ha<sup>-1</sup>. Os autores concluíram que a manutenção de resíduos sobre o solo promove um aumento da taxa de infiltração, revelando o modelo de Horton como o mais indicado para

estimar a taxa de infiltração independentemente do tipo de manejo. Esta constatação foi justificada, pois o modelo de Horton explicou a redução na taxa de infiltração por condições da superfície e fenômenos de expansão e contração do solo. Resultados semelhantes ao obtido por Carvalho et al. (2015) ao avaliar sistemas de manejo e fases da cultura do milho.

Em trabalho análogo, Almeida et al. (2018) examinaram o efeito do preparo e cobertura do solo sobre a infiltração da água, por meio da medição desse parâmetro em áreas sob solo exposto, plantio convencional e plantio direto, com a cultura da soja, e pastagem, comparando também três modelos, Kostiakov-Lewis, Horton e Philip. Os autores verificaram melhor ajuste do modelo de Horton e, ainda, concluíram que a infiltração de água é mais influenciada pela cobertura vegetal dependendo do tipo de uso da terra, do que pelo sistema de manejo.

Assim, a predição do comportamento da infiltração de água pode contribuir para orientar as ações de manejo, a fim de minimizar os efeitos negativos provocados por ações de uso do solo inadequadas.

## **2.2 Estatística espacial**

A Estatística Espacial é uma área da Estatística Aplicada que busca compreender os fenômenos levando em consideração a localização geográfica em que os dados foram coletados ou observados, ou seja, no espaço. Dentro da Estatística Espacial, um campo de estudo é a Geoestatística, que surgiu em 1951 no continente africano quando Daniel Gerhardus Krige verificou a dificuldade de estimar com mais precisão o conteúdo de ouro em blocos de minério, sem levar em consideração a distância entre as amostras. O engenheiro Georges Matheron generalizou os estudos de Krige desenvolvendo a teoria que culminou na hoje conhecida como teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA, 1998; MATHERON, 1963).

A Geoestatística é uma área da Estatística Espacial que consiste na amostragem em um plano, com um determinado número de pontos espaçados uniformemente, de onde as amostras são coletadas (GUIMARÃES et al., 2016) e georreferenciadas, permitindo a identificação e distinção de características de uma

mesma área, tratada como uniforme (RIBEIRO et al., 2016). O conhecimento da heterogeneidade de uma área permite a utilização da agricultura de precisão, quando as ações de correção e manejo são localizadas, diminuindo os custos operacionais e o tráfego de máquinas sobre o solo (BOTTEGA et al., 2013).

Em Geoestatística, as variáveis devem ser simultaneamente aleatórias e espaciais, pois, apesar de muito inconstantes dentro do espaço, os valores numéricos observados não são inteiramente independentes (GUERRA, 1988). Espera-se que os pontos amostrais mais próximos no tempo e espaço tenham maior semelhança, bem como os mais distantes sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes (ISAAKS, SRIVASTAVA, 1989).

A teoria de Krigue explica que variáveis regionalizadas figuram como uma função que descreve fenômenos que possuem uma distribuição espacial como variáveis dependentes de sua localização no espaço. Esta função numérica é representada por um semivariograma que tem por objetivo gerar uma imagem da variabilidade dos dados, bem como da correlação entre pares de pontos no espaço e da distância de dependência amostral (VIEIRA, 2000).

Representa-se  $Z(x)$  como o valor da variável para o local  $x$ , expressa em um sistema de coordenadas  $x = (x_i, y_j)$ , e  $Z(x + h)$  é o valor da mesma variável com distância  $h$ . Desta forma, se  $x$  representa uma posição em um espaço amostral  $S$ , então, o valor da variável  $Z$  é considerado como em 1:

$$Z(x) = m(x) + \delta(x) + \varepsilon(x) \quad (1)$$

sendo,

$m(x)$  uma função determinística que descreve a  $Z$  em  $x$ ;

$\delta(x)$  um termo estocástico, com variação local e independente;

$\varepsilon(x)$  um erro residual, sem correlação espacial.

Fixada uma posição  $x$ , o valor medido de uma variável estudada  $z(x)$  é considerado como uma realização de uma determinada variável aleatória  $Z(x)$ . O conjunto de variáveis aleatórias  $Z(x)$  para qualquer  $x$  em  $S$  é chamado de função aleatória, simbolizado por  $Z(x)$ . Isto é necessário, pois uma função aleatória pode ser contínua e, com isso, submeter-se a um número de hipóteses. Sendo assim, para a estimação de valores acerca dos pontos não amostrados há que se restringir que a variável regionalizada seja estacionária estatisticamente (VIEIRA, 1998).

Dentre as hipóteses de estacionaridade, a hipótese intrínseca é a mais comum na geoestatística por ser menos restritiva. Uma função aleatória pode ser considerada intrínseca quando a esperança matemática é tal que  $E[Z(x)] = m(x) = m$  para todo  $x$ , admitindo que a variância das diferenças depende somente do vetor distância  $h$  (VIEIRA,1998). Com isso, a hipótese intrínseca é definida como em 2:

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (2)$$

e sua variância,  $Var$ , dada por 3:

$$Var[Z(x+h) - Z(x)] = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = 2\gamma(h) \quad (3)$$

### 2.2.1 Semivariogramas

O semivariograma é um instrumento utilizado para mensurar a dependência entre os pontos amostrais, espalhados em um espaço de referência cujo objetivo é a interpolação de valores necessários à construção de mapas de contorno e superfícies por meio da krigagem (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Ao supor que  $Z(x)$  represente o valor da variável para a posição  $x$ , o variograma sintetiza a continuidade espacial para toda comparação de dois valores e para todos os  $h$  significativos (MATHERON, 1963).

Existem três tipos de semivariograma, o verdadeiro, que exprime a dependência real, não conhecida; o experimental, resultado dos pontos amostrais; e o teórico que é o ajustado de acordo com algum modelo teórico (GUERRA, 1998).

Se a hipótese de estacionaridade a for satisfeita, então, de acordo com CRESSIE (1993), a função semivariância  $\gamma(h)$  é definida como em 4:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (4)$$

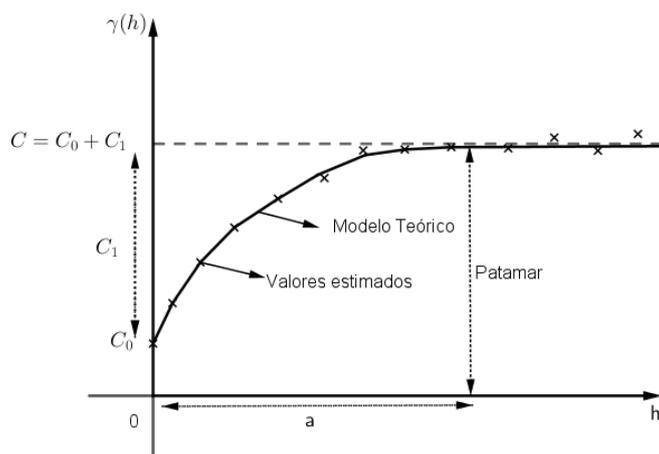
Por isso, é necessário um estimador para a semivariância a fim de construir um semivariograma experimental, a partir dos dados coletados. O Estimador Clássico de Matheron (1963) é muito utilizado, sendo uma função da semivariância dado por 5:

$$\hat{\gamma}_M(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (5)$$

em que  $N(h)$  é o número de pares de dados usados a uma distância  $h$ .

É relevante também a decisão pelo *cutoff* que melhor se adeque aos dados amostrados. Esse *cutoff*, também conhecido como ponto de corte, é a distância máxima a ser usada para o cálculo da semivariância, normalmente considerado como metade da distância máxima entre os pontos (GUERRA, 1998).

A Figura 1 é uma representação idealizada de um semivariograma experimental, uma relação entre a semivariância  $\gamma(h)$  e a distância  $h$ , em que podem ser identificados os parâmetros:  $C_0$  que é o efeito pepita;  $C_1$  que é a contribuição,  $C = C_0 + C_1$  o patamar; e  $a$  é o alcance.



**Figura 1.** Representação de semivariograma experimental e seus parâmetros.

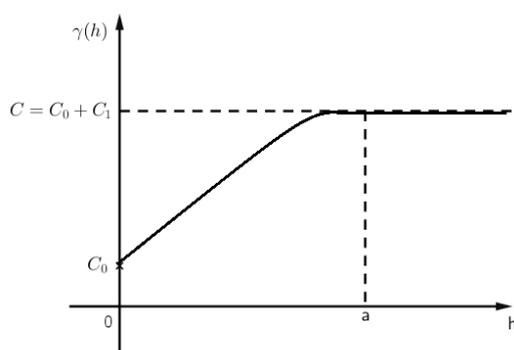
### 2.2.1.1 Modelos teóricos

Como mostrado na Figura 1, o gráfico do semivariograma experimental resulta em um combinado de pontos de  $\gamma(h)$  em função de  $h$  para os quais uma linha deve ser ajustada, no caso, uma função contínua. De acordo com o comportamento dos pontos, os modelos de ajuste podem ser classificados em modelos com patamar e modelos sem patamar (VIEIRA, 1998).

Dentre os modelos com patamar, destacam-se os modelos esférico, gaussiano e exponencial, descritos abaixo, de acordo com Isaaks e Srivastava (1989) e suas respectivas representações na Figuras 2, 3 e 4.

A) Modelo esférico:

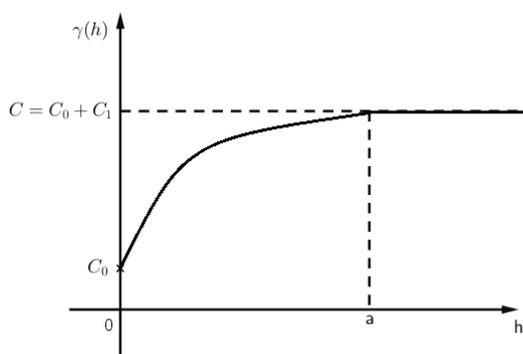
$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C_1 & h < a \end{cases} \quad (6)$$



**Figura 2.** Representação do modelo teórico esférico.

B) Modelo exponencial

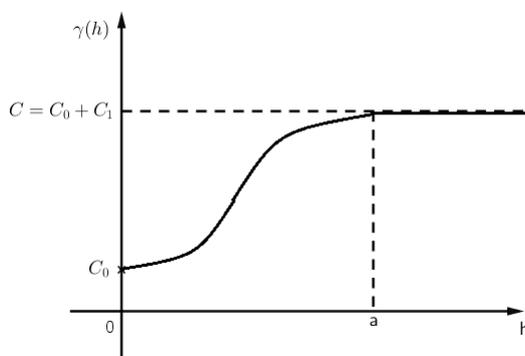
$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-3\frac{h}{a}\right) \right] \quad 0 \leq h \leq a \quad (7)$$



**Figura 3.** Representação do modelo teórico exponencial.

C) Modelo gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \left( \exp\left(-3\frac{h}{a}\right) \right)^2 \right] \quad 0 \leq h \leq a \quad (8)$$



**Figura 4.** Representação do modelo teórico gaussiano.

Segundo Kavanagh (2001), para o melhor ajuste destes modelos são utilizados métodos estatísticos como o método dos mínimos quadrados ordinários, mínimos quadrados ponderados, método de verossimilhança e o método de máxima verossimilhança restrita. Desta forma, o ajuste do modelo pode depender, além da escolha de um bom software de cálculo, também de uma análise criteriosa por parte de quem está executando.

Vieira (1998) afirma que se deve levar em conta a simplicidade do modelo ajustado, evidenciando que não há necessidade de dar muita importância para pequenas variações, mas sim que o modelo ajustado represente a tendência de  $\gamma(h)$  em relação a  $h$  para que os estimadores obtidos a partir da krigagem sejam mais confiáveis.

Com base na escolha dos modelos teóricos que com melhor ajuste, é feita a interpolação dos dados para, enfim, poder realizar a extrapolação para pontos não amostrados da mesma área.

A krigagem é um método interpolação de dados que estima valores de uma certa variável aleatória  $Z(x)$  para locais não amostrados, permitindo a construção de mapas de um espaço  $S$ . De acordo com Cressie (1993), esta técnica minimiza a variância estimada, por meio de um semivariograma ajustado, levando-se em conta a dependência estocástica entre os dados espacialmente distribuídos.

### **2.2.2 Validação cruzada**

A validação cruzada consiste em avaliar erros de estimativas permitindo comparar valores estimados e amostrados a partir da amostra de dados (GRZEGOZEWSKI, 2012). Esta validação permite escolher o modelo estimado mais próximo da semivariância.

O método consiste em descartar de forma temporária um conjunto de dados  $Z(x)$ , e para esta mesma localização estimar por Krigagem um novo conjunto  $\hat{Z}(x)$  a partir do restante dos dados amostrais. Este procedimento é repetido com todos os conjuntos, comparando o valor estimado com o valor da amostra (CARVALHO; ASSAD; PINTO, 2012).

A partir do valor real amostrado e o valor estimados é possível calcular os erros pela diferença entre estes dois valores:

$$\varepsilon(x) = Z(x) - \hat{Z}(x) \quad (9)$$

em que  $\hat{Z}(x)$  é o valor predito por krigagem sem a  $i$ -ésima observação, sem  $Z(x)$ .

A comparação dos modelos é realizada por erro médio (EM), erro médio reduzido (ER), desvio padrão dos erros médios (SEM), desvio padrão dos erros reduzidos (SER) e do erro absoluto (EA) (FARACO et al., 2008). A medida do erro associado à estimativa é o que diferencia o método da krigagem em relação aos demais (LANDIM, 2006).

O resultado final da krigagem é a superfície interpolada de cada variável, com sua respectiva distribuição espacial possibilitando a identificação, localização e a abrangência dos valores extremos, o grau de homogeneidade da área e as direções de maior gradiente. Por meio do mapa gerado é viável inferir sobre a presença de padrões ou comportamentos (GUIMARÃES et al., 2016).

### **2.2.3 Geoestatística aplicada a atributos físicos do solo**

O solo possui uma variabilidade natural, dada pela sua formação e características intrínsecas. Aliado a isto, o uso e manejo podem promover alterações pontuais, elevando a variabilidade espacial dos seus atributos (BOTTEGA et al., 2013), refletindo em uma maior heterogeneidade. Para estes casos, a estatística clássica não é satisfatória para explicar as relações entre os atributos do solo e seu manejo. Assim, a Geoestatística tem se mostrado uma alternativa eficiente para caracterizar e mensurar a variação espacial das propriedades do solo (BOTTEGA et al., 2013; NETO et al., 2015).

Entre os atributos físicos do solo, a densidade, o espaço poroso, a macro e a microporosidade, possuem certa variabilidade espacial, seja por consequência do tráfego de máquinas, pisoteio animais, ou até mesmo por ações do tempo.

Lima et al. (2015) estudaram a variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação, encontrando dependência espacial para todos os atributos analisados. De acordo com os autores, os resultados

encontrados são importantes para o planejamento experimental da área estudada e devem ser levados em consideração em termos de proposta para seu manejo.

Santana da Silva et al. (2015) constaram, ao avaliarem a variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro, que entre os atributos avaliados aqueles que melhor explicaram a variabilidade espacial na produção da cultura do feijão, para a área do estudo, foram os físicos, como densidade, porosidade total, umidade gravimétrica e volumétrica.

O estudo da variabilidade espacial destes atributos é importante também, pois estão diretamente relacionados com as propriedades hidráulicas do solo (MESQUITA; MORAES, 2004; FONSECA et al., 2017), como a  $K_{sat}$  e a infiltração de água.

### **2.2.3.1 Variabilidade espacial dos atributos do solo relacionados com a infiltração de água**

As interferências as quais o solo é submetido promovem alterações em suas propriedades físicas, evidenciando geralmente um estado de deterioração. Assim, é fundamental conhecer a variabilidade espacial destes atributos, buscando um manejo sustentável (OLIVEIRA et al., 2013b).

Entre os atributos físicos do solo que determinam a infiltração de água, a  $K_{sat}$  é a que possui maior variabilidade espacial e, conseqüentemente, maior coeficiente de variação nos testes estatísticos (ALMEIDA et al., 2017). Esta elevada variação ocorre, pois, a  $K_{sat}$  está diretamente relacionada com a macroporosidade, suscetível ainda a presença de bioporos e também à densidade do solo, principalmente em camadas mais superficiais, nas quais ocorre o maior revolvimento do solo e ruptura da continuidade dos poros (MESQUITA; MORAES, 2004).

Almeida et al. (2017) verificaram a variabilidade espacial da condutividade hidráulica em Latossolo, constatando que este atributo determinado por permeâmetro de carga decrescente e a densidade apresentaram dependência espacial. De forma análoga, Lima et al. (2015) também constaram por meio de mapas de correlação, uma relação muito clara entre a infiltração e os demais atributos físicos do solo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Infiltração de água no solo

##### 3.1.1 Localização e caracterização da área de estudo

Este trabalho faz parte de um experimento de longa duração em uma área em que se avaliam sistemas de manejo. O experimento foi conduzido na área experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) polo regional de Santa Tereza do Oeste, Paraná, Brasil, a cerca de 20 km da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, localizado a latitude 25° 05' 6,65" S e longitude 53° 35' 12,98" O. Na região o clima se caracteriza como mesotérmico subtropical úmido, conforme a classificação de Köppen, Cfa (CAVIGLIONE, 2000), com precipitação média anual de 1840 mm e umidade relativa do ar entre 75 a 80 % (IAPAR, 2000).

De acordo com a EMBRAPA (2018), o solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico típico (LVdf). A área possui declividade suavemente ondulada com valores variando entre 0,21% e 5,41%.

Para caracterização química do solo foram retiradas amostras parcialmente deformadas de solo das camadas de 0 - 0,5; 0,5 - 0,10; 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m de cada tratamento com duas repetições por tratamento, sendo enviadas para análise no Laboratório de Análises Químicas do Solo do IAPAR (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização química do solo para nas camadas em estudo

Camadas (m)	pH CaCl <sub>2</sub>	P (Mg dm <sup>-3</sup> )	MO (g dm <sup>-3</sup> )	Cátions						V (%)	
				Al <sup>3+</sup>	H+Al	Ca	Mg	K	SB		T
0-0,05	5,4	38,3	55,1	0,0	4,9	6,8	2,7	0,9	10,4	15,3	67,7
0,05-0,10	5,1	27,2	48,0	0,1	6,7	4,9	2,2	0,7	7,7	14,3	53,5
0,10-0,20	4,8	26,4	44,1	0,3	7,9	3,7	1,7	0,5	5,9	13,8	42,8
0,20-0,40	4,6	9,2	39,2	0,5	8,5	2,6	1,4	0,4	4,4	12,8	33,9

SB: Soma das bases; T: Capacidade de troca de cátions; V: Saturação por bases

Para a análise granulométrica, apresentada na Tabela 2, foi utilizado o método da pipeta para as camadas de 0 - 0,1; 0,1 - 0,2; e 0,2 - 0,3 m. A classe textural foi classificada como muito argilosa.

