



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS**  
**CAMPUS DE JABOTICABAL**

**CORRELAÇÃO LINEAR E ESPACIAL DOS ATRIBUTOS**  
**FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA SOB CULTIVO DE SOJA**  
**NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

**Nilton Eugénio Mário**

Engenheiro Hidráulico Agrícola e Água Rural

**Jaboticabal**  
**Estado de São Paulo**  
**Fevereiro - 2023**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS**  
**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CORRELAÇÃO LINEAR E ESPACIAL DOS ATRIBUTOS**  
**FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA SOB CULTIVO DE SOJA**  
**NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

**Discente:** Nilton Eugénio Mário

**Orientador:** Prof. Dr. Rafael Montanari

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, especialidade: Ciência do Solo.

Jaboticabal – SP  
Fevereiro/2023

M341c      Mário, Nilton Eugénio  
Correlação linear e espacial dos atributos físicos do solo  
em área sob cultivo de soja no Sistema Plantio Direto /  
Nilton Eugénio Mário. -- Jaboticabal, 2023  
56 f. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista  
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,  
Jaboticabal  
Orientador: Rafael Montanari

1. Camadas do solo. 2. Semivariogramas. 3. Mapas de  
krigagem. 4. DNAt do solo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos  
pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

## **IMPACTO ESPERADO NA SOCIEDADE**

Conforme os resultados da presente pesquisa, o impacto esperado na sociedade, está diretamente relacionado à melhoria da produção de soja em sistemas agrícolas sustentáveis. A pesquisa incentiva a adoção de práticas agrícolas que preservam a qualidade do solo, como o Sistema Plantio Direto (SPD), promovendo, assim, uma agricultura mais eficiente e menos impactante ambientalmente. Através do uso de técnicas avançadas, como a geoestatística para monitorar os atributos físicos do solo, os produtores são capacitados a tomar decisões baseadas em dados, o que permite o manejo específico de zonas agrícolas e a maximização da produtividade de forma racional e sustentável. Além disso, essas práticas contribuem para a redução de custos, aumento da eficiência no uso de recursos naturais e melhoria da qualidade do solo, aspectos que favorecem uma produção agrícola mais competitiva. Consequentemente, esse aprimoramento reflete em benefícios econômicos para os produtores e em um menor impacto ambiental, o que resulta em um desenvolvimento agrícola mais equilibrado e sustentável a longo prazo, garantindo tanto a preservação do solo quanto a competitividade da produção de soja no mercado global. Adicionalmente, a aplicação dessas tecnologias pode contribuir para uma agricultura de precisão mais robusta, ao permitir a otimização do uso de insumos, como fertilizantes e defensivos, e a diminuição de desperdícios, elevando ainda mais a sustentabilidade do setor. A produção agrícola, beneficiada por técnicas de manejo mais precisas, pode atender às demandas de alimentos de forma mais responsável, reduzindo a pressão sobre o meio ambiente e os recursos naturais. O aumento da produtividade, aliado à redução de impactos ambientais, também fortalece a economia rural, gerando emprego e renda para comunidades agrícolas e contribuindo para o desenvolvimento regional. Por fim, a conservação dos atributos físicos do solo assegura que as futuras gerações de produtores tenham acesso a solos férteis e saudáveis, garantindo a continuidade da produção agrícola em longo prazo, o que é fundamental em um cenário de crescente demanda por alimentos e sustentabilidade no uso dos recursos naturais.

## **EXPECTED IMPACT ON SOCIETY**

According to the findings of the present research, the expected societal impact is directly linked to the improvement of soybean production within sustainable agricultural systems. The study encourages the adoption of agricultural practices that preserve soil quality, such as the No-Tillage System (NTS), thereby promoting a more efficient and environmentally less impactful agriculture. Through the use of advanced techniques, such as geostatistics for monitoring the physical attributes of the soil, producers are empowered to make data-driven decisions, allowing for targeted management of agricultural zones and the maximization of productivity in a rational and sustainable manner. Furthermore, these practices contribute to cost reduction, increased efficiency in the use of natural resources, and enhanced soil quality, all of which foster a more competitive agricultural production. Consequently, these improvements yield economic benefits for producers while minimizing environmental impacts, leading to a more balanced and sustainable agricultural development in the long term. This, in turn, ensures both soil preservation and the global competitiveness of soybean production. Additionally, the application of these technologies can strengthen precision agriculture by optimizing the use of inputs such as fertilizers and pesticides and minimizing waste, further enhancing the sustainability of the sector. Agricultural production, supported by more precise management techniques, can better meet food demands in a more responsible manner, reducing the pressure on the environment and natural resources. The increase in productivity, combined with the reduction of environmental impacts, also strengthens rural economies by generating employment and income for farming communities, thus contributing to regional development. Finally, the conservation of the physical attributes of the soil ensures that future generations of farmers have access to fertile and healthy soils, thereby guaranteeing the continuity of agricultural production over the long term—an essential factor in an era of growing demand for food and the need for sustainability in natural resource use.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** CORRELAÇÃO LINEAR E ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA SOB CULTIVO DE SOJA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

**AUTOR:** NILTON EUGÊNIO MÁRIO

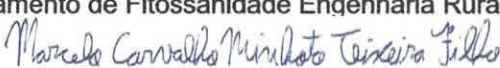
**ORIENTADOR:** RAFAEL MONTANARI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RAFAEL MONTANARI (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade Engenharia Rural e Solos DEFERS / FEIS UNESP Ilha Solteira



Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade / FEIS UNESP Ilha Solteira



Prof. Dr. MARCELO RODRIGO ALVES (Participação Virtual)

Departamento de Agronomia / Universidade do Oeste Paulista - UNOESTE

Jaboticabal, 03 de março de 2023

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**Nilton Eugénio Mário** – de nacionalidade moçambicana, nascido aos 23 de Fevereiro de 1993, natural de Chimoio, província de Manica, filho de Eugénio Mário e Nhatua Mauire. Em Fevereiro de 2012, ingressou no curso de graduação em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural no Instituto Superior Politécnico de Gaza (2016) - Campus Politécnico de Lionde, com conclusão em 10 de junho de 2016. Em 2017, foi atribuído uma Bolsa de Estudos pelo Ministério da Ciência e Tecnologia, Ensino Superior e Técnico Profissional de Moçambique para participar do Programa de Formação de Formadores moçambicanos nas áreas de Ciências Agrárias e Mecanização Agrícola, o programa foi instituído a partir do protocolo de intenções firmado em 30 de Janeiro de 2017 pelo Conselho Nacional das Instituições da Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica (Conif) e o Ministério da Ciência e Tecnologia, Ensino Superior e Técnico Profissional de Moçambique. O programa recebeu apoio da Secretaria de Educação Profissional e Tecnologia (Setec/MEC - Brasil), da Agência Brasileira de Cooperação (ABC) e da Autoridade Nacional de Educação Profissional de Moçambique (ANEP). Em agosto de 2021, ingressou no curso de mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na linha de pesquisa em Engenharia de Água e Solo com área de concentração em Manejo e Conservação do Solo e da Água, sendo bolsista CAPES na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Campus de Jaboticabal, SP, sob orientação do Prof. Dr. Rafael Montanari. Tem experiência na área de Irrigação de Precisão, Drenagem Agrícola, Geoprocessamento, Sistemas de Abastecimento de Água Potável, Extensão Agrária, Mecanização Agrícola, Agroindústria, Sanidade Animal, Sanidade Vegetal e Ciência do Solo.

**[Confia ao SENHOR as tuas obras, e os teus pensamentos serão  
estabelecidos].**

**“Provérbios 16:3”**



## DEDICATÓRIA

A minha querida e amada **mãe** Nhatua Mauire Gero

Ao meu pai Eugénio Mário Sande

A minha amada esposa Neusa da Eufélia Jorge Mário

A minha querida irmã Belinha Eugénio Mário

E por fim, aos meus colegas e amigos

E a todos que contribuíram de forma direta e indireta pelos ensinamentos básicos que me tornaram no indivíduo que sou hoje, sobretudo pelo apoio incomparável e incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus (Senhor Jesus Cristo), pelo dom da vida, saúde, força e coragem para superar as dificuldades e para conclusão desse objetivo em minha vida;

A minha mãe Nhatua Mauire, heroína da minha vida que mesmo distante tem me dado apoio, ensinamentos e puxões de orelhas que hoje me tornaram no indivíduo que sou, pelo incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço, pois se não fosse por ela não sei se algum dia chegaria onde me encontro, o suporte sentimental, moral e material foram determinantes para a minha formação como homem;

A minha irmã Belinha Eugénio Mário pelo apoio moral, encorajamento e dedicação em todos os momentos que necessitei e pelos momentos felizes que me proporciona;

A minha esposa Neusa da Eufélia Jorge Mário pelo companheirismo, carinho, amor, paciência e por sempre me incentivar a sonhar e voar mais alto.

Um agradecimento especial ao meu estimado orientador, Prof. Dr. Rafael Montanari pelo suporte, correções, incentivos, pelo seu apoio e acompanhamento incondicional em todos os momentos e pelo empenho dedicado à realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, Dr. Douglas Henrique Bandeira e Dr<sup>a</sup>. Teresa Cristina Tarlé Pissarra pela orientação, confiança e amizade;

Aos meus colegas, Hernandes Andrade Queiroz e Polyana Pereira, pela grande ajuda que me prestaram em meus estudos;

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da UNESP de Jaboticabal e ao Programa de Ciência de Solo pela oportunidade;

A Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira (FEIS) da UNESP;

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

Enfim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização desse meu sonho:

**MUITO OBRIGADO!**

## SUMÁRIO

|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>                                                     | <b>ii</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>                                                     | <b>iii</b> |
| <b>RESUMO .....</b>                                                              | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                            | <b>v</b>   |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                       | <b>6</b>   |
| 1.1. JUSTIFICATIVA .....                                                         | 7          |
| 1.2. OBJETIVOS.....                                                              | 8          |
| 1.2.1. Geral.....                                                                | 8          |
| 1.2.2. Específicos.....                                                          | 8          |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                                             | <b>9</b>   |
| 2.1. Aspectos gerais sobre a cultura de soja.....                                | 9          |
| 2.2. Atributos físicos do solo .....                                             | 9          |
| 2.2.1. Densidade do solo.....                                                    | 9          |
| 2.2.2. Porosidade do solo.....                                                   | 10         |
| 2.2.3. Resistência do solo à penetração.....                                     | 11         |
| 2.3. Sistema Plantio Direto (SPD) .....                                          | 11         |
| 2.4. Geoestatística agronômica .....                                             | 12         |
| 2.4.1. Semivariograma.....                                                       | 13         |
| 2.4.2. Krigagem .....                                                            | 14         |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                               | <b>16</b>  |
| 3.1. Área experimental.....                                                      | 16         |
| 3.2. Caracterização edafoclimática da área em estudo.....                        | 16         |
| 3.2. Histórico da área irrigada sob SPD (malha para estudo Geoestatístico) ..... | 16         |
| 3.3. Caracterização inicial do solo em estudo.....                               | 17         |
| 3.4. Implantação e caracterização da malha experimental de campo.....            | 17         |
| 3.5. Atributos do solo.....                                                      | 17         |
| 3.6. Extração de DNA total do solo .....                                         | 18         |
| 3.6.1. Quantificação de DNA usando o Espectrofotômetro NanoDrop 2000c .....      | 19         |
| 3.7. Análise estatística dos atributos pesquisados.....                          | 20         |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                           | <b>21</b>  |
| 4.1. Análise descritiva dos dados.....                                           | 21         |
| 4.2. Análise de regressão entre os atributos físicos do solo .....               | 24         |
| 4.2.1. Matriz de correlação linear simples entre os atributos.....               | 24         |
| 4.3. Análise geoestatística dos atributos físicos do solo .....                  | 29         |
| 4.3.1 Análise semivariográfica simples .....                                     | 29         |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>                                                        | <b>39</b>  |
| <b>6. REFERÊNCIAS.....</b>                                                       | <b>40</b>  |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1:</b> Análise descritiva dos atributos físicos de um LATOSSOLO na profundidade de 0,00 - 0,20m sob plantio direto no irrigado.....                                                                             | 23 |
| <b>Tabela 2:</b> Análise descritiva dos atributos físicos de um LATOSSOLO na profundidade de 0,20 – 0,40m sob plantio direto no irrigado. ....                                                                            | 24 |
| <b>Tabela 3:</b> Matriz de correlação dos atributos físicos de um Latossolo vermelho distrófico na profundidade de 0,00 - 0,20m sob plantio direto irrigado. ....                                                         | 28 |
| <b>Tabela 4:</b> Matriz de correlação dos atributos físicos de um Latossolo vermelho distrófico na profundidade de 0,20 - 0,40m sob plantio direto irrigado. ....                                                         | 28 |
| <b>Tabela 5:</b> Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos físicos de um Latossolo vermelho distrófico sob sistema plantio direto do irrigado na profundidade 0,00-0,20m e 0,20 – 0,40m..... | 31 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Exemplo de semivariograma experimental .....                                                                                              | 14 |
| <b>Figura 2:</b> Localização da implantação da malha de amostragem .....                                                                                   | 16 |
| <b>Figura 3:</b> Pontos amostrais do esquema da malha experimental de campo.....                                                                           | 17 |
| <b>Figura 4:</b> Semivariogramas simples dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho<br>Distrófico sob Sistema Plantio Direto. ....                     | 35 |
| <b>Figura 5:</b> Mapas de krigagem de alguns atributos físicos de Latossolo Vermelho<br>Distrófico sob cultivo de soja no município de Selvíria – MS ..... | 38 |

## TÍTULO

### CORRELAÇÃO LINEAR E ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA SOB CULTIVO DE SOJA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

**RESUMO** – A geoestatística é uma ferramenta extremamente importante e indispensável quando se trata de estudos dedicados à análise ou avaliação de atributos do solo e a consequente geração de semivariogramas e mapas de krigagem. Deste modo, a presente pesquisa objetivou-se em avaliar as correlações entre os atributos físicos do solo em área sob cultivo de soja e sua variabilidade espacial no sistema plantio direto, nas camadas de 0,00 – 0,20 m ( $_1$ ) e 0,20 – 0,40 m ( $_2$ ) de profundidade. A pesquisa foi conduzida em uma área localizada no município de Selvíria – MS, onde foram realizadas coletas de dados de solo utilizando-se uma malha experimental de 0,5 ha, totalizando-se 60 pontos amostrais georreferenciados para análise dos seguintes atributos físicos: a granulometria (Are, Arg e Sil), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), a porosidade total determinada (PTd), densidade do solo (DS), resistência a penetração com penetrômetro de impacto (R<sub>Pi</sub>), resistência a penetração com o penetrômetro de bancada (R<sub>Ppb</sub>), umidade gravimétrica (UG), densidade de partícula (DP), porosidade total calculada (PTc) e DNA<sub>t</sub>, com base nas técnicas estatísticas e geoestatísticas feitas por meio de semivariogramas experimentais e mapas de krigagem com auxílio do software estatístico SAS e GS+ 7.0, respectivamente. Foram encontradas correlações que apresentaram melhores resultados na primeira camada do solo, para os seguintes pares de atributos: SIL<sub>1</sub> x R<sub>Pi1</sub>, ARE<sub>1</sub> x UG<sub>1</sub>, SIL<sub>1</sub> x DP<sub>1</sub>, SIL<sub>1</sub> x ARG<sub>1</sub>, DNA<sub>t</sub> x ARG<sub>1</sub>, ARE<sub>1</sub> x Mi<sub>1</sub>, DNA x SIL<sub>1</sub>, PTc<sub>1</sub> x R<sub>Pb1</sub>, PTc<sub>1</sub> x Ma<sub>1</sub>, DNA<sub>t</sub> x R<sub>Pb1</sub>, e para a segunda camada, os seguintes pares: ARG<sub>2</sub> x R<sub>Pi2</sub>, ARE<sub>2</sub> x R<sub>Pi2</sub>, ARE<sub>2</sub> x DP<sub>2</sub>, Mi<sub>2</sub> x ARE<sub>2</sub>, Mi<sub>2</sub> x ARG<sub>2</sub>, PT<sub>2</sub> x ARG<sub>2</sub>, DS<sub>2</sub> x Mi<sub>2</sub> e PTc<sub>2</sub> x Mi<sub>2</sub>. Além disso, verificou-se que a camada de 0,00-0,20 m de profundidade, foi a que apresentou maiores variabilidades dos atributos físicos com base no coeficiente de variação. O DNA<sub>t</sub> do solo quando correlacionado com atributos em estudo, mostrou-se positiva para SIL<sub>1</sub> e R<sub>Pb1</sub> e negativo para ARG<sub>1</sub>, ambos na primeira camada do solo. Entretanto, dos atributos pesquisados, a maior parte deles não apresentaram dependência espacial, isto é, demonstraram-se ser aleatórios, heterogêneos e com muita variabilidade espacial, podendo-se modelar seus semivariogramas do tipo efeito pepita puro.

