

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS  
DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM  
SEMEADURA DIRETA**

**DIANDRA PINTO DELLA FLORA**

**DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2023**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS  
FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM  
SEMEADURA DIRETA**

DIANDRA PINTO DELLA FLORA

Engenheira Agrônoma, Me.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez  
CO-ORIENTADORA: Dra. Michely Tomazi

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doutora.

Dourados  
Mato Grosso do Sul  
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

F632v Flora, Diandra Pinto Della  
VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E  
PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SEMEADURA DIRETA [recurso eletrônico] / Diandra Pinto  
Della Flora. -- 2024.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Jorge Wilson Cortez.

Coorientadora: Michely Tomazi.

Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Textura. 2. agregação. 3. resistência a penetração. 4. densidade do solo. 5. porosidade do solo.  
I. Cortez, Jorge Wilson. II. Tomazi, Michely. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E  
PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SEMEADURA DIRETA**

por

Diandra Pinto Della Flora

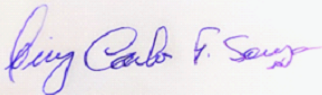
Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de  
DOUTORA EM AGRONOMIA

Aprovado em: 14/02/2023



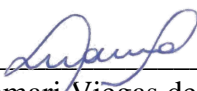
---

Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez  
Orientador – UFGD/FCA



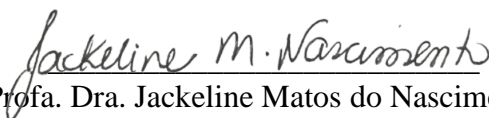
---

Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira de Souza  
UFGD/FCA



---

Profa. Dra. Anamari Viegas de Araújo Motomiya  
UFGD/FCA



---

Profa. Dra. Jackeline Matos do Nascimento  
UNIGRAN



---

Prof. Dr. Elói Panachuki  
UEMS

*A minha família, meus pais Marli e Abraão, minhas irmãs Lisandra e Bianca, meus sobrinhos Lorenzo e Enrico, e meus cunhados Antônio e Leandro, pelo apoio e incentivo em todos os momentos, principalmente os de incerteza, muito comuns para quem trilha novos caminhos.*

*A meu companheiro de vida e de jornadas, Felipe, pelo amor, carinho, cuidado, paciência e apoio incondicional nesses anos de convívio,*

**DEDICO...**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, e pelas oportunidades que tem me proporcionado as quais tem possibilitado a realização de meus sonhos.

A Universidade Federal da Grande Dourados, pela oportunidade de aprendizado e qualificação profissional.

Ao mestre e orientador Dr. Jorge Wilson Cortez, pela dedicação, confiança e paciência, compartilhando conhecimentos acadêmicos e profissionais.

A Embrapa Agropecuária Oeste, pelo apoio e disponibilização da estrutura para análise das amostras coletadas.

Aos meus pais, Marli Pinto Della Flora e Abraão José Della Flora, pelos ensinamentos, incentivo e apoio para que eu seguisse a caminhada em busca dos meus objetivos, independente da distância percorrida.

A todos os demais familiares, em especial: minhas irmãs Lisandra e Bianca, e meus cunhados Antônio e Leandro, pelo apoio concedido a mim e por acreditarem nas minhas potencialidades. Aos meus sogros Sandra e Alberto, e em nome deles à toda família, pelas inúmeras vezes que me ajudaram, apoiaram e incentivaram a continuar firme, independente das dificuldades. A meu companheiro, amigo e amor, Felipe Cardoso Serpa, pela tolerância nos meus momentos de impaciência, pela força nos meus momentos de fraqueza, pelo incentivo nos momentos de incerteza e pelo apoio incondicional em toda minha caminhada; com você quero dividir as duas cadeiras de balanço na varanda.

Aos proprietários e colaboradores da fazenda Dominó, pela disponibilidade e apoio para que este estudo acontecesse.

Ao colega e amigo Dário Alexandre Schwambach, pelo companheirismo, por não medir esforços em ajudar além do necessário para que este trabalho fosse finalizado.

A todos os integrantes do Grupo de Pesquisa em Agricultura de Precisão e Mecanização, em especial Nayra, Amanda e Lucas, pelo tempo de convivência, amizade e pela ajuda na realização dos trabalhos a campo.

A todos aqueles não citados, familiares, colegas, amigos, professores que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

A todos vocês, **Muito Obrigada!**

## SUMÁRIO

### PÁGINA

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 INTRODUÇÃO GERAL .....	9
Referências .....	11
2 ARTIGO I.....	15
A variabilidade granulométrica determina a distribuição de carbono orgânico e atributos físicos do solo em semeadura direta .....	15
Resumo.....	15
Abstract .....	15
2.1 Introdução .....	16
2.2 Material e Métodos .....	17
2.3 Resultados e Discussão .....	20
2.4 Conclusões .....	29
2.5 Referências .....	30
3 ARTIGO II .....	36
Distribuição espacial de atributos físicos indicativos de compactação do solo.....	36
Resumo.....	36
Abstract .....	36
3.1 Introdução .....	37
3.2 Material e Métodos .....	38
3.3 Resultados e Discussão .....	42
3.4 Conclusões .....	54
3.5 Referências .....	54
4 ARTIGO III.....	62
Variabilidade espacial da produtividade da soja e sua correlação com atributos físicos do solo.....	62
Resumo.....	62
Abstract .....	62
4.1 Introdução .....	63
4.2 Material e Métodos .....	64
4.3 Resultados e Discussão .....	69
4.4 Conclusões .....	77
4.5 Referências .....	77
5 CONCLUSÕES GERAIS .....	84

FLORA, D. P. D. **Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e produtividade da soja em semeadura direta**. 84f. 2023. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

## RESUMO

Objetivou-se avaliar a variabilidade dos atributos físicos do solo e da produtividade da soja, em semeadura direta. O trabalho foi realizado em fazenda comercial, localizada em Ponta Porã/MS, cultivada sob semeadura direta. Os dados foram coletados por meio de grade amostral, com 73 pontos, sendo 1 amostra a cada 1,7 ha. Foram avaliados os atributos de solo: argila, silte, areia, macro e microagregação, índice de estabilidade de agregados, carbono orgânico, resistência à penetração, densidade, porosidade total, macro e microporosidade. Para a produtividade da soja foram consideradas três safras (2019/20, 2020/21 e 2021/22). Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e geoestatística, com mapas de variabilidade elaborados pelos interpoladores krigagem e IDW. A correlação entre os atributos de solo e produtividade foi determinada pela correlação de Pearson. O sistema de semeadura direta é eficiente na manutenção da estrutura do solo, porém, não assegura índices adequados de carbono orgânico e macroporosidade. A variabilidade granulométrica interfere na distribuição de macro e microagregados, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados, carbono orgânico, resistência do solo à penetração, densidade, porosidade total e microporosidade do solo e produtividade da soja. Em condições de déficit hídrico, a produtividade é menor nas regiões com maiores teores de areia. As produtividades da soja apresentaram correlação negativa com os atributos areia, microagregação e densidade do solo, e correlação positiva com argila, silte, macroagregação, índice de estabilidade de agregados, carbono orgânico, resistência a penetração, microporosidade e porosidade total.

**Palavras-chave:** Textura, agregação, resistência a penetração, densidade do solo, porosidade do solo, carbono orgânico.



FLORA, D. P. D. **Spatial variability of soil physical attributes and soybean yield under no-tillage.** 84f. 2023. Thesis (PhD in Agronomy), Federal University of Grande Dourados, Dourados-MS.

### ABSTRACT

The objective was to evaluate the variability of soil physical attributes and soybean productivity in no-tillage. The work was carried out in a commercial farm, located in Ponta Porã/MS, cultivated under direct seeding. Data were collected through a sampling grid, with 73 points, with 1 sample every 1.7 ha. Soil attributes were evaluated: clay, silt, sand, macro and microaggregation, aggregate stability index, organic carbon, resistance to penetration, density, total porosity, macro and microporosity. For soybean productivity, three harvests were considered (2019/20, 2020/21 and 2021/22). Data were analyzed using descriptive statistics and geostatistics, with variability maps prepared using kriging and IDW interpolators. The correlation between soil attributes and productivity was determined using Pearson's correlation. The direct seeding system is efficient in maintaining the soil structure, however, it does not ensure adequate levels of organic carbon and macroporosity. The granulometric variability interferes with the distribution of macro and microaggregates, weighted average diameter, aggregate stability index, organic carbon, soil resistance to penetration, density, total porosity and microporosity of the soil and soybean productivity. Under conditions of water deficit, productivity is lower in regions with higher sand content. Soybean yields showed a negative correlation with sand, microaggregation and soil density, and a positive correlation with clay, silt, macroaggregation, aggregate stability index, organic carbon, resistance to penetration, microporosity and total porosity.

**Keywords:** Texture, aggregation, resistance to penetration, bulk density, soil porosity, organic carbon.

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior país produtor de soja do mundo (FAO, 2022), com 38,9 milhões de hectares semeados na safra 2020/21, alcançando produtividade média de 3.528 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2021). Na última década (safra 2011/12 a 2020/21), a área nacional destinada a produção de soja aumentou 1,4 milhão ha ano<sup>-1</sup>, enquanto a produtividade da cultura aumentou 93 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no mesmo período (CONAB, 2021).

Apesar dos aumentos na produtividade, ocorre às custas de maiores cargas ambientais (AKHTAR et al., 2019), de modo que não se pode maximizar a produtividade de soja sem sacrificar a qualidade da água e os recursos do solo (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES AND MEDICINE, 2018). De acordo com Martinez et al. (2020), o aumento da frequência da soja nas sequencias de cultivo impactam negativamente a qualidade do solo, comprometendo a sustentabilidade dos agroecossistemas (CRESPO et al., 2021).

A adoção de sistemas conservacionistas associado ao manejo de culturas de cobertura e manutenção de resíduos na superfície do solo são os esforços necessários para alcançar elevada produtividade e sustentabilidade agrícola. Estes sistemas melhoram a saúde e qualidade do solo, garantem menor potencial de erosão, maior incorporação e estabilização do carbono, melhor agregação das partículas do solo, aumentam as taxas de infiltração de água e reduzem a evaporação da água do solo (LI et al., 2019; NOURI et al., 2019; XAVIER et al., 2019; MUONI et al., 2020; WULANNINGTYAS et al., 2021).

Dentre os sistemas conservacionista, a semeadura direta traz inúmeros benefícios na manutenção da qualidade do solo como melhorias na macroporosidade e estabilidade de agregados (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018; VELOSO et al., 2019), aumento na concentração de carbono orgânico, melhorias na distribuição de poros, aumento da matéria orgânica que fornece elasticidade às propriedades do solo, ciclagem de nutriente (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018), entre outros.

Os solos brasileiros, em geral, são intensamente agricultáveis, apresentando baixa qualidade física, o que exige uma avaliação complexa, abordando ferramentas e técnicas que possam descrever a sua variabilidade e capacidade em sustentar a

produção agrícola. Isso reflete a necessidade de estudos que caracterizem os impactos exercidos sobre a variabilidade existente, caracterizando assim, as possíveis limitações nas regiões produtivas que necessitam de medidas que atenuem o processo de degradação dos solos (MANTOVANELLI et al., 2022).

A estrutura do solo, quando alterada negativamente, pode afetar atributos como densidade, porosidade, distribuição do diâmetro dos poros, armazenamento e disponibilidade de água para as plantas, dinâmica da água na superfície e no perfil do solo e esgotamento da estrutura do solo, resultando no processo de compactação do solo, ou seja, na consolidação física das partículas do solo contra uma força aplicada (GHOSH et al., 2020; DE OLIVEIRA et al., 2021; MANTOVANELLI et al., 2022).

Segundo a FAO (2020), nos últimos 50 anos dois terços das terras agrícolas foram afetadas por diferentes processos de degradação, resultando em dois bilhões de hectares degradados em escala global.

Desse modo, é necessário adotar técnicas padronizadas que agregam atributos do solo sensíveis ao manejo para monitorar a dinâmica da qualidade do solo agrícola que dependem do uso e manejo antropogênico da terra (BÜNEMANN et al., 2018). A qualidade física do solo é vital para identificar práticas de manejo para uso sustentável da terra e avaliar a extensão da sua degradação (CRESPO et al., 2021).

Alterações nas propriedades físicas do solo podem afetar diretamente o estabelecimento e a produção das culturas (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018). Além disso, o monitoramento da qualidade do solo é essencial para as decisões sobre o manejo sustentável do agroecossistema (OBADE, 2019).

Um importante indicador da qualidade do solo é sua variabilidade espacial (GEORGE et al., 2021), resultado direto dos fatores de formação do solo como clima, organismos vivos e material de origem. Segundo George et al. (2021), esses fatores podem atuar independentemente ou em conjunto a outros fatores.

A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo tem sido foco de diversos estudos (BRITO FILHO et al., 2018; SOARES et al., 2018; LOPES et al., 2020; GELAIN et al., 2021), analisada por meio das técnicas geoestatísticas, mostrando que o solo está naturalmente sujeito a variações de suas propriedades (ARAÚJO et al., 2018).

Assim, se faz necessário de um entendimento mais amplo em relação a multifuncionalidade dos sistemas de cultivo, sendo fundamental a elaboração de

planos alternativos de gestão inteligentes, que permitam planejamento e intervenções especializadas e localizadas, considerando as particularidades existentes em cada área. Para isso, é necessário conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo para a tomada de decisão quanto ao manejo a ser adotado.

Portanto, objetivou-se avaliar a variabilidade dos atributos físicos do solo e da produtividade da soja, em semeadura direta.

### **Referências**

AKHTAR, K.; WANG, W.; REN, G.; KHAN, A.; FENG, Y.; YANG, G.; WANG, H. Integrated use of straw mulch with nitrogen fertilizer improves soil functionality and soybean production. **Environment International**, v.132, n.105092, 2019.

ARAÚJO, A. M. S. S.; MENEZES, A. S.; DE ALENCAR, T. L.; DA SILVA, C. P.; ASSIS JÚNIOR R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; DE ALMEIDA, B. G.; MOTA, J. C. A. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: Variability and relation with granulometry. **Catena**, v.166, p.290-297, 2018.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v.326, p.164-200, 2018.

BRITO FILHO, E. G.; MANTOVANELLI, B. C.; BRITO, W. B. M.; DA SILVA, J. F.; CAMPOS, M. C. C.; DA CUNHA, J. M. Variabilidade espacial da textura do solo em área de terra preta arqueológica sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 17, n.1, p.139-143, 2018.

BÜNEMANN, E.K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – a critical review. **Soil Biology & Biochemistry**, v.120, p.105-125, 2018.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra Brasileira de grãos**. Brasília : CONAB, v.8, n.12, 2021.

CRESPO, C.; WYNGAARD, N.; ROZAS SAINZ, H.; STUDDERT, G. A.; BARRACO, M.; GUDELJ, V.; BARBAGELATA, P.; BARBIERI, P. Effect of intensified cropping sequences on soil physical properties in contrasting environments. **Catena**, v.207, n.105690, 2021.

FAO. Food and Agriculture Organization. Countries by commodity. **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations/FAOSTAT**. Disponível em: <[https:// www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity](https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity)>. Acesso em 16 ago. 2022.