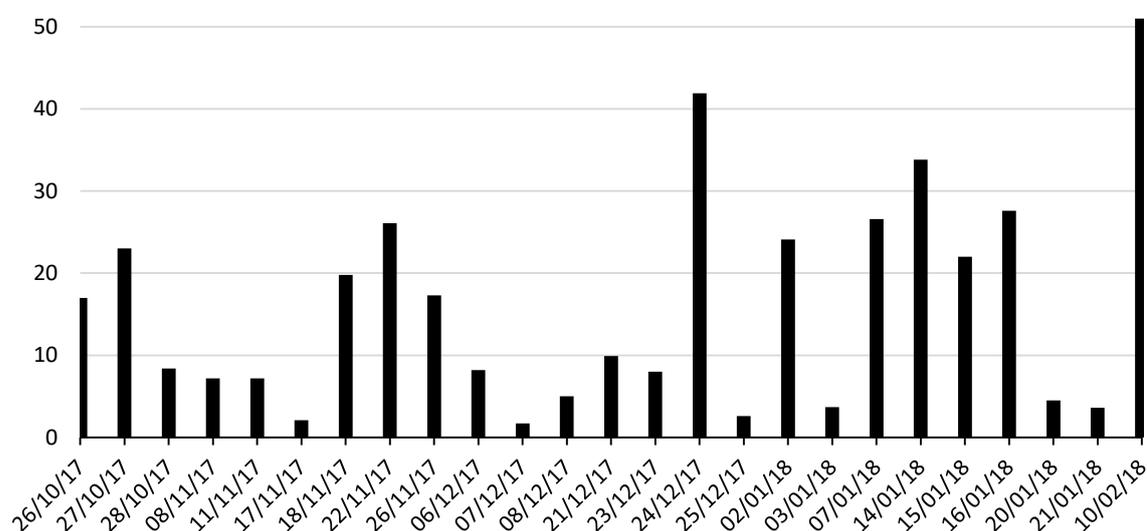
**Tabela 2.** Composição granulométrica<sup>1</sup> do solo nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m da área experimental do IAPAR/Santa Tereza (valores médios de 3 repetições)

Camada (m)	Granulometria		
	Areia	Argila	Silte
	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
0,0-0,1	44,9	561,1	394,1
0,1-0,2	38,7	641,9	319,4
0,2-0,3	24,7	706,2	269,1
<b>Média</b>	<b>36,1</b>	<b>636,4</b>	<b>327,5</b>

<sup>1</sup> Método da pipeta, conforme USDA-Soil Conservation Service. Soil Survey Investigations Report n.1. Whashington, 1972. 63p.

### 3.1.2 Precipitação

A Figura 5 apresenta os dados de precipitação durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja os quais foram obtidos na estação meteorológica do IAPAR de Santa Tereza dos Oeste.



**Figura 5.** Precipitação e temperatura média diária no período de 26/10/17 a 19/02/18 em Santa Tereza do Oeste/PR.

Os dados fornecidos pela estação meteorológica estavam distribuídos por hora, assim, a precipitação diária foi analisada entre os dias 26/10/2017 a 21/02/18, verificando-se o somatório precipitado em 24 horas no período compreendido entre às 8h do dia anterior até às 08h do dia da coleta, pois todas as coletas para

quantificação das perdas de água foram realizadas sempre logo após este horário. Estes dados foram utilizados para o cálculo da intensidade de chuva, sendo esta considerada como o valor da maior precipitação ocorrida em cada período de coleta.

### 3.1.3 Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi realizado na safra 2017/2018 com a cultura da soja, sendo que há quatro anos implantou-se um experimento de longa duração envolvendo sistemas de manejo nesta área: sistema plantio direto tradicional, sistema plantio direto gessado, sistema plantio direto com escarificação e sistema plantio direto com qualidade com espécies de cobertura em consórcio ou não, denominadas “recuperadoras” de estrutura do solo, conforme segue:

T1 = Milheto;

T2 = Aveia branca;

T3 = Guandu anão;

T4 = Aveia preta;

T5 = Sistema plantio direto com escarificação até 0,3 m de profundidade;

T6 = Centeio;

T7 = Aveia preta + nabo forrageiro;

T8 = *Crotalaria juncea*;

T9 = Feijão guandu;

T10 = *Crotalaria spectabilis*;

T11 = Sistema plantio direto com aplicação de 3 t ha<sup>-1</sup> de gesso em superfície;

T12 = Aveia preta + tremoço branco;

T13 = Mucuna preta;

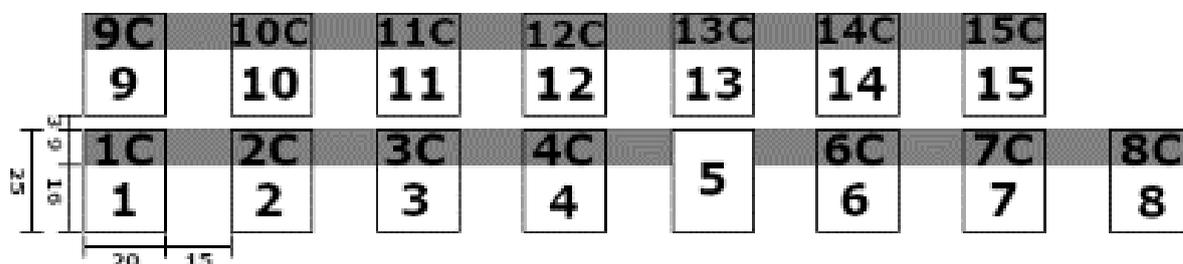
T14 = Aveia preta + ervilha forrageira;

T15 = Sistema plantio direto tradicional (Testemunha).

Os estudos anteriores realizados nesta área por Pilatti et al. (2018) e Tokura et al. (2018) verificaram que as espécies de cobertura utilizadas anteriormente não proporcionaram melhoria significativa na qualidade estrutural do solo, por conta das boas condições estruturais iniciais e ao alto teor de matéria orgânica do solo, conforme evidenciado na Tabela 1.

Assim, foi necessária a passagem de um rolo compactador buscando a deformação na estrutura do solo em aproximadamente 50% da largura das unidades experimentais, possibilitando criar dois estados estruturais em cada tratamento: faixa compactada e faixa não compactada elevando, assim, de 15 para 29 unidades experimentais todo o experimento (o tratamento T5, Sistema plantio direto com escarificação até 0,3 m de profundidade, não recebeu passagem do rolo compactador). Cada tratamento foi dividido, então, em duas regiões, sendo que uma delas recebeu três passadas de rolo compactador, BOMAG BW 211D-40 de 16 toneladas com o dispositivo vibratório ligado. O tratamento T5 não recebeu as passadas do rolo compactador, uma vez que a escarificação havia ocorrido poucos dias antes do procedimento de compactação e, com isso, não representaria de forma adequada o estado estrutural do solo. A umidade do solo no dia da compactação estava em 38,43% na camada de 0,0 – 0,1 m, e de 37,19% na camada de 0,1 – 0,2 m.

Os 29 tratamentos foram estabelecidos em delineamento inteiramente ao acaso, sendo cada parcela não compactada de 16 x 20 m e as parcelas compactadas de 9 x 20 m, como representado na Figura 6.

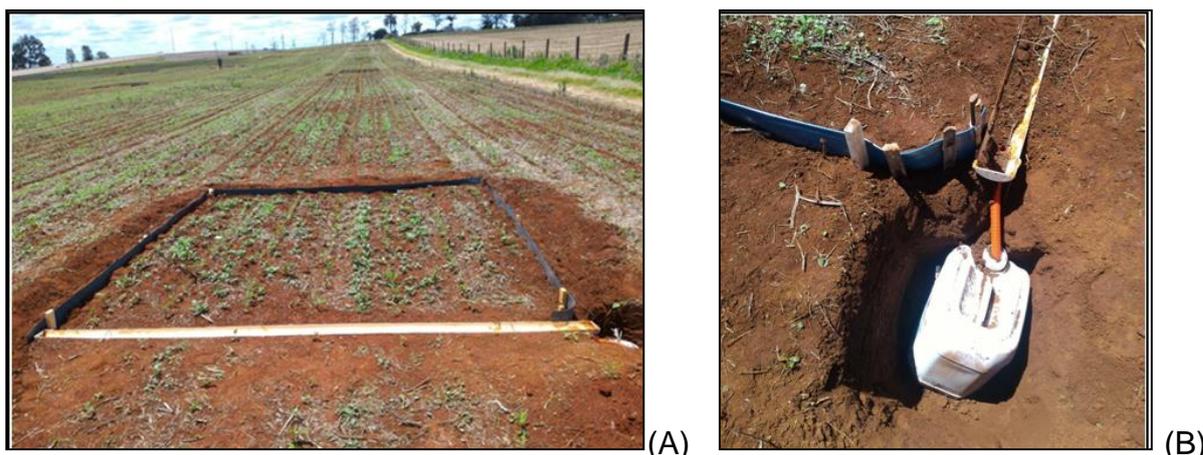


**Figura 6.** Croqui da disposição dos tratamentos após compactação. A faixa escura representa a faixa compactada pelo rolo compactador.

Para a determinação do volume de enxurrada escoado foram confeccionadas 29 calhas coletoras em cano PVC com 0,10 metros de diâmetro e 3 metros de comprimento. Os canos foram cortados ao meio, com as duas extremidades fechadas, sendo que próximo a uma das extremidades foi feito um furo para alocação de mangueira corrugada para que esta fosse conectada aos depósitos de armazenamento de água (galões de 25 litros).

Estas calhas foram instaladas em cada um dos tratamentos, delimitadas por separadores de grama em uma área de 9 m<sup>2</sup> (3 x 3 m), sendo que os galões foram acondicionados em trincheiras abertas próximo as calhas, sempre se verificando

anteriormente a declividade da parcela (Figura 7). Em cada precipitação, o volume total escoado foi medido com auxílio de baldes e provetas graduadas para, posteriormente, determinar a infiltração de água no solo durante as chuvas naturais. A infiltração de água foi determinada pela diferença entre o volume total das precipitações ocorridas em 24h, descontando-se o volume total da enxurrada neste período.



**Figura 7.** (A) Calha coletora instalada; (B) Depósito de armazenamento de água da chuva.

### 3.1.4 Propriedades físicas do solo

A caracterização das propriedades físicas do solo foi realizada antes da semeadura da soja e logo após a sua colheita. Foram realizadas amostragens de solo em dois pontos aleatórios de cada tratamento, sendo que em cada ponto coletou-se duas amostras de solo nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. As amostras indeformadas foram coletadas com anéis volumétricos de inox, sendo alocadas em latas de alumínio e levadas ao Laboratório de Física do Solo, LAFIS, localizado na UNIOESTE, Cascavel, Paraná. No laboratório, as amostras foram devidamente limpas e adequadas ao volume do anel, sendo posteriormente colocadas em bandejas para saturação por um período aproximado de 24h, para após determinação da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) em permeâmetro de carga constante (EMBRAPA, 1997).

Após determinação da  $K_{sat}$ , as amostras de solo foram novamente saturadas e alocadas em uma coluna de areia a uma tensão de 0,6 metros de coluna de água, para a retirada da água dos macroporos (REINERT; REICHERT, 2006).

Após a coluna de areia, as amostras foram, então, levadas em estufa com temperatura de 105°C até massa constante, para extração da água contida nos microporos.

A densidade ( $D_s$ ) do solo foi determinada por meio do método do anel volumétrico, sendo resultado da divisão da massa do solo seco (MSS) já descontado a massa do anel, pelo volume total (VT) do anel (EMBRAPA, 1997), conforme a expressão:

$$D_s (\text{Mg m}^{-3}) = \frac{\text{MSS}}{\text{VT}} \quad (10)$$

Por sua vez, a porosidade total (PT) foi avaliada por meio da densidade do solo e densidade de partícula ( $D_p$ ) pela equação abaixo proposta por Vomocil (1965):

$$\text{PT}(\%) = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) \times 100 \quad (11)$$

Para obter o valor da microporosidade ( $M_i$ ) utilizou-se:

$$M_i(\%) = \frac{\text{MSU} - \text{MSS}}{\text{MSS}} \times 100 \quad (12)$$

Já para o cálculo da macroporosidade ( $M_a$ ) foi utilizada a seguinte equação:

$$M_a (\%) = \text{PT} - M_i \quad (13)$$

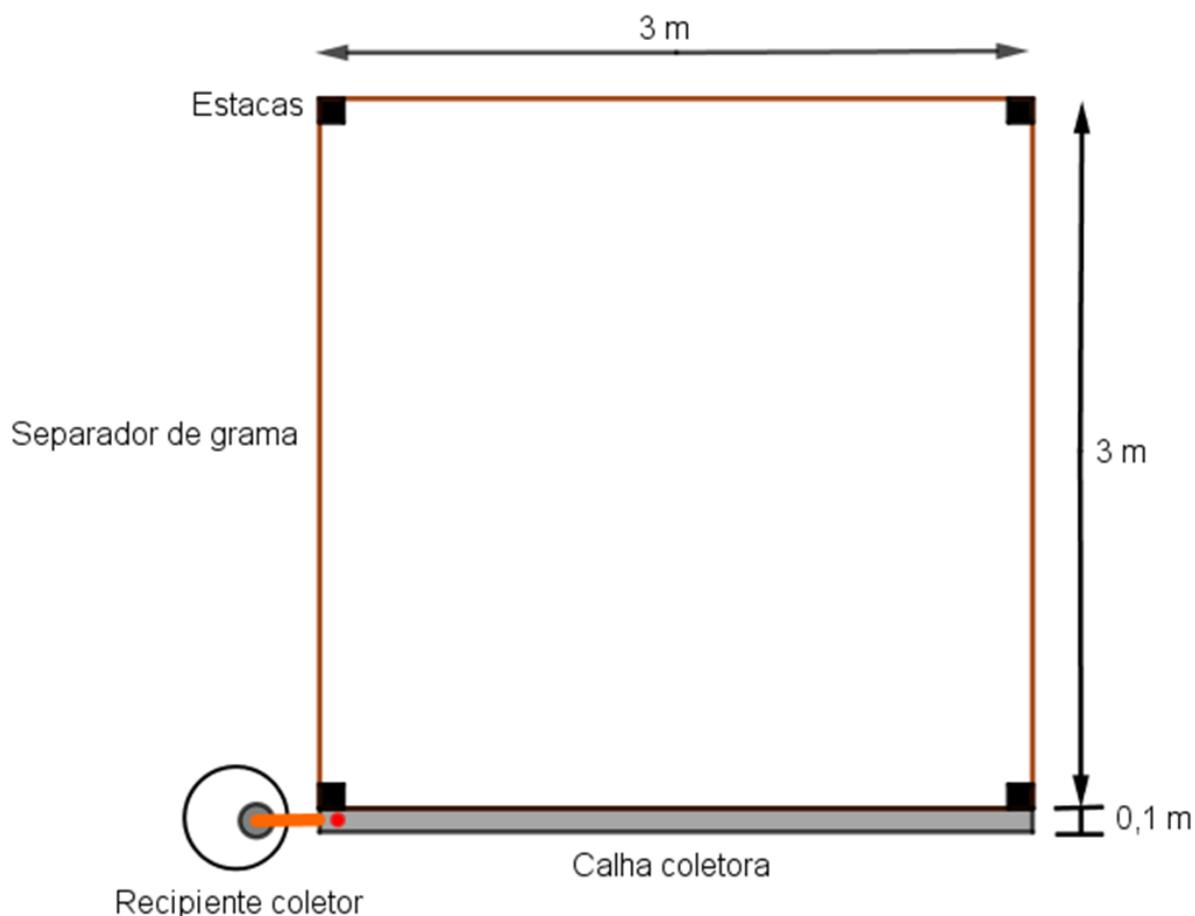
A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico com álcool.

### 3.1.5 Infiltração de água

A cada precipitação ocorrida durante o ciclo da soja, o volume de água escoado foi determinado diretamente por meio de baldes e provetas graduadas, sempre no período da manhã, ou seja, o período de coleta considerado compreendeu as 24h anteriores ao momento da coleta.

Para determinação da quantidade de água coletada em cada tratamento, foi considerado que este representa um somatório do volume escoado dentro da área delimitada pelos separadores que compreendem 9 m<sup>2</sup>, mais o que escoou dentro da

calha de PVC, resultando, portanto, uma área de captura de água de 9,3 m<sup>2</sup> como mostra a Figura 8.



**Figura 8.** Representação da área da calha coletora.

Para determinar o volume infiltrado em cada parcela, primeiro foi convertido o valor captado no depósito em milímetros, dividindo-se o volume total coletado nos galões, em litros, pela área total de coleta, 9,3 m<sup>2</sup>. Posteriormente, este valor foi subtraído do volume total de chuva, também em milímetros.

Foram realizadas 28 coletas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, porém foi necessário descartar alguns dados, em razão dos contratempos encontrados, principalmente no início da coleta e em precipitações de maior intensidade, como pode ser observado na Figura 9. Em tais casos, o volume coletado poderia não representar o total efetivamente escoado, já que, em alguns tratamentos, as calhas acabaram por entupir com solo e resíduos vegetais. Do total de coletas realizadas, apenas 25 foram utilizadas para a modelagem matemática desenvolvida.



**Figura 9.** Calha entupida em dia de precipitação elevada.

### **3.1.6 Semeadura e colheita**

Foi realizada aplicação de calcário em 20 de setembro de 2017. A escarificação no tratamento T5 (SPD com escarificação) deu-se em 06 de outubro de 2017, e a aplicação do gesso no tratamento T11 (SPD gessado) em 11 de outubro de 2017. O plantio da soja aconteceu em 11 de outubro de 2017 em toda a área experimental. A cultivar da soja utilizada foi a Lança IPRO com sementeira de 15 sementes por metro linear e espaçamento de 45 centímetros entre linhas e adubação de 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 08-22-08 + 6% Ca + 9% S. A colheita foi realizada no dia 26 de fevereiro de 2018.