**Palavras-chave:** Camadas do solo, semivariogramas, mapas de krigagem, DNA<sub>t</sub> do solo.

## TITLE

### LINEAR AND SPATIAL CORRELATION OF SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES IN AREA UNDER SOYBEAN CULTIVATION IN NO-TILLAGE SYSTEM

**ABSTRACT** – Geostatistics is an extremely important and indispensable tool when it comes to studies dedicated to the analysis or evaluation of soil attributes and the consequent generation of semivariograms and kriging maps. Thus, the present research aimed to evaluate the correlations between the physical attributes of the soil in an area under soybean cultivation and its spatial variability in the no-tillage system, in the layers of 0.00 - 0.20 m (1) and 0.20 – 0.40 m (2) depth. The research was conducted in an area located in the municipality of Selvíria - MS, where soil data were collected using an experimental mesh of 0.5 ha, totaling 60 georeferenced sampling points for analysis of the following physical attributes: granulometry (Are, Arg and Sil), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), the total porosity determined (PTd), soil density (DS), penetration resistance with impact penetrometer (R<sub>Pi</sub>), resistance to penetration with the bench top penetrometer (R<sub>Ppb</sub>), gravimetric humidity (UG), particle density (SD), calculated total porosity (PT<sub>c</sub>) and DNA<sub>t</sub>, based on statistical and geostatistical techniques made by means of experimental semivariograms and kriging maps with the aid of statistical software SAS and GS+ 7.0, respectively. Correlations were found that presented better results in the first layer, for the following pairs of attributes: SIL<sub>1</sub> x R<sub>Pi1</sub>, ARE<sub>1</sub> x UG<sub>1</sub>, SIL<sub>1</sub> x DP<sub>1</sub>, SIL<sub>1</sub> x ARG<sub>1</sub>, DNA<sub>t</sub> x ARG<sub>1</sub>, ARE<sub>1</sub> x Mi<sub>1</sub>, DNA<sub>t</sub> x SIL<sub>1</sub>, PT<sub>c1</sub> x R<sub>Pb1</sub>, PT<sub>c1</sub> x Ma<sub>1</sub>, DNA x R<sub>Pb1</sub>, and for the second layer, the following pairs: ARG<sub>2</sub> x R<sub>Pi2</sub>, ARE<sub>2</sub> x R<sub>Pi2</sub>, ARE<sub>2</sub> x DP<sub>2</sub>, Mi<sub>2</sub> x ARE<sub>2</sub>, Mi<sub>2</sub> x ARG<sub>2</sub>, PT<sub>2</sub> x ARG<sub>2</sub>, DS<sub>2</sub> x Mi<sub>2</sub> and PT<sub>c2</sub> x Mi<sub>2</sub>. In addition, it was found that the 0.00-0.20 m depth layer presented the greatest variability of physical attributes based on the coefficient of variation. In addition, it was found that the 0.00-0.20 m depth layer presented the greatest variability of physical attributes based on the coefficient of variation. Soil DNA<sub>t</sub>, when correlated with the attributes under study, was positive for SIL<sub>1</sub> and R<sub>Pb1</sub> and negative for ARG<sub>1</sub>, both in the first soil layer. However, of the attributes researched, most of them did not present spatial dependence, that is, they were shown to be random, heterogeneous and with a lot of spatial variability, and their semivariograms of the pure nugget effect type could be modeled.

**Keywords:** Soil layers, semivariograms, kriging maps, soil DNA<sub>t</sub>.

## 1. INTRODUÇÃO

A importância da soja para o cenário mundial é expressiva por estar diretamente ligado a vários setores da nutrição animal. Nesse contexto, o Brasil teve aumento em áreas na produtividade nos últimos anos. A safra de 2019/2020 apresentou crescimento de 38,5 milhões de hectares, o que representa um aumento de 4% na área total cultivada, e uma produção de 3.513 kg/ha. Isso gerou um aumento gradativo em 135,1 milhões de toneladas, crescendo 8,2% em relação à safra passada (CONAB, 2022). Em relação ao aumento de áreas com a cultura da soja, destaca-se o estado do Mato Grosso do Sul, que na safra de 2020/21 superou as previsões e atingiu a marca dos 13.305 milhões de toneladas produzidas. Esse volume representa um recorde histórico 17,8% maior que a safra passada. A produtividade por unidade de área também surpreendeu, fechando em 62,8 sacas por hectare, segundo dados do projeto SIGA/MS (Sistema de Informação Geográfica do Agronegócio) (PERES, 2021). No cenário Mundial, o Brasil ultrapassou o EUA que teve uma redução em áreas plantadas ligados e relacionados a políticas agrícolas. Nessa situação o país tem uma importância no abastecimento global tendo como exemplo a soja exportada para União Europeia que serve para produção de carnes participando 87% da produção de ração animal, com grande parte da soja exportada do Brasil. Nesse contexto atual, é representado pelos vários métodos com tecnologias avançados em décadas de pesquisa, um desses métodos que foi potencializador para chegar nessa produtividade foi sistema plantio direto (SPD) (MARIZ, 2021).

Dentre os sistemas de manejo do solo empregados para a cultura da soja, observa-se o constante crescimento do SPD, o qual teve um incremento de 84% entre os anos de 2006 e 2017, passando de 17,9 milhões de hectares, para 32,9 milhões. O número de produtores também foi ampliado em 10,1% no mesmo período, chegando a 557 mil estabelecimentos (FEBRAPDP – Federação Brasileira do Sistema de Plantio Direto, 2021). A adoção do SPD promove conhecidos benefícios para o solo, sendo considerado um sistema de manejo conservacionista. Isso porque contribui na melhoria da estrutura física do solo, proporciona maior conservação de umidade no solo e maior aproveitamento da água disponível pelas plantas, colabora para a melhoria da porosidade total do solo e proporciona maior tolerância à cultura em períodos de estiagem, assegurando maior probabilidade de obtenção de rendimentos mais elevados (FEBRAPDP, 2021). Ainda, a adoção do SPD contribui para a redução nos gastos de produção, pois há um menor consumo de combustível na atividade agrícola e menor tráfego de máquinas na área.

A agricultura moderna necessita de elevadas produtividades para um crescimento contínuo, a tecnologia com uso da Agricultura de Precisão é importante para o



crescimento da mesma. Este procedimento de gerenciamento da agricultura serve para reduzir perdas e despesas, elevar a produtividade e aumentar a qualidade dos produtos (TAVANTI *et al.*, 2020). Mas para isso, entender o solo é muito importante para execução destas tecnologias, consegue-se ter inúmeras variações ao longo do tempo, devido aos fatores de formação do solo como, clima, relevo, organismo e material de origem, que variam muito e de forma significativa, causando assim aos solos uma elevada diversidade, ou seja, uma grande variação espacial. Para avaliar essas variações são utilizadas ferramentas da pedologia, da estatística descritiva e da geoestatística. Pesquisas têm demonstrado a importância da modelagem do semivariograma da variação espacial de atributos do solo que afetam a produtividade da cultura, com o objetivo de aperfeiçoar o aproveitamento de recursos, diminuir custos e auxiliar na gestão ambiental (SOUZA *et al.*, 2014).

O entendimento da variabilidade espacial dos atributos de solo e da cultura apresenta-se como instrumento vantajoso para pesquisar a variabilidade de ganho verificado em aperfeiçoar o manejo em áreas agrícolas por meio de uma coordenação agrícola que leve uma atenção nas informações pontuais de solo e de culturas (AMADO *et al.*, 2009). Segundo os princípios básicos da experimentação estabelecidos pelo método estatístico clássico, a variabilidade do solo ocorre de forma inteiramente aleatória, admitindo-se que seus atributos possuam distribuição de frequência do tipo normal. Entretanto, vários estudos têm relatado que os atributos do solo apresentam intensa dependência espacial necessitando, portanto, de uma análise geoestatística (TAVANTI *et al.*, 2020). A aplicação de sistemas de manejo típicos na agricultura exige informações precisas sobre a variação espacial dos atributos do solo e da cultura (KERRY E OLIVER, 2007), que podem ser alcançadas por meio dos mapas interpolados (KRAVCHENKO, 2003). Uma maior precisão das bases é adquirida quando se emprega a interpolação por krigagem (DI *et al.*, 1989; SOUZA *et al.*, 2010), pois avaliar os valores para locais não estimados sem tendência e com variância mínima, proporcionando uma estimativa mais necessário do atributo de interesse.

Segundo DALCHIAVON *et al.*, (2012), para se avaliar o comportamento espacial dos componentes de produção e da produtividade, o mais indicado é a utilização de técnicas geoestatísticas, que, por meio de semivariogramas, permitem definir o alcance e o grau da dependência espacial e fornecem parâmetros para a elaboração de mapas de variabilidade pela krigagem e/ou co-krigagem.

### **1.1. JUSTIFICATIVA**

O uso de ferramentas tecnológicas que auxiliam pesquisadores e profissionais no tratamento e na interpretação de dados coletados no campo tem proporcionado o melhor

gerenciamento das tomadas de decisões e garantido cada vez mais o sucesso da atividade agrícola. Nesse contexto, a ciência do solo tem se apoiado intensamente na utilização da geoestatística, que, juntamente com a estatística clássica, formaram uma dupla formidável na importância agronômica devido às inúmeras respostas dadas às mais variadas questões existentes que, até então, eram ignoradas. Conceitualmente, a geoestatística é uma das técnicas quantitativas aplicadas para integrar o mapeamento convencional do solo, a qual busca entender a aparente aleatoriedade dos dados que, por apresentarem uma possível estruturação espacial, estabelece uma função de correlação espacial. A técnica de interpolação krigagem tem se destacado na produção de mapas por considerar a dependência espacial das amostras através do semivariograma (OLIVER; WEBSTER, 2014).

Dentre a importância da geoestatística, podem ser destacados, entre outros, os seguintes aspectos: determinação da dimensão da parcela experimental de campo, dada pelo poder de alcance do semivariograma, estimativa de um atributo do solo de difícil determinação, a partir de outro qualquer cuja determinação seja fácil, por meio do semivariograma cruzado e da co-krigagem, viabilização da agricultura de precisão. Dessa forma, torna-se importante a compreensão dos processos que envolvem o manejo do solo sob SPD e seu efeito temporal no solo. O monitoramento dos atributos físico-químicos do solo, através da geoestatística, auxilia o produtor a alcançar a máxima produtividade das culturas, de forma racional e sustentável, o que justifica o presente estudo. Nessa vertente, o presente trabalho objetivou, diante dos atributos do solo estudado, o seguinte:

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Geral**

- ✚ Avaliar as correlações entre os atributos físicos do solo em área sob cultivo de soja e sua variabilidade espacial no sistema plantio direto.

### **1.2.2. Específicos**

- ✚ Analisar a dependência linear e espacial dos atributos físicos do solo sob sistema plantio direto.
- ✚ Analisar a melhor forma de modelagem do semivariograma para 60 pontos amostrais.
- ✚ Explorar os atributos físicos que melhor se correlacionam com o DNA<sub>t</sub> do solo.
- ✚ Analisar os principais atributos físicos do solo, visando-se implementar os seus aspectos de manejo e conservação, com vistas a proporcionar zonas específicas de manejo.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Aspectos gerais sobre a cultura de soja**

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill), leguminosa, pertencente à família Fabaceae é uma cultura de grande importância econômica, principal cultura do agronegócio brasileiro, destaque entre as principais commodities. Tem origem asiática, cultivada há mais de 5000 mil anos, chegou ao Brasil em 1882. Seu cultivo inicialmente foi na Bahia (MANDARINO, 2017). No Brasil, a grande expansão teve início a partir da década de 1970 e na última safra 2018/2019, atingiu 115 milhões de toneladas do grão (CONAB, 2022).

A soja [*Glycine max* (L) Merrill] cultivada atualmente é muito diferente dos seus ancestrais, que eram plantas rasteiras que se desenvolviam na costa leste da Ásia, principalmente ao longo do Rio Yangtse, na China. Sua evolução começou com o aparecimento de plantas oriundas de cruzamentos naturais entre duas espécies de soja selvagem que foram domesticadas e melhoradas por cientistas da antiga China. Sua importância na dieta alimentar da antiga civilização chinesa era tal, que a soja, juntamente com o trigo, arroz e centeio, era considerada um grão sagrado, com direito a cerimoniais ritualísticos na época de semeadura e da colheita (EMBRAPA, 2018).

No Brasil, a soja foi inicialmente implantada em 1882, no estado da Bahia, posteriormente, passou a ser cultivada no estado de São Paulo, no ano de 1891. Neste período, outras cultivares de soja também foram introduzidas no Rio Grande do Sul. As cultivares de origem norte americana apresentaram boa adaptação nesta região, devido as condições climáticas que favoreceram o seu desenvolvimento (BONATO, 1987).

Com o estabelecimento do programa oficial de incentivo à triticultura nacional em meados dos anos 50, a cultura da soja foi igualmente incentivada, por ser, tanto do ponto de vista técnico (leguminosa sucedendo gramínea), quanto econômico (melhor aproveitamento das máquinas, implementos, infraestrutura e mão de obra), a melhor alternativa de verão para suceder o trigo plantado no inverno (EMBRAPA, 2018).

### **2.2. Atributos físicos do solo**

Os atributos físicos do solo são importantes indicadores de diferentes usos da terra no Cerrado. Dentre os atributos físicos destacam-se a densidade do solo, a porosidade do solo e a resistência do solo à penetração (PENA, 2020).

#### **2.2.1. Densidade do solo**

A densidade do solo é um atributo físico que é usado como medida da qualidade do solo devido suas relações intrínsecas com a porosidade, a umidade, e a condutividade

hidráulica, sendo necessário seu monitoramento para garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (DAM *et al.*, 2005; COSTA *et al.*, 2008; MARTINS *et al.*, 2009).

A densidade do solo por definição é expressa como a massa por unidade de volume de solo seco, é uma propriedade física que reflete o arranjo das partículas do solo, que irá definir as características do sistema poroso. A densidade do solo é variável para um mesmo solo, podendo ser alterada ao longo do perfil do solo. A densidade do solo é um atributo muito utilizado para estimar a compactação do solo (PENA, 2020).

A densidade do solo, também conhecida como densidade aparente ou densidade global, por definição, é a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca em estufa, a 110°C, e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e os poros, dada em  $\text{g cm}^{-3}$ ,  $\text{kg dm}^{-3}$ ,  $\text{t m}^{-3}$  ou  $\text{Mg m}^{-3}$ . Ela possui estreita relação com outros atributos do solo, tais como a porosidade total, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade, condutividade hidráulica e a resistência à penetração, os quais são de suma importância para o desenvolvimento da planta (MONTANARI, 2015).

A densidade do solo pode ser usada como índice do grau de compactação de um solo, tendo em vista que o solo é um material poroso, e, quando comprimido, a mesma massa pode ocupar um volume menor, afetando sua estrutura, o arranjo e o volume dos poros e as características de retenção de água (SOUZA, 2017).

### **2.2.2. Porosidade do solo**

De acordo com BRADY & WEIL, (2013) as partes, orgânica (resíduos vegetais e animais) e inorgânica (areia, silte e argila) constituem a matriz do solo, formando os sólidos do solo. A parte não ocupada pelos sólidos é denominada poros do solo, ou espaço poroso, formando assim um conjunto de diversas formas e tamanhos, interconectados. O espaço poroso é ocupado por quantidades variáveis de uma solução aquosa denominada água no solo e de uma solução gasosa denominada ar do solo, apresentando variação espacial devido a sua complexidade e dinamicidade no sistema.

A porosidade total do solo de acordo com PENA, (2020) é definida como a fração do volume total de um determinado volume de solo suscetível de ser ocupada por água e/ou ar, com ausência de partículas sólidas. De acordo com PENA, (2020), agronomicamente, o solo ideal, deve apresentar  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de porosidade total ( $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de microporosidade, que é responsável pelo armazenamento de água, e  $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de macroporosidade, responsável pela aeração do solo).

A porosidade total é uma medida do espaço poroso do solo, o que a torna diretamente ligada à definição de densidade do solo e, portanto, sofre influência do nível de compactação, ou seja, quanto maior a densidade do solo menor a sua porosidade total (REICHARDT, 1985).

A porosidade total dos solos é afetada, principalmente, pela forma e arranjo das partículas do solo, ou seja, sua capacidade de formação de agregados. Solos arenosos, devido a pouca agregação, apresentam valores de porosidade oscilando, em média, entre 35 a 50% e os argilosos, pela agregação, porosidade entre 40 a 60% (MACHADO; FAVARETTO, 2006).

### **2.2.3. Resistência do solo à penetração**

Resistência à penetração (RP) é um atributo físico do solo estabelecido pela pressão, sendo a razão qualquer entre a força necessária para a penetração da base metálica do penetrômetro, provida de uma extremidade, pela área basal do mesmo que é conhecida e constante (ROSA FILHO *et al.*, 2009).

A resistência mecânica à penetração é um dos atributos físicos mais adotados como indicador da compactação do solo. Apresenta relações diretas com o crescimento das plantas, sendo mais eficiente na identificação da compactação quando acompanhada da umidade e da densidade do solo (MONTANARI, 2009). Fisicamente estabelecida pela pressão, a resistência mecânica à penetração é dada pela razão entre a força necessária para a penetração de uma haste metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Sua avaliação deve ser concomitantemente à da umidade do solo, uma vez que elas variam de forma inversamente proporcional. Contudo, varia positivamente com a densidade do solo (MONTANARI, 2009).

A classificação para os valores de resistência à penetração do solo foi estabelecida por ARSHAD *et al.*, (1996), definindo-as da seguinte forma: extremamente baixa:  $RP < 0,01$  MPa; muito baixa:  $0,01 \leq RP < 0,1$  MPa; baixa:  $0,1 \leq RP < 1,0$  MPa; moderada:  $1,0 \leq RP < 2,0$  MPa; alta:  $2,0 \leq RP < 4,0$  MPa; muito alta:  $4,0 \leq RP < 8,0$  MPa e extremamente alta:  $RP > 8,0$  MPa.