GELAIN, E.; BOTTEGA, E. L.; MOTOMIYA, A. V. DE A.; DE OLIVEIRA, Z. B. Variabilidade espacial e correlação dos atributos do solo com produtividade do milho e da soja. **Nativa**, v.9, n.5, p.536-543, 2021.

GEORGE, T. R.; BHAT, J. A.; WANI, M. A.; MAQBOOL, M.; RAMZAN, S.; YADAV, R. Mapping of spatial variability of soil texture and macronutrients in Wangath watershed, Ganderbal District of Jammu and Kashmir Using GIS. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v.10, n.2, p.628-642, 2021.

GHOSH, T.; MAITY, P P.; DASM T. K.; KRISHNAN, P.; BHATIA, A.; BHATTACHARYA, P.; SHARMA, D. K. Variation of porosity, pore size distribution and soil physical properties under conservation agriculture. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.90, n.11, p.2051-2058, 2020.

LI, Y.; LI, Z.; CUI, S.; JAGADAMMA, S.; ZHANG, Q. Residue retention and minimum tillage improve physical environment of the soil in croplands: A global meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, v.194, n.104292, 2019.

LOPES, K. A. L.; PINTO JUNIOR, F. F.; AGUIAR, F. I. S.; SOUSA, A. E. S.; DE OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S. Diferentes densidades amostrais na caracterização da variabilidade espacial de atributos granulométricos de um Argissolo amarelo distrocoeso típico. **Cultura Agronômica**, v.29, n.1, p. 50-60, 2020.

MANTOVANELLI, B. C.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D.; CARLESSO, R. Qualidade física de solos do Brasil e aplicabilidade de métodos para estimativas de retenção de água no solo: A revisão. **Revista Edutec**, v.03, n.01, p.87-100, 2022.

MARTÍNEZ, J. P.; CRESPO, C.; SAINZ ROZAS, H.; ECHEVERRÍA, H.; STUDDERT, G.; MARTINEZ, F.; CORDONE, G.; BARBIERI, P. Soil organic carbon in cropping sequences with predominance of soybean in the argentinean humid pampa. **Soil Use Manage**, v.36, p.173-183, 2020.

MUONI, T.; KOOMSON, E.; ÖBORN, I.; MAROHN, C.; WATSON, C. A.; BERGKVIST, G.; BARNES, A.; CADISCH, G.; DUNCAN, A. Reducing soil erosion in smallholder farming systems in east Africa through the introduction of different crop types. **Experimental Agriculture**, v.56, n.2, p.183-195, 2020.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Scientific Breakthroughs to Advance Food and Agricultural Research by 2030**. The National Academies Press, Washington, DC, 2018.

NOURI, A.; LEE, J.; YIN, X.; TYLER, D. D.; SAXTON, A. M. Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. **Geoderma**, v.337, p.998-1008, 2019.

OBADÉ, V. P. Integrating management information with soil quality dynamics to monitor agricultural productivity. **Science of the Total Environment**, v.651, p.2036-2043, 2019.

OLIVEIRA DE, J. T.; DE OLIVEIRA, R. A.; DA CUNHA, F. F.; DOS SANTOS, E. S. Spatial autocorrelation of physical attributes of an oxisol. **Engenharia Agrícola**, v.41, n.2, p.255-262, 2021.

SOARES, M. D. R. S.; CAMPOS, M. C. C.; DA CUNHA, J. M.; DE SOUZA, Z. M.; DE OLIVEIRA, I. A.; DE AQUINO, R. E.; MANTOVANELLI, B. C.; OLIVEIRA, L. S. Variabilidade espacial do estoque de carbono e atributos físicos do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Revista Ambiente & Água**, v.13, n.6, 2018.

VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, v.190, p.139–146, 2019.

WULANNINGTYAS, H. S.; GONG, Y.; LI, P.; SAKAGAMI, N.; NISHIWAKI, J.; KOMATSUZAKI, M. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil & Tillage Research**, v.205, n.104749, 2021.

XAVIER, C. V.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. B.; SANTOS, G. A. A.; BARBOSA, M. A.; MILORI, D. M. B. P.; RIGOBELLO, E.; CORÁ, J. E.; SCALA JÚNIOR, N. L. Crop rotation and succession in a no-tillage system: Implications for CO<sub>2</sub> emission and soil attributes. **Journal of Environmental Management**, v.245, p.8-15, 2019.

## 2 ARTIGO I

### **A variabilidade granulométrica determina a distribuição de carbono orgânico e atributos físicos do solo em semeadura direta**

#### **Resumo**

A granulometria do solo, que representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais, controla a maioria dos processos físicos, químicos e biológicos nos solos, e apresenta alta heterogeneidade espacial. Dessa forma, objetivou-se avaliar a variabilidade da granulometria na distribuição dos atributos físicos e carbono orgânico do solo, em semeadura direta. O trabalho foi realizado em fazenda comercial, localizada em Ponta Porã/MS, cultivada sob semeadura direta. Os dados foram coletados por meio de grade amostral, com 73 pontos, sendo 1 amostra a cada 1,7 ha. Foram avaliados os atributos de solo areia, argila, silte, areia fracionada, macro e microagregação, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados e carbono orgânico. Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e geoestatística, e os mapas de variabilidade elaborados por meio do interpolador krigagem. A variabilidade granulométrica interferiu na distribuição de macro e microagregados, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados e carbono orgânico do solo. O sistema de semeadura direta foi eficiente na manutenção da estrutura do solo, porém, não assegurou índices adequados de carbono orgânico.

Palavras-chave: Textura, agregação, índice de estabilidade de agregados, geoestatística, fracionamento da areia.

#### **Abstract**

### **The granulometric variability determines the distribution of organic carbon and physical attributes of the soil in no-tillage**

Soil granulometry, which represents the quantitative distribution of solid mineral particles, controls most physical, chemical and biological processes in soils, and



presents high spatial heterogeneity. Thus, the objective was to evaluate the variability of granulometry in the distribution of physical attributes and soil organic carbon, in no-tillage. The work was carried out on a commercial farm, located in Ponta Porã/MS, cultivated under direct seeding. Data were collected using a sampling grid, with 73 points, with 1 sample every 1.7 ha. Soil attributes sand, clay, silt, fractionated sand, macro and microaggregation, weighted average diameter, aggregate stability index and organic carbon were evaluated. Data were analyzed using descriptive and geostatistical statistics, and variability maps were prepared using the kriging interpolator. The granulometric variability interfered in the distribution of macro and microaggregates, weighted average diameter, aggregate stability index and soil organic carbon. The no-till system was efficient in maintaining the soil structure, however, it did not ensure adequate levels of organic carbon.

**Keywords:** Texture, aggregation, aggregate stability index, geostatistics, sand fractionation.

## **2.1 Introdução**

A granulometria do solo representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais relacionadas ao tamanho, sendo considerada uma das características físicas mais estáveis (PARAHYBA et al., 2019). A textura do solo, característica que controla a maioria dos processos físicos, químicos e biológicos nos solos, apresenta alta heterogeneidade espacial (LIU et al., 2020).

Na produtividade agrícola, além dos cuidados com a fertilidade, deve-se buscar adequadas condições físicas ao solo durante o desenvolvimento das culturas (CORTEZ et al., 2018).

A estrutura do solo é definida pela disposição das unidades, conhecidas como agregados, podendo ser denominados micro e macroagregados, dependendo do seu tamanho (OKOLO et al., 2020). Fatores como teor de argila, silte e areia, mineralização, agentes de ligação, substâncias e exudatos orgânicos, teor de matéria orgânica, carbono orgânico, e outros (SEIDEL et al., 2018; SARKER et al., 2018), são condicionantes da formação de agregados.

Um importante indicador da qualidade do solo é sua variabilidade espacial (GEORGE et al., 2021), resultado direto dos fatores de formação do solo como clima, organismos vivos e material de origem. Segundo George et al. (2021), esses fatores podem atuar independentemente ou em conjunto a outros fatores.

A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo tem sido foco de diversos estudos (BRITO FILHO et al., 2018; SOARES et al., 2018; LOPES et al., 2020; GELAIN et al., 2021), analisada por meio das técnicas geoestatísticas, mostrando que o solo está naturalmente sujeito a variações de suas propriedades (ARAÚJO et al., 2018).

Estes e outros estudos voltados para o monitoramento da qualidade do solo por meio da análise dos atributos físicos são essenciais para a definição de sistemas agrícolas sustentáveis, além de permitir a definição de manejos adequados com foco na conservação (PESSOA et al., 2018). De acordo com Cortez et al. (2018), o grande desafio da sustentabilidade nos sistemas de produção está na quantidade e qualidade dos resíduos culturais provenientes da semeadura direta.

A adoção do sistema plantio direto traz inúmeros benefícios na manutenção da qualidade do solo como melhorias na macroporosidade e estabilidade de agregados (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018; VELOSO et al., 2019), aumento na concentração de carbono orgânico, melhorias na distribuição de poros, aumento da matéria orgânica que fornece elasticidade às propriedades do solo, ciclagem de nutriente (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018), entre outros.

Se faz necessário de um entendimento mais amplo em relação a multifuncionalidade dos sistemas de cultivo, sendo fundamental a elaboração de planos alternativos de gestão inteligentes, que permitam planejamento e intervenções especializadas e localizadas, considerando as particularidades existentes em cada área. Para isso, é necessário conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo para a tomada de decisão quanto ao manejo a ser adotado.

Portanto, objetivou-se avaliar a influência da variabilidade da granulometria na distribuição dos atributos físicos e carbono orgânico do solo, em semeadura direta.

## **2.2 Material e Métodos**

### Localização e descrição da área de estudo

O trabalho foi realizado em uma fazenda comercial, localizada no município de Ponta Porã – MS, cultivada no sistema de sequeiro e adota a semeadura direta a mais de 30 anos. O local situa-se em na latitude de 22°22' S, longitude de 55°10' W e altitude média de 440 m. O clima é do tipo tropical úmido com inverso seco - Cwa (KÖPPEN, 1948). O solo da área é um Latossolo Vermelho distrófico, com relevo suavemente ondulado (SANTOS et al., 2018).

A área avaliada possui 120,6 hectares, cultivados com o predomínio do sistema de sucessão soja e milho safrinha, em semeadura direta a mais de 30 anos. Os insumos utilizados estão descritos no Quadro 1. O uso de herbicida, inseticida e fungicida foram utilizados conforme recomendação técnica.

Quadro 1. Histórico de culturas e de aplicação de fertilizantes e corretivos na área de estudo.

Ano agrícola	Safr	Cultura	Correção/Adubação		
			Fonte	Quantidade (kg/ha)	Modo de aplicação
2017/18	Outono	Milho 2ª safra	NPK <sup>1</sup> 16-16-16	160	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	300	Linha
2018/19	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	160	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	297	Linha
2019/20	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	300	Linha
2020/21	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	320	Linha
2021/22	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	310	Linha

<sup>1</sup>Nitrogênio-Fósforo-Potássio.

### Plano de amostragem de solo

Para a espacialização das coletas de atributos físicos do solo na área foi gerado grade amostral (Figura 1), em que 60 pontos foram alocados de forma regular com um ponto a cada 2,0 hectares (143,61 x 143,61 m) somados 13 pontos amostrais (o equivalente a aproximadamente 20% dos pontos da grade amostral original), alocados de forma aleatória conforme a variabilidade espacial da produtividade observada nos mapas de colheita de milho e soja para os anos de 2018 e 2019 .

Portanto, a grade amostral adotada possuiu 73 pontos amostrais na densidade de 01 amostra a cada 1,7 hectares.

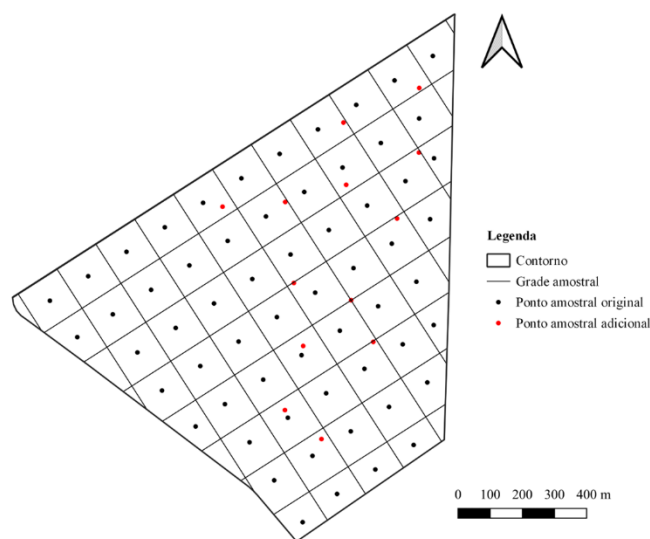


Figura 1. Grade regular com ponto amostral original e ponto amostral adicional para a coleta de amostras de solo.

### Avaliações

Para determinação dos atributos de solo, foram coletadas cinco subamostras por ponto amostral, na camada de 0,00 - 0,20 m. Todos os atributos foram analisados por meio da metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017).

Após determinar a fração total de areia, o conteúdo retido em peneira de malha 0,053 mm passou manualmente em peneiras com diferentes malhas, sendo peocedido seu fracionamento e classificado em: areia muito grossa (2,0 - 1,0 mm), areia grossa (1,0 - 0,5 mm), areia média (0,5 - 0,25 mm), areia fina (0,25 - 0,105 mm) e areia muito fina (0,10 - 0,053 mm), segundo Santos *et al.* (2013).

### Análise de dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística exploratória (estatística descritiva), obtendo-se medidas de posição (mínimo, média e máximo) e de dispersão (desvio padrão, coeficientes de variação (CV%), assimetria e de curtose). Com base nos valores de assimetria (Cs) obtidos, visando caracterizar quanto e como a distribuição de frequências se afasta da simetria, foram classificados como:  $C_s = 0$  distribuição simétrica,  $C_s > 0$  distribuição assimétrica à direita e  $C_s < 0$

distribuição assimétrica à esquerda. Os valores de curtose ( $C_k$ ), que expressam a dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, geralmente utilizada a curva normal, foram classificados em:  $C_k = 0$  distribuição mesocúrtica,  $C_k < 0$  distribuição platicúrtica e  $C_k > 0$  distribuição leptocúrtica.

A dispersão relativa dos dados, fornecida pelos valores de coeficiente de variação (CV%), serão classificadas como baixa quando CV for inferior a 10% (alta precisão), média quando o CV estiver entre 10% e 20% (boa precisão), alta de 20% a 30% (baixa precisão) e muito alta com CV maior que 30% (baixíssima precisão) (PIMENTEL-GOMES E GARCIA, 2002).

A hipótese de normalidade foi testada pelo teste de Shapiro e Wilk ( $W$ ,  $p < 0,05$ ), sendo considerados como distribuição normal os dados que obtiveram  $p$ -valor  $> 0,05$ .