### **3.1.7 Análise estatística**

As propriedades físicas foram submetidas ao software R Studio (R CORE TEAM, 2016) para determinação das estatísticas descritivas como a média, mediana, variância, desvio padrão e análise de variância e posterior comparação de médias dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Para avaliar a influência do estado estrutural do solo na infiltração de água, foi analisada a combinação dos dois períodos de coleta de dados, antes da semeadura e após a colheita, assim como uma média das repetições das camadas avaliadas de cada atributo. Isto possibilitou a identificação de tratamentos homogêneos a partir da identificação de médias semelhantes entre eles, pelo teste de Tukey.

Para a infiltração acumulada I, foi realizado o mesmo procedimento de análise estatística, considerando cada dia de coleta como uma repetição para cada tratamento.

### 3.1.8 Modelagem matemática

Para análise da infiltração acumulada, foram utilizados os modelos de Kostiakov (1932) e o modelo de Philip (1957). O modelo de Kostiakov (1932) é definido como:

$$I = at^b \quad (15)$$

em que:

I é a infiltração acumulada (mm);

t é o tempo de infiltração (horas);

a é uma constante que depende do solo;

b é uma constante que depende do solo ( $0 < b < 1$ ).

Os parâmetros a e b são parâmetros empíricos, sem significado físico, e são ajustados a partir de dados observados. Com base na equação em evidência, é possível também obter a equação da taxa de infiltração em  $\text{mm h}^{-1}$ , por meio da derivação da equação acima. Apesar de ser um modelo puramente empírico, é muito útil para programas de irrigação, ajusta-se a uma grande variedade de solos, porém para períodos de tempo curtos (LIBARDI, 2009).

O modelo de Philip (1957) descrito a seguir leva em consideração características do solo:

$$I = St^{\frac{1}{2}} + Ft \quad (16)$$

em que:

I é a infiltração acumulada (mm);

t é o tempo de infiltração (horas);

S é um parâmetro do solo denominado sortividade que indica a capacidade de um solo homogêneo absorver água em relação a sua umidade inicial;

F é um parâmetro que se relaciona com a contribuição da gravidade para o movimento da água (LIBARDI, 1999).

Ressalta-se que, apesar de o modelo de Philip possuir uma base física, dado seus parâmetros S e F, neste trabalho, estas constantes serão obtidas a partir de ajustes dos dados observados.

O ajuste dos parâmetros e obtenção dos modelos foi determinado por meio de estimação não linear com auxílio do software Statistic 10.0 (STATSOFT, 2011). O algoritmo usado foi o Levenber-Marquardt, implementado no software, com um número máximo de iterações igual a 50 e critério de convergência igual a  $10^{-6}$ .

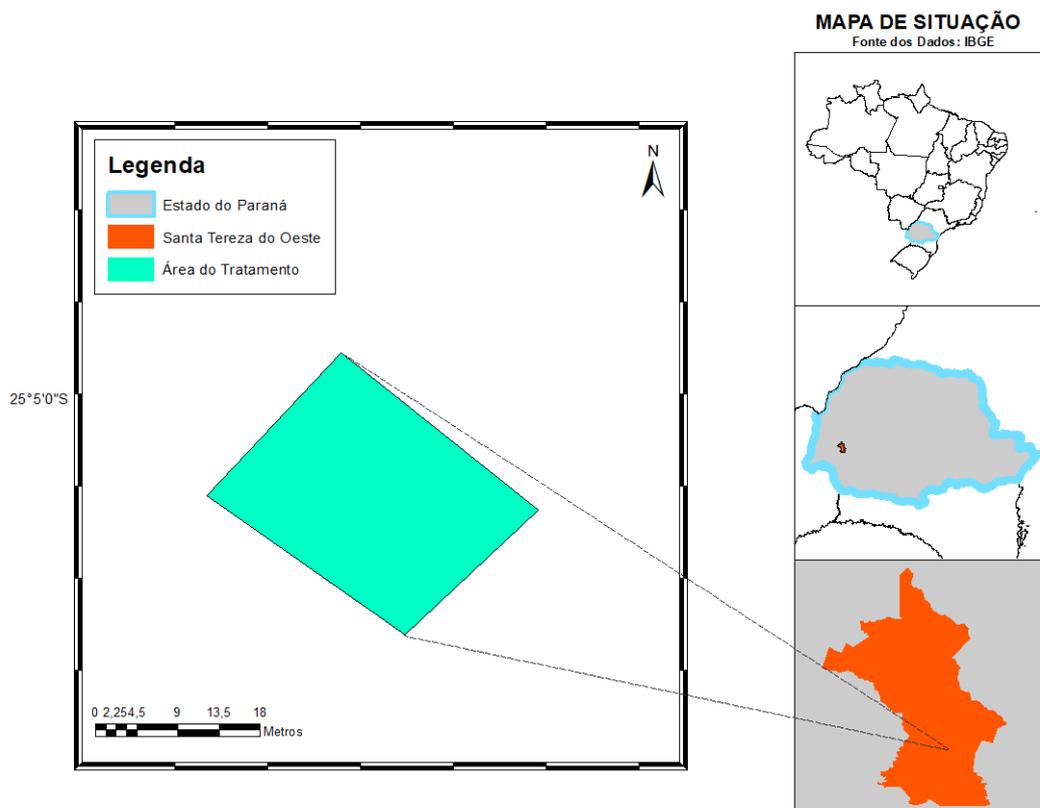
Os modelos matemáticos foram empregados com base nos níveis de intensidade de chuva, sendo cada data de coleta considerada como uma repetição dentro do seu respectivo nível.

## **3.2 Análise geoestatística**

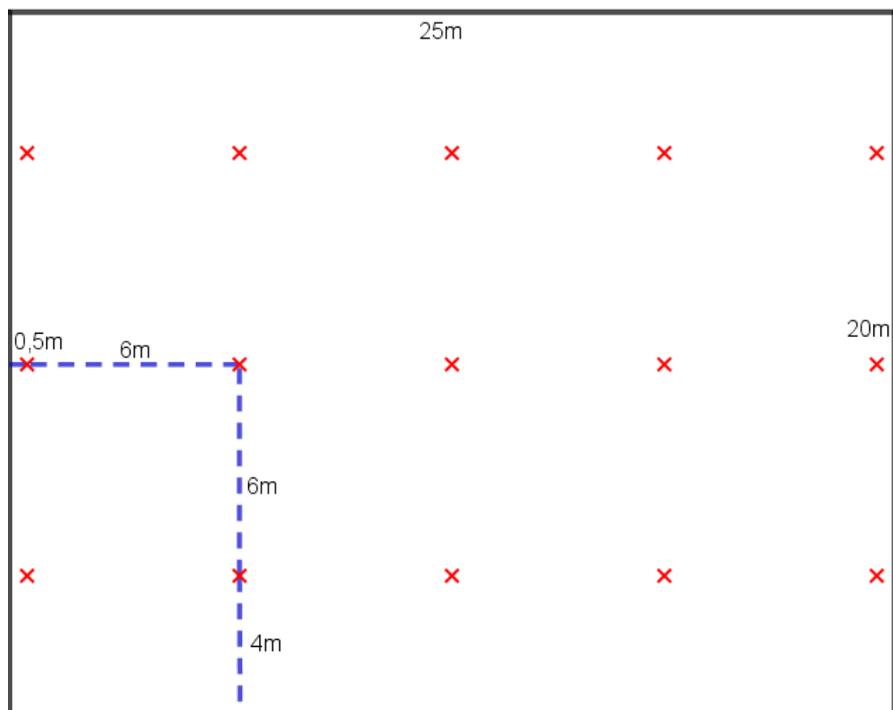
### **3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo**

A Figura 10 apresenta a localização de um dos tratamentos analisados, T5, sendo os demais com localização muito próxima, na mesma área experimental utilizada para modelar a infiltração da água no solo.

No caso da análise de variabilidade espacial, foram selecionadas as áreas que representam os sistemas de manejo, sendo elas, T5 (Sistema plantio direto com escarificação até 0,3 m de profundidade), T11 (Sistema plantio direto com aplicação de  $3 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso em superfície) e T15 (Sistema plantio direto tradicional). Em cada uma das áreas analisadas foram marcados 15 pontos georreferenciados, dos quais foram coletadas amostras de solo indeformadas das camadas 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, com uma repetição por ponto. O espaçamento entre pontos foi determinado considerando um número de pontos para melhor representatividade da área, conforme a Figura 11, sendo que cada área possui medida de 20 x 25 m. A coleta de dados foi realizada no dia 21 de abril de 2018.



**Figura 10.** Mapa de localização do tratamento 5.



**Figura 11.** Detalhamento do espaçamento entre pontos para análise de variabilidade espacial.

### 3.2.2 Propriedades físicas

As propriedades físicas analisadas para esta avaliação foram a densidade, macroporosidade e microporosidade. A metodologia de obtenção destas propriedades está descrita no item 3.1.4 deste trabalho.

### 3.2.3 Estatística descritiva e análise espacial

Os dados foram submetidos a análise de estatística descritiva, como a média, mediana, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, quartis, curtose e simetria, com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2016), disponíveis nas Tabelas 18, 19 e 20 do Anexo 2.

A análise geoestatística também contou com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2016) em que foi utilizado o estimador de semivariância de Matheron (MATHERON, 1962) para avaliar a existência e forma da dependência espacial entre as amostras. Posterior a construção dos semivariogramas experimentais, com *cutoff* de 50% da distância máxima entre os pontos amostrados, foram ajustados os modelos teóricos (Figuras 21, 22 e 23 do Anexo 3) pelo método dos mínimos quadrados ordinários e determinados os parâmetros  $C_0$ : efeito pepita,  $C_1$ : contribuição,  $C=C_0+C_1$ : patamar ou variância estrutural, e  $a$ : alcance, para cada atributo do solo.

Para determinar o grau de dependência espacial, GD, utilizou-se a razão entre a variância estrutural e o patamar conforme segue (MELLO et al., 2008):

$$GD = \frac{C_1}{C_0 + C_1} \times 100 \quad (17)$$

A classificação destes valores correu conforme Mello et al. (2008), sendo: GD < 25% (fraca dependência espacial), entre 25 e 75% (moderada dependência espacial) e GD > 75% (forte dependência espacial).

Os mapas temáticos das variáveis foram gerados ao se observar a dependência, por meio da Krigagem, que estima valores não tendenciosos para as regiões próximas com variância mínima (VIEIRA, 2000).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Infiltração Acumulada

A Tabela 3 apresenta os resultados da estatística descritiva para a infiltração acumulada I, em mm, levando em consideração os dados das 18 coletas analisadas e de todos os 29 tratamentos, separados pela compactação e não compactação do solo.

**Tabela 3.** Estatística descritiva para a infiltração acumulada (mm) nos tratamentos compactados (C) não compactados

Estatística	Infiltração acumulada - I (mm)	
	Não compactado	Compactado (C)
Mínimo	1,48	1,48
1º Quartil	3,57	3,54
Média	13,56	13,48
2º Quartil (mediana)	7,01	7,06
3º Quartil	21,80	21,80
Máximo	50,00	49,30
Desvio Padrão	13,61	13,61
Variância	185,23	185,29
Coef. de Variação (%)	100,34	100,95
Assimetria	1,28	1,30
Curtose	0,56	0,62

A amplitude dos dados, calculada pela diferença entre os valores máximo e mínimo, é alta, o que pode implicar em uma elevada dispersão dos dados. No entanto, por levar em consideração apenas estes dois valores, é importante uma avaliação das demais medidas avaliadas.

Os resultados apresentados revelam elevados índices de coeficiente de variação, CV, para os dois casos. Pode-se afirmar que os dados possuem dispersão elevada, pois, de acordo com Pimentel Gomes (1990), para ensaios agrícolas de campo, coeficientes de variação com valores acima de 30% são considerados muito altos. O alto coeficiente de variação pode ser explicado, visto que para a estatística descritiva foram levados em consideração todos os dados coletados, independente da precipitação. Isto pode incorrer em discrepância nos valores de infiltração de água,

uma vez que foram percebidas alterações no volume coletado quando em precipitações mais elevadas.

Quanto ao coeficiente de assimetria, os valores positivos para os dois casos indicam uma distribuição assimétrica à direita, com a média maior que a mediana. Os dados de curtose indicam que tanto para os tratamentos compactados, quanto para os não compactados, a função de distribuição de frequência dos dados é leptocúrtica e possui uma curva mais afunilada que em uma distribuição normal dos dados.

Para os valores da média, em ambos os casos, percebe-se valores semelhantes, o que pode indicar a não influência da compactação para a infiltração acumulada de água no solo. Tal resultado vai de encontro a estudos que envolvem infiltração de água e compactação, pois, como visto em Beutler et al. (2003) e Bonini et al. (2011), que avaliaram a taxa de infiltração sem considerar a infiltração acumulada, esta tende a diminuir em solos compactados. Além disso, existem experimentos que verificaram que os estados de compactação não são fatores determinantes para a infiltração acumulada, como o trabalho de Silva et al. (2009) quando compararam este fator em três níveis de compactação e dois tipos de solo.

A análise de variância (ANOVA) mostrou não haver diferença significativa a 5% de probabilidade para a infiltração acumulada (mm) entre todos os 29 tratamentos, conforme Tabela 4.

**Tabela 4.** Análise de variância (ANOVA) para a Infiltração acumulada de água

	GL	SQ	QM	Fc	Pr(>F)
Inf Água	28	3	0,12	4e-04	1
Resíduo	725	235233	324,46		
Coef. de Variação = 102,94%		Número de observações = 754			
Média geral = 17,50		DMS: 2,93			

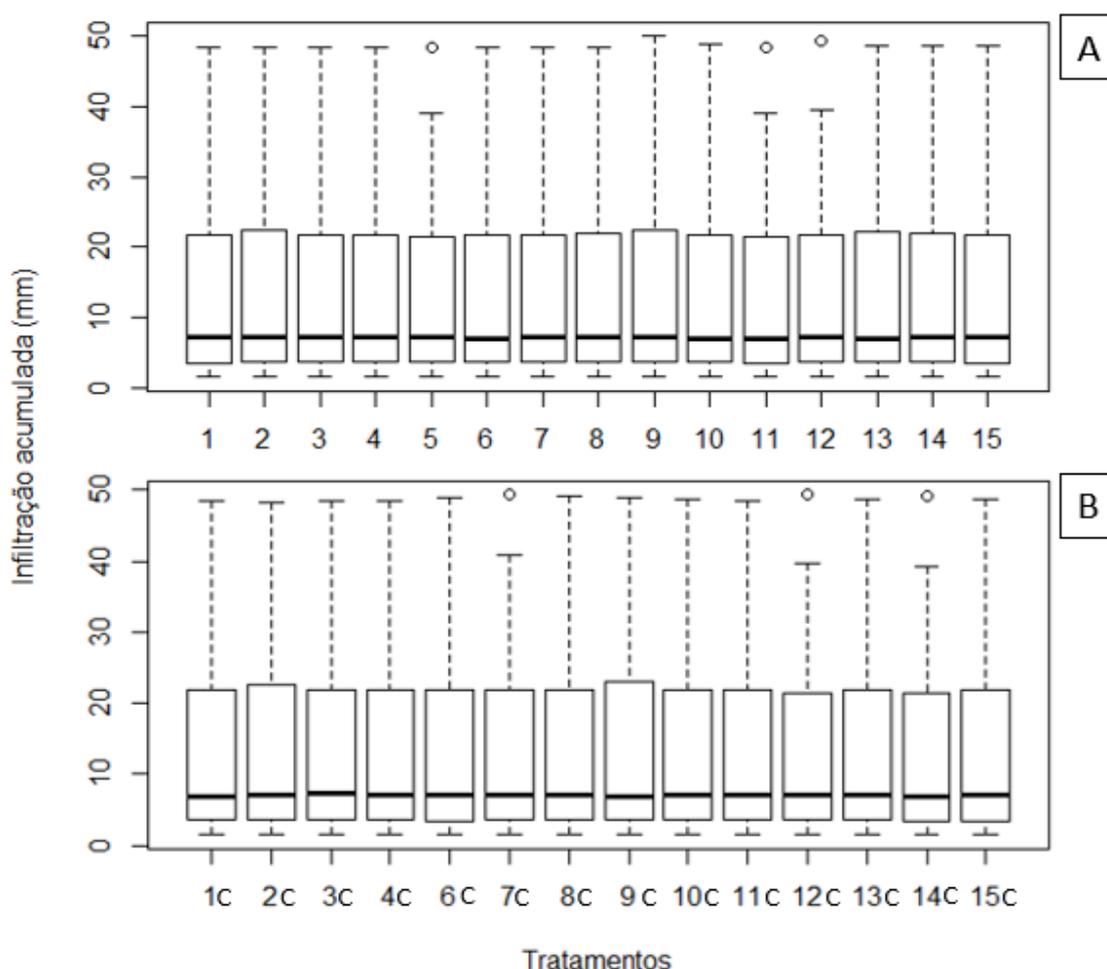
GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; Fc: valor de F calculado; Pr(>F): p-valor, se este valor for maior que  $\alpha = 0,05$  não existe diferença significativa entre os tratamentos; DMS: Diferença Mínima Significativa.

Marchini et al. (2015) também não encontraram diferença significativa para a infiltração acumulada em Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. Estes autores argumentaram que a metodologia utilizada para mensurar a infiltração de água com mini-infiltrômetro pode ter subestimado os dados em alguns tratamentos

em razão da presença de camada de material orgânico na superfície que prejudicou o contato com a placa de cerâmica do dispositivo.

Como pode ser observado no tópico 4.2 a seguir, a boa qualidade estrutural do solo, aliada ao cultivo da mesma oleaginosa em todos os tratamentos, pode ter criado condições semelhantes para a infiltração de água acumulada, bem como em todos os tratamentos neste experimento. Panachuki et al. (2006) também não obtiveram diferença significativa para a taxa de infiltração entres os tratamentos de manejo avaliados para intensidade de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , sendo a diferença apenas para a intensidade maior avaliada, de  $100 \text{ mm h}^{-1}$ .

A Figura 12 apresenta os gráficos boxplot para os 29 tratamentos.