### **2.3. Sistema Plantio Direto (SPD)**

O sistema plantio direto (SPD) é um manejo conservacionista que visa preservar, minimizar e/ou reverter os impactos provocados pelo sistema convencional, estando embasado sobre três pilares, estes são: 1º - não revolvimento do solo entre a colheita da safra anterior e a semeadura da próxima safra, 2º - manutenção dos restos culturais sobre a superfície do solo e 3º - rotação de diferentes culturas nos diferentes anos agrícolas (SALES, 2020).

Segundo SALOMÃO *et al.*, (2020), o SPD, é uma alternativa de manejo conservacionista do solo. Através do não revolvimento do solo, da rotação de culturas e da conservação da palhada, este sistema promove a estabilização de agregados do solo,

devido à ação da matéria orgânica proveniente da palhada da cultura anterior utilizada no sistema. A palhada do SPD protege o solo das gotas de chuva, da radiação solar, e da ação dos ventos, podendo assim reduzir em até cinco vezes mais a perda de sedimentos, quando comparado com sistema de plantio convencional, além de proporcionar nutrientes através da mineralização da matéria orgânica proveniente desta.

O sistema de plantio direto consiste na técnica de cultivo onde a cobertura vegetal presente sobre o solo é preservada e não adoção do revolvimento superficial do solo. Entretanto a camada subsuperficial é revolvida para proporcionar condições de a semente germinar e a planta se desenvolver (BORTOLETI Junior *et al.*, 2015).

A prática de manter os restos culturais no solo sem a incorporação traz grandes benefícios ao sistema produtivo, pois existe a amortização do impacto das gotas com solo, diminuição do corrimento d'água e maior aproveitamento de infiltração da mesma. Junto a isso, a rotação de culturas que o SPD realiza traz benefícios ao sistema produtivo por preservar a cadeia microbológica presente no solo (BERTOLLO; LEVIEN, 2019).

Se acordo com COELHO *et al.*, (2016) devido à presença de cobertura vegetal sobre o solo no SPD, a mineralização e ciclagem de nutrientes é realizada por microrganismos presentes no solo resultando em preservação da fertilidade e aumento da quantidade de matéria orgânica e carbono orgânico no solo. Além dos benefícios nutricionais, as plantas de cobertura no solo realizam de maneira indireta a supressão de plantas indesejadas na lavoura, acarretando uma produção com menor utilização de químicos e de maior rentabilidade.

#### **2.4. Geoestatística agronômica**

A geoestatística é uma ferramenta utilizada na agricultura de precisão, com objetivo de caracterizar e fazer estimativas da variabilidade espacial dos atributos do solo e das plantas, a fim de se identificar inter-relações desses atributos no espaço e no tempo, além de permitir estudar padrões adequados de amostragem (FERRAZ *et al.*, 2012; VIEIRA, 2000). Sua teoria fundamental consiste em que amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as mais distantes (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Para a agricultura de precisão, a geoestatística é de extrema importância, pois os programas computacionais a utilizam a partir dos mapas gerados para monitorar as máquinas agrícolas, via satélite, sendo assim possível uma aplicação de insumos com taxas variáveis (COELHO, 2003).

Na geoestatística, a dependência espacial apresentada pelos dados pode ser estimada pelo semivariograma, pressuposto da estacionaridade inerente à hipótese intrínseca, que é a representação gráfica do ajuste de modelos matemáticos aos dados observados (NEGRO, 2017). A geoestatística é utilizada para o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo e da planta, que auxilia na escolha, locação de experimentos e interpretação dos resultados (MONTANARI, 2009).

#### 2.4.1. Semivariograma

O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (EMBRAPA, 2017). O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre amostras, além de definir parâmetros necessários para estimativa de valores não amostrados no espaço, por meio da técnica de krigagem (SOUZA, 2017).

A escolha do modelo de semivariograma que será utilizado é um dos aspectos mais importantes da geoestatística, se o modelo ajustado não for apropriado, todos os cálculos seguintes conterão erros que poderão afetar as inferências (DALCHIAVON *et al.*, 2011).

Segundo MONTANARI (2009), semivariograma é um gráfico que caracteriza a estrutura de dependência espacial da variável (ou variáveis) sob estudo, ou seja, o semivariograma é uma função que relaciona a semivariância com o vetor distância, podendo ser representada analítica e/ou graficamente, sendo estimado pela seguinte equação:

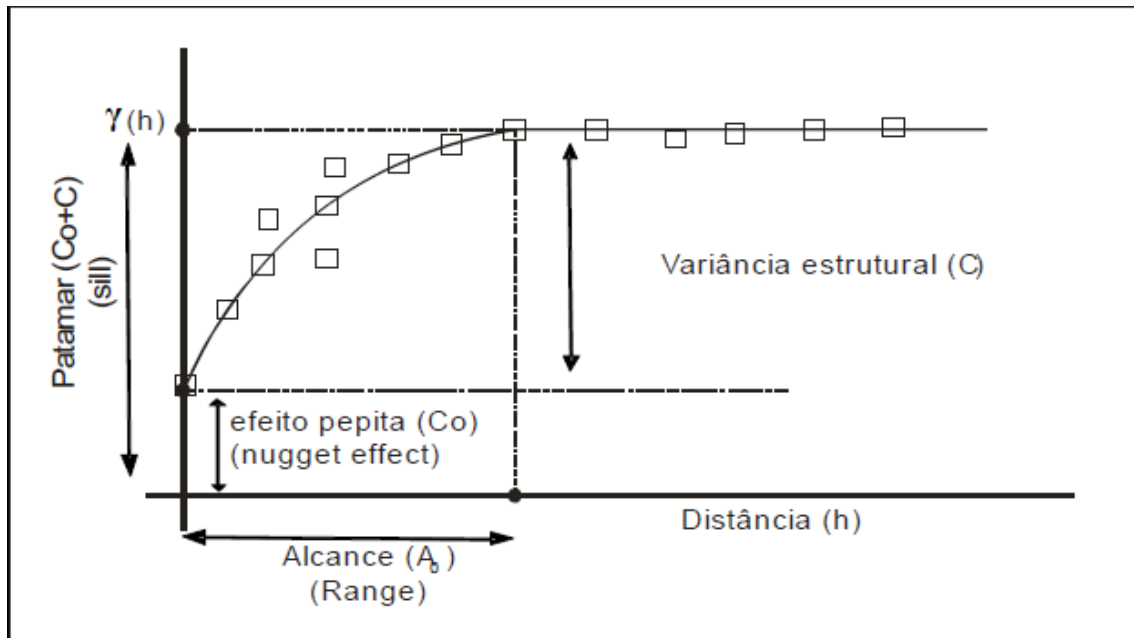
$$\gamma(h) = \frac{1}{2.N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

$N(h)$  é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor  $h$

$h$  e  $Z$  representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura.

Geralmente, o semivariograma é representado pelo gráfico de  $\gamma(h)$  versus  $h$ . No esquema ilustrado na Figura 1, demonstra o estilo típico de um semivariograma experimental de um atributo que apresenta dependência espacial.



**Figura 1:** Exemplo de semivariograma experimental

Fonte: Montanari, (2009)

De acordo com Vieira *et al.*, (1983); Mcbratney; Webster, (1981), semivariograma inicia com um baixo valor, denominado efeito pepita puro ( $C_0$ ) e cresce à medida que  $h$  cresce, até uma distância denominada alcance ( $A_0$ ), que determina a distância até a qual o atributo apresenta-se espacialmente dependente, onde dentro da área cujo raio é igual ao seu valor, possuem entre si extrema semelhança em magnitude. A partir dessa distância passam a assumir valores independentes.

Segundo Kim, (1990), afirmam que quanto menor for o efeito pepita do semivariograma, menor será a variância da estimativa. Mais precisamente, quanto menor for a proporção do efeito pepita para o patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa ou maior a confiança que se pode ter na estimativa. Quando tiver a ausência total de dependência espacial, ou se existir, será manifestada à distância ou tempo menor do que o menor espaçamento entre amostras, o semivariograma será constante e igual ao patamar, tendo assim o efeito pepita puro.

#### 2.4.2. Krigagem

A krigagem é um processo de interpolação que estima valores de atributos em locais não amostrados, sem tendência e com variância mínima, podendo expressar os resultados em forma de mapas de isolinhas ou de superfície tridimensional. O valor da variável espacial, num local não amostrado, é estimado por combinação linear de valores medidos em outros locais vizinhos, levando-se em conta a modelagem da dependência espacial da variável, expressa pelo semivariograma. Pontos próximos dos



locais não amostrados têm maior peso do que os afastados e aqueles agrupados têm maior peso do que os isolados, (VIEIRA *et al.*, 1983; BORGELT *et al.*, 1994 citado por MONTANARI, 2009). Dentre os diversos métodos de interpolação disponíveis, são referidos o do inverso da potência da distância, mínima curvatura, base radial, *shepard*, regressão polinomial, triangulação e krigagem. A krigagem apresenta, entre outras vantagens, maior precisão geral e fidelidade aos dados originais (VIEIRA, 2000).

A estimativa de valores para locais não amostrados, pela técnica de krigagem, possibilita estabelecer um mapa da área de estudo para os atributos do solo, permitindo a definição de linhas de isovalores, que podem ser de grande utilidade no planejamento experimental e na interpretação do comportamento espacial dos dados (BURGESS; WEBSTER, 1980), auxiliando no planejamento das atividades agrícolas e no fornecimento de subsídios para tomadas de decisões.

O termo krigagem é utilizado em homenagem a Daniel G. Krige, que foi o pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas em mineração (DELFINER; DELHOMME, 1975).

A partir do uso dessa técnica é possível criar mapas da área de estudo, definindo linhas de isovalores, tornando possível conhecer o comportamento espacial do atributo analisado, permitindo um melhor planejamento das atividades agrícolas e experimentais e otimizando a tomada de decisão do manejo adequado (BURGESS; WEBSTER, 1980).

Dentre os diversos tipos de métodos de estimação utilizados, a krigagem ordinária é o procedimento mais empregado em dados de ciência do solo. Por ser considerado o melhor estimador linear sem viés, cujo objetivo é a minimização da variância da estimativa, porém a krigagem ordinária representa apenas uma variabilidade média dos atributos da área de estudo modelado pelo semivariograma (MONTANARI, 2009).

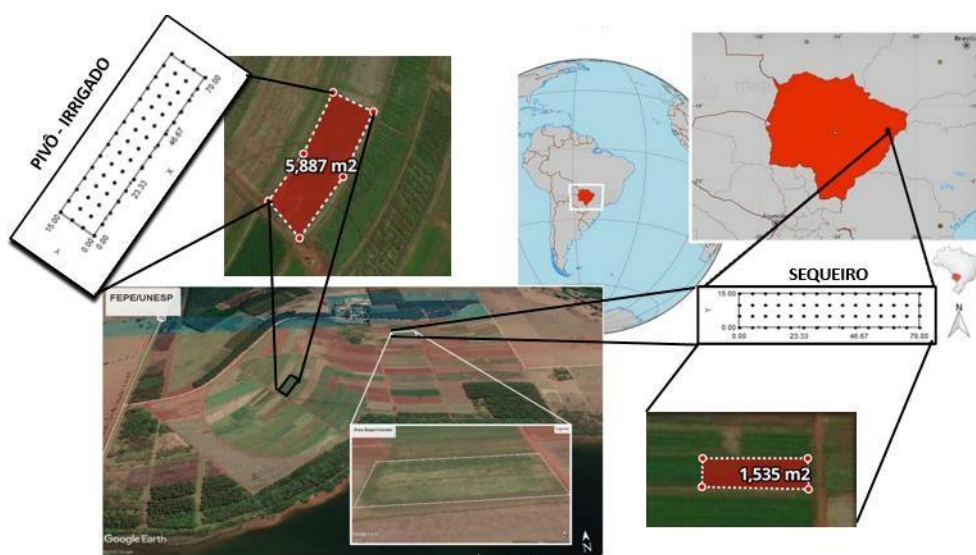
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área experimental

A pesquisa foi desenvolvida na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) situada no município de Selvíria (MS), pertencente à Faculdade de Engenharia – UNESP, Campus de Ilha Solteira, no período da campanha agrícola de 2021/2022. Apresentando coordenadas geográficas de 51° 22' de longitude Oeste de Greenwich e 20° 22' de Latitude Sul, com altitude de 335 m.

#### 3.2. Caracterização edafoclimática da área em estudo

O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO, textura argilosa (DEMATTE, 1980; EMBRAPA, 2018). A classificação climática desta região conforme classificação de Koppen é do tipo Aw, descrita como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno (Alvares *et al.*, 2014). A temperatura média anual é de 23,5° C, a precipitação pluvial média anual é de 1.370mm e a umidade relativa do ar média anual entre 70 e 80 %. Desse modo, pode-se observar na Figura 2, a localização da área de estudo.



**Figura 2:** Localização da implantação da malha de amostragem

#### 3.2. Histórico da área irrigada sob SPD (malha para estudo Geoestatístico)

A área sob sistema de irrigação por pivô central, teve início das pesquisas em 2013, sendo que o solo era cultivado usando-se culturas anuais em SPD há 10 anos, sendo que, a cultura anterior o milho em consórcio com variedade de capim o (Xaraés). Durante a condução dos experimentos houve uma continuação de diversas culturas, às quais seguem: aveia preta (2013) – com semente inoculada e adubação fosfatada; consórcio milho/capim Marandu (2013/14) – com inoculação das sementes de milho + residual de fósforo; feijoeiro de inverno (2014) - residual de adubação fosfatada e de inoculação; cultivo de capim Marandu para produção de palha (2014/15) – intervalo;

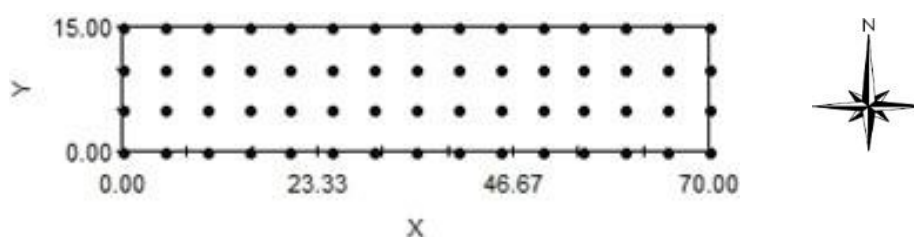
aveia preta (2015) - com semente inoculada e residual de adubação fosfatada; consórcio milho/capim Marandu (2015/16) - com inoculação das sementes de milho + residual de fósforo; feijoeiro de inverno (2016) - residual de adubação fosfatada e de inoculação. Com o intuito de elaborar as caracterizações da fertilidade do solo e após avaliar o efeito da decomposição da palha das culturas antecedentes e do residual da adubação fosfatada sobre a fertilidade, efetuou-se uma verificação da fertilidade do solo segundo metodologia 29 proposta por (RAIJ *et al.*, 2001), na época dos análises experimentais e ao final de cada série de culturas na sucessão (DICKMANN, 2019).

### 3.3. Caracterização inicial do solo em estudo

Esta atividade foi realizada entre os meses do final de outubro e começo de novembro de 2021, visando à caracterização do solo antes da instalação do experimento, que à posterior foram feitas análises físicas em duas profundidades (0,00 – 0,20m e 0,20 – 0,40m). Os locais de coleta das amostras foram determinados de forma aleatória na área onde foi instalada a cultura da soja.

### 3.4. Implantação e caracterização da malha experimental de campo

Para facilitar a pesquisa dos atributos do solo no presente estudo, foi utilizado uma malha para coleta de dados de campo definida nas direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas, num lançante estabelecido da área agrícola. Empregando-se o nível ótico comum, foi feito o estaqueamento global da malha experimental após a semeadura da soja, isto é, no primeiro decêndio de novembro/2020. A malha experimental foi constituída de 15 x 70m, com as transecções (4 X 15), tendo pontos amostrais esquadrejados em 5 x 5 m e contendo 60 pontos amostrais numa área com 1050 m<sup>2</sup> como ilustra a Figura abaixo.



**Figura 3:** Pontos amostrais do esquema da malha experimental de campo

### 3.5. Atributos do solo

Os atributos físicos do solo estudados foram determinados de forma individual, e coletados nas profundidades 0,00 – 0,20m e 0,20 – 0,40m, entorno de cada ponto amostral. A etapa laboratorial que consistiu nas análises físicas do solo foi realizada entre os meses de março e maio de 2022. Os atributos do solo que foram determinados são: a granulometria (Are, Arg e Sil), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), a porosidade total determinada (PTd), densidade do solo (DS), resistência à penetração

com penetrômetro de impacto (RPI), resistência à penetração com o penetrômetro de bancada (RPpb), umidade gravimétrica (UG), a densidade da partícula (DP), porosidade total calculada (PTc). Todos os atributos do solo foram determinados conforme a metodologia descrita pela EMBRAPA (2018).

A microporosidade foi analisada pelo método da mesa de tensão, com coluna de água de 0,60m, a macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, segundo EMBRAPA (2018). Enquanto a porosidade total foi obtida pela saturação do volume da amostra, e a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2018). A análise da densidade de partícula foi realizada pela determinação do volume de álcool necessário para completar a capacidade de um balão volumétrico de 50 ml, contendo 20 g de amostra deformada de solo. A análise textural foi realizada pelo o método da pipeta (EMBRAPA, 2018).

As amostras deformadas do solo para determinação da umidade gravimétrica foram coletadas no mesmo momento que o da resistência do solo a penetração e foi calculada de acordo com a formula abaixo:

$$UG = \frac{(PU-PS)}{PS} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: UG é umidade gravimétrica ( $\text{kg kg}^{-1}$ ); PU é o peso de solo úmido (g); e PS é o peso de solo seco em estufa (g). As análises citadas anteriormente foram feitas de acordo com a metodologia da (EMBRAPA, 2018).