A análise geoestatística foi realizada por meio de semivariogramas experimentais (VIEIRA, 2000), sendo os ajustes realizados por meio de modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano e linear). A determinação dos modelos foi ajustada com base no melhor coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e avaliados pela técnica de validação cruzada, por meio do melhor coeficiente angular e menor erro quadrático médio (RMSE). Do ajuste de um modelo matemático aos dados, foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita ( $C_0$ ), contribuição ( $C_1$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ) e alcance ( $a$ ). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado por meio da equação:  $IDE = [C_0 / (C_0 + C_1)] * 100$ . Com base nos IDE, foi classificado o grau de dependência espacial (GDE) como: forte, para  $IDE \leq 25\%$ ; moderado, para IDE entre 25 e 75%; e fraco, para  $IDE > 75\%$  (CAMBARDELLA et al., 1994).

A espacialização foi procedida por meio da construção dos mapas temáticos de interpolação por krigagem.

### **2.3 Resultados e Discussão**

Quando avaliado a média das frações granulométricas, não foi possível observar domínio entre as frações argila e areia. As frações texturais são estáveis, apresentando pouca modificação ao longo do tempo (Quadro 2) e, conseqüentemente, baixo coeficiente de variação (Soares *et al.*, 2015), classificado

como alto (para teor de argila) e muito alto (para teores de areia e silte) (Quadro 2), que reflete a variação espacial da área.

Quadro 2. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo na profundidade de 0,00 - 0,20 m, da área em estudo.

Atributo	Mínimo	Média	Máximo	Dp <sup>1</sup>	CV <sup>2</sup>	Cs <sup>3</sup>	Ck <sup>4</sup>	W <sup>5</sup>
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	253,19	457,48	754,74	141,08	30,84	0,2579	-1,0529	0,979*
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	27,06	114,23	173,28	36,48	31,93	-0,4605	-0,6805	0,983*
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	218,20	428,29	606,22	107,50	25,10	-0,1135	-1,0608	0,986 <sup>ns</sup>
MG (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>6</sup>	0,00	0,98	5,25	1,15	118,01	1,8837	3,9793	0,930*
G (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>7</sup>	7,25	19,68	37,50	6,83	34,68	0,2906	-0,3940	0,993 <sup>ns</sup>
M (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>8</sup>	55,50	120,05	248,00	42,97	35,79	0,8930	0,2031	0,963*
F (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>9</sup>	100,75	249,86	463,75	96,65	38,68	0,2263	-0,9941	0,983 <sup>ns</sup>
MF (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>10</sup>	21,75	67,32	106,75	16,30	24,21	-0,2766	0,5012	0,991 <sup>ns</sup>
DMPs (mm) <sup>11</sup>	3,13	4,30	4,99	0,36	8,43	-0,5758	0,8336	0,985 <sup>ns</sup>
DMPu (mm) <sup>12</sup>	1,95	3,60	4,39	0,51	14,23	-1,2660	1,7900	0,952*
Macro (%) <sup>13</sup>	82,32	90,47	96,28	3,42	3,79	-0,6077	-0,3525	0,979*
Micro (%) <sup>14</sup>	3,72	9,53	17,68	3,42	35,93	0,6077	-0,3525	0,979*
IEA (%) <sup>15</sup>	49,51	83,51	92,38	7,90	9,46	-2,1564	5,5096	0,881*
CO (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>16</sup>	8,04	12,95	18,10	2,25	17,36	0,0856	-0,6845	0,994 <sup>ns</sup>

<sup>1</sup>DP: Desvio padrão; <sup>2</sup>CV%: Coeficiente de variação; <sup>3</sup>Cs: Coeficiente de assimetria; <sup>4</sup>Ck: Coeficiente de curtose; <sup>5</sup>Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde (\*) significativo em níveis de  $p < 0,05$  e (<sup>ns</sup>) não significativo. Quando significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada. Fracionamento da areia - <sup>6</sup>MG: muito grossa; <sup>7</sup>G: grossa; <sup>8</sup>M: média; <sup>9</sup>F: fina; <sup>10</sup>MF: muito fina. <sup>11</sup>DMPs: diâmetro médio ponderado seco; <sup>12</sup>DMPu: diâmetro médio ponderado úmido; <sup>13</sup>Macro: macroagregados; <sup>14</sup>Micro: microagregados; <sup>15</sup>IEA: índice de estabilidade de agregados; <sup>16</sup>CO: carbono orgânico.

Pela análise textural (Figura 2), considerando a classificação de Santos et al. (2018), o solo da área de estudo é considerado argiloso.

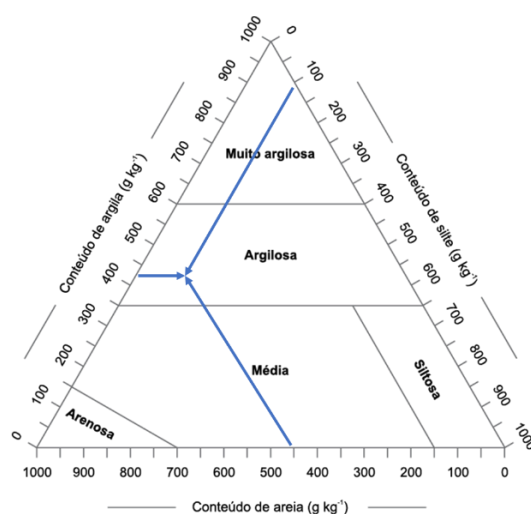


Figura 2. Classificação da textura do solo conforme Santos et al. (2018).

Quanto à distribuição granulométrica das partículas da fração areia, observou-se predominância de areia fina e média (Quadro 2), que juntas somam 83,8% da areia total, seguidos da fração muito fina (67,32 g kg<sup>-1</sup>), grossa (19,68 g kg<sup>-1</sup>) e muito grossa (0,98 g kg<sup>-1</sup>).

A partir do fracionamento da areia total (AT), pode-se ainda verificar se há predominância pronunciada de uma fração em relação a outra, por meio da relação entre AG/AF e AT/AF. De acordo com Filizola et al. (2019), valores mais próximos de 1,00 na relação indicam que não há predominância pronunciada de um teor sobre o outro. Quanto ao tamanho de partículas, quanto mais heterogêneo for o solo, maior será a possibilidade de reajustes (DONAGEMMA et al., 2016). Pode-se considerar que o solo da área desse estudo possui alta capacidade de ajustes de suas partículas granulométricas, visto que apresentou relações AG/AF de 0,44 e AT/AF de 1,44.

O DMP, estimativa da quantidade relativa de solo em cada classe de agregados, apresentou média variando de 3,60 a 4,30 mm (úmido e seco, respectivamente) (Quadro 2). Quanto maior a porcentagem de agregados retidos nas peneiras com maiores malhas, maior será o valor de DMP (FILIZOLA E LUIZ 2018; FACHIN E THOMAZ, 2020). O valor limite para DMP, proposto por Tisdall e Oades (1982), é de 0,5 mm, sendo que DMP muito próximos a esse valor são considerados pouco resistentes ao esboroamento e à dispersão de seus agregados.

Os agregados foram classificados como macroagregados (> 0,25 mm) e microagregados (< 0,25 mm) (EDWARDS E BREMNER, 1967), onde os macroagregados são a formação resultante de microagregados fracamente ligados (TOTSCHKE et al., 2018). Foi possível observar domínio da fração de macroagregados (90,47 %) sobre microagregados (9,53%) (Quadro 2).

O IEA, diferentemente do DMP, não considera a distribuição por classe de agregados, representando uma medida de agregação total do solo (FILIZOLA et al., 2017). Segundo Singh et al. (2019), a estabilidade agregada de um solo reflete sua resistência estrutural contra forças destrutivas (mecânicas ou físico-químicas). O IEA (Quadro 2) foi de 83,51 %, indicativo de melhor estrutura espacial.

O teor médio de carbono (12,95 g kg<sup>-1</sup>) (Quadro 2) foi classificado como baixo (< 13,90 g kg<sup>-1</sup>) (SOUSA E LOBATO, 2004), chegando a adequado em algumas áreas com teores acima de 17,40, atingindo máxima em 18,10 g kg<sup>-1</sup>.

Os índices de assimetria e curtose (Quadro 2) foram próximos de zero para a maioria dos atributos. Entretanto, apenas os atributos argila, frações de areia G, F e MF, DMPs e CO ajustaram-se à distribuição normal determinada pelo teste W. Apesar da condição de normalidade na distribuição dos dados não ser uma exigência para a análise geoestatística (CRESSIE, 1991), estes não podem apresentar assimetria muito acentuada (LOPES et al. 2020), pois a distribuição de dados com calda muito alongada pode comprometer a análise em estimativas via krigagem (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989).

Os modelos que mais se ajustaram aos parâmetros do semivariograma (Quadro 3) foram o esférico e o exponencial, com exceção do DMPs e IEA que se ajustaram aos modelos gaussiano e linear com patamar, sucessivamente. Para os atributos de solo, os modelos teóricos esférico e exponencial são os que mais comumente se ajustam (SOARES et al., 2018; BRITO FILHO et al., 2018; LOPES et al., 2020). De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), enquanto o modelo exponencial apresenta-se melhor a fenômenos erráticos em pequena escala, o modelo esférico descreve propriedades com alta continuidade espacial.

Quadro 3. Parâmetros para o ajuste dos semivariogramas dos atributos estudados.

Atributo	Modelo	Semivariograma			Validação cruzada		Dependência espacial	
		C <sub>0</sub> <sup>1</sup>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> <sup>2</sup>	A <sup>3</sup>	a <sup>4</sup>	RMSE <sup>5</sup>	IDE <sup>6</sup>	GDE <sup>7</sup>
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	Esférico	0,00	21683,93	441,95	1,04	74,14	0,00	Forte
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Esférico	0,00	1436,27	359,10	1,03	20,71	0,00	Forte
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Esférico	0,00	12668,46	472,05	1,02	57,82	0,00	Forte
MG (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>8</sup>	Esférico	0,24	1,64	789,25	0,99	0,87	14,80	Forte
G (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>9</sup>	Exponencial	0,00	48,64	304,55	0,88	5,77	0,00	Forte
M (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>10</sup>	Exponencial	0,00	2059,24	454,80	0,99	30,16	0,00	Forte
F (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>11</sup>	Esférico	0,00	10255,02	465,03	1,04	51,25	0,00	Forte
MF (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>12</sup>	Esférico	85,02	318,95	893,94	0,97	11,81	26,66	Moderado
DMPs (mm) <sup>13</sup>	Gaussiano	0,11	0,14	249,6	0,62	0,36	78,42	Fraco
DMPu (mm) <sup>14</sup>	Exponencial	0,00	0,27	160,41	0,62	0,49	0,00	Forte
Macro (%) <sup>15</sup>	Esférico	0,06	12,25	346,06	1,00	2,15	0,47	Forte
Micro (%) <sup>16</sup>	Esférico	0,06	12,25	346,06	0,99	2,18	0,47	Forte
IEA (%) <sup>17</sup>	Linear com patamar	48,61	63,07	238,48	0,80	7,27	77,07	Fraco
CO (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>18</sup>	Exponencial	0,01	5,45	446,84	1,00	1,72	0,13	Forte

<sup>1</sup>C<sub>0</sub>: efeito pepita; <sup>2</sup>C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>: patamar; <sup>3</sup>A: alcance (m); <sup>4</sup>a: coeficiente angular; <sup>5</sup>RMSE: raiz quadrada do erro médio; <sup>6</sup>IDE: índice de dependência espacial; <sup>7</sup>GDE: grau de dependência espacial. Fracionamento da areia - <sup>8</sup>MG: muito grossa; <sup>9</sup>G: grossa; <sup>10</sup>M: média; <sup>11</sup>F: fina; <sup>12</sup>MF: muito fina. <sup>13</sup>DMPs: diâmetro médio ponderado seco; <sup>14</sup>DMPu: diâmetro médio ponderado úmido; <sup>15</sup>Macro: macroagregados; <sup>16</sup>Micro: microagregados; <sup>17</sup>IEA: índice de estabilidade de agregados; <sup>18</sup>CO: carbono orgânico.



O ajuste do modelo matemático aos semivariogramas experimentais foi realizado por meio dos critérios de seleção da técnica da validação cruzada, considerando maior coeficiente angular ( $\alpha$ ) e menor erro quadrático médio (RMSE). Os atributos apresentaram coeficiente angular acima de 0,62 (Quadro 3), indicando que os semivariogramas apresentam ajustes adequados, capazes de captar as estruturas de variação espacial do meio amostral, além de garantir bom desempenho da interpolação pela krigagem ordinária (AZEVEDO, 2004). Quanto mais próximos de 1 os valores da validação cruzada, maior a confiabilidade e maior a eficiência do modelo apresentado (ALHO et al., 2014).

Os valores de efeito pepita (Quadro 3) foram próximos a zero para quase todos os atributos, exceto fração de areia MF (85,02) e IEA (48,61), o que refletiu no grau de dependência espacial classificado como moderado e fraco para estes atributos, respectivamente. O DMPs, apesar de apresentar efeito pepita próximo a zero (0,11), resultou em modelo de dependência espacial fraco devido ao baixo valor do patamar (0,14). Os demais atributos apresentaram forte GDE, segundo os critérios propostos por Cambardella et al. (1994).

De acordo com Lima et al. (2010), maiores precisões podem ser obtidas na estimativa de locais não amostrados quanto maior for a dependência espacial da variável de estudo. Variáveis que apresentam forte dependência espacial estão relacionadas a propriedades intrínsecas do solo (fatores de formação), enquanto dependência espacial moderada deve-se à homogeneização do solo e dependência espacial fraca às propriedades extrínsecas (CAMBARDELLA et al. 1994).

Os maiores alcances (Quadro 3) foram observados para as frações de areia MF (893,94 m) e MG (789,25 m), demonstrando que estes atributos apresentam menor variabilidade e maior continuidade espacial, permitindo melhor precisão na estimativa em locais não amostrados. O alcance representa a distância máxima entre dois pontos para que estes estejam correlacionados espacialmente, indicando que pontos localizados numa área de raio igual ou menor ao alcance são mais homogêneos entre si (LOPES et al 2020). Os valores de alcance variaram entre 160,41 e 893,94 m, indicando que a distância utilizada para coleta das amostras de solo neste estudo foi adequada para captar a variabilidade espacial dos atributos avaliados.

Nos mapas de variabilidade dos teores de areia, silte e argila (Figura 3), os valores médios de cada atributo foi agrupado em cinco classes de cores, o que permitiu verificar a variabilidade granulométrica ao longo da área. O comportamento dos teores de argila e silte foram contrários aos da fração areia. Segundo Liu et al. (2020), a textura do solo frequentemente apresenta alta heterogeneidade espacial, sendo uma importante propriedade que controla a maioria dos processos físicos, químicos e biológicos. Apesar da sua alta variabilidade, a granulometria do solo é uma das características físicas mais estáveis (PARAHYBA et al. 2019), apresentando pouca ou nenhuma alteração ao longo do tempo.