**Figura 12.** Boxplot da infiltração acumulada para os tratamentos não compactados (A) e compactados (B).

Verifica-se que existem pontos discrepantes para os tratamentos T5 (SPD com escarificação), T11 (SPD gessado), T12 (Aveia preta + tremçoço branco), T7C

(Aveia preta+ nabo forrageiro com compactação), T12C (Aveia preta + tremoço branco com compactação) e T14C (Aveia preta + ervilha forrageira com compactação). Além disso, a posição da mediana próximo ao primeiro quartil indica uma assimetria positiva dos dados (Tabela 3), indicando que a maior parte dos dados de infiltração acumulada concentram-se abaixo de 10 mm.

É importante ressaltar que este experimento contou com a obtenção dos dados de infiltração acumulada a partir de chuvas naturais, o que pode ser um obstáculo para a obtenção de dados uniformes, uma vez que os fenômenos naturais não podem ser controlados como em experimentos utilizando-se simulador de chuva. Entretanto, por esta mesma razão, tal tipo de pesquisa torna-se de grande relevância para caracterização das chuvas e utilização na predição de perdas de água ou solo por erosão, uma vez que a intensidade de chuva não é constante durante todo seu período (EVANGELISTA; CARVALH; BERNARDINO, 2005).

A semelhança das médias da infiltração acumulada entre os tratamentos, independente do sistema de manejo, espécie de cobertura ou compactação do solo pode ser explicada analisando-se as propriedades físicas do solo de cada tratamento, pois a infiltração de água é reflexo das condições físicas do solo, como sua estrutura e espaço poroso, bem como da identificação de camadas compactadas (ALVES et al., 2007).

## **4.2 Propriedades físicas do solo**

A partir do resultado anterior, da igualdade entre as médias para a infiltração acumulada entre os tratamentos com e sem compactação, buscou-se verificar a homogeneidade dos tratamentos por meio das propriedades físicas do solo pelo valor médio do perfil. Os testes estatísticos foram realizados levando em consideração todas as repetições das camadas do solo avaliadas, representando, portanto, o valor da camada de 0,0-0,3 m.

A análise de variância constatou diferença significativa com 5% de probabilidade para as propriedades físicas analisadas, como evidenciado nas Tabelas 13 a 17 no Anexo 1. A Tabela 5 apresenta o resultado do teste de Tukey para as variáveis analisadas: Ds, PT, Ma, Mi e Ksat.

**Tabela 5.** Teste de Tukey para a densidade do solo (Ds), Porosidade total (PT) macroporosidade (Ma) Microporosidade (Mi) e condutividade hidráulica saturada (Ksat)

2017/2018					
TRAT.	Ds (Mg m <sup>3</sup> )	PT (%)	Ma (%)	Mi (%)	Ksat (mm h <sup>-1</sup> )
T1	1,04 f	59,92 a	15,34 ab	44,58 abcdef	66,18 abcd
T2	1,05 ef	59,82 a	14,58 abc	45,23 abcde	41,31 bcd
T3	1,07 bcdef	58,73 abcd	14,66 abc	44,08 abcdef	45,05 bcd
T4	1,08 abcdef	58,49 abcde	13,94 abcde	44,54 abcdef	33,56 bcd
T5	1,05 def	59,54 ab	14,06 abcde	45,48 abcd	140,48 a
T6	1,09 abcdef	58,00 abcde	15,85 a	42,15 def	101,15 abc
T7	1,10 abcdef	57,90 abcde	14,63 abc	43,27 bcdef	66,19 abcd
T8	1,12 abcdef	57,16 abcde	14,66 abc	42,49 cdef	46,61 bcd
T9	1,07 bcdef	58,80 abcd	15,21 ab	43,59 abcdef	71,21 abcd
T10	1,09 abcdef	58,26 abcde	14,29 abcd	43,97 abcdef	38,93 bcd
T11	1,06 cdef	59,16 abc	13,99 abcde	45,16 abcde	105,85 ab
T12	1,08 abcdef	58,41 abcde	13,55 abcde	44,86 abcdef	48,22 bcd
T13	1,08 bcdef	58,65 abcd	13,83 abcde	44,82 abcdef	62,24 bcd
T14	1,13 abcdef	56,78 abcde	13,89 abcde	42,89 bcdef	51,57 bcd
T15	1,11 abcdef	57,17 abcde	15,70 a	41,47 f	63,00 bcd
T1C	1,13 abcde	56,26 bcde	12,70 bcdef	43,56 abcdef	26,94 cd
T2C	1,16 a	55,13 e	12,03 cdef	43,09 bcdef	9,71 d
T3C	1,12 abcdef	56,66 abcde	12,72 bcdef	43,94 abcdef	34,83 bcd
T4C	1,15 ab	55,45 de	11,19 ef	44,26 abcdef	14,78 d
T6C	1,15 abc	55,82 cde	12,44 bcdef	43,38 abcdef	27,99 cd
T7C	1,11 abcdef	57,01 abcde	13,27 abcde	43,74 abcdef	15,95 d
T8C	1,11 abcdef	57,10 abcde	12,70 bcdef	44,40 abcdef	37,75 bcd
T9C	1,12 abcdef	56,57 abcde	11,39 def	45,18 abcde	57,49 bcd
T10C	1,11 abcdef	57,02 abcde	10,18 f	46,84 a	9,89 d
T11C	1,10 abcdef	57,51 abcde	11,42 def	46,09 ab	43,94 bcd
T12C	1,14 abcd	56,08 cde	11,31 ef	44,78 abcdef	16,27 d
T13C	1,11 abcdef	57,02 abcde	11,28 ef	45,73 abc	25,72 cd
T14C	1,15 ab	55,42 de	13,51 abcde	41,91 ef	32,99 bcd
T15C	1,15 ab	55,52 de	13,26 abcde	42,26 cdef	22,40 d
CV (%)	7,26	5,48	20,40	7,41	151,17
DMS	0,074	2,87	2,49	2,97	64,99

CV: Coeficiente de Variação; DMS: Diferença Mínima Significativa; Médias de tratamentos seguidas por letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A Ds é um importante atributo limitante para a infiltração de água, pois representa a relação entre a massa do solo seco com o seu volume total, ou seja, os espaços vazios. Ao comparar os valores médios dos tratamentos, pode-se afirmar que todos encontram-se abaixo do intervalo de densidade crítica que compreende o intervalo de 1,25 a 1,30 Mg m<sup>-3</sup> para solos de textura muito argilosa (REICHERT;

REINERT; BRAIDA, 2003). Assim, a infiltração de água não foi prejudicada por este atributo. Apesar disto, os maiores valores de  $D_s$  concentraram-se nos tratamentos compactados, como no T2C (Aveia branca com compactação), T4C (Aveia preta com compactação), T14C (Aveia preta + ervilha forrageira com compactação), T15C (SPD tradicional com compactação), T6C (Centeio com compactação), T12C (Aveia preta + tremoço branco com compactação) e T1C (Milheto com compactação), respectivamente, com valores entre 1,13 a 1,16  $Mg\ m^{-3}$ , o que pode ser resultado das passadas do rolo compactador ou simplesmente de pelo tráfego de máquinas, uma vez que foi constatado semelhança estatística destes valores em tratamentos não compactados, como o T14 (Aveia preta + ervilha forrageira) com  $D_s$  igual a 1,13  $Mg\ m^{-3}$ .

Durante o processo de infiltração, os macroporos desempenham a importante função de condução da água no solo, assim, este atributo é fundamental nesta avaliação. O volume de macroporos em todos os tratamentos ficou acima de 10%, portanto, valor considerado não crítico por Vomocil e Flocker (1966) para disponibilidade de ar, água e o pleno desenvolvimento das raízes das plantas. O maior volume de macroporos concentrou-se nos tratamentos não compactados, além dos tratamentos 14C (Aveia preta + ervilha forrageira com compactação) e 15C (SPD tradicional com compactação). O volume menor de macroporos nos tratamentos 1C a 13C pode ser explicado pela deformação na estrutura por meio da compactação (REICHERT, REINERT, BRAIDA, 2003), como também mostrado no trabalho de Suzuki, Reichert e Reinert, (2013).

A  $K_{sat}$  é um atributo de elevado coeficiente de variação e, com isso, seu CV foi de 151,17%. Os valores encontrados para a  $K_{sat}$  revelam sua relação com a  $M_a$ , pois os tratamentos com maiores valores de  $K_{sat}$ , T5 (SPD com escarificação), T11 (SPD gessado), T6 (Centeio), T9 (Feijão guandu), T7 (Aveia preta + nabo forrageiro), T1 (Milheto), T15 (SPD tradicional) e T13 (Macuna preta) estão entre os tratamentos com maior volume de macroporos. Contudo, por ser um atributo que não depende somente das variações estruturais do solo, mas também da continuidade dos poros e da presença de poros naturais, a  $K_{sat}$ , individualmente, não é um bom indicador para caracterização da qualidade física do solo de uma área (MESQUITA; MORAES, 2004).

Os atributos físicos do solo podem ser utilizados para caracterizá-lo, pois, de acordo com Araújo, Goedert e Lacerda (2007), ao se quantificar as propriedades do solo, estas podem auxiliar no monitoramento do estado de qualidade do solo. Para uso na modelagem matemática, foi necessário caracterizar parcelas homogêneas por meio dos atributos físicos analisados, usando estas como um tratamento unificado, uma vez que a infiltração de água não diferiu entre os tratamentos.

Dado que a infiltração é fortemente influenciada pela densidade e macroporosidade, optou-se por selecionar os tratamentos com menor densidade e maior volume de macroporos. Os tratamentos que atendem a essas características simultaneamente estão destacados em negrito na Tabela 5 acima e correspondem aos tratamentos não compactados de 1 a 15.

### 4.3 Precipitação e Intensidade de chuva

A Tabela 6 apresenta os dados de precipitação das 20 datas de coletas utilizadas da modelagem matemática. Como mencionado, os dados de precipitação foram analisados por hora, assim, a precipitação acumulada nas 24 horas que antecederam as coletas de água estão na segunda coluna, seguido do tempo de precipitação e respectiva intensidade.

**Tabela 6.** Precipitação (mm) por data das coletas de água, seus respectivos tempos de ocorrência e intensidade de precipitação

<b>NÍVEIS DE INTENSIDADE</b>	<b>DATA</b>	<b>PRECIPITAÇÃO (mm)</b>	<b>TEMPO (h)</b>	<b>INTENSIDADE (mm h<sup>-1</sup>)</b>
	26/10/2017	17	10	7,8
	27/10/2017	23	15	3,2
	28/10/2017	8,4	8	2,2
	08/11/2017	7,2	3	5,4
	11/11/2017	7,2	3	3,2
	17/11/2017	2,1	3	1,5
Baixa	18/11/2017	20	14	4,9
	26/11/2017	17,3	9	8,7
	06/12/2017	8,2	2	8,1
	07/12/2017	1,7	3	1,1
	08/12/2017	5	5	3
	21/12/2017	9,9	15	3,8

**Tabela 6.** Continuação

NÍVEIS DE INTESIDADE	DATA	PRECIPITAÇÃO (mm)	TEMPO (h)	INTENSIDADE (mm h <sup>-1</sup> )
Baixa	23/12/2017	8	3	7,4
	25/12/2017	2,6	8	1,4
	03/01/2018	3,7	8	1,4
	15/01/2018	22	8	6,9
	20/01/2018	4,5	4	2,6
	21/01/2018	3,6	5	1,8
Média	02/01/2018	24,1	8	11,6
	14/01/2018	33,8	7	10,6
	16/01/2018	27,6	9	11,6
	10/02/2018	51	12	14,2
Alta	22/11/2017	26,1	5	18,9
	24/12/2017	41,9	12	24,8
	07/01/2018	26,6	2	25,9

Como a coleta foi realizada apenas após 24h de chuva, não foi possível realizar o cálculo da intensidade de chuva mais próximo da realidade. Desta forma, a intensidade é aqui representada pelo valor da maior precipitação ocorrida durante os eventos, uma vez que seus efeitos são mais danosos para a superfície do solo, promovendo alterações significativas na infiltração de água.

A partir dos dados da Tabela anterior, foram determinados três intervalos de intensidade, baixa, média e alta, detalhados na Tabela 7, para uma nova análise estatística da infiltração acumulada separada nestes intervalos. Para esta classificação optou-se pela simples divisão do intervalo em três partes iguais.

**Tabela 7.** Intervalo das intensidades, baixa, média e alta (mm h<sup>-1</sup>)

Intervalo de intensidades		
Baixa	Média	Alta
1,1 F 9,37	9,37 F 17,63	17,63 F 25,9

#### 4.3.1 Infiltração acumulada para os intervalos de intensidade

Com a classificação da intensidade de chuva em níveis, foi possível o agrupamento da infiltração acumulada de acordo com o nível correspondente de cada dia coletado. Desta forma, usando as informações disponibilizadas na Tabela 6, pode-

se verificar a categorização, indicando os dias correspondentes a cada nível de intensidade.

A partir desta nova classificação, a análise de variância apresentada na Tabela 12 do Anexo 1, constatou diferença significativa a 5% de probabilidade para as médias da infiltração acumulada entre os níveis de intensidade, levando agora em consideração apenas os 15 tratamentos não compactados como uma região homogênea. A Tabela 8 apresenta o resultado do teste de Tukey a 5% de significância, mostrando que a média de infiltração acumulada foi maior para a intensidade média, seguida da infiltração acumulada para as intensidades alta e baixa.

**Tabela 8.** Infiltração acumulada de acordo com os níveis de intensidade

<b>Intensidade</b>	<b>Médias</b>
Média	32,26 a
Alta	29,53 b
Baixa	8,69 c
CV (%)	48,16

Dado este resultado, é importante ressaltar que, conforme Zonta et al. (2012), o volume infiltrado está mais relacionado com o volume total precipitado, pois este determina a energia cinética acumulada das gotas de chuva, que podem causar o encrostamento da superfície. Para Dunkerley (2011), o perfil do evento de precipitação e não sua intensidade é que controlam a magnitude da infiltração de água no solo em eventos reais, assim, o tempo de precipitação também pode provocar alterações na infiltração.

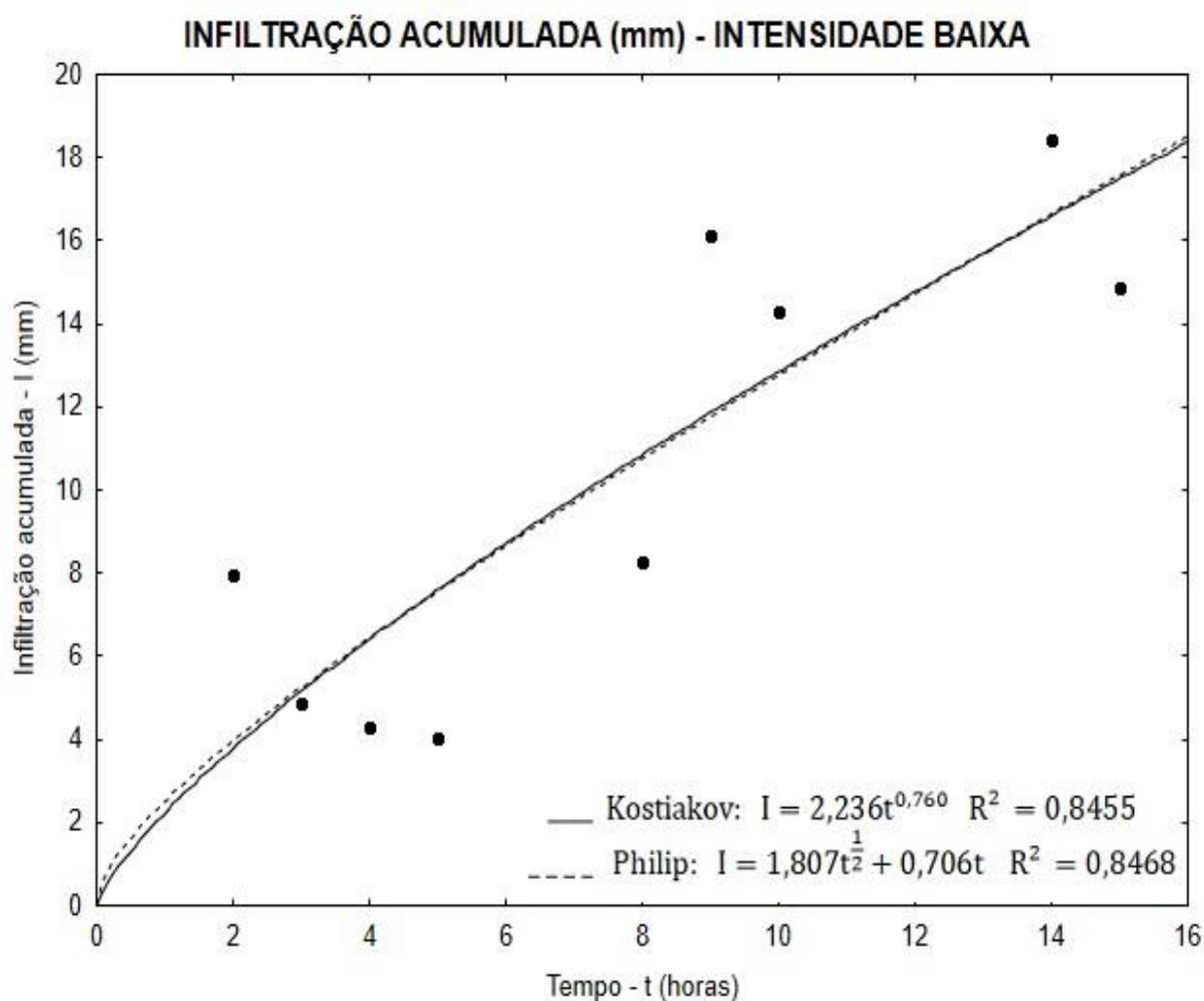
#### **4.4 Modelos matemáticos de infiltração acumulada**

Os valores de infiltração acumulada foram obtidos a partir de chuvas naturais, pelas calhas coletoras de água, sendo então levados em consideração os fenômenos naturais aos quais o solo ficou exposto como, por exemplo, a intensidade de chuva inconstante, característica de toda precipitação e, com isso, o impacto direto da gota chuva. Diferentemente disto, são vistos na literatura experimentos em que a infiltração é realizada com simuladores de chuva (ZONTA et al., 2012), ou com o método de

duplos anéis concêntricos (CUNHA et al., 2009), que não conseguem captar com precisão as variáveis naturais.