A umidade volumétrica foi determinada pela seguinte fórmula, relacionado em KIEHL (1979):

$$UV = UG * DS \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

UV= umidade volumétrica, UG=umidade gravimétrica e DS= densidade do sol.

Para avaliar a resistência do solo à penetração foi utilizado o penetrômetro de impacto nas camadas citadas anteriormente.

### 3.6. Extração de DNA total do solo

Para a execução dessa atividade, foi utilizado a técnica descrita por Selbach (1998), com modificações na quebra das amostras do solo no aparelho *fast prep* e não por agitação.

Foi colocada uma amostra de solo de 0,25 g em microtubo de 1,5 ml contendo 0,5ml de pérolas de vidro de 0,1 mm de diâmetro e adicionou-se 500 µl de tampão fosfato (120mM, pH 8,0). Em seguida, esse material foi submetido a um ciclo “*bead beater*”, agitando em aparelho *fast-prep* por média de 20 segundos, com velocidade 4,0. Posteriormente, esse material foi centrifugado a 14.000 x rpm por 15 minutos, sendo o

sobrenadante descartado. Em seguida, foram adicionados 500 µl da solução de lise (0,01 M Tris HCl, pH 8,0; lisozima 10 mg/ml) contendo CaCl<sub>2</sub> e incubado por uma hora a 37 °C com agitação a cada 15 minutos. Após etapa, foi adicionada proteinase K, para obter-se uma concentração final igual a 200 µg/ml e foi incubada uma solução sob as mesmas condições anteriores. Logo depois, foram acrescentados 500 µl de solução de SDS (0,1 M NaCl, 0,5 M Tris-HCl pH 8,0, 10% [peso/volume] SDS) e a mistura foi homogeneizada em agitador tipo vórtex durante 5 segundos e então submetida a três ciclos de congelamento (-20 °C em freezer) e descongelamento (a 65 °C em banho maria). A solução foi misturada e centrifugada a 1400 x rpm por 15 minutos, sendo o sobrenadante transferido para um novo tubo. Foi adicionado EDTA ao sobrenadante para se ter uma concentração final igual a 20 mM. Finalmente, o DNA foi precipitado utilizando-se 0,6 volumes de isopropanol e incubado a -20 °C de um dia para o outro (aproximadamente 24 horas). Após esse período, a amostra foi centrifugada a 14000 x rpm por 15 minutos e o precipitado formado foi lavado com etanol 70% e resuspenso com 100 µL de tampão TE, e estocado a -20 °C.

### **3.6.1. Quantificação de DNA usando o Espectrofotômetro NanoDrop 2000c**

A quantificação foi realizada seguindo a metodologia de Desjardins e Conklin, (2010). Para começar a quantificação de cada amostra no Nanodrop, limpa-se as superfícies superior e inferior óptica do sistema de retenção microvolume do espectrofotômetro, pipetando-se 2-3 µL de água deionizada para limpar a superfície inferior óptica. Fecha-se o braço de alavanca, garantindo que o pedestal superior entre em contato com a água deionizada. Levanta-se o braço de alavanca e limpa-se ambas as superfícies ópticas com um pano, sem fiapos, limpo e seco. Após o feito, seguiu-se os seguintes passos:

- ✓ Abrir o software NanoDrop e selecionar o aplicativo de ácido nucléico. Usar um volume pequeno e um pipetador calibrado para realizar uma medição em branco. Dispensar 1 µL de tampão para a superfície inferior óptica. Abaixar o braço da alavanca e selecionar "branco" na aplicação de ácido nucléico;
- ✓ Uma vez que a medição em branco é realizada, limpar novamente ambas as superfícies ópticas com um pano limpo, sem fiapos e seco;
- ✓ Dispensar 1 µL de amostra de ácido nucléico para o pedestal inferior óptico e fechar o braço de alavanca e, selecionar "*Measure*" no software de aplicação. O software irá calcular automaticamente as taxas de concentração de ácido nucléico e pureza.

### 3.7. Análise estatística dos atributos pesquisados

De acordo com atributos do solo estudados, foram efetuadas as análises descritivas para cada um dos atributos de forma individual auxiliada pela estatística clássica. Deste modo, também foi efetuada a análise da distribuição de frequência dos dados. Com recurso ao *software* estatístico SAS (Schlotzhaver e Littel, 1997) foi calculada a média, mediana, moda, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Contudo, foi realizado o teste F para estudar a significância estatística dos atributos do solo utilizando-se o mesmo *software* estatístico SAS e à posterior foi montada a matriz de correlação, visando efetuar as regressões lineares para as combinações, entre todos os atributos do solo estudados na malha experimental do irrigado. Objetivou-se estudar a correlação linear entre os atributos do solo, na expectativa de selecionar aqueles de elevada correlação, e que provavelmente poderiam apresentar semivariograma cruzado e, portanto, co-krigagem. Também, para cada atributo foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, com bases nos pressupostos de estacionariedade da hipótese intrínseca, usando-se o pacote Gama Design Software (GS+, 2004).

Semivariogramas simples foram ajustados a todos os atributos do solo estudados. Seguidamente, foram ajustados semivariogramas cruzados entre as combinações de atributos do solo, pelo uso do GS<sup>+</sup> (2004). Os ajustes dos semivariogramas simples e cruzados, em função de seus modelos, foram efetuados prioritariamente pela seleção inicial de: a) o maior coeficiente de determinação ( $r^2$ ); b) a menor soma dos quadrados dos desvios (SQD), e c) o maior avaliador do grau da dependência espacial (ADE).

A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionará a melhor malha de krigagem e/ou co-krigagem, realizadas por meio da krigagem em blocos. Para cada atributo, foram estimados o efeito pepita ( $C_0$ ), o alcance ( $A_0$ ) e o patamar ( $C_0 + C$ ). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a Equação 04.

$$ADE = \left[ \frac{C}{(C+C_0)} \right] * 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; e  $C + C_0$  é o patamar. A interpretação proposta para o ADE foi conforme estabelecido por Dalchiavon e Carvalho (2012): a)  $ADE < 20\%$  = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b)  $20\% \leq ADE < 40\%$  = baixa dependência (BA); c)  $40\% \leq ADE < 60\%$  = média dependência (ME); d)  $60\% \leq ADE < 80\%$  = alta dependência (AL) e e)  $80\% \leq ADE < 100\%$  = muito alta dependência (MA).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise descritiva dos dados

Os resultados da estatística descritiva para os atributos físicos do solo estudados em área irrigada sob sistema plantio direto, nas duas (1,2) profundidades de amostragem 0,00 – 0,20m (1) e 0,20 – 0,40m (2) estão respectivamente apresentados nas Tabelas 1 e 2. Na comparação dos diversos atributos físicos do solo, o coeficiente de variação participa de forma direta numa maior ou menor variação em termos de porcentagem. Deste modo, quanto maior for a porcentagem, verifica-se uma heterogeneidade nos dados, tendo como coeficiente de variação (CV) uma ferramenta para análise dessa variabilidade. Segundo MONTANARI *et al.*; (2010), foram adotadas as classes e magnitudes que se seguem, para a classificação do coeficiente de variação (CV): baixa ( $CV \leq 10\%$ ), média ( $10\% < CV \leq 20\%$ ), alta ( $20\% < CV \leq 30\%$ ) e muito alta ( $CV > 30\%$ ) variabilidade.

Portanto, observando as Tabelas 1 e 2, pode-se notar que os atributos físicos ocorreram valores de CV's respectivamente (UG<sub>1</sub>, Ma<sub>1</sub>, DNA<sub>t</sub>, UG<sub>2</sub> e Ma<sub>2</sub>) entre 33.017, 36.402, 1378.8, 78.211 e 86.558 % (CV's) com valores de muito alta variabilidade, concordando com os resultados encontrados por COSTA (2022), OLIVEIRA *et al.*; (2013), e PEDROSA, (2021), cujos os mesmos encontraram valores de muito alta variabilidade ( $CV > 30\%$ ) para os atributos de UG e Ma. No entanto, diferem com os dados obtidos por TAVARES, (2012) e MONTANARI, (2009) que encontraram valores com baixa variabilidade ( $CV \leq 10\%$ ) para os mesmos atributos. Porém, a variabilidade do DNA<sub>t</sub> não se assemelha com os dados obtidos por MARTIN (2022) que encontrou valores variando de média à alta variabilidade.

Ainda nas mesmas Tabelas, encontramos para os atributos DP<sub>1</sub>, ARG<sub>1</sub>, ARE<sub>1</sub>, DS<sub>1</sub>, DP<sub>2</sub>, ARG<sub>2</sub>, ARE<sub>2</sub> e DS<sub>2</sub> que obteve-se valores de 1.097, 6.727, 8.481, 8.545, 1.743, 5.979, 8.758, 7.564 % (CV's) com uma baixa variabilidade nas duas camadas. Assim, neste sentido foi igual aos obtidos por CRUZ *et al.*; (2010), COSTA (2022), OLIVEIRA *et al.*; (2013), TAVARES *et al.*; (2012), no entanto, CAMPOS *et al.*; (2007) e SOARES *et al.*; (2015) discordam por terem-se deparado com valores de muito alta variabilidade no atributo ARE ( $CV > 30\%$ ).

Resultados semelhantes para a resistência a penetração, microporosidade, porosidade total determinada, e porosidade total calculada (RP<sub>1,2</sub>, Mi<sub>1</sub>, PTd<sub>1</sub> e PTC<sub>1,2</sub>) podem ser notados nos trabalhos de COSTA (2022), PEDROSA (2021) e MONTANARI *et al.*; (2013), os quais também apresentaram valores com médio coeficiente de variabilidade, ao passo que PELLIN *et al.* (2015) e MONTANARI *et al.*, (2013) mostraram valores de alta e muito alta no coeficiente de variação para a RP<sub>1,2</sub>,

respectivamente, discordando dos dados apresentados no presente trabalho. No entanto, para a fração silte ( $SIL_{1,2}$ ), porosidade total ( $PT_2$ ), microporosidade ( $Mi_2$ ) e resistência a penetração análise de bancada ( $RPb_{1,2}$ ) esses atributos apresentaram valores de coeficiente de variação entre 22.889 e 25.495% para  $SIL_{1,2}$ , 22.876% para  $PT_2$ , 20.451% para  $Mi_2$  e 23.399 e 28.166% para  $RPb_{1,2}$  fazendo com que tenham valores com coeficiente de alta variabilidade. Valores que não se parecem e que discordam com os que foram encontrados por LIMA (2007) e PEDROSA (2021) quando encontraram respectivamente coeficientes de média e muito alta variabilidade entre 17,7 à 18% e 44 à 47% de coeficiente de variação para SIL nas duas camadas estudadas. Por outro lado, discordam também OLIVEIRA *et al.*; (2013) e LIMA (2007) que apresentaram respectivamente dados com valores (6 à 9% e 17%) de baixa e média variabilidade para  $PT_2$ . Os dados apresentados neste trabalho diferiram dos dados de OLIVEIRA *et al.*; (2013) e Lima (2007) para o  $Mi_2$  que apresentaram valores de baixa e média de coeficiente de variação, o mesmo acontece com  $RPb_{1,2}$  quando COSTA (2022) constatou dados diferentes entre 52 à 54% nas duas camadas estudadas atribuindo uma magnitude de muito alta variabilidade.

A distribuição de frequência normal, representante típica dos dados de solo, é a ideal para um estudo estatístico (análise de regressão e/ou geoestatística). Não sendo assim, busca-se a normalidade pela transformação logarítmica (MOLIN *et al.*; 2007). Os atributos físicos do solo que apresentaram coeficientes de assimetria negativa foram  $ARE_1$  -0.790,  $PTd_1$  -0.614,  $ARG_2$  -0.330,  $ARE_2$  -0.118,  $DS_2$  -0.535 e  $Mi_2$  -2.925, com coeficiente negativo para curtose para  $SIL_1$  -0.106,  $RPb_1$  -0.085,  $DNA_t$  -0.203,  $DP_2$  -0.519,  $ARE_2$  -0.102,  $RPb_2$  -0.610 e com coeficiente de curtose positivo para os demais atributo estudados, todos com a distribuição frequência do tipo N (normal) exceto para  $ARE_1$ ,  $PTd_1$  e  $Mi_2$ ,  $DP_2$ , que deram tipo de frequência IN (indeterminado).

Para os atributos  $ARG_{1,2}$ ,  $ARE_2$ ,  $SIL_1$ ,  $DS_{1,2}$ ,  $RPb_{1,2}$ ,  $PTc_{1,2}$ , e  $DNA_t$  a distribuição de frequência foi do tipo N (normal), e quanto aos demais atributos a sua distribuição de frequência foi do tipo IN (indeterminado), onde está anormalidade dos dados pode estar associada a erros amostrais ou até mesmo a heterogeneidade da área devido ao impacto causado pela mecanização nas últimas safras. Contudo, essas distribuições de frequências divergiram com os que foram obtidos por COSTA (2022) para  $RPb_{1,2}$ , onde o autor trabalhou em um Latossolo Vermelho distrófico e encontrou distribuição de frequência do tipo indeterminado para o mesmo atributo nas mesmas profundidades estudadas. Dos atributos físicos estudados, apresentaram distribuição de frequência do tipo N (normal) os seguintes:  $ARG_1$ ,  $SIL_1$ ,  $DS_1$ ,  $RPb_1$ ,  $PTc_1$ ,  $DNA_t$ ,  $ARG_2$ ,  $ARE_2$ ,  $DS_2$ ,  $RPb_2$  e  $PTc_2$ , no entanto, para os demais todos deram tipo de frequência IN



(indeterminado). O coeficiente de assimetria é utilizado para caracterizar como e quanto a distribuição de frequências se afasta da simetria, sendo que: se coeficiente de assimetria maior que zero tem-se que a distribuição é assimétrica à direita (positiva): se coeficiente de assimetria menor que zero distribuição é assimétrica à esquerda (negativa): e se coeficiente de assimetria igual a zero a distribuição é simétrica. Sendo que todas as variáveis apresentaram valores próximos de zero (ZANÃO JÚNIOR *et al.*, 2010).

**Tabela 1:** Análise descritiva dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO na profundidade de 0,00 - 0,20m sob sistema plantio direto no irrigado.

| Atributo <sup>(a)</sup>                | Medidas estatísticas descritivas |         |        |         |               |              |         |            | Probabilidade do teste <sup>(b)</sup> |    |
|----------------------------------------|----------------------------------|---------|--------|---------|---------------|--------------|---------|------------|---------------------------------------|----|
|                                        | Média                            | Mediana | Valor  |         | Desvio Padrão | Coeficiente  |         |            |                                       |    |
|                                        |                                  |         | Mínimo | Máximo  |               | Variação (%) | Curtose | Assimetria |                                       |    |
|                                        |                                  |         |        |         |               |              |         |            | Pr<w                                  | DF |
| Atributos físicos do solo              |                                  |         |        |         |               |              |         |            |                                       |    |
| RP1 (MPa)                              | 1,847                            | 1,846   | 1,122  | 2,914   | 0,340         | 18,413       | 1,903   | 0,908      | 0,0049                                | IN |
| UG1 (kg kg <sup>-1</sup> )             | 0,247                            | 0,231   | 0,050  | 0,671   | 0,081         | 33,017       | 12,715  | 2,486      | 0,0001                                | IN |
| DP1 (kg dm <sup>-3</sup> )             | 2,515                            | 2,501   | 2,440  | 2,597   | 0,028         | 1,097        | 1,897   | 0,769      | 0,0001                                | IN |
| ARG1 (g kg <sup>-1</sup> )             | 491,60                           | 487,50  | 427,0  | 594,000 | 33,072        | 6,727        | 0,560   | 0,592      | 0,1938                                | NO |
| ARE1(g kg <sup>-1</sup> )              | 410,12                           | 412,00  | 297,0  | 473,000 | 34,781        | 8,481        | 1,781   | -0,790     | 0,0168                                | IN |
| SIL1((g kg <sup>-1</sup> )             | 97,383                           | 96,000  | 38,000 | 157,000 | 24,828        | 25,495       | -0,106  | 0,062      | 0,9523                                | NO |
| Ma1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )  | 0,072                            | 0,064   | 0,013  | 0,153   | 0,026         | 36,402       | 1,685   | 1,108      | 0,0003                                | IN |
| Mi1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )  | 0,215                            | 0,215   | 0,096  | 0,378   | 0,040         | 18,713       | 8,175   | 1,460      | 0,0001                                | IN |
| DS1 (kg dm <sup>-3</sup> )             | 1,500                            | 1,522   | 1,129  | 1,763   | 0,128         | 8,545        | 0,251   | -0,614     | 0,0589                                | NO |
| PTd1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | 0,284                            | 0,270   | 0,170  | 0,450   | 0,041         | 14,549       | 4,755   | 1,334      | 0,0001                                | IN |
| RPb1 (MPa)                             | 1,674                            | 1,637   | 0,623  | 2,845   | 0,471         | 28,166       | -0,085  | 0,140      | 0,9923                                | NO |
| PTc1 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | 0,403                            | 0,397   | 0,304  | 0,548   | 0,051         | 12,648       | 0,097   | 0,529      | 0,1870                                | NO |
| DNA1(ng/µl)                            | 243,2                            | 245,5   | 152,0  | 329,0   | 37,1          | 1378,8       | -0,203  | 0,111      | 0,7592                                | NO |

<sup>(a)</sup> RP, UG, DP, ARG, ARE, SIL, Ma, Mi, DS, PTd, RPb, PTc, DNA1 são respectivamente, resistência a penetração, umidade gravimétrica, argila, areia, silte, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, porosidade total determinada, resistência penetração análise de bancada, porosidade total calculada e DNA total; <sup>(b)</sup> DF = distribuição de frequência, sendo NO, TN e IN respectivamente, do tipo normal, tendendo a normal e indeterminada.