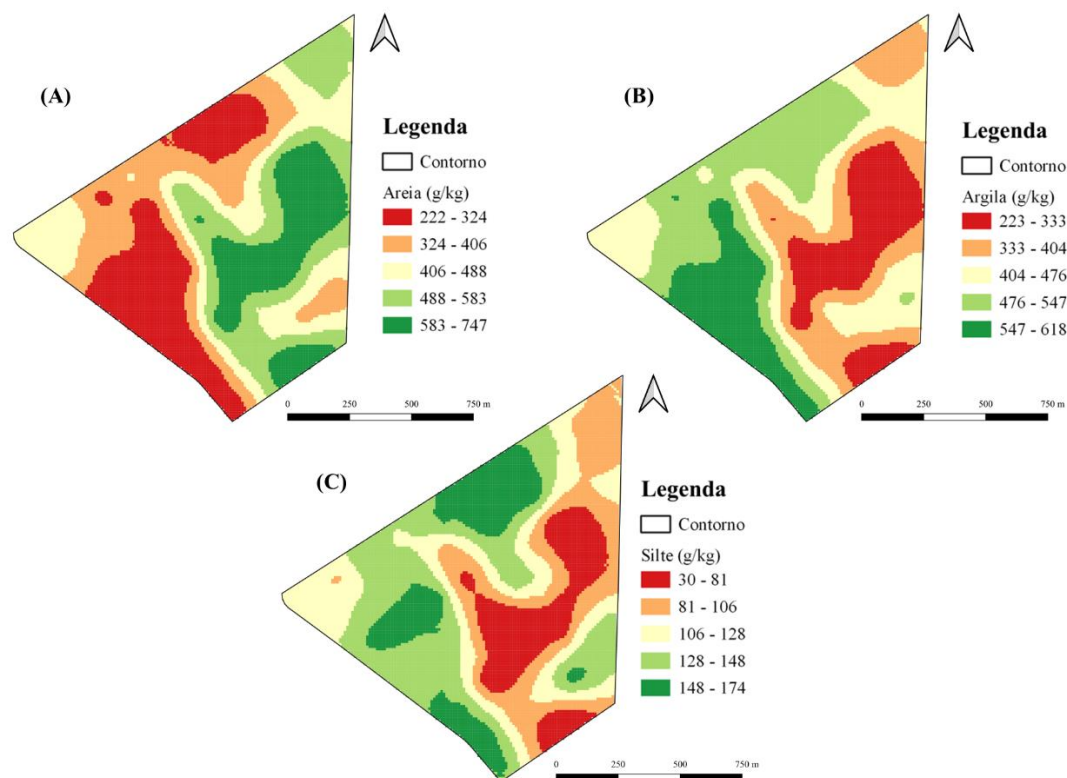


Figura 3. Mapas de variabilidade dos teores de areia total (A), argila (B) e silte (C) do solo.

A distribuição espacial do fracionamento da areia (Figura 4) permitiu verificar a elevada concentração das frações média e fina, seguidas da fração muito fina, principalmente nas regiões com maior concentração de areia total (Figura 3). Os altos valores de areia média e fina promovem distribuição capilar de poros de menor diâmetro, capazes de permitir maior retenção e armazenamento de água entre

as partículas, e menor para por percolação (PARAHYBA et al. 2019). De acordo com Donagemma et al. (2016), para um mesmo teor de argila, quanto maior o teor de areia fina mais o solo tende a reter água.

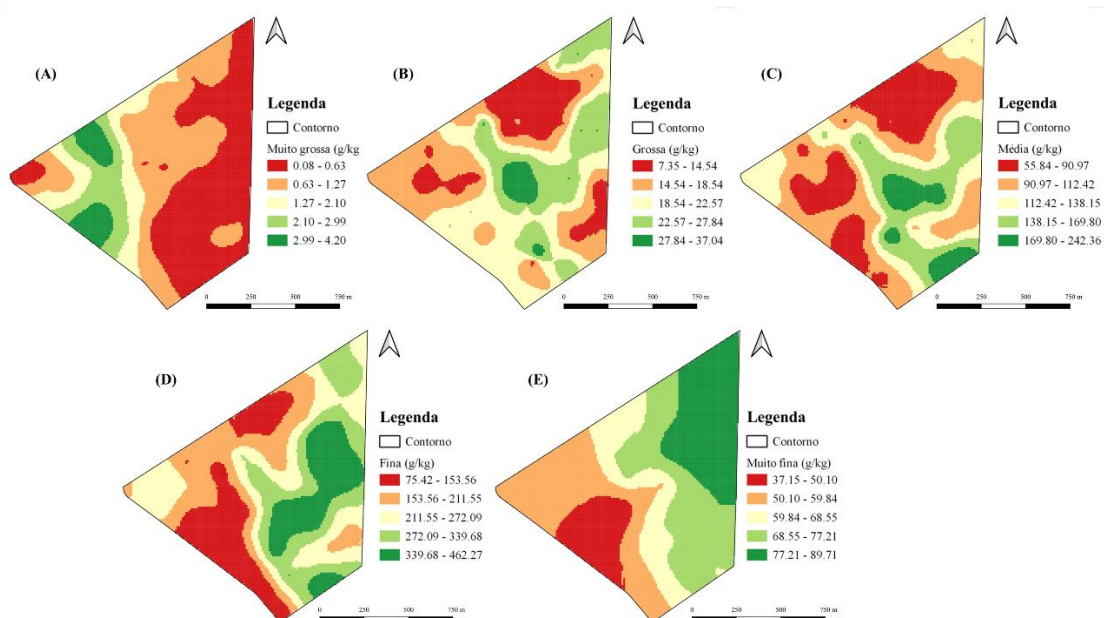


Figura 4. Mapas do fracionamento da areia em muito grossa (A), grossa (B), média (C), fina (D) e muito fina (E).

O fracionamento da areia em diversas classes de tamanho permite conhecer melhor a textura do solo, compreender melhor seu comportamento e permitir diferenciá-los frente ao seu uso e manejo, entretanto, esse parâmetro não tem sido utilizado na classificação (FILIZOLA et al., 2017).

Segundo Donagemma et al. (2016), determinadas distribuições no tamanho das partículas do solo podem reduzir o espaço poroso, pois, quanto maior a heterogeneidade granulométrica, mais os espaços vazios entre grãos maiores podem ser preenchidos por partículas menores, provocando o fenômeno de empacotamento.

Os mapas de variabilidade dos atributos do solo apresentados na Figura 5, apresentam elevada similaridade desses atributos com a variabilidade granulométrica da área.

O DMP, estimativa da quantidade relativa de solo em cada classe de agregados, apresentou variação entre 4,14 e 4,88 mm em via seca (Figura 5A), e entre 2,03 e 4,35 mm em via úmida (Figura 5A). Conforme já discutido anteriormente, solos com DMP acima de 0,5 mm são considerados relativamente

resistentes ao esboroamento e à dispersão dos agregados. As regiões com concentração de maior DMP, de maneira geral, correspondem às regiões com maior concentração dos teores de argila e silte (Figuras 3B e 3C).

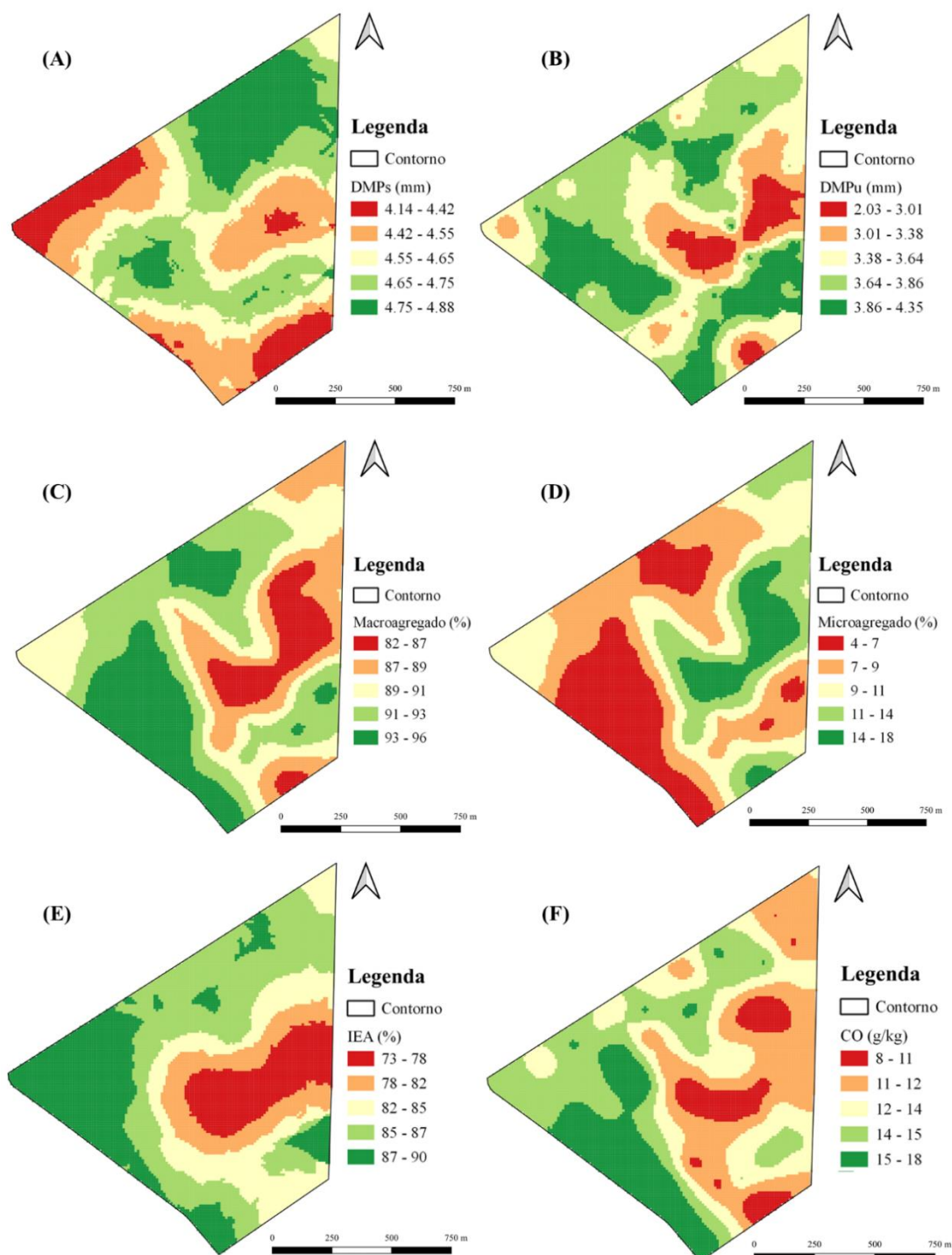


Figura 5. Mapas dos atributos diâmetro médio ponderado seco (A), diâmetro médio ponderado úmido (B), macroagregados (C), microagregados (D), índice de estabilidade dos agregados (E) e carbono orgânico (F) do solo.

A alta concentração de macroagregados (Figura 5C), corresponde às regiões com maior concentração dos teores de argila (Figura 3B), enquanto os microagregados (Figura 5D) correspondem às regiões com maior concentração dos teores de areia (Figura 3A).

A formação do microagregados ocorre primeiramente, pela combinação de partículas do solo com íons metálicos, que servirão como blocos para a formação dos macroagregados, colados por raízes e hifas que, por serem agentes ligantes temporários, se decompõe novamente em microagregados quando o solo sofre perturbações (RAN et al., 2020).

A agregação, arranjo espacial de partículas do solo (MONDAL E CHAKRABORTY, 2022), é caracterizada pela distribuição do tamanho, quantidade e estabilidade dos agregados (FILIZOLA E LUIZ, 2018), sendo esta última uma medida da resistência do solo contra forças destrutivas (SINGH et al., 2019).

O índice de estabilidade de agregados (Figura 5E) apresentou teores abaixo de 85% nas regiões de maior concentração de areia (Figura 3A), o que pode estar associado ao baixo teor de carbono (menos de 14%) (Figura 5F) nestas mesmas áreas. Como consequência, regiões com menor concentração de argila não forma agregados, sendo mais suscetível a erosão.

De acordo com Edwards e Bremner (1967), o aumento da estabilidade dos agregados está intimamente relacionado com a capacidade da matéria orgânica de aderir-se às partículas minerais do solo. Assim, as alterações e distribuição espacial da estabilidade do agregado pode afetar a proteção do carbono do solo, uma vez que essa estabilidade está fortemente relacionada às mudanças de concentração da matéria orgânica do solo (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018).

Regiões com predominância de teores de carbono acima de 14% (Figura 5F), correspondem àquelas com IEA maiores que 95% (Figura 5E), devido o carbono orgânico ter efeito na ligação do solo, aumentando a estabilidade dos agregados, e consequentemente, reduzindo sua erosão (SINGH et al., 2019; AJAYI et al., 2021).

Apesar dos valores de IEA observados na área de estudo serem elevados (acima de 70%), o teor de carbono foi considerado baixo ( $< 13,90 \text{ g kg}^{-1}$ ) para mais de 50% da área, principalmente às regiões correspondentes a teores de argila abaixo de  $475 \text{ g kg}^{-1}$ . Isso mostra que o sistema de semeadura direta tem sido eficiente na

manutenção da estrutura do solo, porém, não tem assegurado índices adequados de carbono, que podem ser incrementados com a adoção de práticas de manejo como a rotação de culturas, transformando o manejo da área em sistema plantio direto.

De acordo com Cortez et al. (2018), o grande desafio da sustentabilidade nos sistemas de produção está na quantidade e qualidade dos resíduos culturais provenientes da semeadura direta.

A adoção da semeadura direta traz inúmeros benefícios na manutenção da qualidade do solo como melhorias na macroporosidade e estabilidade de agregados (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018; VELOSO et al., 2019), aumento na concentração de carbono orgânico, melhorias na distribuição de poros, aumento da matéria orgânica que fornece elasticidade às propriedades do solo, ciclagem de nutriente (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018), entre outros.

A distribuição espacial mostrou-se uma ferramenta que pode ser utilizada para o monitoramento do comportamento da granulometria, dos atributos físicos e do carbono no solo. Atrelado a isso, é essencial o acompanhamento e avaliações da qualidade estrutural das áreas produtivas, possibilitando a orientação de práticas de uso e manejo sustentável dos sistemas de produção agrícola.

Dessa forma, necessita-se de um entendimento mais amplo em relação a multifuncionalidade dos sistemas de cultivo, sendo fundamental a elaboração de planos alternativos de gestão inteligentes, que permitam planejamento e intervenções especializadas e localizadas, considerando as particularidades existentes em cada área.

## **2.4 Conclusões**

A variabilidade granulométrica interfere na distribuição de macro e microagregados, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados e carbono orgânico do solo.

O sistema de semeadura direta é eficiente na manutenção da estrutura do solo, porém, não assegura índices adequados de carbono orgânico.

## 2.5 Referências

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, p.246-254, 2014.

AJAYI, A. E.; TASSINARI, D.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; FALOYE, O. T.; ABAYOMI, F.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N. Long-term no tillage management impact on soil hydro-physical properties in coffee cultivation. **Geoderma**, v.404, 2021.

ARAÚJO, A. M. S. S.; MENEZES, A. S.; DE ALENCAR, T. L.; DA SILVA, C. P.; ASSIS JÚNIOR R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; DE ALMEIDA, B. G.; MOTA, J. C. A. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: Variability and relation with granulometry. **Catena**, v.166, p.290-297, 2018.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Palotti, 2004. 100p.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v.326, p.164-200, 2018.