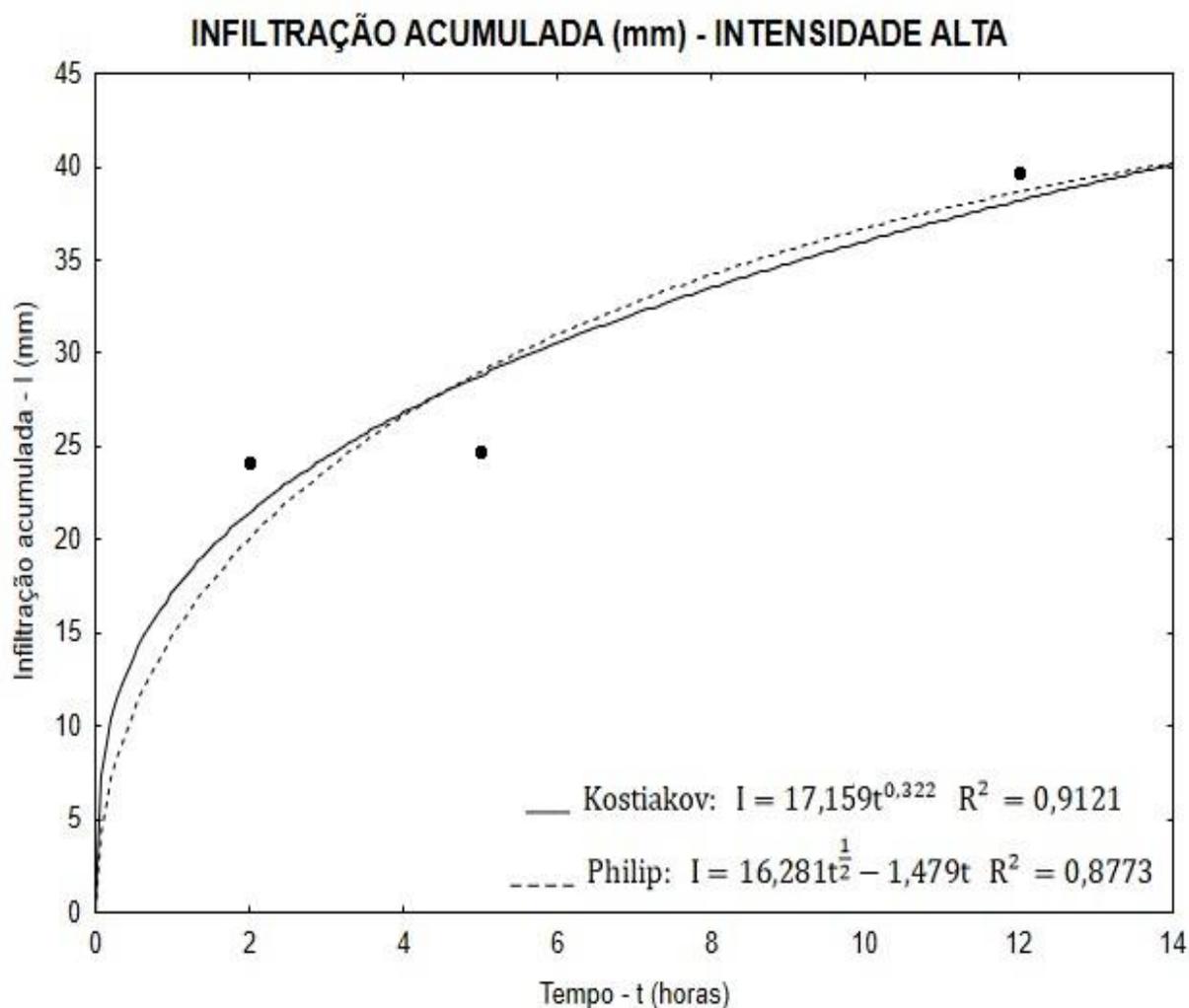
Para a modelagem matemática, no caso da intensidade baixa, foi calculada uma média para os valores de infiltração acumulada, assim como nos casos de valores com mesmo tempo de precipitação.

As Figuras 13 e 14 apresentam o ajuste dos dados aos modelos de Kostiakov e Philip para as intensidades baixa e alta, respectivamente.



**Figura 13.** Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelos modelos de Kostiakov e Philip para intensidade baixa.

Os dois modelos resultaram em ajuste estatístico semelhantes e alto coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as duas intensidades, sendo de 84,55% para o modelo de Kostiakov e 84,68% para o modelo de Philip na baixa intensidade e 91,21% no modelo de Kostiakov e 87,73% no modelo de Philip para alta intensidade.

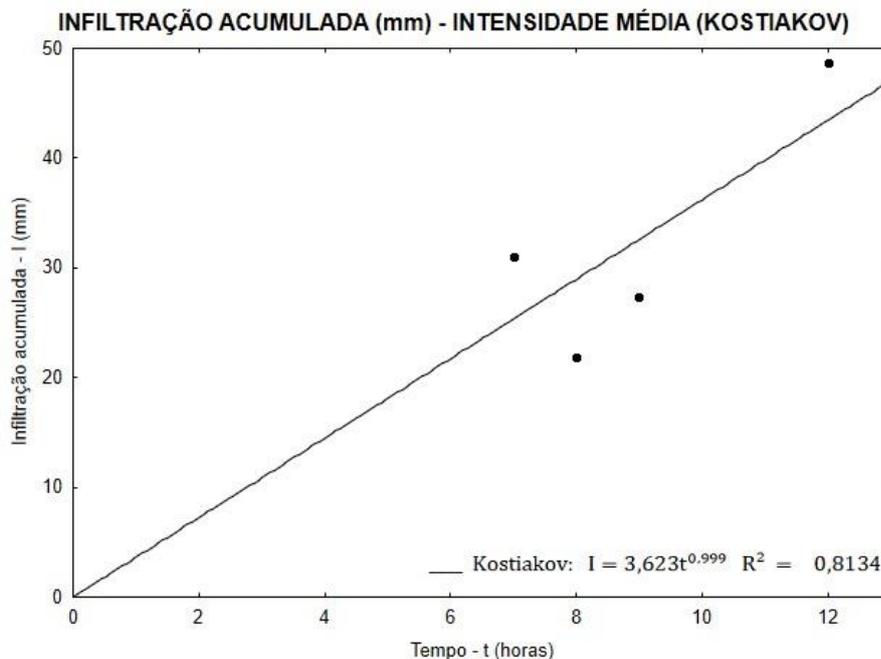


**Figura 14.** Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelos modelos de Kostiakov e Philip para intensidade alta.

Para o caso da intensidade média, o modelo de Kostiakov ajustado aos dados apresentou valor numérico para o parâmetro  $b = 1,318$ . Todavia, este modelo possui a restrição de que este parâmetro tenha seu valor entre 0 e 1. Para restringir o valor deste parâmetro, foi feita uma regressão não linear associada a uma função de perda,  $L$ , do tipo:

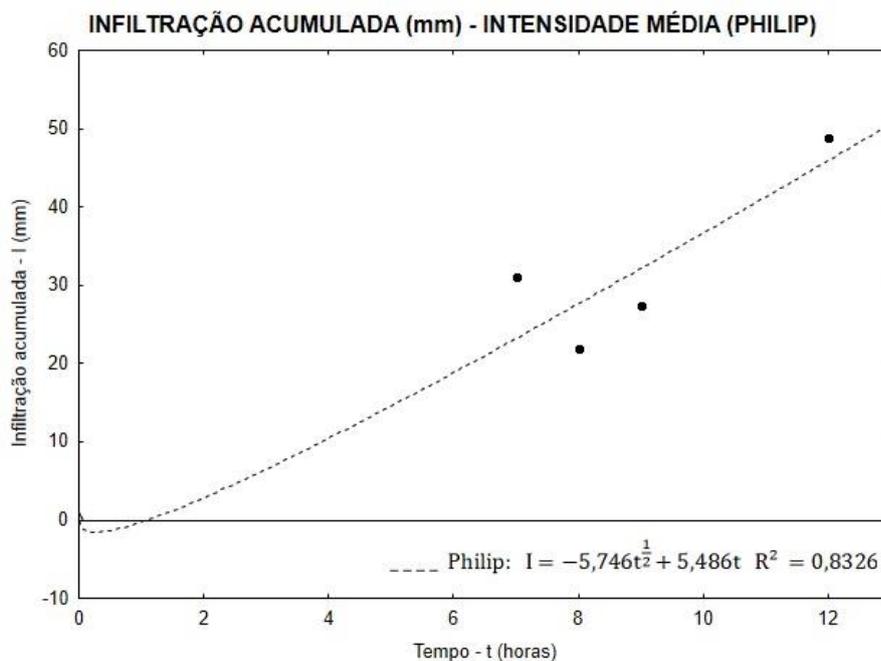
$$L = (\text{Valor observado} - \text{valor predito})^2 - (b < 1) \times 100000000 \quad (18)$$

No caso evidenciado, o algoritmo utilizado foi o Quasi-Newton, implementado no software Statistic (STASOFT, 2011), com número máximo de iterações igual a 50 e critério de convergência igual a 0,0001. A Figura 15 apresenta o resultado deste ajuste, com  $R^2$  igual a 81,34%.



**Figura 15.** Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelo modelo de Kostiakov para intensidade média.

Para o modelo de Philip na intensidade média, o ajuste dos dados evidenciou comportamento não aceitável fisicamente para tempos bem pequenos, quando a infiltração acumulada resultaria em valores negativos, como pode ser observado no início do gráfico apresentado na Figura 16.



**Figura 16.** Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelo modelo de Philip para intensidade média.

Para discutir e analisar este resultado, observou-se que os dois modelos possuem comportamento semelhante, ao levar em consideração o primeiro termo da equação de Philip,  $at^{1/2}$ , e a equação de Kostiakov,  $at^b$ . Isto ficou ainda mais evidente nas intensidades baixa e alta, visto que os dois modelos apresentaram ajustes muito semelhantes.

Em uma primeira análise, objetivou-se determinar o parâmetro "a" para o modelo de Philip, a partir da média dos parâmetros obtidos nas intensidades baixa e alta do mesmo modelo, resultando em um ajuste razoável, considerando o valor de  $R^2$ . O modelo obtido neste caso foi:  $I = 9,044t^{1/2} + 0,685t$ , com  $R^2 = 69,62\%$ .

Na segunda análise, optou-se por avaliar também o comportamento dos valores do parâmetro "a" do modelo de Kostiakov. A partir da Tabela 9, que apresenta os valores do parâmetro "a" para todas as intensidades, foi possível perceber uma razão entre os valores dos parâmetros dos dois modelos, fazendo a divisão do parâmetro "a" do modelo de Philip pelo valor de "a" do modelo de Kostiakov, nas duas intensidades. Os valores obtidos nestas operações foram de 0,808 e 0,949, respectivamente para as intensidades baixa e alta.

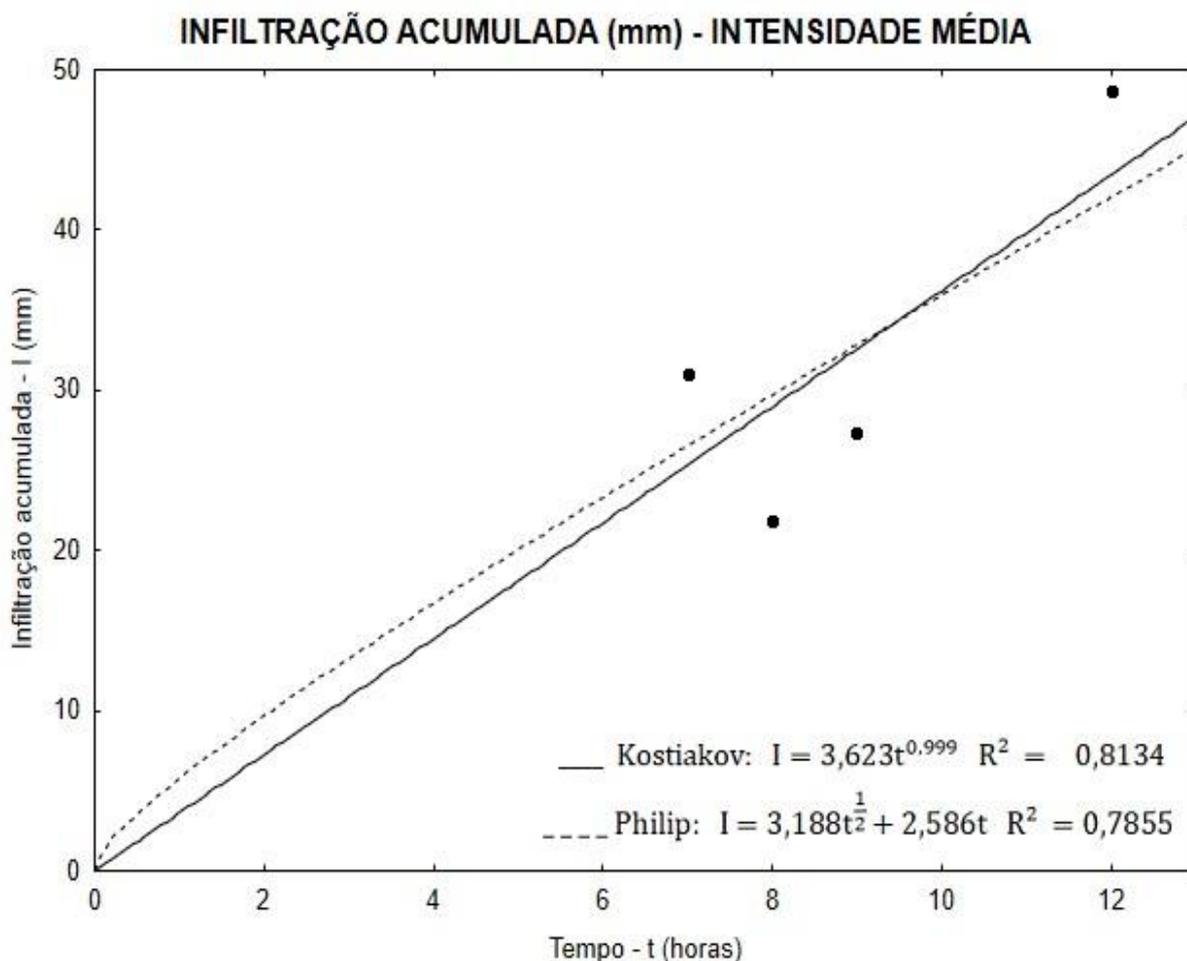
**Tabela 9.** Valores do parâmetro "a" para os modelos de Philip e Kostiakov.

MODELOS	INTENSIDADES		
	BAIXA	MÉDIA	ALTA
PHILIP	1,807	-	16,281
KOSTIKOV	2,236	3,623	17,159

A partir disso, para encontrar esta razão k, foram realizadas tentativas com valores próximos a estes dois encontrados acima, analisando o menor erro relativo entre o valor real do parâmetro e o valor predito na multiplicação de "a" pelo número pretendido k.

Com isto chegou-se ao valor constante  $k = 0,88$ , tal que ao multiplicar o valor dos parâmetros "a" do modelo de Kostiakov por  $k = 0,88$ , obteve-se o valor aproximado do parâmetro "a" do modelo de Philip.

Por meio desta hipótese, chegou-se ao valor de "a" para o modelo de Philip de intensidade média igual a 3,188. A Figura 17 apresenta o gráfico deste novo ajuste, com  $R^2 = 78,55\%$ , ligeiramente maior que o coeficiente de determinação da primeira análise.



**Figura 17.** Infiltração acumulada de água (mm) no tempo (horas) observada e estimada pelos modelos de Kostiakov e Philip para intensidade média.

As Figuras 13, 14 e 17 indicam que houve uma distribuição consistente dos dados, o que viabilizou um resultado satisfatório para o ajuste dos modelos. Resultado semelhante ao obtido por Cunha et al. (2009) com o modelo de Kostiakov para a taxa de infiltração.

Já Almeida et al. (2018), apesar de concluírem que o modelo de Horton foi o mais indicado para seu experimento, consideraram o modelo de Philip como adequado para mensurar a infiltração de água sob sistemas de manejo.

A Tabela 10 mostra as equações obtidas para todas as intensidades. Em todos os casos, os ajustes podem ser considerados aceitáveis pelos elevados valores do coeficiente de determinação, com ressalva aos modelos de intensidade média, que não apresentaram ajuste aceitável fisicamente, pois os valores de seus parâmetros tiveram que ser adequados para se ajustarem aos modelos.

**Tabela 10.** Modelos de Kostiakov e Philip com respectivos R<sup>2</sup>

INTENSIDADES	MODELOS	EQUAÇÕES	R <sup>2</sup>
<b>BAIXA</b>	Kostiakov	$I = 2,336 t^{0,760}$	0,8455
	Philip	$I = 1,807 t^{1/2} + 0,706t$	0,8468
<b>MÉDIA</b>	Kostiakov	$I = 3,623 t^{0,999}$	0,8134
	Philip	$I = 3,188 t^{1/2} + 2,586t$	0,7855
<b>ALTA</b>	Kostiakov	$I = 17,159 t^{0,322}$	0,9947
	Philip	$I = 16,281 t^{1/2} + 1,479t$	0,9937

Os valores numéricos das equações obtidas neste experimento divergem dos encontrados em experimentos semelhantes, como o de Cunha et al. (2009) utilizando infiltrômetros de simples anel e Cunha et al. (2015) com o método do infiltrômetro de duplo anel. Isso pode ocorrer por alterações na superfície do solo, quando submetido às ações naturais, principalmente ao impacto das gotas de chuva. Rao et al. (1998) encontraram valores de taxa de infiltração e infiltração acumulada até 6 vezes menor em precipitações naturais, que nos testes com infiltrômetros. Para os autores, essa diferença pode ser explicada, pois com a utilização dos infiltrômetros não houve o encrostamento superficial, que pode reduzir a infiltração de água.

Dada a semelhança entre os dois modelos, em todos os níveis de intensidade é possível afirmar que ambos são capazes de predizer a infiltração de água para solos com características semelhantes a área estudada com sistemas de manejo e plantas de cobertura.

#### 4.5 Mapas de variabilidade espacial

A Tabela 11 apresenta os resultados da estatística descritiva, modelos teóricos e os parâmetros para análise de variabilidade espacial dos atributos densidade (Ds), macroporosidade (Ma) e Microporosidade (Mi), do solo nas três camadas analisadas das áreas dos sistemas de manejo avaliadas T5 (SPD com escarificação), T11 (SPD gessado) e T15 (SPD tradicional).