**Tabela 2:** Análise descritiva dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO na profundidade de 0,20 - 0,40m sob sistema plantio direto no irrigado.

| Atributo <sup>(a)</sup>                | Medidas estatísticas descritivas |         |         |        |               |              |             |            | Probabilidade do teste <sup>(b)</sup> |    |
|----------------------------------------|----------------------------------|---------|---------|--------|---------------|--------------|-------------|------------|---------------------------------------|----|
|                                        | Média                            | Mediana | Valor   |        | Desvio Padrão | Variação (%) | Coeficiente |            |                                       |    |
|                                        |                                  |         | Mínimo  | Máximo |               |              | Curtose     | Assimetria |                                       |    |
|                                        |                                  |         |         |        |               |              |             |            | Pr<w                                  | DF |
| Atributos físicos do solo              |                                  |         |         |        |               |              |             |            |                                       |    |
| RP2 (MPa)                              | 2,077                            | 2,013   | 1,193   | 3,252  | 0,384         | 18,501       | 1,917       | 0,973      | 0,0025                                | IN |
| UG2 (kg kg <sup>-1</sup> )             | 0,285                            | 0,237   | 0,021   | 1,611  | 0,223         | 78,211       | 25,081      | 4,778      | 0,0001                                | IN |
| DP2 (kg dm <sup>-3</sup> )             | 2,570                            | 2,565   | 2,500   | 2,670  | 0,045         | 1,743        | -0,519      | 0,192      | 0,0011                                | IN |
| ARG2 (g kg <sup>-1</sup> )             | 520,52                           | 520,000 | 428,000 | 591,0  | 31,123        | 5,979        | 0,529       | -0,330     | 0,8534                                | NO |
| ARE2 (g kg <sup>-1</sup> )             | 389,37                           | 392,000 | 299,000 | 468,0  | 34,099        | 8,758        | -0,102      | -0,118     | 0,6787                                | NO |
| SIL2 (g kg <sup>-1</sup> )             | 90,217                           | 88,000  | 62,000  | 164,0  | 20,651        | 22,889       | 1,719       | 1,078      | 0,0015                                | IN |
| Ma2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )  | 0,091                            | 0,073   | 0,036   | 0,506  | 0,079         | 86,558       | 19,296      | 4,275      | 0,0001                                | IN |
| DS2 (kg dm <sup>-3</sup> )             | 1,492                            | 1,494   | 1,188   | 1,760  | 0,113         | 7,564        | 0,715       | -0,535     | 0,1166                                | NO |
| PT2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )  | 0,295                            | 0,290   | 0,170   | 0,710  | 0,067         | 22,876       | 25,139      | 4,267      | 0,0001                                | IN |
| Mi2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )  | 0,204                            | 0,215   | 0,023   | 0,267  | 0,042         | 20,451       | 9,878       | -2,925     | 0,0001                                | IN |
| RPb2 (KPa)                             | 1,588                            | 1,582   | 0,856   | 2,390  | 0,372         | 23,399       | -0,610      | 0,161      | 0,523                                 | NO |
| PTc2 (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | 0,419                            | 0,419   | 0,314   | 0,525  | 0,046         | 10,943       | 0,100       | 0,249      | 0,290                                 | NO |

<sup>(a)</sup> RP, UG, DP, ARG, ARE, SIL, Ma, Mi, DS, PT, RPb, PTc, são respectivamente, resistência a penetração, umidade gravimétrica, argila, areia, silte macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, porosidade total, resistência penetração análise de bancada, porosidade total calculada; <sup>(b)</sup> DF = distribuição de frequência, sendo NO, TN e IN respectivamente, normal, tendendo a normal e indeterminada.

## 4.2. Análise de regressão entre os atributos físicos do solo

### 4.2.1. Matriz de correlação linear simples entre os atributos

De acordo com as Tabelas 3 e 4, estão apresentadas as matrizes de correlação linear simples entre os atributos físicos do solo versus atributos físicos do solo na profundidade de 0,00 - 0,20m (RPi<sub>1</sub>, UG<sub>1</sub>, DP<sub>1</sub>, ARG<sub>1</sub>, ARE<sub>1</sub>, SIL<sub>1</sub>, Ma<sub>1</sub>, Mi<sub>1</sub>, DS<sub>1</sub>, PT<sub>1</sub>, RPb<sub>1</sub>, PTc<sub>1</sub> e DNA<sub>1</sub>) e na camada de 0,20 - 0,40m (RPi<sub>2</sub>, UG<sub>2</sub>, DP<sub>2</sub>, ARG<sub>2</sub>, ARE<sub>2</sub>, SIL<sub>2</sub>, Ma<sub>2</sub>, Mi<sub>2</sub>, DS<sub>2</sub>, PT<sub>2</sub>, RPb<sub>2</sub> e PTc<sub>2</sub>) sob plantio direto irrigado. Podem-se observar correlações significativas na primeira camada (0,00-0,20m) para os pares: SIL<sub>1</sub> x RPi<sub>1</sub> (r = 0,284\*), ARG<sub>1</sub> x UG<sub>1</sub> (r = 0,337\*\*), ARE<sub>1</sub> x UG<sub>1</sub> (r = -0,289\*), SIL<sub>1</sub> x DP<sub>1</sub> (r = 0,287\*), ARE<sub>1</sub> x ARG<sub>1</sub> (r = -0,718\*\*), SIL<sub>1</sub> x ARG<sub>1</sub> (r = -0,283\*), SIL<sub>1</sub> x ARE<sub>1</sub> (r = -0,443\*\*), Mi<sub>1</sub> x ARE<sub>1</sub> (r = -0,249\*), DS<sub>1</sub> x Mi<sub>1</sub> (r = -0,347\*\*), PT<sub>1</sub> x Ma<sub>1</sub> (r = 0,561\*\*), PT<sub>1</sub> x Mi<sub>1</sub> (r = 0,646\*\*), PT<sub>1</sub> x DS<sub>1</sub> (r = -0,518\*\*), RPb<sub>1</sub> x Ma<sub>1</sub> (r = -0,520\*\*), RPb<sub>1</sub> x DS<sub>1</sub> (r = 0,333\*\*), RPb<sub>1</sub> x PT<sub>1</sub> (r = -0,527\*\*), PTc<sub>1</sub> x Ma<sub>1</sub> (r = 0,278\*), PTc<sub>1</sub> x Mi<sub>1</sub> (r = 0,345\*\*), PTc<sub>1</sub> x DS<sub>1</sub> (r = -0,992\*\*), PTc<sub>1</sub> x PT<sub>1</sub> (r = 0,519\*\*), PTc<sub>1</sub> x RPb<sub>1</sub> (r = -0,321\*), DNA x ARG<sub>1</sub> (r = -0,269\*), DNA x SIL<sub>1</sub> (r = 0,299\*) e DNA x RPb<sub>1</sub> (r = 0,313\*), e na segunda camada (0,20-0,40m) para os pares: ARG<sub>2</sub> x RPi<sub>2</sub> (r = 0,329\*), ARE<sub>2</sub> x RPi<sub>2</sub> (r = -0,286\*), Mi<sub>2</sub> x RPi<sub>2</sub> (r = 0,408\*\*), ARE<sub>2</sub> x DP<sub>2</sub> (r = -0,265\*), ARE<sub>2</sub> x ARG<sub>2</sub> (r = -0,804\*\*), Mi<sub>2</sub> x ARG<sub>2</sub> (r = 0,262\*), PT<sub>2</sub> x ARG<sub>2</sub> (r = 0,291\*), SIL<sub>2</sub> x ARE<sub>2</sub> (r = -0,538\*\*), Mi<sub>2</sub> x ARE<sub>2</sub> (r = -0,271\*), Mi<sub>2</sub> x Ma<sub>2</sub> (r = -0,504\*\*), PT<sub>2</sub> x Ma<sub>2</sub> (r

= 0,849\*\*),  $DS_2 \times Mi_2$  ( $r = -0,256^*$ ),  $PT_{C2} \times Mi_2$  ( $r = 0,317^*$ ),  $RPb_2 \times DS_2$  ( $r = 0,533^{**}$ ),  $PT_{C2} \times DS_2$  ( $r = -0,951^{**}$ ) e  $PT_{C2} \times RPb_2$  ( $r = -0,511^{**}$ ).

Todos os pares acima apresentados, os que obtiveram correlação positiva para as camadas 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, são diretamente proporcionais, indicando que quanto maior for o aumento de um dos atributos ocorrerá o mesmo com outro atributo pelo qual forma o par, enquanto que, os pares que apresentaram correlação negativa para as mesmas camadas estudadas são inversamente proporcionais, indicando que quanto maior for o aumento de um dos atributos menor será o outro atributo pelo qual forma o par, isto aplica-se tanto nas correlações significativas a 1% (\*\*) assim como nas correlações significativas a 5 % (\*).

A correlação negativa do par  $PT_c \times RPb$  nas duas camadas estudadas indica que quanto maior for a  $PT_c$  menor será a  $RPb$ , concordando com os dados obtidos por COSTA (2022) ao estudar variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo sob a cultura da soja no cerrado em sistema plantio direto, tendo obtido ( $r = -0,784^{**}$ ) e ( $r = -0,784^{**}$ ) nas mesmas camadas estudadas neste trabalho. Resultados semelhantes foram apresentados por MONTANARI *et al.*; (2013) quando estudaram a correlação entre a produção de feijão sob cultivo mínimo irrigado e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico típico que observaram correlação negativa entre a  $PT$  e  $RP$  na camada de 0,00-0,10m porém, não foi significativa ( $r = -0,116$ ).

Para os pares  $PT_1 \times Mi_1$  ( $r = 0,646^{**}$ ),  $Mi_2 \times Ma_2$  ( $r = -0,504^{**}$ ) e  $PT_2 \times Ma_2$  ( $r = 0,849^{**}$ ) apresentados neste trabalho convergem com os dados encontrados por MEGDA *et al.*, (2008) que ao estudarem correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho, obtiveram correlação positiva para os pares  $PT \times Mi$  ( $r = 0,306^{**}$ ),  $PT \times Ma$  ( $r = 0,608^{**}$ ) e correlação negativa para  $Mi \times Ma$  ( $r = -0,475^{**}$ ) na camada de 0,20-0,30m sendo significativas a 1% (\*\*).

A correlação entre a  $PT_1 \times DS_1$  ( $r = -0,518^{**}$ ) é inversamente proporcional, indicando que quanto maior for a  $PT$  menor será a  $DS$ , resultados similares foram obtidos por PELLIN *et al.*, (2015), que estudando a variabilidade de atributos físicos de um Latossolo vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar, observaram correlação significativa e negativa entre a  $PT$  e  $RP$  ( $r = -0,942^{**}$ ) na camada de 0,00-0,20 m.

MONTANARI *et al.*, (2015) ao estudarem variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono cerrado-pantanal, encontraram correlação significativa porém inversa para os pares  $SIL \times ARE$  ( $r = -0,378^{**}$ ),  $ARG \times ARE$  ( $r = -0,456^{**}$ ) e  $Mi \times ARE$  ( $r = -0,512^{**}$ ) na camada de 0,10-0,20m, assemelhando-se com os resultados obtidos neste presente trabalho para os mesmos pares nas duas camadas estudadas.

O par RP x DS ( $r = 0,533^{**}$  e  $r = 0,333^{**}$ ) apresentou correlação positiva e significativa entre seus atributos nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m consecutivamente, deste modo, com o aumento da RP ocorrerá um aumento da DS e vice-versa, concordando assim com (MONTANARI *et al.*, 2012), os quais, trabalhando com atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milho, sob plantio convencional, também obtiveram correlação direta, com coeficiente de correlação de ( $r = 0,195^{*}$ ).

De acordo com RAMOS *et al.*, (2020) após terem estudado os atributos físico-hídricos de um Neossolo quartzarênico sob diferentes usos, e MARCATTO e SILVEIRA (2017) que ao fazerem o estudo da relação entre as propriedades físicas e hídricas e os tipos de uso da terra em Neossolos Regolíticos da bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR, constataram respectivamente para o par DS x Mi que não teve correlação significativa ( $r = 0,38$ ) e ( $r = 0,982$ ) respectivamente, nas camadas de 0 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m, discordando totalmente com os resultados obtidos neste presente estudo sob as mesmas camadas, visto que, o par em causa teve correlação significativa com 1% de probabilidade ( $r = -0,347^{**}$ ) na primeira camada e correlação significativa com 5% de probabilidade ( $r = -0,256^{*}$ ) na segunda camada.

Os resultados obtidos por RAMOS *et al.*, (2022) ao fazerem a determinação da análise de regressão linear simples para explicar a influência dos atributos físicos do solo na produção do algodão, mostraram correlação significativa positiva com 1% de probabilidade para os pares de PT x ARG ( $r = 0,909^{**}$ ) e Mi x ARG ( $r = 0,890^{**}$ ) na camada de 0,00-0,20 m, desta forma, corroborando com os dados obtidos neste presente trabalho onde para os mesmos pares apresentaram correlação significativa positiva porém com 5% de probabilidade ( $r = 0,291^{*}$ ) e ( $r = 0,262^{*}$ ) para as duas camadas em causa, respectivamente.

Para os pares  $SIL_1$  x  $DP_1$  ( $r = 0,287^{*}$ ),  $SIL_1$  x  $ARG_1$  ( $r = -0,283^{*}$ ) e  $ARE_2$  x  $DP_2$  ( $r = -0,265^{*}$ ) que apresentam correlação significativa positiva exceto os últimos dois pares que apesar de serem significativos mostraram-se ser negativo, este dados divergem-se com aqueles obtidos por ANDRADE *et al.*; (2020) que ao abordarem sobre os atributos físico-hídricos do solo via funções de pedotransferência em solos dos tabuleiros costeiros de Pernambuco, não constataram correlação significativas para estes pares  $SIL$  x  $DP$  ( $r = -0,33$ ),  $SIL$  x  $ARG$  ( $r = 0,38$ ) e  $ARE$  x  $DP$  ( $r = 0,39$ ) na profundidade de 0,00-0,20 m.

Portanto, esta análise de correlação linear de certo modo ilustra até que ponto os atributos estudados podem estar associados entre si e como estes podem contribuir no aumento do desempenho do manejo e conservação do solo.

Para o pare  $DNA_t \times ARG_1$  ( $r = -0,269^*$ ), apesar de apresentar correlação significativa, mostrou-se ser negativo, o que significa que os microrganismos (fungos, bactérias, vírus, protozoários e microalgas) provavelmente não estejam se desenvolvendo de forma ideal ou como era esperado tratando-se deste tipo de solo, visto que, em solos de textura argilosa, geralmente, tem a tendência de apresentar mais organismos do que em solo arenoso, no entanto, depende da temperatura e umidade ideal, ou seja, para o bom desenvolvimentos dos microrganismos é necessário que o solo apresente umidade intermedia.

Entretanto, o pare  $DNA_t \times SIL_1$  ( $r = 0,299^*$ ) apresenta uma correlação significativa e positiva, o que era esperado pois os microrganismos desenvolvem-se melhor nesse tipo de solo pelo facto dessa textura do solo apresentar tamanho de partículas intermédias em ralação ao solo de textura argilosa que possui menores partículas enquanto a textura arenosa apresenta maior tamanho de partículas.

Para o pare  $DNA_t \times RPB_2$  ( $r = 0,313^*$ ), apresenta uma correlação significativa e positiva, no entanto, para melhor desenvolvimento dos microrganismos neste atributo físico do solo vai depender, ou seja, é diretamente influenciada pela umidade do solo, devendo apresentar umidade ideal.