BRITO FILHO, E. G.; MANTOVANELLI, B. C.; BRITO, W. B. M.; DA SILVA, J. F.; CAMPOS, M. C. C.; DA CUNHA, J. M. Variabilidade espacial da textura do solo em área de terra preta arqueológica sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 17, n.1, p.139-143, 2018.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CORTEZ, J. W.; DA SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; ARCOVERDE, S. N. S.; OLSZEWSKI, N. Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. **Revista Agrarian**, v.11, n.42. p.343-351, 2018.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York, John Wiley, 1991. 900p.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1003-1020, 2016.

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Microaggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.18, n.1, p.64-73, 1967.

ESTADOS UNIDOS. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Survey Division Staff. **Soil survey manual**. Washington, DC, 2017. 639 p. (Agriculture Handbook, n. 18).

FACHIN, P. A.; THOMAZ, E. L. A escarificação do solo em sistema de plantio direto afeta a estabilidade de agregados e o teor de matéria orgânica em latossolo vermelho. **Caminhos de Geografia**, v.21, n.77, p.18-28, 2020.

FILIZOLA, H. F.; FONTANA, A.; DONAGEMMA, G. K.; SOUZA, M. D. DE; BORTOLON, E. S. O.; BORTOLON, L. **Qualidade física de solos influenciada pelo uso e manejo na região de Guaraí-TO**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017. 34 p.

FILIZOLA, H. F.; LUIZ, A. J. B. Tempo de cultivo contínuo de cana-de-açúcar e influência nas características físicas e carbono orgânico de latossolos vermelhos distróficos em Guaíra/SP. **Revista de estudos ambientais**, v.20, n.2, p.21-36, 2018.

FILIZOLA, H. F.; FONTANA, A.; DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; LUIZ, A. J. B.; DE SOUZA, M. D. **Diagnóstico de atributos físico-hídricos dos solos de textura arenosa em áreas de intensificação agrícola no bioma Cerrado**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 74 p.



GELAIN, E.; BOTTEGA, E. L.; MOTOMIYA, A. V. DE A.; DE OLIVEIRA, Z. B. Variabilidade espacial e correlação dos atributos do solo com produtividade do milho e da soja. **Nativa**, v.9, n.5, p.536-543, 2021.

GEORGE, T. R.; BHAT, J. A.; WANI, M. A.; MAQBOOL, M.; RAMZAN, S.; YADAV, R. Mapping of spatial variability of soil texture and macronutrients in Wangath watershed, Ganderbal District of Jammu and Kashmir Using GIS. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v.10, n.2, p.628-642, 2021.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560p

KOPPEN, W. P. **Climatologia, com un estúdio de los climas de la tierra**. México : Fondo de Cultura Econômica, 1948. 478p.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, v.34, p.127-136, 2010.

LIU, F.; ZHANG, G. L.; SONG, X., LI, D.; ZHAO, Y.; YANG, J.; WU, H.; YANG, F. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China. **Geoderma**, v.361, 2020.

LOPES, K. A. L.; PINTO JUNIOR, F. F.; AGUIAR, F. I. S.; SOUSA, A. E. S; DE OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S. Diferentes densidades amostrais na caracterização da variabilidade espacial de atributos granulométricos de um Argissolo amarelo distrocoeso típico. **Cultura Agronômica**, v.29, n.1, p. 50-60, 2020.

OKOLO, C. C.; GEBRESAMUEL, G.; ZENEBE, A.; HAILE, M.; EZE, P. N. Accumulation of organic carbon in various soil aggregate sizes under different land use systems in a semi-arid environment. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.297, 2020.

PARAHYBA, R. B. V.; DE ARAÚJO, M. S. B.; DE ALMEIDA, B. G.; ROLIM NETO, F. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CALDAS, A. M. Water retention capacity in Arenosols and Ferralsols in a semiarid area in the state of Bahia, Brazil. **Anais da academia Brasileira de ciências**, v.91, n.4, 2019.

PESSOA, M. M. C.; NUNESM L. A. P. L.; SOUSA, R. S.; ARAÚJO, A. S. F.; IBIAPINA, T. V. B.; SALVIANO, A. A. C. Physical attributes of yellow oxisol under different monocultures in the savanna of PiauÍ state, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, n.4, e5576, 2018.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

RAN, Y. WU, S.; ZHU, K.; LI, W.; LIU, Z.; HUANG, P. Soil types differentiated their responses of aggregate stability to hydrological stresses at the riparian zones of the Three Gorges Reservoir. **Journal of Soils and Sedimentes**, v.20, p.951-962, 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.

SARKER, J. R, SINGH, B. P., COWIE, A. L., FANG, Y. Agricultural management practices impacted carbon and nutrient concentrations in soil aggregates, with minimal influence on aggregate stability and total carbon and nutrient stocks in contrasting soils. **Soil and Tillage Research**, v.178, p.209-223, 2018.

SEIDEL, E. P., SCHNEIDER, A. P. H., SUSTAKOWSKI, M. C., MATTÉ, L. M. Soybean Yield, Soil Porosity and Soil Penetration Resistance under Mechanical Scarification in No-Tillage System. **Journal of Agricultural Science**, v.10, p.53-66, 2018.

SINGH, A. K.; KUMAR, S.; KALAMBUKATTU, J. G. Assessing aggregate stability of soils under various land use/land cover in a watershed of Mid-Himalayan Landscape. **Eurasian Journal of Soil Science**, v.8, n.2, p.131-143, 2019.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; FRANCISCON, U.; CASTIONE, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias**, v.58, n.4, p.434-441, 2015.

SOARES, M. D. R. S.; CAMPOS, M. C. C.; DA CUNHA, J. M.; DE SOUZA, Z. M.; DE OLIVEIRA, I. A.; DE AQUINO, R. E.; MANTOVANELLI, B. C.; OLIVEIRA, L. S. Variabilidade espacial do estoque de carbono e atributos físicos do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Revista Ambiente & Água**, v.13, n.6, 2018.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

SURAJIT, M.; CHAKRABORTY, D. Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. **Geoderma**, v.405, 2022.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília, DF : Embrapa, 2017. 574 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.33, n.2, p.141-163, 1982.

TOTSCHKE, K. U., AMELUNG, W., GERZABEK, M. H., GUGGENBERGER, G., KLUMPP, E., KNIEF, C., KÖGEL-KNABNER, I. Microaggregates in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.181, p.104–136, 2018.

VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, v.190, p.139–146, 2019.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54, 2000.

### 3 ARTIGO II

#### **Distribuição espacial de atributos físicos indicativos de compactação do solo**

##### **Resumo**

Mudanças na qualidade do solo podem ser identificadas por meio de seus atributos físicos, capazes de identificar áreas em processo de compactação do solo. Dessa forma, objetivou-se avaliar a distribuição espacial dos atributos físicos do solo indicativos de compactação, em semeadura direta. O trabalho foi realizado em fazenda comercial, localizada em Ponta Porã/MS, cultivada sob semeadura direta. Os dados foram coletados por meio de grade amostral, com 73 pontos, sendo 1 amostra a cada 1,7 ha. Foram avaliados os atributos de solo: resistência à penetração, densidade, porosidade total, macro e microporosidade. Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e geoestatística, e os mapas de variabilidade elaborados por meio dos interpoladores krigagem e IDW. A variabilidade da resistência do solo à penetração, densidade, porosidade total e microporosidade são indicadores de compactação do solo, e refletem a variabilidade textural da área. A área apresentou porosidade total, densidade e resistência do solo à penetração adequados, indicando não haver compactação. Apesar do sistema de semeadura direta ser eficiente na manutenção da estrutura do solo, não assegura índices adequados de macroporosidade.

Palavras-chave: Resistência a penetração, densidade do solo, porosidade do solo, textura, geoestatística.

##### **Abstract**

#### **Spatial distribution of physical attributes indicative of soil compaction**

Changes in soil quality can be identified through its physical attributes, capable of identifying areas in the process of soil compaction. Thus, the objective was to evaluate the spatial distribution of soil physical attributes indicative of compaction, in direct seeding. The work was carried out in a commercial farm, located in Ponta

Porã/MS, cultivated under direct seeding. Data were collected through a sampling grid, with 73 points, with 1 sample every 1.7 ha. Soil attributes were evaluated: resistance to penetration, density, total porosity, macro and microporosity. Data were analyzed using descriptive statistics and geostatistics, and variability maps prepared using kriging and IDW interpolators. The variability of soil resistance to penetration, density, total porosity and microporosity are indicators of soil compaction, and reflect the textural variability of the area. The area showed adequate total porosity, soil density and resistance to penetration, indicating that there was no compaction. Although the direct seeding system is efficient in maintaining the soil structure, it does not ensure adequate macroporosity indices.

Keywords: Penetration resistance, soil density, soil porosity, texture, geostatistics.

### 3.1 Introdução

Mudanças na qualidade do solo podem ser identificadas por meio de seus atributos físicos, como a resistência do solo à penetração das raízes, densidade, macro e microporosidade, e porosidade total do solo (Torres *et al.*, 2022), que possibilitam a identificação de áreas com restrições físicas causadas pelo trânsito de máquinas agrícolas.

A estrutura do solo, quando alterada negativamente, pode afetar atributos como densidade, porosidade, distribuição do diâmetro dos poros, armazenamento e disponibilidade de água para as plantas, dinâmica da água na superfície e no perfil do solo e esgotamento da estrutura do solo, resultando no processo de compactação do solo, ou seja, na consolidação física das partículas do solo contra uma força aplicada (Ghosh *et al.*, 2020; de Oliveira *et al.*, 2021; Mantovanelli *et al.*, 2022).

A compactação do solo promove um impedimento mecânico ao crescimento radicular, que pode ser simulado de forma rápida e econômica, além de gerar uma série de observações que permitem analisar a resolução espacial estrutural do solo (Parahyba *et al.*, 2019).

Os solos brasileiros, em geral, são intensamente agricultáveis, apresentando baixa qualidade física, o que exige uma avaliação complexa, abordando ferramentas e técnicas que possam descrever a sua variabilidade e capacidade em sustentar a

produção agrícola. Isso reflete a necessidade de estudos que caracterizem os impactos exercidos sobre a variabilidade existente, caracterizando assim, as possíveis limitações nas regiões produtivas que necessitam de medidas que atenuem o processo de degradação dos solos (Mantovanelli *et al.*, 2022).

O estudo dos indicadores físicos de qualidade do solo permite avaliar o efeito das práticas de manejo adotadas, garantindo a sustentabilidade do sistema produtivo e compreendendo seu processo, por meio da identificação de atributos sensíveis as variações do uso do solo.

Portanto, objetivou-se avaliar a distribuição espacial dos atributos físicos do solo indicativos de compactação, em semeadura direta.

### 3.2 Material e Métodos

O trabalho foi realizado em uma fazenda comercial, localizada no município de Ponta Porã – MS, cultivada no sistema de sequeiro e adota a semeadura direta a mais de 30 anos. O local situa-se em na latitude de 22°22' S, longitude de 55°10' W e altitude média de 440 m. O clima é do tipo tropical úmido com inverso seco - Cwa (KÖPPEN, 1948). O solo da área é um Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS *et al.*, 2018), com relevo suavemente ondulado.

A área experimental possui 120,6 hectares, cultivados com o predomínio do sistema de sucessão soja e milho safrinha, em semeadura direta a mais de 30 anos. Os insumos utilizados estão descritos no Quadro 1. O uso de herbicida, inseticida e fungicida foram utilizados conforme recomendação técnica.

Quadro 1. Histórico de culturas e de aplicação de fertilizantes e corretivos na área de estudo.

Ano agrícola	Safr	Cultura	Correção/Adubação		
			Fonte	Quantidade (kg/ha)	Modo de aplicação
2017/18	Outono	Milho 2ª safra	NPK <sup>1</sup> 16-16-16	160	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	300	Linha
2018/19	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	160	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	297	Linha
2019/20	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	300	Linha
2020/21	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	320	Linha

2021/22	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	310	Linha

<sup>1</sup>Nitrogênio-Fósforo-Potássio.

O solo da área possui textura argilosa, de acordo com a classificação de Santos et al. (2018), com teor médio de 43% de argila. Os mapas de variabilidade dos teores de areia, argila e silte encontram-se na Figura 1.

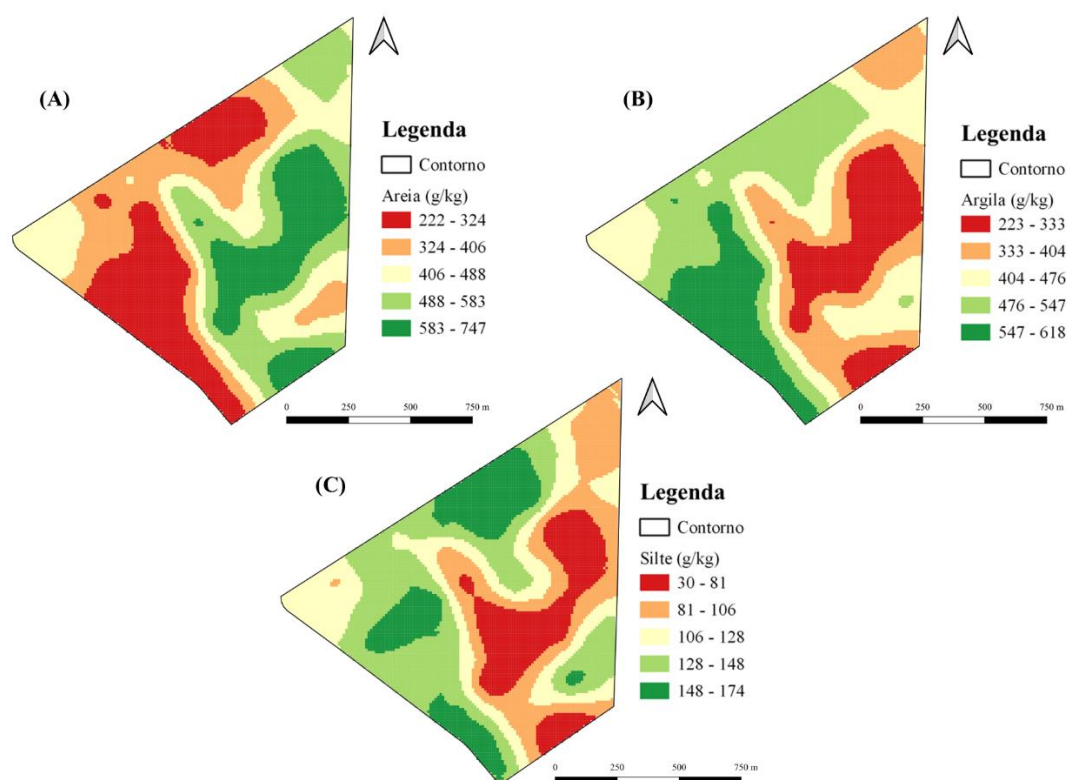


Figura 1. Mapas de variabilidade dos teores de areia total (A), argila (B) e silte (C) do solo.