**Tabela 11.** Estatística descritiva e espacial dos atributos físicos do solo nas três camadas analisadas

TRAT.	CAMADA	MÉDIA	CV	MODELO	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	a	GD	FD
<b>DENSIDADE</b>									
T5	0,0 – 0,1 m	1,11	10,14	Gaussiano	0,007	0,01	14	30,00	Moderada
	0,1 – 0,2 m	1,17	6,68	Esférico	0,0019	0,0055	12	65,45	Moderada
	0,2 – 0,3 m	1,13	6,36	Esférico	0,0005	0,0052	14	90,38	Forte
T11	0,0 – 0,1 m	1,07	10,08	Exponencial	0,0039	0,011	14	64,55	Moderada
	0,1 – 0,2 m	1,12	9,13	Exponencial	0,0025	0,011	14	77,27	Forte
	0,2 – 0,3 m	1,07	8,22	Exponencial	0,004	0,007	14	42,86	Moderada
T15	0,0 – 0,1 m	1,02	5,21	Gaussiano	0,0023	0,0029	14	20,69	Fraca
	0,1 – 0,2 m	1,05	6,92	Esférico	0	0,0059	12	100	Forte
	0,2 – 0,3 m	1,09	3,84	Esférico	0,0005	0,0019	10,1	73,68	Forte
<b>MACROPOROSIDADE</b>									
T5	0,0 – 0,1 m	13,38	24,26	Esférico	1,0	9	8	88,89	Forte
	0,1 – 0,2 m	13,29	22,88	Esférico	3	8,1	10	62,96	Moderada
	0,2 – 0,3 m	14,58	18,68	Esférico	4,1	6,2	6	33,87	Moderada
T11	0,0 – 0,1 m	14,68	27,23	Exponencial	0	15,1	14	100	Forte
	0,1 – 0,2 m	15,17	23,33	Exponencial	4,9	11,9	14	58,82	Moderada
	0,2 – 0,3 m	16,13	15,47	Gaussiano	4,1	5,9	14	30,51	Moderada
T15	0,0 – 0,1 m	16,43	11,24	Gaussiano	2,4	4,01	14	40,15	Moderada
	0,1 – 0,2 m	18,09	10,42	Esférico	2	4	9	50,00	Moderada
	0,2 – 0,3 m	18,03	10,26	Gaussiano	0	4,1	12	100	Forte
<b>MICROPOROSIDADE</b>									
T5	0,0 – 0,1 m	43,32	6,68	EPP	5,6	-	-	-	-
	0,1 – 0,2 m	41,66	2,89	Esférico	0	1,25	6	100	Forte
	0,2 – 0,3 m	43,17	5,66	EPP	5,6	-	-	-	-
T11	0,0 – 0,1 m	43,54	7,81	Gaussiano	0	11	14	100	Forte
	0,1 – 0,2 m	41,49	2,61	Exponencial	0	1,8	14	100	Forte
	0,2 – 0,3 m	43,11	5,74	Esférico	0	6,9	7	100	Forte
T15	0,0 – 0,1 m	43,91	5,41	Esférico	0,5	5,1	7,8	90,20	Forte
	0,1 – 0,2 m	41,29	7,28	Esférico	5,25	6,9	6	23,91	Fraca
	0,2 – 0,3 m	41,19	3,68	Gaussiano	0,4	3,2	14	87,50	Forte

CV: Coeficiente de variação; C<sub>0</sub>: Efeito pepita; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>: Patamar; a: Alcance; GD: Grau de dependência; FD: Faixa de dependência; Ds: Densidade do solo; Ma: Macroporosidade; Mi: Microporosidade; EPP: Efeito Pepita Puro.

A densidade do solo apresentou valores entre 1,02 e 1,17 Mg m<sup>3</sup>, sem grandes variações, dentro do valor considerado crítico para este tipo de solo, semelhante aos encontrados por Faraco et al. (2008).

O maior valor de densidade foi encontrado nas três camadas do tratamento T5, tratamento escarificado, com valores de 1,11, 1,17 e 1,13 Mg m<sup>3</sup> para as camadas 1, 2 e 3, respectivamente. Isto pode ser explicado em razão da escarificação ter sido realizada em outubro de 2017 e a coleta dos dados em abril de 2018, período em que pode ter acontecido a reestruturação do solo (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004).

Nunes et al. (2014) verificaram o efeito temporário da escarificação do solo após 18 meses, com valores de densidade superiores ao tratamento testemunha.

Em contrapartida, no tratamento T15 constatou-se menores valores de densidade quando comparado aos tratamentos T5 e T11, o que pode revelar que o plantio direto tradicional não promoveu alterações negativas significativas na estrutura do solo. Tal efeito é contrário ao esperado, visto que experimentos recentes têm mostrado uma deterioração da estrutura dos solos manejados com plantio direto por longos períodos (CÁSSARO et al., 2011; SUZUKI; REICHERT; REINERT, 2013; DIDONÉ et al., 2014; SORACCO et al., 2018).

O atributo com maior coeficiente de variação em todas as camadas foi a macroporosidade, tendo maior CV de 27,23% na segunda camada do tratamento T11. Resultado semelhante ao encontrado por Drescher et al. (2016), com maiores valores de CV para este mesmo atributo, sendo que a primeira camada com 43,8% de CV levando em consideração todos os tratamentos analisados no experimento. Guimarães et al. (2016) explicam que a maior variabilidade deste atributo pode ser resultado da metodologia utilizada na sua determinação, uma vez que seu valor é obtido pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

Para a densidade e a microporosidade, o coeficiente de variação apresentou resultados próximos ou abaixo de 10%, resultados semelhantes aos encontrados por Reichert et al. (2016).

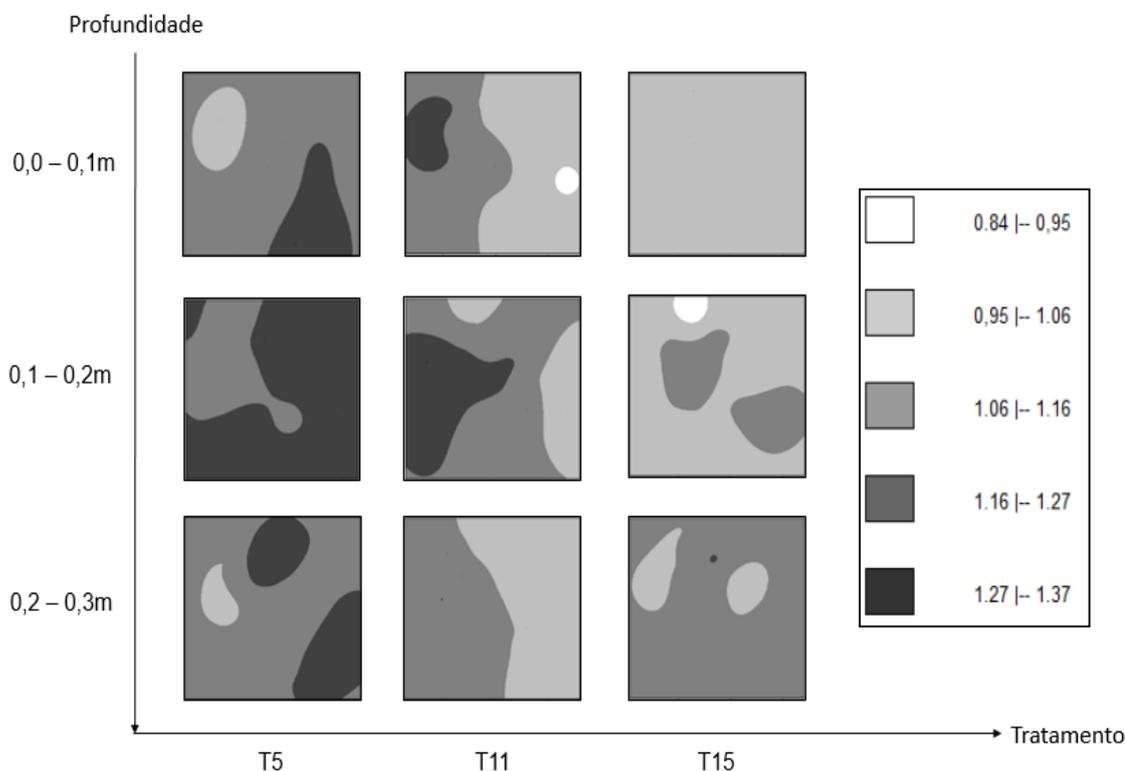
Destaca-se o chamado efeito pepita puro (EPP) na primeira e terceira camada do tratamento T5 da microporosidade. Este resultado pode indicar a não detecção da estrutura de variabilidade espacial em distâncias menores do que a menor distância de amostragem utilizada (KAMIKURA et al., 2013). Em algumas profundidades também foi observada a nulidade de  $C_0$ , comportamento esperado para um semivariograma ideal.

O valor do alcance variou de 6 a 14 metros, sendo que a  $M_i$  apresentou menores valores de alcance. A densidade apresentou alcance de 10,1 a 14 metros, semelhante ao observado por Grego e Vieira (2005) e maiores que os encontrados por Kamikura et al. (2013) nas duas primeiras camadas avaliadas no experimento.

Baseado na classificação do grau de dependência de Mello et al. (2008), a  $D_s$  e a  $M_a$  apresentaram dependência espacial moderada a forte em quase todas as camadas dos três tratamentos, exceto para  $D_s$  da primeira camada do T15, com GD

igual a 20,69 e a segunda camada da Mi do tratamento T15 com GD de 23,91%. A Mi não apresentou grau de dependência espacial nas camadas 1 e 3 do tratamento T5, enquanto Kamimura et al. (2013) verificaram forte dependência para esta variável em todas as camadas.

As Figuras 18, 19 e 20 apresentam os mapas de krigagem para as três camadas dos três tratamentos analisados. Na Figura 18, observa-se a variabilidade espacial da densidade do solo. O tratamento T5 apresentou maiores valores de densidade, seguido do tratamento T11, em todas as camadas quando comparados ao tratamento T15. Esse comportamento explica-se pelo efeito temporário da escarificação, no caso do tratamento T5. Já a maior densidade do tratamento T11 em relação ao tratamento T15 pode ser explicado pela neutralização em parte, de íons de alumínio, que neste tipo de solo, promovem a dispersão dos agregados existentes, como visto em Costa et al. (2007).



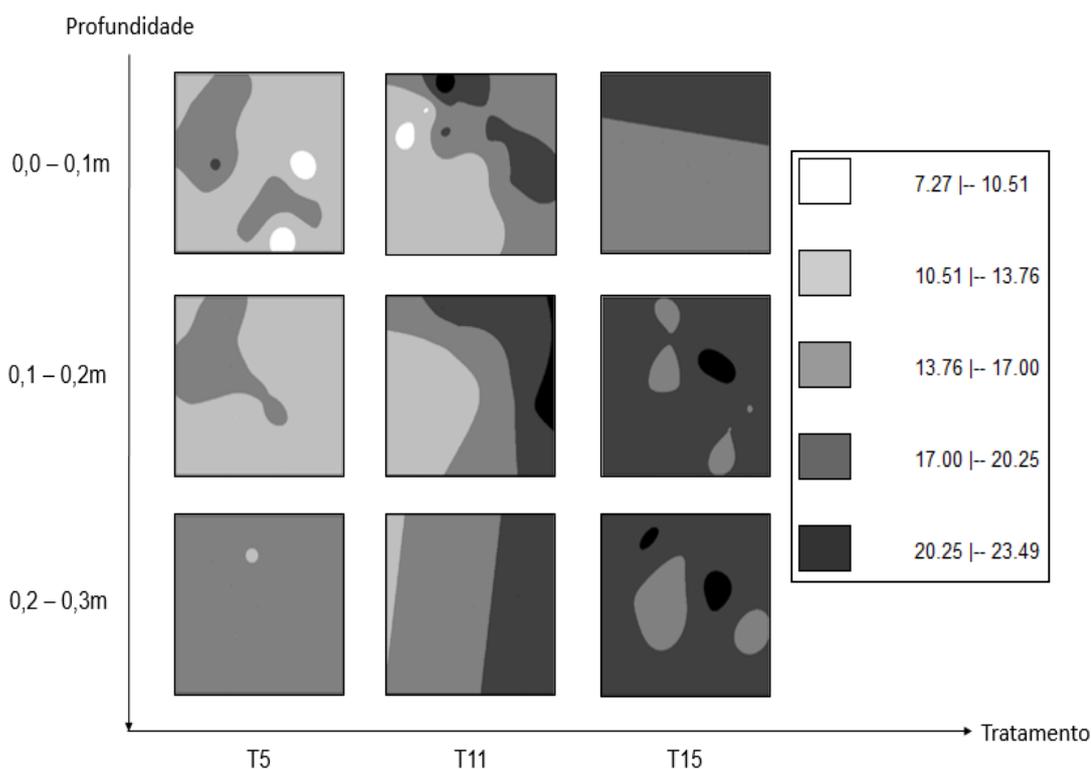
**Figura 18.** Mapas de superfície da densidade do solo ( $\text{Mg m}^{31}$ ) para os três tratamentos, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

Além disso, pela Figura 18, é possível perceber maior valor de densidade na camada de 0,1 - 0,2 m nos tratamentos T5 e T11. Este fato explica-se, pois, é nas camadas subsuperficiais que ocorrem os maiores efeitos do tráfego de máquinas e

implementos agrícolas, principalmente em solos manejados com o SPD, conforme Nunes et al. (2015). No tratamento T15, ocorreu um leve incremento da densidade ao longo das camadas, contrário ao observado por Faraco et al. (2008) também em plantio direto.

Sobre o tratamento T11, este concentrou maior densidade do lado oeste em todas as camadas, região na qual houve a passagem do rolo compactador descrito na Figura 2 deste trabalho. Nos outros tratamentos não ficou clara a deformação pela passagem do rolo compactador, podendo as variações na densidade serem explicadas por variáveis intrínsecas como resultado de alterações naturais do solo, ou extrínsecas, como o tráfego de máquina sobre o solo (KAMIMURA et al., 2013).

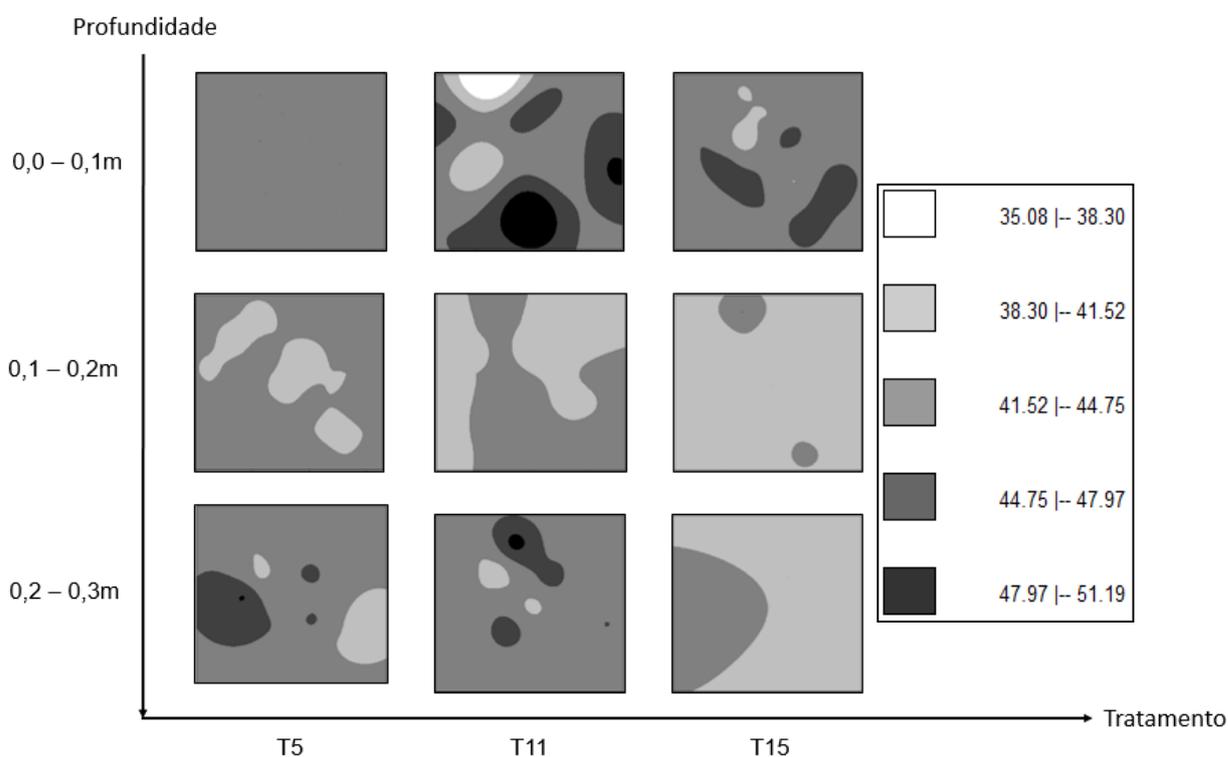
Chama atenção o formato semelhante do mapa de densidade da segunda camada do T5 com o mesmo mapa da macroporosidade deste tratamento. Na região em que se concentra a maior densidade, a Figura 19 revela menor volume de macroporos, deixando evidente a relação entre esses dois importantes atributos. O resultado é semelhante ao observado por Santos et al. (2012) na primeira camada (0,0 - 0,1 m) avaliada no experimento, em Latossolo Vermelho com textura semelhante a estudada.



**Figura 19.** Mapas de superfície da macroporosidade do solo (%) para os três tratamentos, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

O tratamento T15 apresentou os maiores valores de macroporosidade em todas as camadas, o que pode estar relacionado com os menores valores de densidade deste tratamento (REICHERT et al., 2007). No entanto, em todos os tratamentos os valores de macroporosidade apresentaram volume de macroporos acima de 10,51%, portanto, acima do valor limite para a boa aeração e movimento da água no solo. Exceção a isto foram as pequenas regiões na primeira camada dos tratamentos T5 e T11 que apresentam valor entre 7,27 a 10,51%.

Pela Figura 20, é possível afirmar que a microporosidade se manteve constante no perfil do solo para os três tratamentos, com pequena diminuição nas duas últimas camadas do T15, assim como apontam Reichert et al. (2007) ao afirmar que este atributo é pouco sensível às deformações pela compactação do solo. Na Figura 20 também é possível visualizar a menor continuidade espacial deste atributo, principalmente na primeira camada do tratamento T11.