**Tabela 3:** Matriz de correlação dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico na profundidade de 0,00 - 0,20m sob plantio direto irrigado.

| ATRIBUTOS <sup>(a)</sup> | COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO <sup>(b)</sup> |                |               |                 |                 |               |                 |                 |                 |                 |                |        |     |
|--------------------------|------------------------------------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|--------|-----|
|                          | RP1                                      | UG1            | DP1           | ARG1            | ARE1            | SIL1          | Ma1             | Mi1             | DS1             | PT1             | RPb1           | PTc1   | DNA |
| UG1                      | 0,156                                    | -              | -             | -               | -               | -             | -               | -               | -               | -               | -              | -      | -   |
| DP1                      | -0,091                                   | -0,058         | -             | -               | -               | -             | -               | -               | -               | -               | -              | -      | -   |
| ARG1                     | -0,127                                   | <b>0,337**</b> | -0,014        | -               | -               | -             | -               | -               | -               | -               | -              | -      | -   |
| ARE1                     | -0,059                                   | <b>-0,289*</b> | -0,178        | <b>-0,718**</b> | -               | -             | -               | -               | -               | -               | -              | -      | -   |
| SIL1                     | <b>0,284*</b>                            | -0,038         | <b>0,287*</b> | <b>-0,283*</b>  | <b>-0,443**</b> | -             | -               | -               | -               | -               | -              | -      | -   |
| Ma1                      | -0,168                                   | -0,017         | -0,031        | 0,013           | 0,071           | -0,148        | -               | -               | -               | -               | -              | -      | -   |
| Mi1                      | 0,016                                    | 0,090          | -0,015        | 0,027           | <b>-0,249*</b>  | 0,178         | 0,001           | -               | -               | -               | -              | -      | -   |
| DS1                      | 0,124                                    | -0,088         | 0,082         | 0,024           | 0,080           | -0,137        | -0,280          | <b>-0,347**</b> | -               | -               | -              | -      | -   |
| PT1                      | 0,001                                    | 0,106          | -0,007        | 0,139           | -0,193          | 0,087         | <b>0,561**</b>  | <b>0,646**</b>  | <b>-0,518**</b> | -               | -              | -      | -   |
| RPb1                     | -0,043                                   | -0,018         | 0,099         | -0,040          | -0,041          | 0,086         | <b>-0,520**</b> | -0,155          | <b>0,333**</b>  | <b>-0,527**</b> | -              | -      | -   |
| PTc1                     | -0,139                                   | 0,079          | 0,048         | -0,028          | -0,105          | 0,172         | <b>0,278*</b>   | <b>0,345**</b>  | <b>-0,992**</b> | <b>0,519**</b>  | <b>-0,321*</b> | -      | -   |
| DNA <sub>t</sub>         | 0,125                                    | -0,138         | 0,058         | <b>-0,269*</b>  | 0,015           | <b>0,299*</b> | -0,187          | 0,017           | 0,136           | -0,180          | <b>0,313*</b>  | -0,129 | -   |

<sup>(a)</sup> RP, UG, DP, ARG, ARE, SIL, Ma, Mi, DS, PTd, RPb, PTc, DNA são respectivamente, resistência a penetração, umidade gravimétrica, argila, areia, silte, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, porosidade total determinada, resistência penetração análise de bancada, porosidade total calculada: <sup>(b)</sup> \* Significativo a 5%, \*\* Significativo a 1%.

**Tabela 4:** Matriz de correlação dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico na profundidade de 0,20 - 0,40m sob sistema plantio direto irrigado.

| ATRIBUTOS <sup>(a)</sup> | COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO <sup>(b)</sup> |        |                |                 |                 |        |                 |                |                 |        |                 |      |
|--------------------------|------------------------------------------|--------|----------------|-----------------|-----------------|--------|-----------------|----------------|-----------------|--------|-----------------|------|
|                          | RP2                                      | UG2    | DP2            | ARG2            | ARE2            | SIL2   | Ma2             | Mi2            | DS2             | PT2    | RPb2            | PTc2 |
| UG2                      | -0,016                                   | -      | -              | -               | -               | -      | -               | -              | -               | -      | -               | -    |
| DP2                      | 0,147                                    | -0,041 | -              | -               | -               | -      | -               | -              | -               | -      | -               | -    |
| ARG2                     | <b>0,329*</b>                            | 0,112  | 0,226          | -               | -               | -      | -               | -              | -               | -      | -               | -    |
| ARE2                     | <b>-0,286*</b>                           | -0,044 | <b>-0,265*</b> | <b>-0,804**</b> | -               | -      | -               | -              | -               | -      | -               | -    |
| SIL2                     | 0,056                                    | -0,093 | 0,070          | 0,003           | <b>-0,538**</b> | -      | -               | -              | -               | -      | -               | -    |
| Ma2                      | -0,093                                   | -0,001 | 0,102          | 0,113           | -0,054          | -0,073 | -               | -              | -               | -      | -               | -    |
| Mi2                      | <b>0,408**</b>                           | -0,063 | 0,034          | <b>0,262*</b>   | <b>-0,271*</b>  | 0,029  | <b>-0,504**</b> | -              | -               | -      | -               | -    |
| DS2                      | -0,201                                   | 0,115  | -0,068         | -0,810          | 0,022           | 0,062  | -0,003          | <b>-0,256*</b> | -               | -      | -               | -    |
| PT2                      | 0,136                                    | -0,042 | 0,196          | <b>0,291*</b>   | -0,224          | -0,075 | <b>0,849**</b>  | 0,008          | -0,167          | -      | -               | -    |
| RPb2                     | -0,014                                   | 0,008  | 0,055          | -0,036          | 0,036           | -0,069 | 0,009           | -0,153         | <b>0,533**</b>  | -0,067 | -               | -    |
| PTc2                     | 0,229                                    | -0,105 | 0,167          | 0,135           | -0,109          | -0,006 | 0,025           | <b>0,317*</b>  | <b>-0,951**</b> | 0,202  | <b>-0,511**</b> | -    |

<sup>(a)</sup> RP, UG, DP, ARG, ARE, SIL, Ma, Mi, DS, PTd, RPb, PTc, são respectivamente, resistência a penetração, umidade gravimétrica, argila, areia, silte, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, porosidade total determinada, resistência penetração análise de bancada, porosidade total calculada: <sup>(b)</sup> \* Significativo a 5%, \*\* Significativo a 1%.

### 4.3. Análise geoestatística dos atributos físicos do solo

#### 4.3.1 Análise semivariográfica simples

Na Tabela 5, estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob plantio direto do irrigado na profundidade 0,00 – 0,20m e 0,20 – 0,40m sob cultivo se soja. Deste modo, ficou apurado que, com exceção da  $RPi_2$ ,  $ARG_1$ ,  $SIL_1$ ,  $Ma_1$ ,  $RPb_2$  e  $DNA_t$  que apresentaram dependência espacial, todos os demais atributos apresentaram efeito pepita puro. A ocorrência do efeito pepita puro é um indicativo de que esses atributos são espacialmente independentes, apresentam distribuição aleatória ou de que o espaçamento da malha amostral é maior que o necessário para revelar a dependência espacial (COSTA *et al.*, 2022).

No que tange ao desempenho dos semivariogramas, foi feita a relação decrescente deles, obedecendo a análise da grandeza do coeficiente de determinação espacial ( $r^2$ ), que foi a seguinte: 1)  $SIL_1$  (0,968), 2)  $ARG_1$  (0,940), 3)  $RPb_2$  (0,890), 4)  $DNA_t$  (0,826), 5)  $RPi_2$  (0,805) e 6)  $Ma_1$  (0,721). Contudo, em relação aos três primeiros atributos ( $SIL_1$ ,  $ARG_1$  e  $RPb_2$ ), que tiveram elevados coeficientes de determinação espacial, observou-se o seguinte, conforme relatado abaixo:

Para o primeiro atributo ( $SIL_1$ ), seu valor do  $r^2$  (0,968) indicou ser tal atributo o de melhor ajuste semivariográfico, concordando com aqueles verificados por MONTANARI *et al.*, (2015), que trabalhando com a variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do Ecótono Cerrado-Pantanal, obteve o valor de  $r^2$  (0,921). Também concordou com SOUZA (2022), o qual, trabalhando com a variabilidade espacial de atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo e componentes de produção da cultura do milho em áreas com e sem aplicação de microgeo no Cerrado, obteve o valor de  $r^2$  (0,931). Contudo, discordou com os resultados encontrados por SOUZA (2017), que trabalhando variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade da cana-de-açúcar, detectou efeito pepita puro para fósforo. Em relação ao ADE, apresentou-se como sendo uma variável espacial de muito alta dependência (88,0%), concordando apenas com MONTANARI (2015), no qual obteve o ADE de 99,9%, discordou com JÚNIOR *et al.*, (2017), no qual obteve 29,0% e também discordou com AQUINO *et al.*, (2014), que obteve o ADE de 71,0%. Quanto ao alcance do  $SIL_1$  do presente (53,4 m), foi maior do que dos dois últimos autores citado e menor para o primeiro autor citado, que foi de 23,4 m, 27,6 m e 138,5 m, respectivamente. Contudo, o modelo exponencial ajustado para o  $SIL_1$  ficou de acordo com dos dois últimos autores citados e em total desacordo com o primeiro autor referido.

Para o segundo atributo ( $ARG_1$ ), seu valor do  $r^2$  (0,940), indicou ser tal atributo o segundo de melhor ajuste semivariográfico, concordando com aqueles verificados por LOVERA (2015), qual pesquisou atributos do solo e componentes produtivos da soja numa abordagem linear, multivariada e geoestatística, obteve o valor de  $r^2$  (0,977) e OLIVEIRA *et al.*, (2018) ao estudar a correlação espacial de atributos físicos do solo e produtividade de tomate industrial, obteve o valor de  $r^2$  (0,884). No entanto, discordou com os resultados encontrados por JÚNIOR *et al.*; (2017), que trabalhando tributos físico-hídricos em área de Terra Preta de Índio sob cultivo de café em Apuí, detectou efeito pepita puro para argila. Em relação ao ADE, o valor muito alto observado (95,0%) discordou com LOVERA (2015), OLIVEIRA *et al.*, (2018) e JÚNIOR *et al.*, (2017), os quais obtiverem 70,5 (alta dependência espacial), 13,49% (dependência espacial muito baixa) e e.p.p, respectivamente, tendo concordado do SOUZA (2022) com valor de alta dependência, no qual obteve o ADE de 0,943%. Quanto ao modelo exponencial ajustado para o  $ARG_1$ , ficou em total desacordo com os referidos autores. Contudo, o alcance do  $ARG_1$  do presente (39,90 m), foi menor do que aquele dos autores citados, que foi de 70,5; 96 e 158 m, respectivamente.

No terceiro atributo ( $RPb_2$ ), seu valor do  $r^2$  (0,890), indicou ser tal atributo o terceiro de melhor ajuste semivariográfico, discordando dos resultados encontrados por COSTA (2022) que ao trabalhar com a variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo sob a cultura da soja no cerrado em sistema plantio direto, detectou efeito pepita puro para as duas resistências de penetração (por impacto e análise de bancada).

Na Tabela 5, a relação decrescente dos alcances foi a seguinte: 1)  $SIL_1$  (53,40 m), 2)  $ARG_1$  (39,90 m), 3)  $DNA_t$  (30,0 m), 4)  $Ma_1$  (28,40 m), 5)  $RPi_2$  (27,60 m), e 6)  $RPb_2$  (15,76 m). Portanto, nas condições da presente pesquisa, assim como, visando auxiliar futuras pesquisas, na qual os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não deverão ser menores do que 15,76 m.

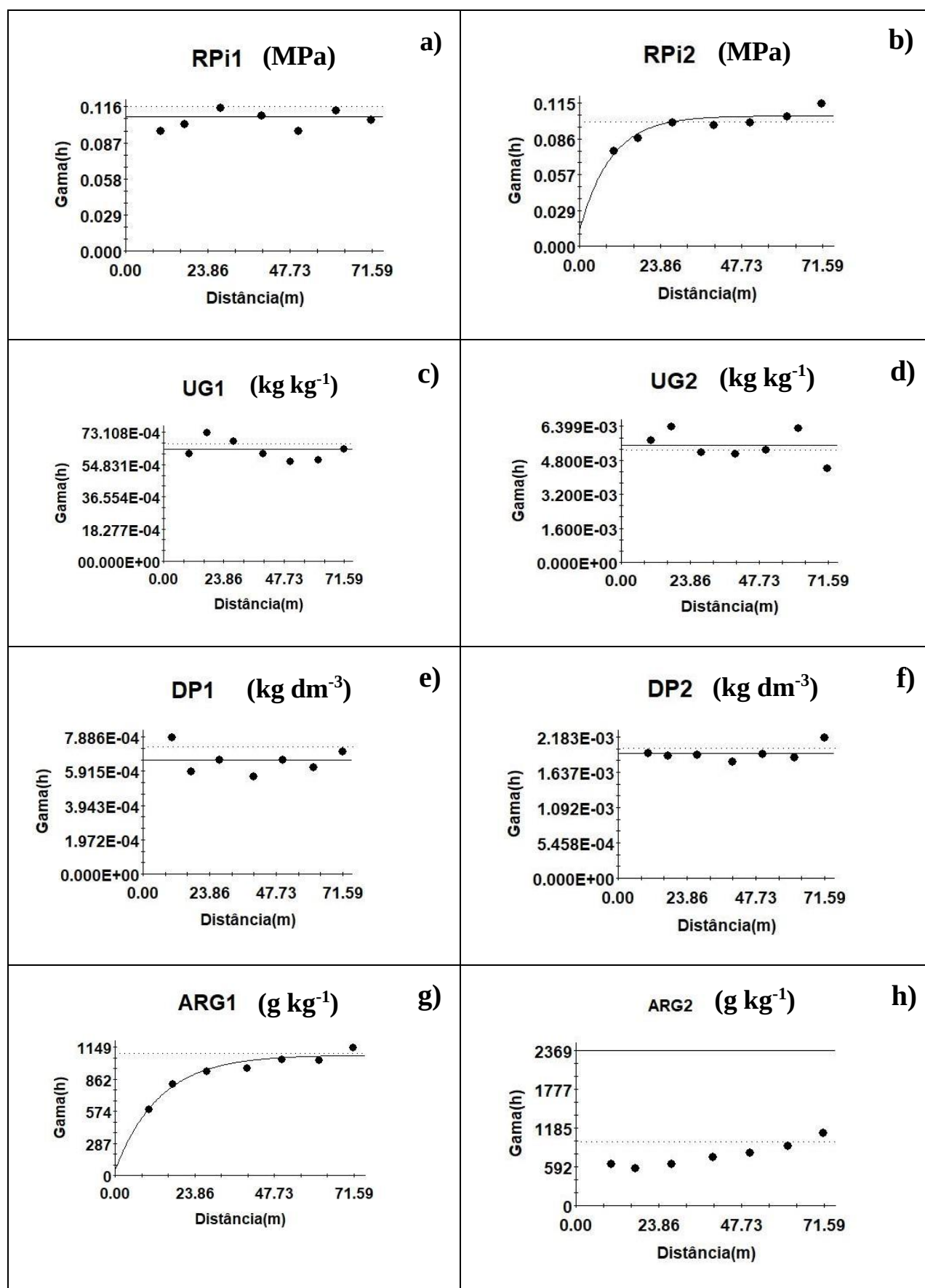


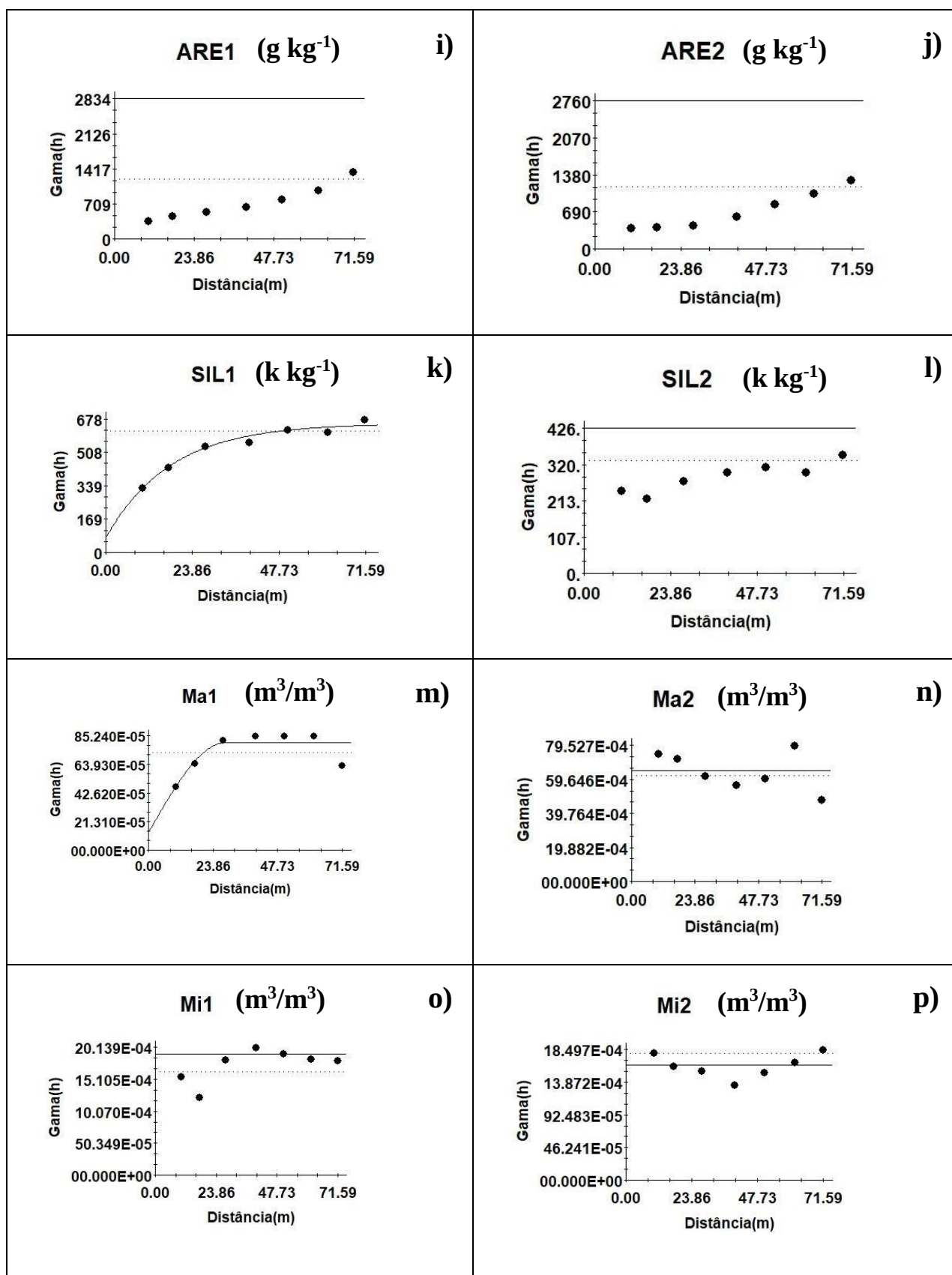
**Tabela 5:** Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob sistema plantio direto do irrigado na profundidade 0,00-0,20m e 0,20 – 0,40m.