### Plano de amostragem de solo

Para a espacialização das coletas de atributos físicos do solo na área foi gerado grade amostral (Figura 2), em que 60 pontos foram alocados de forma regular com um ponto a cada 2,0 hectares (143,61 x 143,61 m) somados 13 pontos amostrais (o equivalente a aproximadamente 20% dos pontos da grade amostral original), alocados de forma aleatória conforme a variabilidade espacial da produtividade observada nos mapas de colheita de milho e soja para os anos de 2018 e 2019 .



Portanto, a grade amostral adotada possuiu 73 pontos amostrais na densidade de 01 amostra a cada 1,7 hectares.

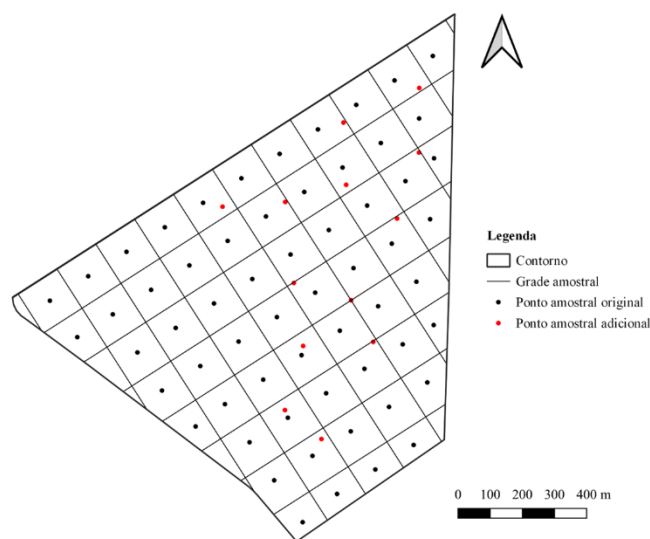


Figura 2. Grade regular com ponto amostral original e ponto amostral adicional para a coleta de amostras de solo.

### Avaliações

Para determinação dos atributos de solo densidade (Ds), Porosidade Total (Pt), macro e microporosidade, foram coletadas três subamostras por ponto amostral, e para a resistência do solo à penetração (RP) foram consideradas cinco subamostras, nas camadas de 0,00 – 0,10, 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,30 e 0,30 – 0,40 m.

A RP foi determinada por meio de um penetrômetro eletrônico acoplado a um quadriciclo, denominado de SoloStar (FALKER, 2010), modelo PLG5500. A umidade do solo foi determinada para caracterização, por meio do método gravimétrico, proposto por Teixeira et al. (2017), conforme Quadro 2, e indica que no momento da coleta de dados de resistência à penetração estava acima da faixa friável. Os demais atributos foram analisados por meio da metodologia proposta por Teixeira et al. (2017).

Quadro 2. Teor de água do solo (%) no momento da determinação da RP, nas camadas avaliadas.

Camada (m)	Teor de água (%)
0,00 – 0,10	25,37
0,10 – 0,20	26,38

0,20 – 0,30	28,74
0,30 – 0,40	27,45

---

### **Análise de dados**

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística exploratória (estatística descritiva), obtendo-se medidas de posição (mínimo, média e máximo) e de dispersão (desvio padrão, coeficientes de variação (CV%), assimetria e de curtose). Com base nos valores de assimetria ( $C_s$ ) obtidos, visando caracterizar quanto e como a distribuição de frequências se afasta da simetria, foram classificados como:  $C_s = 0$  distribuição simétrica,  $C_s > 0$  distribuição assimétrica à direita e  $C_s < 0$  distribuição assimétrica à esquerda. Os valores de curtose ( $C_k$ ), que expressam a dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, geralmente utilizada a curva normal, foram classificados em:  $C_k = 0$  distribuição mesocúrtica,  $C_k < 0$  distribuição platicúrtica e  $C_k > 0$  distribuição leptocúrtica.

A dispersão relativa dos dados, fornecida pelos valores de coeficiente de variação (CV%), foram classificadas como baixa quando CV for inferior a 10% (alta precisão), média quando o CV estiver entre 10% e 20% (boa precisão), alta de 20% a 30% (baixa precisão) e muito alta com CV maior que 30% (baixíssima precisão) (PIMENTEL-GOMES E GARCIA, 2002).

A hipótese de normalidade foi testada pelo teste de Shapiro e Wilk ( $W$ ,  $p < 0,05$ ), sendo considerados como distribuição normal os dados que obtiveram  $p$ -valor  $> 0,05$ .

A análise geoestatística foi realizada por meio de semivariogramas experimentais (VIEIRA, 2000), sendo os ajustes realizados por meio de modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano e linear). A determinação dos modelos foi ajustada com base no melhor coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e avaliados pela técnica de validação cruzada, por meio do melhor coeficiente angular e menor erro quadrático médio (RMSE). Do ajuste de um modelo matemático aos dados, foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita ( $C_0$ ), contribuição ( $C_1$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ) e alcance ( $a$ ). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado por meio da equação:  $IDE = [C_0 / (C_0 + C_1)] * 100$ . Com base nos IDE, foi classificado o grau de dependência espacial (GDE) como: forte, para  $IDE \leq 25\%$ ; moderado, para IDE entre 25 e 75%; e fraco, para  $IDE > 75\%$  (CAMBARDELLA et al., 1994).

A espacialização foi procedida por meio da construção dos mapas temáticos de interpolação por krigagem ou inverso do quadrado da distância (IDW) (para os atributos que não apresentaram ajuste adequado do semivariograma).

### 3.3 Resultados e Discussão

A resistência do solo à penetração (RP) apresentou valores médios que variaram de 0,92 a 2,14 MPa, nas camadas 0,00 – 0,10 e 0,20 – 0,30 m, respectivamente, com coeficiente de variação classificado como alto (PIMENTEL-GOMES E GARCIA, 2002), para a primeira camada (0,00 – 0,10 m), e médio para as demais profundidades, o que reflete a variação espacial da área. De modo geral, o CV foi maior na camada 0,00 – 0,10 m para a maioria dos atributos, o que pode ser explicado pelas camadas mais superficiais serem as que mais sofrem efeito da ação antrópica, resultando em coeficiente mais elevados.

Quadro 3. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo nas camadas 0,00 – 0,10, 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,30 e 0,30 – 0,40 m, da área em estudo.

Atributo	Mínimo	Média	Máximo	Dp <sup>1</sup>	CV(%) <sup>2</sup>	Cs <sup>3</sup>	Ck <sup>4</sup>	W <sup>5</sup>
0,00 a 0,10 m								
RP (MPa) <sup>6</sup>	0,42	0,92	2,45	0,30	32,89	1,8988	7,7402	0,93*
Ds (kg dm <sup>-3</sup> ) <sup>7</sup>	0,93	1,42	1,80	0,14	9,65	-0,3995	1,6789	0,98*
Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>8</sup>	0,35	0,46	0,63	0,06	12,40	0,4208	-0,0553	0,99 <sup>ns</sup>
Macro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>9</sup>	0,02	0,09	0,29	0,05	59,68	1,2511	2,2666	0,95*
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>10</sup>	0,28	0,36	0,44	0,04	9,85	-0,0846	-0,1812	0,99 <sup>ns</sup>
0,10 a 0,20 m								
RP (MPa)	1,36	1,94	2,77	0,26	13,58	0,4843	0,6731	0,99 <sup>ns</sup>
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	1,28	1,57	1,82	0,11	7,15	-0,1007	-0,4885	0,99 <sup>ns</sup>
Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,32	0,40	0,48	0,04	10,36	0,2885	-0,8797	0,98 <sup>ns</sup>
Macro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,00	0,04	0,11	0,02	57,19	0,5218	-0,2589	0,99 <sup>ns</sup>
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,27	0,36	0,46	0,04	11,94	0,1360	-0,7608	0,99 <sup>ns</sup>
0,20 a 0,30 m								
RP (MPa)	1,76	2,14	2,88	0,24	11,24	0,9170	0,7830	0,97*
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	1,26	1,51	1,75	0,13	8,47	-0,1965	-1,1180	0,98*
Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,32	0,40	0,49	0,04	10,29	0,0115	-0,6187	0,99 <sup>ns</sup>
Macro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,01	0,05	0,12	0,03	53,91	0,8832	0,5455	0,97*
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,27	0,36	0,43	0,04	11,98	-0,3024	-0,9107	0,98 <sup>ns</sup>
0,30 a 0,40 m								
RP (MPa)	1,53	1,97	2,85	0,24	12,23	1,3379	2,9632	0,951*
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	1,28	1,49	1,68	0,11	7,35	-0,1500	-1,2424	0,978*
Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,34	0,41	0,50	0,04	9,62	0,3674	-0,5082	0,990 <sup>ns</sup>
Macro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,00	0,05	0,14	0,03	55,96	0,9221	0,7128	0,969*
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,27	0,36	0,44	0,04	10,99	-0,0381	-0,7345	0,993 <sup>ns</sup>

<sup>1</sup>DP: Desvio padrão; <sup>2</sup>CV%: Coeficiente de variação; <sup>3</sup>Cs: Coeficiente de assimetria; <sup>4</sup>Ck: Coeficiente de curtose; <sup>5</sup>Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde (\*) significativo em níveis de  $p < 0,05$  e (ns) não significativo. Quando significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada. <sup>6</sup>RP: resistência à penetração; <sup>7</sup>Ds: densidade do solo; <sup>8</sup>Pt: porosidade total; <sup>9</sup>Macro: macroporosidade; <sup>10</sup>Micro: microporosidade.

Menor RP na camada de 0,00 – 0,10 m em comparação com as demais camadas pode estar relacionada com a deposição e manutenção da palha dos resíduos da cultura na superfície, além de maior atuação do sistema radicular das plantas. Em contrapartida, a RP foi maior na camada 0,20 – 0,30 m devido à carga de pressão dos rodados, efeito do trânsito de máquinas agrícolas.

Na literatura, o valor crítico da RP, varia de 2,0 a 4,0 MPa, podendo ser descritos a partir de 2,0 MPa para sistema de preparo convencional (MORAES et al., 2014) e de 3,0 a 4,0 MPa para sistemas de preparo mínimo e semeadura direta, considerados conservacionistas (VAZ et al., 2011; BETIOLI JÚNIOR et al., 2012; GUIMARÃES et al., 2013).

Dessa forma, a RP da área de estudo (Quadro 3) encontra-se abaixo o nível crítico (3,0 a 4,0 MPa), que prejudicaria o crescimento radicular, considerando ser manejada sob semeadura direta.

Houve grande amplitude entre os valores máximos e mínimos de RP em todas as camadas, o que reforça a variabilidade existente na área, indicativo da necessidade de manejo diferenciado quando este for necessário.

A densidade do solo (Ds) apresentou menor variação entre as camadas, com valores médios entre 1,42 e 1,57 kg dm<sup>-3</sup>, nas camadas de 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20, respectivamente, e CV classificado como baixo (PIMENTEL-GOMES E GARCIA, 2002) para todas as camadas (Quadro 3).

Assim como para RP, os níveis críticos da Ds também são variáveis, podendo ser considerados valores de 1,30 a 1,40 kg m<sup>-3</sup> para solos argilosos como restritivo ao desenvolvimento radicular da maioria das plantas (REICHERT et al., 2009; SILVA et al., 2011; USDA, 2014), enquanto Noor et al. (2020) consideram crítico valores acima de 1,47 kg m<sup>-3</sup>, Blaiski et al. (2008), acima de 1,5 kg m<sup>-3</sup>, e Reinert et al. (2008), acima de 1,55 kg m<sup>-3</sup>.

Considerando a classificação da maioria dos autores para o nível crítico de Ds (1,30 a 1,55 kg m<sup>-3</sup>), todos os valores de Ds estavam acima de 1,40 kg dm<sup>-3</sup> (Quadro 3), indicando haver restrição no desenvolvimento radicular das culturas nesta área.

Os valores elevados da  $D_s$  desde as camadas superficiais podem ser atribuídos ao tráfego de máquinas na área, além de uma possível impermeabilização da superfície e formação de crostas promovidas por não haver mobilização do solo a mais de 30 anos.

De acordo com Blanco-Canqui e Ruis (2018), seguidas operações de semeadura, controle de ervas daninhas e colheita, que exigem repetido tráfego nas áreas com equipamentos pesados, principalmente com operações realizadas com o solo úmido, acarretam em aumento da densidade.

A porosidade total (Pt) apresentou valores médios que variaram entre 0,40 e 0,46  $m^3 m^{-3}$ , nas camadas de 0,10 – 0,30 e 0,00 – 0,10, respectivamente, com CV classificado como médio (PIMENTEL-GOMES E GARCIA, 2002) para as camadas de 0,00 – 0,30 m e baixo para a camada de maior profundidade (Quadro 3).

O comportamento físico, químico e biológico do solo é influenciado pelas características existentes nos diferentes tamanhos e formatos de poros presentes no solo, que podem ser alteradas na escala espaço-temporal pelas práticas de preparo do solo (GHOSH et al., 2020). Para que o solo possa apresentar ótima retenção e fluxo de energia, é necessária uma matriz de tamanhos de poros (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2020), em outras palavras, a distribuição do tamanho dos poros é um indicador da capacidade do solo de transmitir água, ar e calor (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018).

A Pt ideal de um solo com vistas a produção agrícola deve ser próxima a 0,50  $m^3 m^{-3}$ , com uma distribuição percentual média de 33% para macroporos e 66% para microporos, para que haja desenvolvimento satisfatório de sistemas radiculares, ou seja, 1/3 de macroporos e 2/3 de microporos (BAVER et al., 1972; KIEHL, 1979). De acordo com Fu et al. (2019), o papel dos macroporos está ligado às funções hidráulicas com drenagem livre e fácil movimentação de água e ar, enquanto a retenção de água que auxilia o desenvolvimento das plantas depende dos microporos. Para a manutenção da qualidade do solo, é fundamental haver um equilíbrio adequado de macro e microporos (FERRAZ-ALMEIDA, 2022).

Apesar da área de estudo ser considerada fisicamente ideal por apresentar porosidade próxima a 50%, a relação entre macro e microporosidade aproximou-se do ideal (1/3 e 2/3, respectivamente) apenas para a camada 0,00 – 0,10 m, estando abaixo do ideal para as demais profundidades (Quadro 3), podendo acarretar em

alteração na dinâmica da água e a chance de crescimento de raízes no solo. Uma proporção maior de microporos leva a uma maior retenção de água, embora possa limitar o rápido fluxo e trocas de água, ar e gás.

O nível crítico para a macroporosidade do solo é de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , ou seja, abaixo desse valor a macroporosidade é considerada restritiva às trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, podendo limitar a presença de oxigênio para as raízes das plantas e para a macro e microfauna do solo (NOOR et al., 2020).

Os resultados obtidos para macroporidade (Quadro 3) foram considerados abaixo do nível crítico ( $< 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), logo, restritivos ao desenvolvimento radicular por implicam na falta de oxigenação das raízes. Esse cenário pode ter sido causado por processos de compactação e, assim, a macroporosidade do solo pode ter sido reduzida em maior medida do que a microporosidade. Além disso, a redução da macroporosidade em profundidade pode ser resultado do rearranjo das partículas por meio da pressão externa, fazendo com que os macroporos sejam ocupados por partículas menores, formando microporos em espaços vazios, responsáveis pela retenção de água, resultando em redução dos espaços aerados, levando à falta de oxigênio e outros gases, e reduzindo o volume de solo explorado pelo sistema radicular (VALADÃO JUNIOR et al., 2020).