**Figura 20.** Mapas de superfície da microporosidade do solo (%) para os três tratamentos, nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

## 5. CONCLUSÕES

A infiltração de água acumulada não diferiu significativamente entre os sistemas de manejo analisados.

Houve diferença significativa para a infiltração acumulada apenas entre diferentes intensidades de chuva ao considerar os tratamentos não compactados como uma região homogênea.

Os modelos de Philips e Kostiakov foram adequados para mensurar a infiltração de água acumulada de acordo com os níveis de intensidade de precipitação para este tipo de solo.

Todos os atributos físicos apresentaram dependência espacial entre os dados, com maiores valores de densidade e menores de macroporosidade nas áreas com os sistemas de manejo T5 (SPD com escarificação) e T11 (SPD gessado).

## 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, jun. 2004.

ALMEIDA, K. S. S. A.; DA SILVA SOUZA, L.; DA SILVA PAZ, V. P.; DOS SANTOS SILVA, F. T.; SANTOS, D. N.; PEREIRA, J. D. S. L. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em Latossolo Amarelo Distrocoeso, no município de Cruz das Almas. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 2, p. 259, abr/jun. 2017.

ALMEIDA, W. S.; PANACHUKI, E.; DE OLIVEIRA, P. T. S.; DA SILVA MENEZES, R.; SOBRINHO, T. A.; DE CARVALHO, D. F. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 130-138, 2018.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.617-625, aug. 2007

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, out. 2007.

BELL, J. M.; SCHWARTZ, R.; MCINNES, K. J.; HOWELL, T.; MORGAN, C. L. Deficit irrigation effects on yield and yield components of grain sorghum. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 289-296, abr. 2018.

BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, C.; LUCIANO, R. V. Water infiltration in two cultivated soils in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 573-588, abr. 2015.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; GARCIA ROQUE, C.; SOUZA, Z. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, Botucatu, v. 8, n. 3, p. 242-249, set/dez. 2003.

BONINI, A. K.; SECCO, D.; FERREIRA SANTOS, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 9, p. 1543-1548, set. 2011.

BONO, J. A. M.; MOTTA MACEDO, M. C.; TORMENA, C. A.; NANNI, M. R.; PEREIRA GOMES, E.; MARQUES LOPES MÜLLER, M. Infiltração de água no solo em um Latossolo Vermelho da Região Sudoeste dos Cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, dez. 2012.

BOTTEGA, E. L.; DE QUEIROZ, D. M.; DE CARVALHO PINTO, F. D. A.; DE SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de

semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, jan/mar. 2013.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1235-1242, set. 2012.

CARVALHO, D. F. D.; EDUARDO, E. N.; ALMEIDA, W. S. D.; SANTOS, L. A.; SOBRINHO, T. A. Water erosion and soil water infiltration in different stages of corn development and tillage systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 11, p. 1072-1078, nov. 2015.

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

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000.

CECÍLIO, R. A.; MARTINEZ, M. A.; FALCO PRUSKI, F.; DAVID DA SILVA, D. Modelo para estimativa da infiltração de água e perfil de umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 411-421, abr. 2013.

COSTA, C. D. O.; ALVES, M. C.; SOUSA, A. P. Movimento de água e porosidade dos solos de uma sub-bacia hidrográfica no noroeste do estado de São Paulo. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 2, p. 304, mar/jun. 2015.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. Reviewed Edition. Wiley, New York, 1993.

CUNHA, J. L. X. L.; ALBUQUERQUE, A. W.; SILVA, C. A.; DE ARAÚJO, E.; DOS SANTOS JUNIOR, R. B. Velocidade de infiltração da água em um Latossolo amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 1, jan/mar. 2009.

CUNHA, J. L. X. L.; COELHO, M. E.; ALBUQUERQUE, A. W. D.; SILVA, C. A.; SILVA JÚNIOR, A. B. D.; DE CARVALHO, I. D. Water infiltration rate in Yellow Latosol under different soil management systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 11, p. 1021-1027, nov. 2015.

DALRI, A. B.; CORTEZ, G. E. P.; RIUL, L. G. S.; ARAÚJO, J. A. C.; CRUZ, R. L. Influência da aplicação de vinhaça na capacidade de infiltração de um solo de textura franco arenosa. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 4, p. 344, out/dez. 2010.

DALVAN, C. L. R. L.; REICHERT, J. R. J. M.; PAULO, L. E. A. S. S.; GUBIANI, I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1172-1178, ago. 2006.

DECHEN, S. C. F.; SANTOS TELLES, T.; DE FÁTIMA GUIMARÃES, M.; CLERICE DE MARIA, I. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, abr/jun. 2015.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; REICHERT, J. M.; MERTEN, G. H.; DALBIANCO, L.; DE BARRROS, C. A. P.; RAMON, R. Impact of no-tillage agricultural systems on sediment yield in two large catchments in Southern Brazil. **Journal of soils and sediments**, v. 14, n. 7, p. 1287-1297, 2014.

DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 2, p. 159-168, fev. 2016.

DUNKERLEY, D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 15, p. 2211-2224, 2012.

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

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Mapa de solos do estado do Paraná**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2007.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 5. ed. Brasília, DF, 2018.

EVANGELISTA, A. W. P.; DE CARVALHO, L. G.; BERNARDINHO, D. T. Caracterização do padrão das chuvas ocorrentes em Lavras, MG. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 4, p. 322-333, nov/dez 2005.

FARACO, M. A., URIBE-OPAZO, M. A., ALVES DA SILVA, E. A., JOHANN, J. A., BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 463-476, abr. 2008.

FASINMIRIN, J. T.; REICHERT, J. M. Conservation tillage for cassava (*Manihot esculenta crantz*) production in the tropics. **Soil and Tillage Research**, v. 113, n. 1, p. 1-10, 2011.

FONSECA, L. D. A. M.; LANI, J. L.; SANTOS, G. R. D.; FERREIRA, W. P. M.; SANTOS, A. M. R. T. Variability in soil physical properties in landslide-prone areas. **Acta Sci., Agron.**, Maringá, v. 39, n. 1, p. 109-118, 2017.

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics-Part I-The flow of air and water through soils. **Journal of Agric. Sci.**, n. 4, 1911.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 169-177, abr. 2005.

GRZEGOZEWSKI, D. M. **Influência local para modelos geoestatísticos utilizando a produtividade da soja e atributos químicos do solo**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

GUBIANI, P. I.; DE JONG VAN LIER, Q.; DRESCHER, M. S.; CALETTI MEZZOMO, H.; VEIGA, C. M. C. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, fev. 2015.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Brasília, MME/DNPM, 1988. 145p

GUIMARÃES, W. D.; JUNIOR, J. G.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, Campina Grande, v. 47, n. 2, p. 247-255, jul/ago. 2016.

HOLTAN, H. N. Concept for infiltration estimates in watershed engineering. 1961.

HORTON, R. E. An Approach Toward a Physical Interpretation of Infiltration-Capacity 1. **Soil science society of America journal**, v. 5, n. C, p. 399-417, 1941.

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

ISAAKS, E. H., SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford Univ. Press., New York, 1989. 600p.

JUNIOR, S. D. D. S.; SILVA, A. P. D.; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1854-1867, dez. 2012.

KAMIMURA, K. M.; RODRIGUES DOS SANTOS, G.; SILVA DE OLIVEIRA, M.; DE SOUZA DIAS JUNIOR, M.; GONTIJO GUIMARÃES, P. T. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho-amarelo, sob lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, ago. 2013.

KAVANAGH, C. R. **Estimação de parâmetros no ajuste de modelos teóricos a semivariogramas experimentais**. Cascavel, 2001. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), UNIOESTE, Cascavel, 2001.

KOSTIAKOV, A. N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. **Trans. Sixth Comm. Int. Soc. Soil Sci.**, v. 1, p. 7-21, 1932.

KUNZ, M.; DE ARAUJO GONÇALVES, A. D. M.; REICHERT, J. M.; LOCKS GUIMARÃES, R. M.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1699-1708, dez. 2013.

LANDIM, P.M.B. **Sobre geoestatística e mapas**. Terra e Didática, v. 2 n. 1, p.19-33, 2006.

LEÃO, T. P. Particle size distribution of Oxisols in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 7, n. 2, p. 216-222, 2016.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 2. Ed. Piracicaba: P. L. Libardi, 1999.

LIMA, F. V., DA SILVA SILVINO, G., DE SOUZA MELO, R. S., LIRA, E. C., & DE SOUZA RIBEIRO, T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 53-63, dez. 2015

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; DA COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, dez. 2012.

MAO, L.; LI, Y.; HAO, W.; ZHOU, X.; XU, C.; LEI, T. A new method to estimate soil water infiltration based on a modified Green–Ampt model. **Soil and Tillage Research**, v. 161, p. 31-37, 2016.

MARCHINI, D. C.; LING, T. C.; ALVES, M. C.; CRESTANA, S.; SOUTO FILHO, S. N.; DE ARRUDA, O. G. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, Campina Grande, v. 19, n. 6, jun. 2015.

MATHERON, G. **Traite de geoestatistique appliquée**, v. 1, 1962.

MATHERON, G. Principles of Geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, v.9, n.2, p.384-394, 1973.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; MELLO, J. M.; SILVA, A. M. Continuidade espacial de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 532-539, abr. 2008.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of Brazilian agriculture: soil erosion scenarios. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 1, n. 3, p. 37-48, 2013.

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, jun. 2004.

MILLAN, E.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B.; DA COSTA, L. M. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 10, p. 1003-1009, out. 2014.

MOHAMMADZADEH-HABILI, J.; HEIDARPOUR, M. Application of the Green–Ampt model for infiltration into layered soils. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 824-832, 2015.

NETO, F. D. C. C.; SAMPAIO, F. D. M. T.; DA COSTA VELOSO, M. E.; MATIAS, S. S. R.; ANDRADE, F. R.; LOBATO, M. G. R. Variabilidade espacial da resistência à penetração em Neossolo Litólico degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1353-1361, out. 2015.

NICOLOSO, R. D. S.; CARNEIRO AMADO, T. J.; SCHNEIDER, S., ENÍVAR LANZANOVA, M.; CAUDURO GIRARDELLO, V.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1723-1734, ago. 2008.

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, jul. 2014.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; PAULETTO, E. A.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 119-126, 2015.

OLIVEIRA P. R.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; ROSSETTI, K. V.; FERRAUDO, A. S.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; BÁRBARO JÚNIOR, L. S. Qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 604-612, jun. 2013a.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; DE AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; DO NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1103-1112, jul/ago. 2013b.

OLIVEIRA, D. M. S.; LIMA, R. P.; VERBURG, E. E. J. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquidos suínos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, Campina Grande, v. 19, n. 3, mar. 2015.

PANACHUKI, E.; SOBRINHO, T. A.; TADEU VITORINO, A. C.; FONSECA DE CARVALHO, D.; URCHEI, M. A. Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 1, jan/mar. 2006.

PEREIRA, T. T. C.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F. D.; LIMA NEVES, J. C.; CALHAU ALMEIDA, C. Gênese de Latossolos e Cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do Grupo Bambuí-Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, ago. 2010.

PHILIP, J. R. The theory of Infiltration: 5. The Influence of the Initial Moisture Content. **Soil Science**, v. 4, n. 84, p. 329-339, 1957.

PILATTI, M. A.; SECCO, D.; ZANÃO JR, L. A.; MARINS, A.; TOKURA, L.; DE VILLA, B. Structural alterations of Paraná's Oxisols by cover crops. **Journal of Agricultural Science**. v.10, n. 9, p. 180-190, 2018.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 13. ed. Piracicaba: Nobel, 1990.

PORTELA, J. C.; COGO, N. P.; BAGATINI, T.; CHAGAS, J. P.; PORTZ, G. Restauração da estrutura do solo por sequências culturais implantadas em semeadura direta, e sua relação com a erosão hídrica em distintas condições físicas de superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, ago. 2010.

POTT, C. A.; MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, fev. 2003.

PRANDO, M. B.; OLIBONE, D.; OLIBONE, A. P. E.; ROSOLEM, C. A. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 693-700, jun.2010.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>.

RAO, K. P. C.; STEENHUIS, T. S.; COGLE, A. L.; SRINIVASAN, S. T.; YULE, D. F.; SMITH, G. D. Rainfall infiltration and runoff from an Alfisol in semi-arid tropical India. I. No-till systems. **Soil and Tillage Research**, v. 48, n. 1-2, p. 51-59, 1998.

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

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. da; REICHERT, J.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5, p.49-134, 2007.

REICHERT, J. M.; ROSA, V. T.; VOGELMANN, E. S.; ROSA, D. P.; HORN, R.; REINERT, D. J.; SATTTLER, A.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016.

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

RIBEIRO, L. S.; OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S.; SILVA, C. V.; SILVA, G. B.; AZEVEDO, J. R. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo coeso sob sistemas de manejo convencional e de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1699-1702, set. 2016.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.

ROSA, V. T. **Tempo de implantação do sistema plantio direto e propriedades físico-mecânicas de um Latossolo**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 101 f. 2009.

SANTANA DA SILVA, E. N.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; RODRIGUES CORREA, A.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, abr. 2015.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; DELLA FLORA, L. P.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, set. 2012.

SANTOS, D.; SOUZA, E. G.; NÓBREGA, L.; BAZZI, C. L.; GONÇALVES, A. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 843-848, ago. 2012.

SANTOS, M. A. D. N. D.; PANACHUKI, E.; SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S. D.; RODRIGUES, D. B. B. Water infiltration in an Ultisol after cultivation of common bean. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1612-1620, out. 2014.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES DA SILVA, V. Atributos físicos e rendimentos de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 39, n. 1, p. 58-64, fev. 2009.

SIHAG, P.; TIWARI, N. K.; RANJAN, S. Estimation and inter-comparison of infiltration models. **Water Science**, v. 31, n. 1, p. 34-43, 2017.

- SILVA, V. R. D.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BORTOLUZZI, E. C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1097-1104, out. 2009.
- SINGH, V. P.; YU, F. X. Derivation of infiltration equation using systems approach. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 116, n. 6, p. 837-858, 1990.
- SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C.; SOUZA, L. C. D.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. D. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, maio/ago. 2003.
- SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; VILLARREAL, R.; MELANI, E.; SARLI, G. O. Temporal Variation of Soil Physical Quality under Conventional and No-Till Systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, abr. 2018.
- SOUZA, V. F. C; BERTOL, I.; WOLSCHICK, N. H. Effects of Soil Management Practices on Water Erosion under Natural Rainfall Conditions on a Humic Dystrudept. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, jun. 2017.
- STATSOFT, INC. Statistica (data analysis software system), versão 10. 2011.
- STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, Campina Grande, v. 17, n. 12, dez. 2013.
- SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES DE LIMA, C. L. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, jun. 2008.
- SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil Research**, v. 51, n. 4, p. 311-321, 2013.
- TELLES, T. S.; REYDON, B. P.; MAIA, A. G. Effects of no-tillage on agricultural land values in Brazil. **Land Use Policy**, v. 76, p. 124-129, 2018.
- TOKURA, L. K.; SECCO, D.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; SIQUEIRA, J. A. C.; SOUZA, S. N. M.; BARICCATTI, R. A.; ALOVISI, A. M. T.; BARISON, A.; VILLA, B. ; PILATTI, M. A. ; RECH, K. S. ; REGINATTO, R. . Structuring of a Haplortox by Soil Cover Species. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 11, p. 299-310, 2018.
- VAN DEN PUTTE, A.; GOVERS, G.; LEYS, A.; LANGHANS, C.; CLYMANS, W.; DIELS, J. Estimating the parameters of the Green–Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 332-344, 2013.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS - GIS.** Curitiba - PR: Curso... Sagres, 53 p., 1998.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-53, 2000.

VIVAN, G. A.; PEITER, M. X.; ROBAINA, D. R.; BARBOZA, F. S.; BUSKE, T. C. Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação. **Irriga, Botucatu**, v. 18, n. 2, p. 282, abr/jun. 2013.

VOMOCIL, J. A. Porosity. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and ampling.** Madison: American Society of Agronomy, p.1, p.499-510, 1965.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Trans. American Society of Agricultural and Biological Engineers.**, v. 4, p. 242-246, 1961.

ZHAO, L.; HOU, R.; WU, F.; KEESSTRA, S. Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 179, p. 47-53, 2018.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; DA SILVA, D. D.; MONTEBELLER, C. A. Adequação dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, Campina Grande, v. 14, n. 10, out. 2010.

ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A.; FALCO PRUSKI, F.; DA SILVA, D. D.; ROCHA DOS SANTOS, M. Efeito da aplicação sucessiva de precipitações pluviárias com diferentes perfis na taxa de infiltração de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, abr. 2012.

## Anexo 1

### Análise de variância (ANOVA)

**Tabela 12.** Análise de variância (ANOVA) para a Infiltração de água de acordo com os níveis de intensidade de chuva

	GL	SQ	QM	Fc	Pr(>F)
Inf Água	2	38150	19075,2	367,33	<2e-16
Resíduo	372	19318	51,9		
Coef. de Variação = 48,16%			Número de observações = 375		
Média geral = 14,96			DMS (Alta - Baixa): 2,71		
			DMS (Alta - Média): 2,54		
			DMS (Baixa - Média): 2,41		

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; Fc: valor de F calculado; Pr(>F): p-valor, se este valor for maior que  $\alpha = 0,05$  não existe diferença significativa entre os tratamentos. DMS: Diferença Mínima Significativa.

**Tabela 13.** Análise de variância (ANOVA) para a densidade do solo (Ds)

	GL	SQ	QM	Fc	Pr(>F)
Densidade	28	0,7554	0,02698	4,182	1,171e-11
Resíduo	666	4,2967	0,00654		
Coef. de Variação = 7,26%			Número de observações = 695		
Média geral = 1,11			DMS: 0,074		

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; Fc: valor de F calculado; Pr(>F): p-valor, se este valor for maior que  $\alpha = 0,05$  não existe diferença significativa entre os tratamentos. DMS: Diferença Mínima Significativa.

**Tabela 14.** Análise de variância (ANOVA) para a porosidade total do solo (PT)

	GL	SQ	QM	Fc	Pr(>F)
Por. Total	28	1262,4	45,086	4,555	3,55e-13
Resíduo	666	6592,0	9,898		
Coef. de Variação = 5,48%			Número de observações = 695		
Média geral = 57,42			DMS: 2,87		

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; Fc: valor de F calculado; Pr(>F): p-valor, se este valor for maior que  $\alpha = 0,05$  não existe diferença significativa entre os tratamentos.