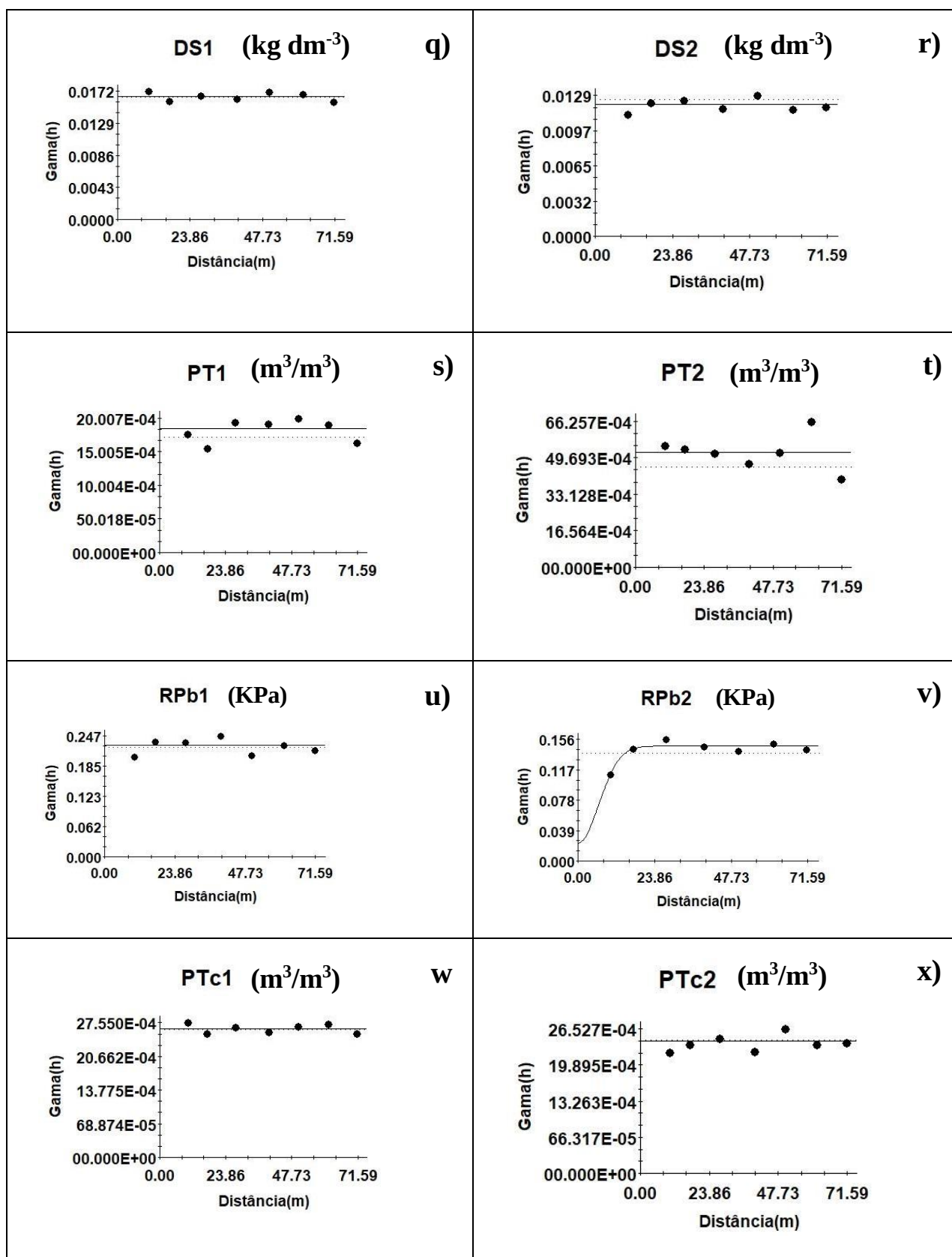
| Atributos <sup>(a)</sup> | Parâmetros            |                                 |                              |                               |                |                        |                                   |        |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|------------------------|-----------------------------------|--------|
|                          | Modelo <sup>(b)</sup> | Efeito pepita (C <sub>0</sub> ) | Patamar (C <sub>0</sub> + C) | Alcance (A <sub>0</sub> ) (m) | r <sup>2</sup> | SQR <sup>(c)</sup>     | Avaliador da dependência espacial |        |
|                          |                       |                                 |                              |                               |                |                        | ADE <sup>(d)</sup>                | Classe |
| <b>RPi<sub>1</sub></b>   | epp                   | -                               | 0,107                        | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>RPi<sub>2</sub></b>   | exp                   | 0,012                           | 0,105                        | 27,60                         | 0,805          | 1,759.10 <sup>-4</sup> | 88%                               | Forte  |
| <b>UG<sub>1</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,0064                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>UG<sub>2</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,0055                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>DP<sub>1</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,00066                      | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>DP<sub>2</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,00193                      | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>ARG<sub>1</sub></b>   | exp                   | 47,00                           | 1078,0                       | 39,90                         | 0,94           | 11493                  | 95%                               | Forte  |
| <b>ARG<sub>2</sub></b>   | epp                   | -                               | 2369,0                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>ARE<sub>1</sub></b>   | epp                   | -                               | 2834,0                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>ARE<sub>2</sub></b>   | epp                   | -                               | 2760,0                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>SIL<sub>1</sub></b>   | exp                   | 75,0                            | 654,80                       | 53,40                         | 0,968          | 2790                   | 88%                               | Forte  |
| <b>SIL<sub>2</sub></b>   | epp                   | -                               | 426,30                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>Ma<sub>1</sub></b>    | esf                   | 0,00013                         | 0,0008                       | 28,40                         | 0,721          | 3,71.10 <sup>-8</sup>  | 83%                               | Forte  |
| <b>Ma<sub>2</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,0065                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>Mi<sub>1</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,0019                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>Mi<sub>2</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,0016                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>DS<sub>1</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,0165                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>DS<sub>2</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,012                        | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>PT<sub>1</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,0018                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>PT<sub>2</sub></b>    | epp                   | -                               | 0,0052                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>RPb<sub>1</sub></b>   | epp                   | -                               | 0,228                        | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>RPb<sub>2</sub></b>   | gau                   | 0,0229                          | 0,1478                       | 15,76                         | 0,890          | 1,41.10 <sup>-4</sup>  | 84%                               | Forte  |
| <b>PTc<sub>1</sub></b>   | epp                   | -                               | 0,0026                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>PTc<sub>2</sub></b>   | epp                   | -                               | 0,0024                       | -                             | -              | -                      | -                                 | -      |
| <b>DNA<sub>1</sub></b>   | esf                   | 593,0                           | 1372,0                       | 30,0                          | 0,826          | 29260                  | 56%                               | Médio  |

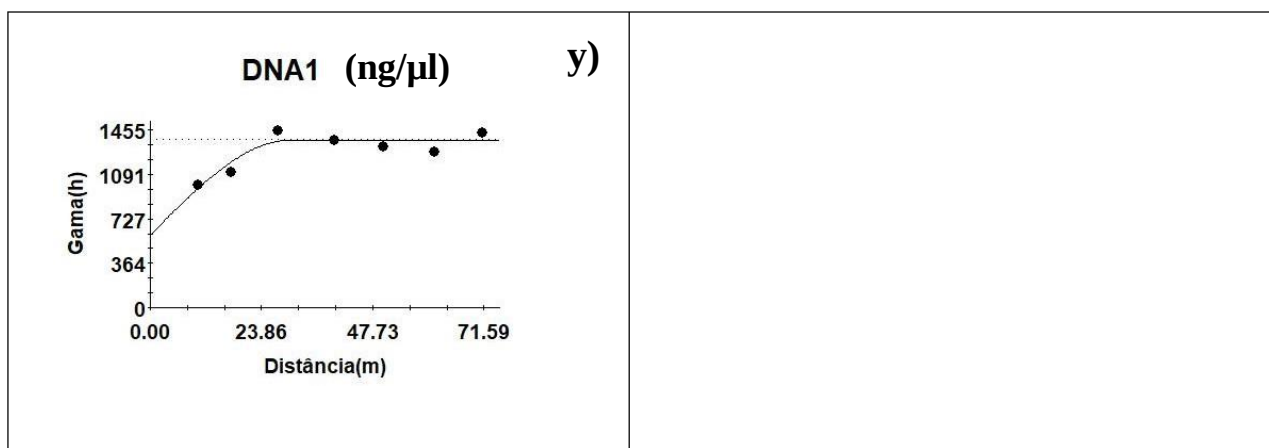
<sup>(a)</sup> RPi, UG, DP, ARG, ARE, SIL, Ma, Mi, DS, PT, RPb, PTc, DNA são respectivamente, resistência a penetração, umidade gravimétrica, argila, areia, silte, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, porosidade total determinada, resistência penetração análise de bancada, porosidade total calculada; <sup>(b)</sup> gau= gaussiano, exp = exponencial, esf = esférico e epp = efeito pepita puro; modelo sucedido por número entre parêntesis, significando o número de pares no primeiro lag; <sup>(c)</sup> SQR = soma dos quadrados dos resíduos; <sup>(d)</sup> ADE = avaliador da dependência espacial.

Na Figura abaixo, estão apresentados os semivariogramas cruzados entre os atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob sistema de plantio direto.









**Figura 4:** Semivariogramas simples dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob Sistema Plantio Direto.

#### 4.4. Mapas de krigagem dos atributos físicos estudados

Na Figura 4, estão apresentados os mapas de krigagem dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico no município de Selvíria - MS para o cultivo de soja sob sistema plantio direto. Em relação aos mapas apresentados abaixo, serão comentados aqueles que mostraram ser de elevada semelhança espacial para efeito prático de manejo do solo. Dessa forma, foi observada a referida semelhança entre os mapas dos seguintes atributos físicos:  $RPi_2$ ,  $ARG_1$ ,  $SIL_1$ ,  $Ma_1$ ,  $RPb_2$  e  $DNA_t$ . Assim, na Figura 4 podem ser observados os mapas de krigagem.

Na Figura 4<sup>a</sup> observa-se a sudoeste da área, solos com maiores valores de resistência a penetração ( $RPi_2$ ) de 2,31Mpa na segunda camada. PEDROSA *et al.*, (2021) provaram a influência negativa dessa região compactada na produtividade da cultura da soja, onde obtiveram menores valores produtivos e os maiores valores de resistência à penetração, com correlação negativa de 40 e 33%, nas avaliações do ano de 2017 e 2018, respectivamente. No entanto, na região noroeste apesar de ser uma das menores áreas do mapa, foram encontrados solos com maior teor de argila na primeira camada ( $ARG_1$  Figura 4<sup>b</sup>) com 535 g/kg, porém com baixo valor na região sul, sudeste e leste, estes resultados foram de acordo com o estudo realizado por SOUZA (2017) tendo observado maiores valores para a fracção argila na primeira camada, enquanto que na região sudoeste constatou-se que há maior teor de silte na camada de 0,00-0,20 m, com de 116 k/kg (Figura 4<sup>c</sup>) e menor teor de silte na região norte do mapa.

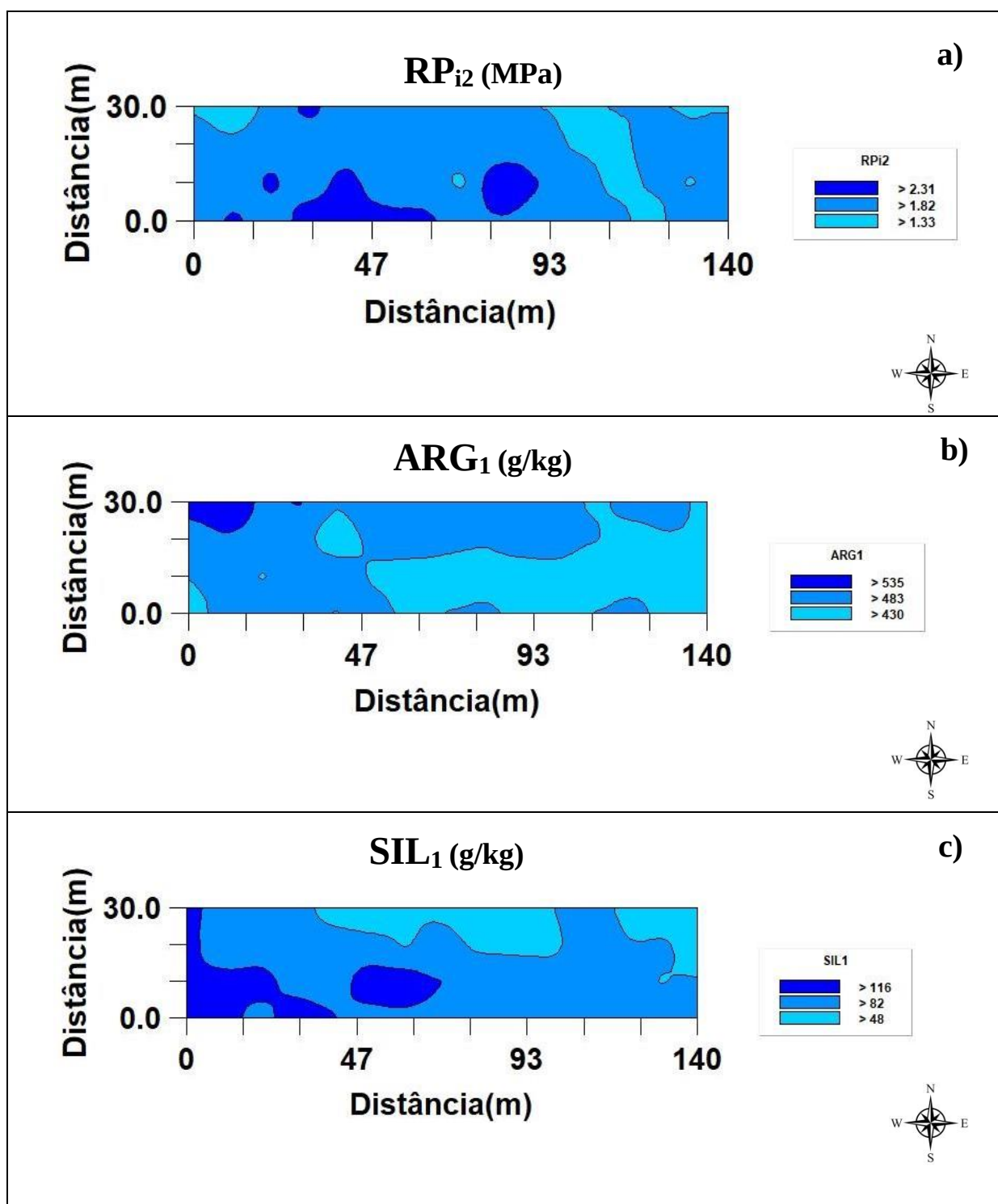
Observando ainda a Figura 2 do mapa d, pode-se afirmar que a região norte indo para zona nordeste e um pouco na entrada de sudeste possui maior concentração de macroporos

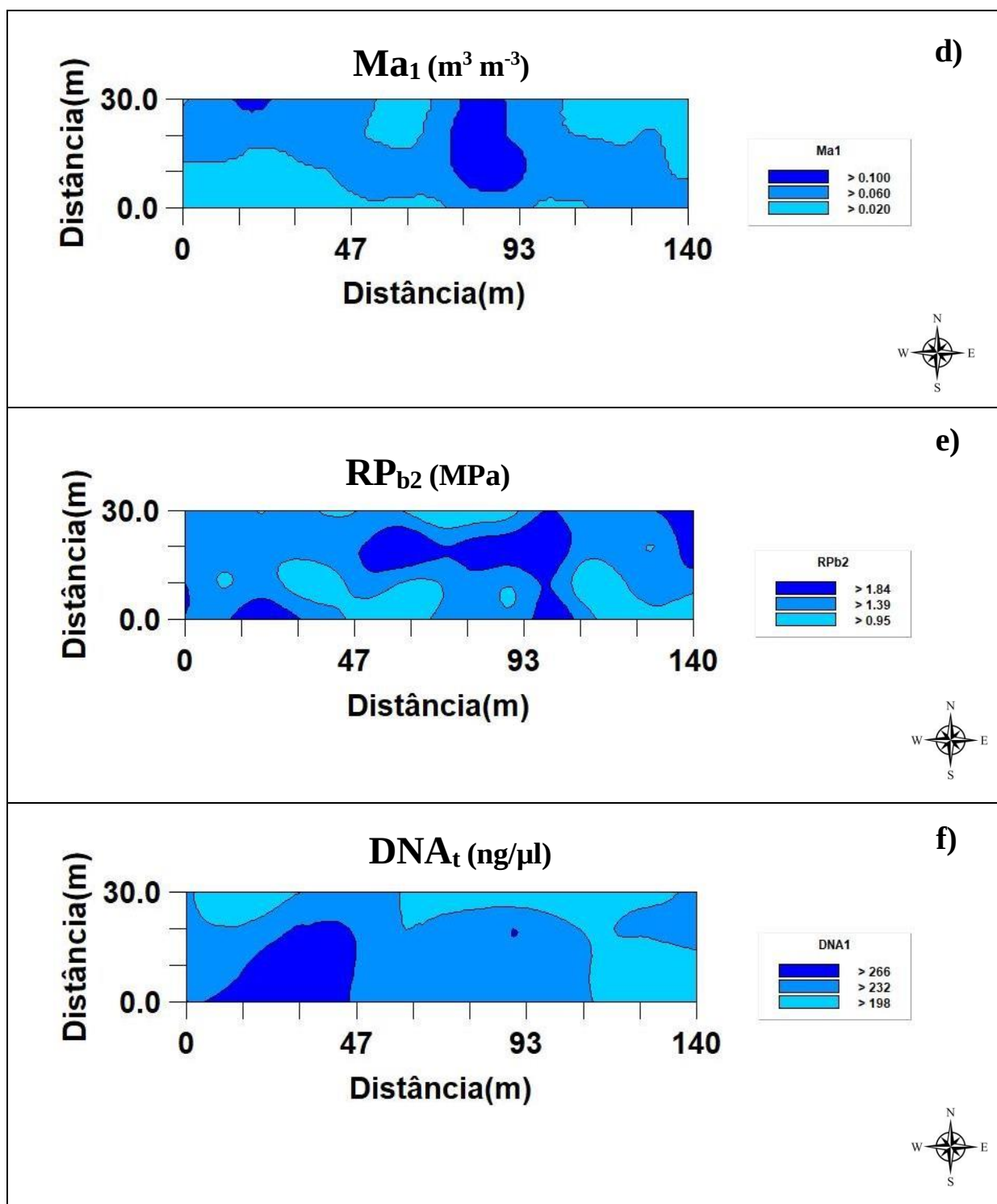
(Ma<sub>1</sub>) na primeira camada do solo, com um valor maior de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, sendo zonas com alta capacidade de retenção e armazenando da água pela capilaridade, tornando-se importante para a manutenção da umidade. Além disso, também indicou que uma parte considerável da área do mapa tem valor médio de 0,06 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> dos macroporos. Também pode-se notar que a região nordeste destaca-se por possuir maior valor de resistência penetração análise de bancada (RPb<sub>2</sub>) da Figura 4<sup>e</sup> que é de 1,84 Mpa, isto é, na segunda camada do solo. Sendo a resistência do solo à penetração uma das propriedades físicas do solo que possui uma relação diretamente no tange ao crescimento das plantas e modificada pelos sistemas de preparo do solo, nesse sentido, esta informação mostra-se ser de extrema relevância para o produtor e o profissional da área a optar por melhor estratégia no manejo do solo, de modo a proporcionar a penetração e o alongamento das raízes. O aumento pode estar relacionado com a compactação do solo devido ao processo de mecanização agrícola durante o manejo e preparo do solo.