Outro fator que pode influenciar na maior distribuição de microporos em relação aos macroporos, segundo Ferraz-Almeida (2022), é o incremento natural de partículas de argila no solo em relação ao teor de silte e arenoso, associado à organização dessas partículas de argila, que ocupam maiores espaços entre as partículas, favorecendo a formação de microporos.

Os índices de assimetria e curtose (Quadro 3) foram próximos de zero para a maioria dos atributos. Entretanto, apenas na camada de 0,10 – 0,20 m todos os atributos ajustaram-se à distribuição normal determinada pelo teste W, enquanto para as demais camadas apenas Pt e micro ajustaram-se a distribuição normal. Apesar da condição de normalidade na distribuição dos dados não ser uma exigência para a análise geoestatística (CRESSIE, 1991), estes não podem apresentar assimetria muito acentuada (LOPES et al., 2020), pois a distribuição de dados com calda muito alongada pode comprometer a análise em estimativas via krigagem (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989). Além disso, segundo Cortez et al. (2018b), quando a normalidade ocorre, tende a facilitar o ajuste do semivariograma.

Os modelos que mais se ajustaram aos parâmetros do semivariograma (Quadro 4) foram o esférico e o exponencial, com exceção da RP (0,00 – 0,10 m) e Ds (0,20 – 0,40 m) que se ajustaram aos modelos linear e linear com patamar, sucessivamente. Para os atributos de solo, os modelos teóricos esférico e exponencial são os que mais comumente se ajustam (SOARES et al., 2018; BRITO FILHO et al., 2018; LOPES et al., 2020). De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), enquanto o modelo exponencial apresenta-se melhor a fenômenos erráticos em pequena escala, o modelo esférico descreve propriedades com alta continuidade espacial.

Quadro 4. Parâmetros para o ajuste dos semivariogramas dos atributos estudados, nas camadas 0,00 – 0,10, 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,30 e 0,30 – 0,40 m.

Atributo	Modelo	Semivariograma			Validação cruzada		Dependência Espacial	
		C <sub>0</sub> <sup>1</sup>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> <sup>2</sup>	A <sup>3</sup>	a <sup>4</sup>	RMSE <sup>5</sup>	IDE <sup>6</sup>	GDE <sup>7</sup>
0,00 a 0,10 m								
RP (MPa) <sup>8</sup>	Linear	0,05	0,09	552,38	0,96	0,24	58,89	Moderado
Ds (kg dm <sup>-3</sup> ) <sup>9</sup>	Esférico	0,01	0,01	757,60	0,65	0,11	76,92	Fraco
Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>10</sup>	Esférico	0,00	0,00	423,91	0,75	0,05	100,00	Fraco
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>11</sup>	Esférico	0,00	0,00	477,26	1,14	0,18	100,00	Fraco
0,10 a 0,20 m								
RP (MPa)	Exponencial	0,00	0,06	257,42	0,91	0,31	0,00	Forte
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	Esférico	0,00	0,01	775,66	0,95	0,40	28,57	Moderado
Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Exponencial	0,00	0,00	588,88	0,94	0,46	0,00	Forte
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Esférico	0,00	0,00	425,20	0,96	0,61	0,00	Forte
0,20 a 0,30 m								
RP (MPa)	Esférico	0,04	0,04	243,67	0,35	0,02	95,45	Fraco
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	Linear com patamar	0,00	0,02	467,14	0,94	0,39	27,78	Moderado
Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Exponencial	0,00	0,00	382,15	0,98	0,45	0,00	Forte
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Exponencial	0,00	0,00	447,39	0,98	0,49	0,00	Forte
0,30 a 0,40 m								
RP (MPa)	Esférico	0,04	0,06	199,2	0,57	0,08	60,94	Moderado
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	Linear com patamar	0,00	0,01	494,1	1,02	0,53	21,43	Forte
Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Linear	0,00	0,00	514,7	1,00	0,20	50,00	Moderado
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Exponencial	0,00	0,00	392,7	0,97	0,43	0,00	Forte

<sup>1</sup>C<sub>0</sub>: efeito pepita; <sup>2</sup>C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>: patamar; <sup>3</sup>A: alcance (m); <sup>4</sup>a: coeficiente angular; <sup>5</sup>RMSE: raiz quadrada do erro médio; <sup>6</sup>IDE: índice de dependência espacial; <sup>7</sup>GDE: grau de dependência espacial. <sup>8</sup>RP: resistência à penetração; <sup>9</sup>Ds: densidade do solo; <sup>10</sup>Pt: porosidade total; <sup>11</sup>Micro: microporosidade.

Apenas o atributo macroporosidade não apresentou bom ajuste do semivariograma. Para as demais variáveis o ajuste do modelo matemático aos

semivariogramas experimentais foi realizado por meio dos critérios de seleção da técnica da validação cruzada, considerando maior coeficiente angular ( $\alpha$ ) e menor erro quadrático médio (RMSE). A maioria dos atributos apresentou coeficiente angular acima de 0,65 (Quadro 4), indicando que os semivariogramas apresentam ajustes adequados, capazes de captar as estruturas de variação espacial do meio amostral, além de garantir bom desempenho da interpolação pela krigagem ordinária (AZEVEDO, 2004). Quanto mais próximos de 1 os valores da validação cruzada, maior a confiabilidade e maior a eficiência do modelo apresentado (ALHO et al., 2014). Apenas a RP nas camadas 0,20 – 0,40 apresentaram coeficiente angular abaixo de 60%.

Os valores de efeito pepita (Quadro 4) foram próximos a zero para todos os atributos, o que refletiu no grau de dependência espacial classificado como moderado e forte para a maioria dos atributos, segundo os critérios propostos por Cambardella et al. (1994). As variáveis Ds, Pt e micro, na camada de 0,00 – 0,10 m, apesar de apresentarem efeito pepita iguais a zero (0,00), resultou em modelo de dependência espacial fraco devido aos baixos valores do patamar, e o IDE acima de 75%.

A discrepância da dependência espacial entre a camada mais superficial e as demais camadas do solo, pode ser resultado de o solo mais profundo estar em estado relativamente original, enquanto o solo superior é mais vulnerável a ser perturbado por fatores externos que, por sua vez, enfraquecem a autocorrelação espacial dos atributos do solo na camada superior (SHAN et al., 2019).

De acordo com Lima et al. (2010), maiores precisões podem ser obtidas na estimativa de locais não amostrados quanto maior for a dependência espacial da variável de estudo. Variáveis que apresentam forte dependência espacial estão relacionadas a propriedades intrínsecas do solo (fatores de formação), enquanto dependência espacial moderada deve-se à homogeneização do solo e dependência espacial fraca às propriedades extrínsecas (CAMBARDELLA et al., 1994).

Os maiores alcances (Quadro 4) foram observados para a Ds nas camadas de 0,10 – 0,20 m (775,66 m) e 0,00 – 0,10 m (757,60 m), demonstrando que estes atributos apresentam menor variabilidade e maior continuidade espacial, permitindo melhor precisão na estimativa em locais não amostrados. O alcance representa a distância máxima entre dois pontos para que estes estejam correlacionados espacialmente, indicando que pontos localizados numa área de raio igual ou menor



ao alcance são mais homogêneos entre si (LOPES et al., 2020). Os valores de alcance variaram entre 199,20 e 775,66 m, indicando que a distância utilizada para coleta das amostras de solo neste estudo foi adequada para captar a variabilidade espacial dos atributos avaliados.

Nos mapas de variabilidade da RP do solo (Figura 3), os valores médios foram agrupados em cinco classes de cores, o que permitiu verificar a variabilidade ao longo da área. A camada de 0,20 – 0,30 m apresentou RP variando de 2,0 a 2,5 MPa em quase toda área, devido à carga de pressão dos rodados, efeito do trânsito de máquinas agrícolas, enquanto a camada superficial 0,00 – 0,10 m apresentou RP máxima de 1,5 MPa, devido a deposição e manutenção da palha dos resíduos da cultura na superfície. Vale ressaltar que a RP da área encontra-se abaixo de 2,5 MPa, em toda extensão do perfil avaliado (0,00 – 0,40 m), mantendo-se abaixo do crítico.

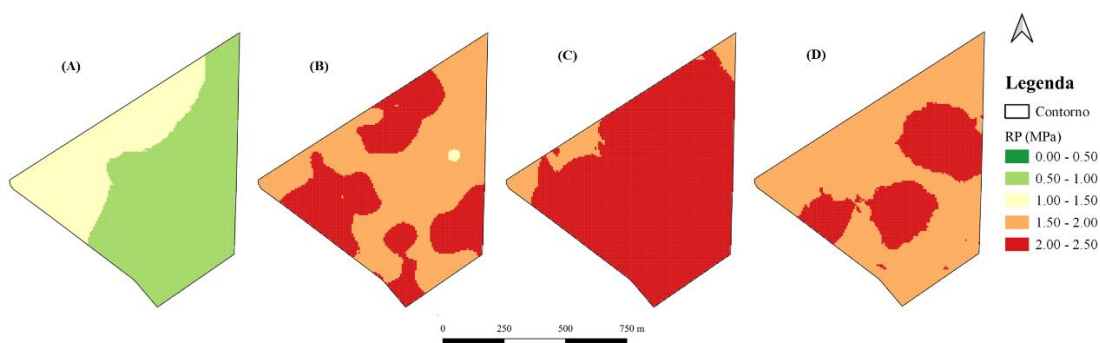


Figura 3. Mapas de variabilidade da resistência à penetração (RP) do solo nas profundidades 0,00 – 0,10 m (A), 0,10 – 0,20 m (B), 0,20 – 0,30 m (C) e 0,30 – 0,40 m (D).

A RP é um estimador da resistência do solo à água, ar, crescimento radicular, fluxo de calor e outros processos dinâmicos (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2020). Uma compactação leve é benéfica para melhorar o contato solo-raiz e fluxos moderados de energia, mas níveis de resistência acima dos níveis críticos podem reduzir a emergência de plântulas e impedir o desenvolvimento radicular (CASSEL et al., 1995; BENGOUGH et al., 2011).

Assim como a resistência a penetração, a Ds é uma propriedade física amplamente utilizada para avaliar a compactação do solo (BLANCO CANQUI E RUIS, 2018). Enquanto a RP simula a resistência do solo ao fluxo de energia e ao desenvolvimento das raízes, a densidade reflete o quão denso ou compactado é um

solo (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2020), o que torna essa propriedade um importante indicador para a descrição da qualidade do solo (SHAN et al., 2019)

A distribuição espacial da Ds (Figura 4) permitiu verificar que a camada superficial (0,00 – 0,10 m), apresenta menor variabilidade, com valores de Ds atingindo até  $1,60 \text{ kg dm}^{-3}$ , enquanto as demais camadas possuem mais classes, além de valores de densidade acima de  $1,60 \text{ kg dm}^{-3}$ . As regiões dos mapas a partir da camada 0,10 m, com maior concentração de valores de Ds acima de  $1,60 \text{ kg dm}^{-3}$ , coincidem com as regiões com maiores teores de areia (Figura xx), uma vez que o aumento da Ds está associado a redução da macro e elevação da microporosidade (SOARES et al., 2018).

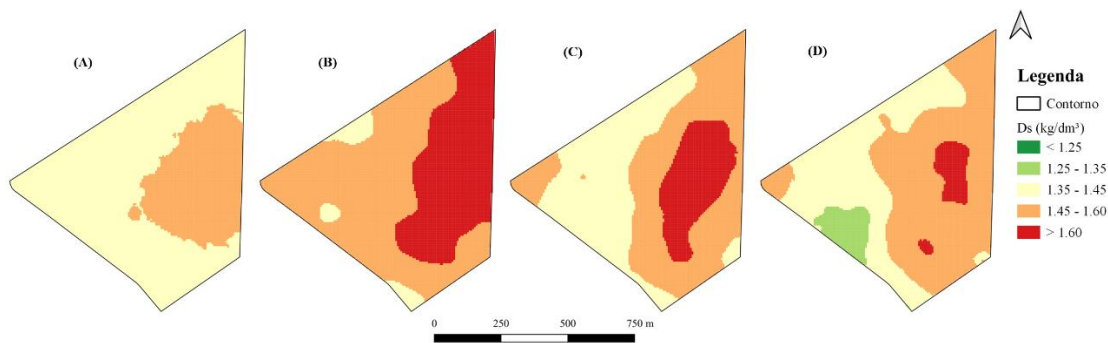


Figura 4. Mapas de variabilidade da densidade do solo (Ds) nas profundidades 0,00 – 0,10 m (A), 0,10 – 0,20 m (B), 0,20 – 0,30 m (C) e 0,30 – 0,40 m (D).

O adensamento do solo nas camadas subsuperficiais pode provocar restrições à penetração das raízes, prejudicando o desenvolvimento das plantas. Segundo Sales et al. (2018), práticas conservacionistas, como a semeadura direta, podem ser adotadas para impossibilitar o surgimento destas camadas compactadas em subsuperfície. A presença de espécies diversificadas pela rotação, com predominância de culturas que possuem sistemas radiculares agressivos, contribui para impossibilitar o surgimento destas camadas compactadas ao longo dos anos.

A densidade está diretamente ligada à porosidade total do solo, de modo que maiores valores de Pt podem ser condicionados à redução da densidade (BORGES et al., 2020).

Os mapas de variabilidade da Pt do solo (Figura 5), refletem o mesmo comportamento observado para Ds (Figura 4), onde a camada superficial apresenta maiores teores de porosidade, próximos de 50%, valor ideal de um solo com vistas a

produção agrícola. As regiões com menor Pt, assemelha-se à mesma região com maior Ds, e maior teor de areia no solo (Figura 1), que reflete nos baixos valores de macroporosidade observados no Quadro 3.

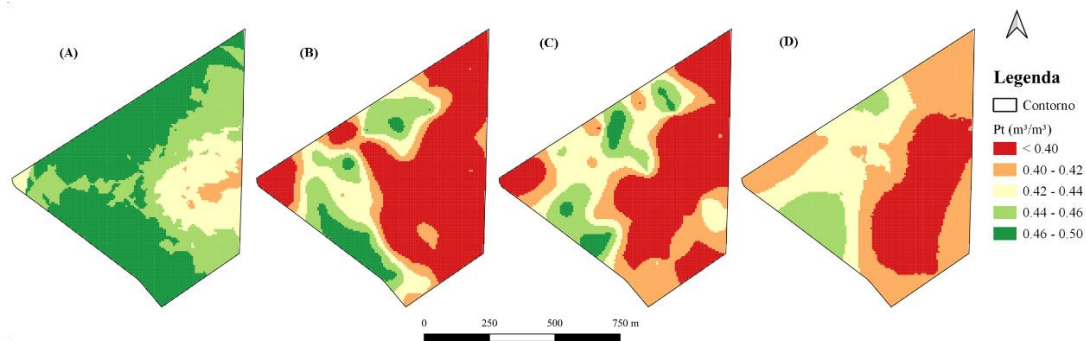


Figura 5. Mapas de variabilidade da porosidade total (Pt) do solo nas profundidades 0,00 – 0,10 m (A), 0,10 – 0,20 m (B), 0,20 – 0,30 m (C) e 0,30 – 0,40 m (D).