**Tabela 15.** Análise de variância (ANOVA) para a macroporosidade do solo (Ma)

	GL	SQ	QM	Fc	Pr(>F)
Macro	28	1512	54,01	7,268	< 2,2e-16
Resíduo	666	4949	7,43		
Coef. de Variação = 20,40 %			Número de observações = 695		
Média geral = 13,36			DMS: 2,49		

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; Fc: valor de F calculado; Pr(>F): p-valor, se este valor for maior que  $\alpha = 0,05$  não existe diferença significativa entre os tratamentos.

**Tabela 16.** Análise de variância (ANOVA) para a Microporosidade do solo (Mi)

	GL	SQ	QM	Fc	Pr(>F)
Micro	28	1140,10	40,717	3,8211	3,324e-10
Resíduo	666	7096,7	10,656		
Coef. de Variação = 7,41 %			Número de observações = 695		
Média geral = 36,34			DMS: 2,97		

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; Fc: valor de F calculado; Pr(>F): p-valor, se este valor for maior que  $\alpha = 0,05$  não existe diferença significativa entre os tratamentos.

**Tabela 17.** Análise de variância (ANOVA) para a condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat)

	GL	SQ	QM	Fc	Pr(>F)
Ksat	28	608013	21715	4,332	2,87e-12
Resíduo	667	3343526	5073		
Coef. de Variação = 151,17%			Número de observações = 696		
Média geral = 46,83			DMS: 64,99		

GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de quadrados; QM: Quadrado médio; Fc: valor de F calculado; Pr(>F): p-valor, se este valor for maior que  $\alpha = 0,05$  não existe diferença significativa entre os tratamentos.

## Anexo 2

## Estatística descritiva

**Tabela 18.** Estatística descritiva para os atributos físicos do solo do Tratamento T5

Tratam.	T5								
	Variável	Densidade			Macro			Micro	
Camada		0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,0-0,1	0,1-0,2
Média	1,11	1,16	1,13	13,38	13,29	14,58	43,32	41,66	43,17
Mínimo	0,91	1,05	1,01	7,27	9,03	9,81	39,29	39,57	38,87
Q1	1,04	1,09	1,08	11,62	10,51	13,62	41,41	41,02	41,66
Mediana	1,10	1,16	1,12	14,54	13,63	14,12	43,04	41,53	42,75
Q3	1,18	1,23	1,16	15,70	15,78	16,19	45,11	42,17	45,27
Máximo	1,37	1,28	1,26	17,83	17,67	18,68	50,17	44,17	48,36
S	0,113	0,078	0,072	3,247	3,042	2,359	2,892	1,206	2,445
S <sup>2</sup>	0,013	0,006	0,005	10,539	9,254	5,567	8,364	1,454	5,979
CV	10,14	6,68	6,36	24,26	22,88	16,19	6,68	2,89	5,66
Assimetria	0,372	0,001	0,549	-0,550	-0,023	-0,074	0,579	0,321	0,379
Curtose	3,20	1,57	2,60	2,24	1,53	2,59	3,15	2,74	2,66
p-valor*	0,9574	0,2652	0,3538	0,2326	0,2007	0,9417	0,3678	0,9872	0,7146

Q1: Primeiro quartil; Q3: Terceiro quartil; S: desvio padrão; S<sup>2</sup>: variância; p-valor\* para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, se p-value < 0,05 os dados não têm distribuição normal de probabilidades.

**Tabela 19.** Estatística descritiva para os atributos físicos do solo do Tratamento T11

Tratam.	T11								
	Variável	Densidade			Macro			Micro	
Camada		0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,0-0,1	0,1-0,2
Média	1,07	1,12	1,07	14,68	15,17	16,13	43,54	41,49	43,71
Mínimo	0,86	0,90	0,96	9,26	11,43	11,35	35,08	39,11	39,74
Q1	1,01	1,06	1,00	11,29	12,91	14,65	42,91	41,38	42,21
Mediana	1,05	1,15	1,09	14,78	13,81	16,36	43,43	41,79	43,14
Q3	1,16	1,20	1,13	17,45	17,57	17,65	44,69	42,01	45,12
Máximo	1,26	1,27	1,24	23,15	23,49	20,40	50,37	43,06	49,68
S	0,108	0,102	0,088	3,998	3,539	2,494	3,403	1,084	2,510
S <sup>2</sup>	0,012	0,010	0,008	15,989	12,525	6,223	11,582	1,175	6,301
CV	10,08	9,13	8,22	27,23	23,33	15,47	7,817	2,612	5,743
Assimetria	0,065	-0,713	0,306	0,410	1,055	0,090	-0,510	-1,053	0,633
Curtose	2,45	2,63	2,02	2,28	3,06	2,38	4,42	3,33	3,34
p-valor	0,8164	0,2754	0,4591	0,2833	0,023	0,6585	0,2128	0,0322	0,6659

Q1: Primeiro quartil; Q3: Terceiro quartil; S: desvio padrão; S<sup>2</sup>: variância; p-valor\* para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, se p-value < 0,05 os dados não têm distribuição normal de probabilidades.

**Tabela 20.** Estatística descritiva para os atributos físicos do solo do Tratamento T15

Tratam.	T15								
Variável	Densidade			Macro			Micro		
Camada	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3
Média	1,02	1,05	1,09	16,43	18,09	18,03	43,91	41,29	41,19
Mínimo	0,95	0,84	1,02	13,77	15,34	14,98	39,45	37,96	39,20
Q1	0,98	1,01	1,06	14,94	16,98	16,56	41,95	40,12	39,83
Mediana	1,01	1,06	1,08	16,93	17,37	17,92	44,58	40,68	41,35
Q3	1,04	1,10	1,11	18,12	19,72	19,75	46,08	40,99	42,12
Máximo	1,12	1,13	1,17	19,38	21,29	20,38	46,52	51,19	43,83
S	0,053	0,073	0,042	1,845	1,886	1,845	2,375	3,006	1,518
S <sup>2</sup>	0,003	0,005	0,002	3,408	3,556	3,418	5,641	9,039	2,304
CV	5,21	6,92	3,84	11,24	10,42	10,26	5,41	7,28	3,68
Assimetria	0,580	-1,602	0,273	0,080	0,389	-0,205	-0,516	2,533	0,239
Curtose	2,61	5,72	2,42	1,59	1,86	1,58	1,90	9,16	1,832
p-valor	0,278	0,009	0,9379	0,3053	0,2182	0,1283	0,082	9,2x10 <sup>-5</sup>	0,269

Q1: Primeiro quartil; Q3: Terceiro quartil; S: desvio padrão; S<sup>2</sup>: variância; p-valor\* para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, se p-value < 0,05 os dados não têm distribuição normal de probabilidades.

## Anexo 3

## Semivariogramas

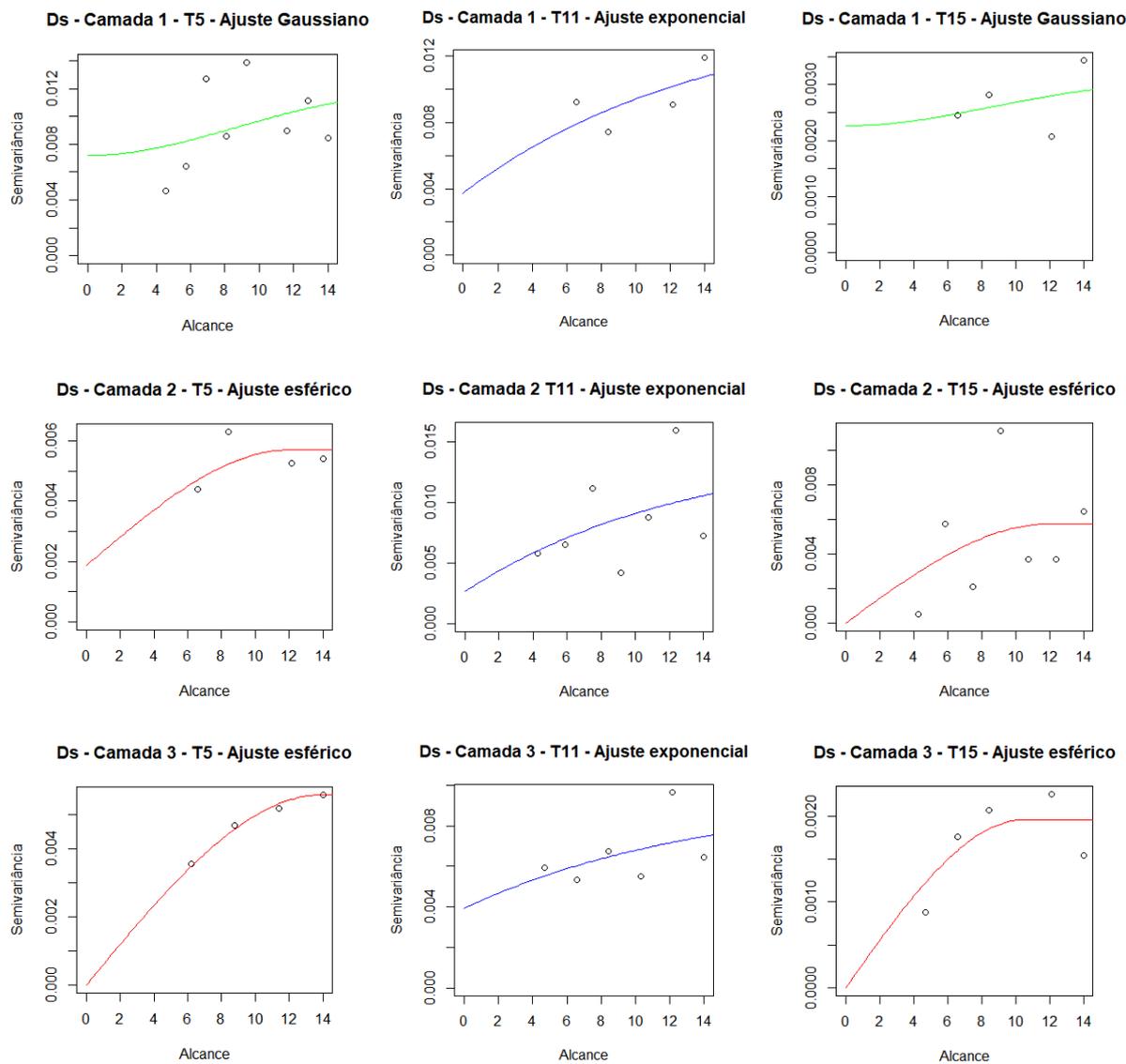
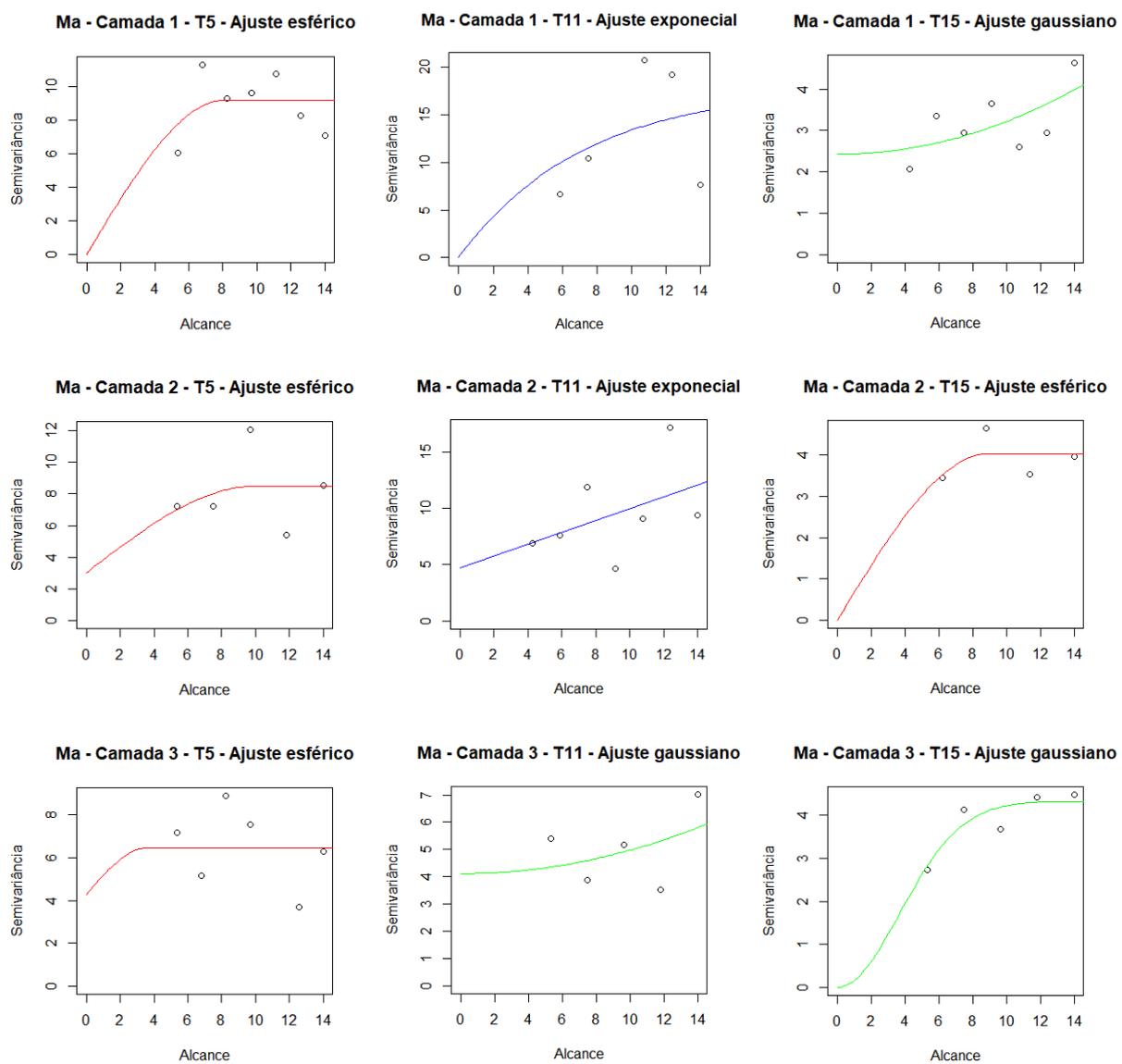
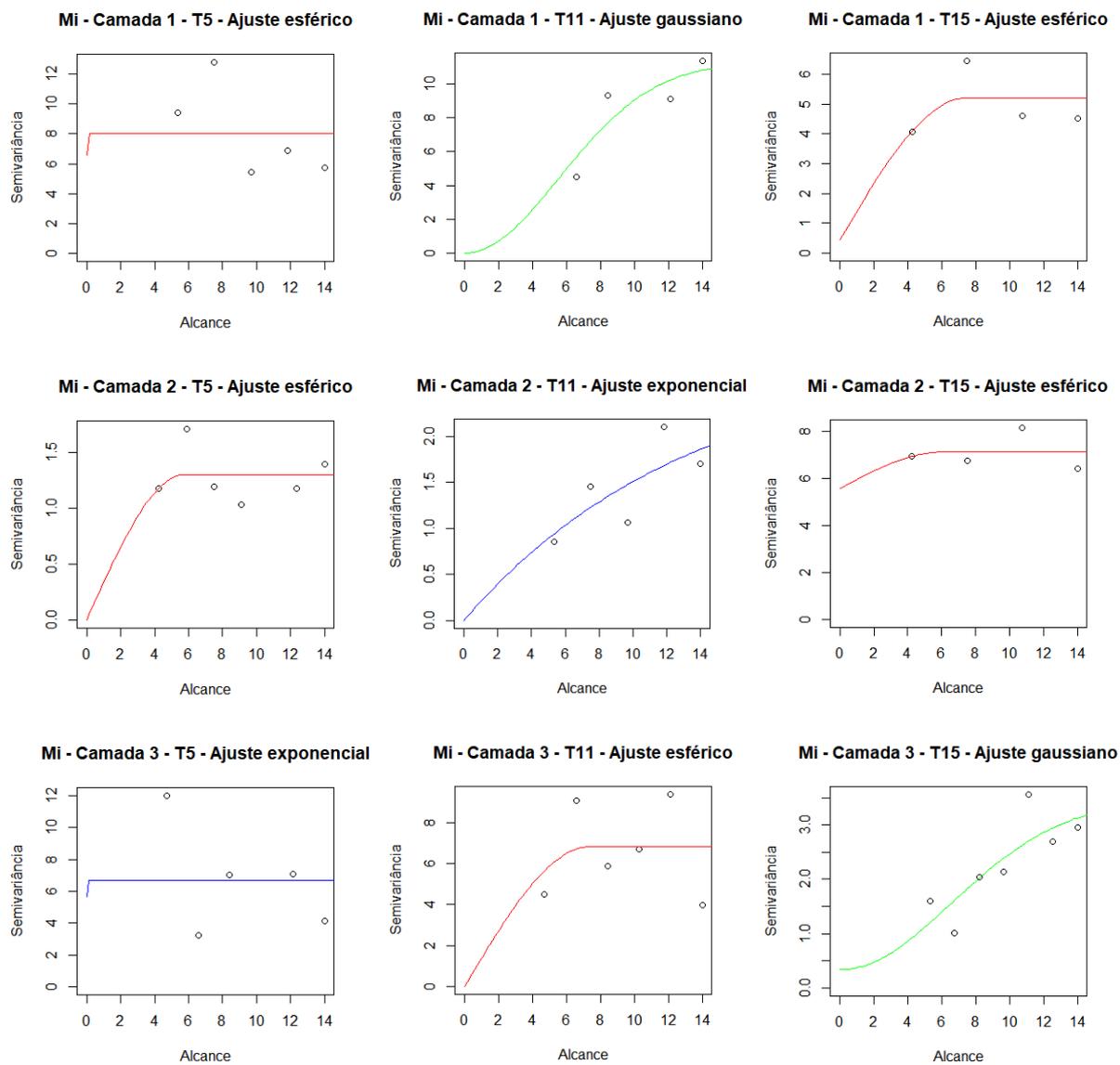


Figura 21. Semivariogramas teóricos para a Densidade.



**Figura 22.** Semivariogramas teóricos para a Macroporosidade.



**Figura 23.** Semivariogramas teóricos para a Microporosidade.