Na última Figura (mapa 4<sup>f</sup> de DNA<sub>t</sub>) foi observado o valor de 266 ng/μl, situado na região sudoeste como o maior valor, enquanto que as regiões sudeste e nordeste da área com menores valores 198 ng/μl, no entanto, as regiões norte e sudeste apresentaram valor baixo na área do mapa. Deste modo, mostra que na região sudoeste apresenta maior quantidades de microrganismos (fungos, bactérias, vírus, protozoários e microalgas) que beneficiam as atividades agrícolas e ajudam a melhorar a produtividade da lavoura em comparação com as outras regiões mencionadas.

Segundo MARCOLIN e KLEIN (2011), a fração silte possui poros menores e mais numerosos, retendo mais água e menor taxa de drenagem do que areia. A argila, em função do reduzido diâmetro, apresenta grande área superficial específica, o que acarreta elevada retenção de água e fluxo lento de ar e água, além de elevada pegajosidade quando úmida e alta coesão, quando seca. A argila é a fração do solo que mais influencia o seu comportamento físico. Contudo, a associação de todos esses fatores, possibilita-nos observar a interferência da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo na produtividade da soja sob sistema plantio direto.

Na Figura abaixo, está apresentado mapas de krigagem de alguns atributos físicos de Latossolo Vermelho Distrófico sob cultivo de soja no município de Selvíria – MS.





**Figura 5:** Mapas de krigagem de alguns atributos físicos de Latossolo Vermelho Distrófico sob cultivo de soja no município de Selvíria – MS.



## 5. CONCLUSÕES

De acordo com a presente pesquisa, realizada num Latossolo Vermelho Distrófico sob o cultivo de soja em sistema plantio direto, estabelecido no município de Selvíria (MS), possibilitou apurar as seguintes conclusões:

✚ A camada de 0,0-0,20 m de profundidade foi que apresentou maiores variabilidades dos atributos físicos, com base no coeficiente de variação e maior número de pares com correlações significativas, tanto positivas como negativa.

✚ O DNAt do solo quando correlacionado com atributos físicos do solo, mostrou-se positiva para  $SIL_1$  e  $RPb_1$  e negativo para  $ARG_1$ , ambos na primeira camada do solo.

✚ Os valores dos alcances da dependência espacial a serem empregados deverão estar compreendidos entre 15,76 e 53,40 metros.

✚ Dos atributos pesquisados, a maior parte deles não apresentou dependência espacial, isto é, são aleatórios, heterogêneos e com muita variabilidade espacial, podendo se modelar seus semivariogramas do tipo efeito pepita puro.

## 6. REFERÊNCIAS

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Moraes G, Leonardo J, Sparovek G (2014) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22:711-728.
- Amado TJC, PES LZ, Lemainski CL, Schenato RB (2009) Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:831-843.
- Andrade FHN, Almeida CDGC De, Almeida BG De, Albuquerque Filho JAC, Mantovanelli BC, Araújo Filho JC (2020) Atributos físico-hídricos do solo via funções de pedotransferência em solos dos tabuleiros costeiros de Pernambuco. **Irriga** 25:69-86. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2020v25n1p69-86>
- Aquino RA De, Campos MCC, Marques Júnior J, Oliveira IM De, Mantovanelli BC, Soares MDR (2014) Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38:397-406. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200004>
- Araújo R, Goedert WJ, Lacerda MPC (2007) Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31:1099-1108
- Arshad MA, Lowery B, Grossman B (1996) Physical test for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. (Ed.). Methods for assessing soil quality. Madison: **Soil Science Society American Journal** 49:123-141.
- Bertollo AM, Levien R (2019) Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha** 25:208-218.
- Bonato ER, Bonato ALV (1987) A soja no Brasil: história e estatística. **Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Soja – CNPSo**. Documentos (INFOTECA-E).
- Bortoleti Junior A. et al. (2015) A importância do plantio direto e do plantio convencional e as suas relações com o manejo e conservação do solo. **Revista Conexão Eletrônica** 12:296-306.
- Brady NC, Weil RR (2013) Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3ª ed. Porto Alegre 689.
- Burgess TM, Webster R (1980) Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, 31:315-331.
- Campos MCC, Marques Júnior J, Pereira GT, Montanari R, Siqueira DS (2007) Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agronômica** 38:149-157.
- Coelho AM (2003) Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e da cultura. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 4:249-290.
- Coelho SP. et al. (2016) Coberturas vegetais na supressão de plantas daninhas em sistema de plantio direto orgânico de milho. **Brazilian Journal of Maize and Sorghum**, v. 15:65-72.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2022) Acompanhamento da safra brasileira, safra 2022/2023, Novembro 2022. Conab. v 10, Safra 2022/23 - N. 2 - segundo levantamento.

Corrêa AR (2018) **Densidade de amostragem de dados para análise da correlação espacial da produtividade do eucalipto em função de atributos do solo**. Tese (Doutora em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Costa CMS (2022) **Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo sob a cultura da soja no cerrado em sistema de plantio direto**. 32f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agrônômica) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Costa FS, Bayer C, Zanatta JA, Mielniczuk J (2000) Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:323-332.

Costa WA, Oliveira CAS, Kato E (2008) Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um latossolo-vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:515-523.

Cruz JS, Júnior RNA, Matias SSR, Camacho-Tamayo JH, Tavares RC (2010) Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia** 34:271-278. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000200001>

Dalchiavon FC, Carvalho MP (2012) Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. Semina: **Ciências Agrárias** 33:541-552. DOI: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n2p541>

Dalchiavon FC, Carvalho MP, Freddi OS, Andreotti M, Montanari R (2011) Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia, Campinas** 70:908-916.

Dam RF, Mehdi BB, Burgess MSE, Madramootoo CA, Mehuys GR, Callum IR (2005) Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil and Tillage Research** 84:41-53.

Delfiner P, Delhomme JP (1975) Optimum Interpolation by Kriging. Display and Analysis of Spacial Data. New York: John Wiley.

Demattê, JLI (1980) **Levantamento detalhado de solos do “Campus Experimental de Ilha Solteira”**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, p. 146.

Di HJ, et al. (1989) Use of geostatistics in designing sampling strategies for soil survey. **Soil Science Society American Journal** 53:1163-1167.

Dickmann L. (2019) **Residual da adubação fosfatada e efeito da inoculação com azospirillum brasilense nas culturas em sistema plantio direto no cerrado**. 118f. Tese (Doutor em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018) Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 3 ed. 575p.

FEBRAPDP – Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (2021).

Ferraz GAS, Silva FM, Costa PAN, Silva AC, Carvalho FM (2012) Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, 7:59-67, 2012.

GS +: Geostatistics for environmental sciences (2004) Gamma Desing Software. Michigan, Plainwell, 7 ed. 159p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo agropec., Rio de Janeiro. 2021.

Isaaks EH, Srivastava RM (1989) An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University., 561p.

Júnior PCM, Campos MCC, Mantovanelli BC, Franciscon U, Cunha JMD (2017) Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em terra preta de índio sob cultivo de café conilon. **Coffee Science** 12:260 – 271.

Kerry R, Oliver MA (2007) Comparing sampling needs for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood. **Geoderma** 140:383-396.

Kim YC (1990) Introductory geostatistics and mine planning. Arizona: The University of Arizona, Department of Mining and Geological Engineering 139 p.

Kravchenko AN (2003) Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. **Soil Science Society of American Journal** 67:1564-1571.

Leão TP, Silva AP, Macedo MCM, Imoff S, Euclídes VPB (2004) Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:415-423.

Lima CGR (2007) **Correlação Linear e Espacial da Produtividade de Forragem de Milho com Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico**. 107 f. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Lovera LH (2015) **Atributos do solo e componentes produtivos da soja: uma abordagem linear, multivariada e geoestatística**. 73f. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Machado A de MM, Favaretto N (2006) Atributos físicos do solo relacionados ao manejo e conservação dos solos. In: LIMA, M. R. (Ed.). Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos. Curitiba: **UFPR/Setor de Ciências Agrárias**, p. 234-254.

Mandarino JMG (2017) Origem e história da soja no Brasil. Disponível em: <https://blogs.canalrural.uol.com.br/embrapasoja/2017/04/05/origem-e-historia-da-soja-no-brasil/>

Marcatto FS, Silveira H (2017) Relação entre as propriedades físicas e hídricas e os tipos de uso da terra em Neossolos Regolíticos da bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR. **Caderno de Geografia** 27:2318-2962. DOI: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27n50p427>

Marcolin CD, Klein VA (2011) Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, 33:349-354. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120>

Mariz C (2021) Brasil deve ultrapassar Estados Unidos da América como maior produtor de soja do mundo. Disponível em: < <https://exame.com/economia/brasil-deve-ultrapassar-eua-como-maior-produtor-de-soja-do-mundo/> > Acesso em 10 Setembro de 2022.

Martin RA (2022) **Variabilidade espacial do teor de matéria orgânica e DNA total de um Latossolo em áreas de eucalipto e mata ciliar**. 28f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agrônômica) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Martins MV, Passos E, Carvalho M, Andreotti M, Montanari R (2009) Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul **Acta Scientiarum Agronomy** 31:147-154.

Mcbratney AB, Webster R (1981) Detection of ridge and furrow pattern by spectral analysis of crop yield. **International Statistical Review** 49:49-52.

Megda MM, Carvalho MP, Vieira MX, Andreotti M, Pereira EC (2008) Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:781-788. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200032>

Molin JP, Junior PAV, Neto DD, Faulin DC, Mascarin L (2007) Variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos macronutrientes e à população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo** 6:309-324. DOI: <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v6n03p%25p>

Montanari R (2009) **Aspectos da produtividade do feijoeiro correlacionados com atributos do solo sob sistemas de manejo de elevado nível tecnológico**. 172f. Tese de Doutorado, (Doutor em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Montanari R, Carvalho M de Passos, Andreotti M, Dalchiavon FC, Lovera LH & Honorato MAO (2010) Aspectos da influência do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob nível elevado tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:1811-1822. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000600005>

Montanari R, Nagel PL, da Luz AP, da Silva ENS, Rezende IdaS, da Silva LV, Machado FC, Roque CG (2013) Correlação espacial e temporal de atributos físicos do solo com a produtividade do feijão em Chapadão do Sul -MS. **Revista Agrarian** 6:289-302.

Montanari R, Panachuki E, Lovera LH, Correa AR, Oliveira IS, Queiroz HA, Tomaz PK (2015) Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono Cerrado-Pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:385-396. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140215>

Montanari R, Zambiano EC, Corrêa AR, Pellin DMP, Carvalho M de Passos, Dalchiavon FC (2012) Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milheto. **Revista Ceres** 59:125-135. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000100018>

Negro SRL (2017) **Correlação linear e espacial da produtividade da soja com atributos físicos da relação massa volume do solo**. Tese (Doutor em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Oliveira DG De, Fialho dos Reis E, Medeiros JC, Martins MP De O, Umbelino AS (2018) Correlação espacial de atributos físicos do solo e produtividade de tomate industrial. **Revista Agro@mbiente On-line**, 12:1-10. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v12i1.4211>

Oliveira IA, Campos MCC, Soares MDR, Aquino RE, Marques Júnior J, Nascimento EP (2013) Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37:1103-1112. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400027>

Oliver MA, Webster R (2014) A tutorial guide to geoestatistics: computing and modelling variograms and kriging. **Catena** 113: 56-59.

Paro JV (2021) **Manejo do solo para instalação do sistema plantio direto no cerrado** 28f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agrônômica) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Pedrosa GM (2021) **Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e sua relação com a produtividade do sorgo**. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia.

Pellin DMP, Montanari R, Lima E De Souza, Lovera LH, Corrêa AR (2015) Variabilidade de atributos físicos de um Latossolo vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Catinga** 28:28-38.

Pena LK (2020) **Fitossociologia de plantas daninhas, plantas de cobertura e sistemas de preparo em Latossolo Vermelho cultivado com soja**. 61 f. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba.

Peres P (2021) Mato Grosso do Sul colhe 13 milhões de toneladas de soja e bate recorde de produção. **Comunicação Semagro**. Disponível <http://www.ms.gov.br/mato-grosso-do-sul-colhe-13-milhoes-de-toneladas-de-soja-e-bate-recorde-de-producao/> Acessado em 23\12\2021.

Raij BV, Andrade JC de, Cantarella H, Quaggio JA (2001) **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico p. 285.

Ramos HMM, Duarte JFB, Simplício AAF, Oliveira IMC, Feitosa D de Lima (2020) Atributos físico-hídricos de um neossolo quartzarênico sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** 14:3968-3975. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v14n101147>

Ramos PNF, da Silveira OR, de Souza Maia JC (2022) Regressão linear simples na análise da influência dos atributos físicos do solo e na qualidade da fibra do algodão. **Brazilian Journal of Development** 8:28341-28357. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-365>

Reichardt K (1985) Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4. ed. Campinas: **Fundação Cargill**, 486p.

REIS, G.N. et al. (2007) Avaliação de desenvolvimento da cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Agrotecnologia** 31:228-235.

Rosa Filho G, Carvalho MP, Andreotti M, Montanari R, Binotti FFS, Gioia MT (2009) Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 33:283-29.

Sales LZ De Souza (2020) **Momentos de reinoculação de *rhizobium tropici* no feijoeiro na implantação de sistema plantio direto**. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Salomão PEA, Kriebel W, Dos Santos AA, Martins ACE (2020) A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development** 9:154911870-e154911870.

Schlotzhaver SD, Littell RC (1997) SAS system for elementary statistical analysis. 2 ed. Cary: SAS, p. 441.

So HB, Grabski A, Desborough P (2009) The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia. **Soil and tillage research** 104:180-184.

SO HB, Grabski A, Desborough P, (2009) The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia. **Soil and tillage research** 104:180-184.

Soares MDR, Campos MCC, Souza ZM de, Brito WBM, Franciscon U, Castioni GAF (2015) Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias** 58:434-441. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1975>

Souza DHS (2017) **Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade da cana-de-açúcar na zona da mata norte de Pernambuco**. 81f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Souza PT De (2022) **Variabilidade espacial de atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo e componentes de produção da cultura do milho em áreas com e sem aplicação de microgeo no Cerrado**. 66f. Tese (Doutor em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

SOUZA ZM et al., (2014) Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural** 44:261-268.

Tavanti RF, Montanari R, Panosso, RA, Freddi SO, González PA (2020) Pedotransfer function to estimate the soil structural “s” index and spatial variability in an oxisol within a livestock farming system. **Engenharia Agrícola** 40:34-44, 2020.

Tavares EU, Rolim MM, Pedrosa EMR, Montenegro AAM, Magalhães AG, Barreto MTL (2012) Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista brasileira de engenharia Agrícola e ambiental** 16:1206–1214. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100009>

Troleis MJB, Sena KN, Souza PT, Barbieri RS, Yano EH, González AP, Montanari R (2020). Sistemas de manejo e qualidade do solo na produção de soja no cerrado de baixa altitude. **Research, Society And Development** 9:1-23.

Vieira SR (2000) Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo** 1:1-54.

Vieira SR, Hatfield JL, Nielsen DR, Biggar JW (1983) Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia, Berkeley**, 51:1-75.

Zanão Júnior LA, Lana RMQ, Carvalho-Zanão MP, Guimarães EC (2010) Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres** 57:429-438. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000300021>.