Classificada como uma lacuna entre as partículas minerais sólidas (argila, silte e areia) e a matéria orgânica (MOTA et al., 2018), a porosidade do solo é vital para a reserva de água e ar para as plantas, e está entre os componentes mais importantes nos agroecossistemas (LUCAS et al., 2019). Quando relacionada a disponibilidade hídrica, quanto maior a Pt, maior o volume de espaços vazios e, conseqüentemente, maior a quantidade de água que o solo pode armazenar (DE OLIVEIRA et al., 2021). Se o contrário ocorrer e houver redução da Pt, haverá também redução da infiltração e aumento do volume de água disponível em superfície para carregar partículas, potencializando a perda de solos por erosão (MARCATTO et al., 2021).

Além do impacto na infiltração de água, a diminuição significativa da porosidade do solo pode ter efeitos adversos nos fluxos de ar e calor entre outros processos do solo, que dependem não apenas da Pt, como também da distribuição dos tamanhos dos poros (macroporos e microporos) (BLANCO-CANQUI et al., 2022).

A distribuição dos poros no solo por meio do seu tamanho, além de determinar suas características de transporte e retenção de água, é utilizada para acompanhar e investigar as modificações causadas por intervenções climáticas ou antrópicas no sistema poroso do solo (CHANDRASEKHAR et al., 2019), permitindo

sua separação entre macro e microporos, refletindo a heterogeneidade do sistema poroso do solo. De acordo com de Oliveira et al. (2021), meios porosos heterogêneos são frequentemente caracterizados por terem poros distribuídos em uma ampla faixa de diâmetros característicos.

Oliveira et al. (2021) sugerem ainda que, se em um determinado volume ocupado por partículas de solo (macro e microporos), for adicionado mais solo para preencher esse mesmo volume, os macroporos presentes no espaço serão reduzidos para dar espaço para que esse novo solo seja inserido, resultando em uma massa maior para o mesmo volume e, conseqüentemente, maior densidade do solo.

A distribuição espacial da macroporosidade do solo (Figura 6), reforça os valores observados no Quadro 3, principalmente da presença de macroporos abaixo do nível crítico para praticamente a área total, em todo perfil avaliado (0,00 – 0,40 m), independentemente da variação textural observada na Figura x. Segundo De Campos et al. (2018), a compactação decorrente do uso de maquinários, muitas vezes evidenciada pelo aumento da  $D_s$ , possivelmente, proporciona a fragmentação dos macroporos em poros menores, justificando, assim, a maior Micro nessa área. Além disso, solos argilosos possuem maior proporção de microporos do que macroporos, fato encontrado neste trabalho.

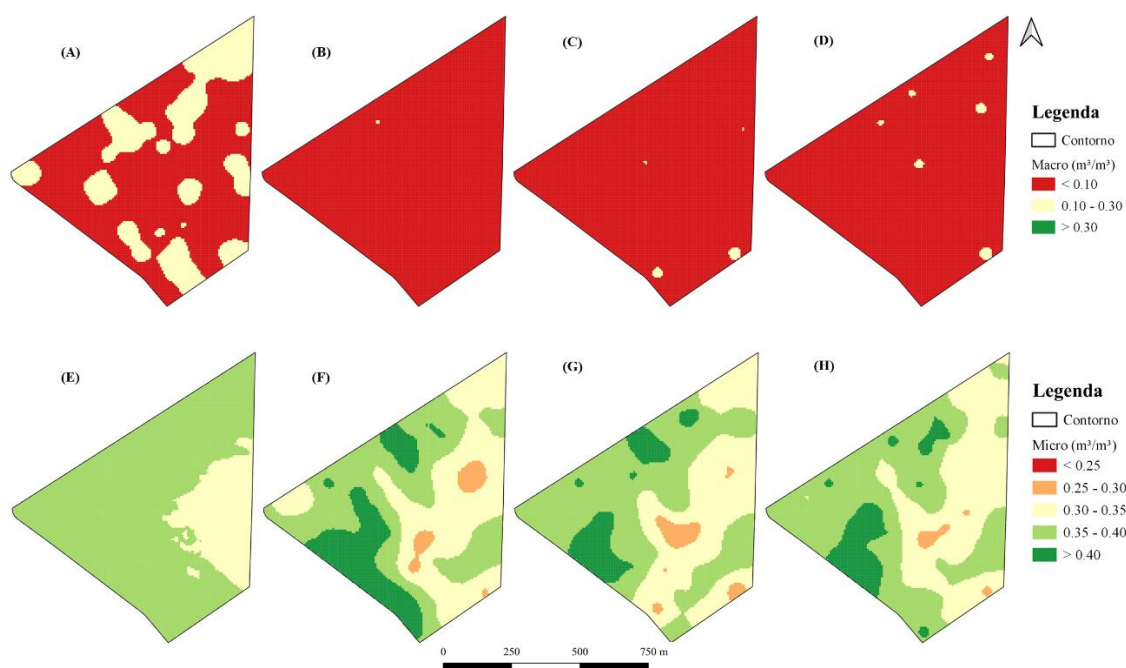


Figura 6. Mapas de variabilidade da macroporosidade do solo nas profundidades 0,00 – 0,10 m (A), 0,10 – 0,20 m (B), 0,20 – 0,30 m (C) e 0,30 – 0,40 m (D), e microporosidade nas profundidades 0,00 – 0,10 m (E), 0,10 – 0,20 m (F), 0,20 – 0,30 m (G) e 0,30 – 0,40 m (H).

A macroporosidade, além está diretamente relacionada à uma diminuição no tamanho dos agregados do solo (TORRES et al., 2022), está ligada a drenagem e oxigenação da água, fazendo com que a modificação da estrutura do solo altere suas funções e serviços (CANISARES et al., 2019). Por serem mais suscetíveis a sofrer com as perturbações (SALES et al., 2018), os macroporos são drasticamente reduzidos no processo de compactação do solo, afetando as trocas líquidas e gasosas, e aumentando a presença de microporos (RODRIGUES E SILVA et al., 2020).

Enquanto a macroporosidade se enquadra na categoria de porosidade estrutural, a microporosidade é pouco influenciada pelas práticas de manejo do solo, pois é classificada como um componente da porosidade textural do solo (RAMOS et al., 2014).

A distribuição espacial da microporosidade do solo (Figura 6), está diretamente relacionada a variabilidade textural da área (Figura 1), onde as regiões com mais de 35% de microporos reflete as regiões com maior teor de argila (mais de 47%), o que reforça sua classificação como componente da porosidade textural do solo.

A compactação é um dos principais agentes que degrada a qualidade física do solo, sob agricultura altamente mecanizada (BLANCO-CANQUI et al., 2022), devido o aumento no tamanho e peso dos equipamentos agrícolas.

Como visto anteriormente, a compactação do solo reduz a macroporosidade, a porosidade total e a continuidade dos poros no solo, causando a reorganização e distribuição das partículas (RODRIGUES E SILVA et al., 2020), afetando o movimento do ar e da água no solo, e, conseqüentemente, restringindo o desenvolvimento das raízes das plantas.

Sistemas conservacionistas do solo, como o sistema plantio direto, que resultam em perturbação moderada do solo e incorporação parcial de resíduos das culturas, possuem a capacidade de reduzir a compactabilidade (BLANCO-CANQUI et al., 2022). Entretanto, a eficácia desses sistemas está diretamente relacionada à quantidade e qualidade dos resíduos culturais (CORTEZ et al., 2018a). De acordo com Nouri et al. (2018), o solo das lavouras conservacionistas é menos responsivo quando o acúmulo de resíduos é insuficiente, aumentando sua suscetibilidade à compactação e erosão.

Todos esses fatores influenciam na variabilidade espacial do solo superficial, importante indicador da sua qualidade. Essa variabilidade é resultado direto dos fatores formadores do solo, que podem funcionar independentemente ou em combinação com outros fatores, tornando-se útil para as tomadas de decisões (GEORGE et al., 2021).

A distribuição espacial mostrou-se uma ferramenta que pode ser utilizada para o monitoramento do comportamento dos atributos físicos do solo, indicativos de compactação. Atrelado a isso, é essencial o acompanhamento e avaliações da qualidade estrutural das áreas produtivas, possibilitando a orientação de práticas de uso e manejo sustentável dos sistemas de produção agrícola.

Dessa forma, necessita-se de um entendimento mais amplo em relação a multifuncionalidade dos sistemas de cultivo, sendo fundamental a elaboração de planos alternativos de gestão inteligentes, que permitam planejamento e intervenções especializadas e localizadas, considerando as particularidades existentes em cada área.

### 3.4 Conclusões

A variabilidade da resistência do solo à penetração, densidade, porosidade total e microporosidade do solo são indicadores de compactação do solo, e refletem a variabilidade textural da área.

A área apresenta porosidade total, densidade e resistência a penetração adequados, indicando não haver compactação.

Apesar do sistema de semeadura direta ser eficiente na manutenção da estrutura do solo, não assegura índices adequados de macroporosidade.

### 3.5 Referências

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, p.246-254, 2014.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Palotti, 2004. 100p.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4. ed. New York: John Wiley and Sons, 1972. 529 p.

BENGOUGH, G., MCKENZIE, B. M., HALLETT, P. D., VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v.62, p.59–68, 2011.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.3, p.971-982, 2012.

BLAISKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. Quantificação de degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.32, p.975-983, 2008.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v.326, p.164-200, 2018.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. Cover crop impacts on soil physical properties: A review. **Soil Science Society of America Journal**, v.84, n.5, 2020.

BLANCO-CANQUI, H.; HASSIM, R.; SHAPIRO, C.; JASA, P.; KLOPP, H. How does no-till affect soil-profile compactibility in the long term?. **Geoderma**, v.425, n.116016, 2022.

BORGES, M. C. R. Z.; NOGUEIRA, K. B.; ROQUE, C. G.; BARZOTO, G. R. Atributos físicos de um Latossolo vermelho e produtividade da soja em diferentes sistemas de preparo após o consórcio sorgo-brachiaria. **Acta Iguazu**, v.9, n.1, p.1-10, 2020.

BRITO FILHO, E. G.; MANTOVANELLI, B. C.; BRITO, W. B. M.; DA SILVA, J. F.; CAMPOS, M. C. C.; DA CUNHA, J. M. Variabilidade espacial da textura do solo em área de terra preta arqueológica sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Scientia Agraria Paranaensis.**, v. 17, n.1, p.139-143, 2018.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS DE, A. G.; OLIVEIRA DE, M. F.; SILVA, B. M.; FREITAS, D. A. F.; RAMOS, M. C. P. **Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho após vinte anos com diferentes sistemas de preparo.** Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 240, 2018. 30p.



CANISARES, L. P.; QUERUBIN, M. R.; SILVA, L. F. S. DA; FRANCO, A. L. C.; COOPER, M.; MOONEY, S. J.; CERRI, C. E. P. Soil microstructure alterations induced by land use change for sugarcane expansion in Brazil. **Soil Use and Management**, v.36, p.189-199, 2019.

CASSEL, D. K., RACZKOWSKI, C. W., DENTON, H. P. Tillage effects on corn production and soil physical conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.1436–1443, 1995.

CHANDRASEKHAR, P., KREISELMEIER, J., SCHWEN, A., WENINGER, T. Modeling the evolution of soil structural pore space in agricultural soils following tillage. **Geoderma**, v.353, p.401–414, 2019.

CORTEZ, J. W.; DA SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; ARCOVERDE, S. N. S.; OLSZEWSKI, N. Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. **Revista Agrarian**, v.11, n.42. p.343-351, 2018a.

CORTEZ, J. W.; CAVASSANI, V. H.; MOTOMIYA, A. V.; ORLANDO, R. C.; VALENTE, I. Q. M. Spatialization of soil resistance to penetration for localized management by precision agriculture tools. **Engenharia Agrícola**, v.38, n.5, p.690-696, 2018b.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York, John Wiley, 1991. 900p.

FERRAZ-ALMEIDA, R. How does organic carbon operate in the pore distribution of fine-textured soils?. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.26, n.10, p.743-746, 2022.

FU, Y.; TIANB, Z.; AMOOZEGAR, A.; HEITMAN, J. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. **Soil and Tillage Research**, v.193, p.114-121, 2019.

GEORGE, T. R.; BHAT, J. A.; WANI, M. A.; MAQBOOL, M.; RAMZAN, S.; YADAV, R. Mapping of spatial variability of soil texture and macronutrients in Wangath watershed, Ganderbal District of Jammu and Kashmir Using GIS. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v.10, n.2, p.628-642, 2021.

GHOSH, T.; MAITY, P P.; DASM T. K.; KRISHNAN, P.; BHATIA, A.; BHATTACHARYA, P.; SHARMA, D. K. Variation of porosity, pore size distribution and soil physical properties under conservation agriculture. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.90, n.11, p.2051-2058, 2020.

GUIMARÃES, R. M. L.; BLAINSKI, E.; FIDALSKI, J. Inter-valo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.6, p.1512-1521, 2013.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560p

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. 1. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KOPPEN, W. P. **Climatologia, com un estudio de los climas de la tierra**. México : Fondo de Cultura Econômica, 1948. 478p.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, v.34, p.127-136, 2010.

LIMA, R. P. DE; ROLIM, M. M.; TOLEDO, M. P. S.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. R. DA; SILVA, I. A. C.; PEDROSA, E. M. R Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v.215, p.1-9, 2022.

LOPES, K. A. L.; PINTO JUNIOR, F. F.; AGUIAR, F. I. S.; SOUSA, A. E. S.; DE OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S. Diferentes densidades amostrais na caracterização da variabilidade espacial de atributos granulométricos de um Argissolo amarelo distrocoeso típico. **Cultura Agrônômica**, v.29, n.1, p.50-60, 2020.

LUCAS, M.; SCHLÜTER, S.; HANS-JÖRG, V.; DORIS, V. Roots compact the surrounding soil depending on the structures they encounter. **Scientific Reports**, v.9, p.1-13, 2019.

MANTOVANELLI, B. C.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D.; CARLESSO, R. Qualidade física de solos do Brasil e aplicabilidade de métodos para estimativas de retenção de água no solo: A revisão. **Revista Edutec**, v.03, n.01, p.87-100, 2022.

MARCATTO, F. S.; SILVEIRA, H.; FONTANA, A. C. Estabilidade de agregados dos solos em uma topossequência cultivada com cana-de-açúcar em Astorga-PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.7, p.3953-3967, 2021.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Limites críticos de resistência à penetração do solo em um Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.1, p.288-298, 2014.

MOTA, R. P. DA; ALMEIDA, R. F. DE; LEMES, E. M.; BUIATTI, C.; ALVARENGA, L.; MAGELA, M. L. M.; CAMARGO, L. de. Soil attributes in conventional tillage of *Coffea arabica* L.: A case study. **Coffee Science**, v.13, p.168-177, 2018.

NOOR, R. S.; HUSSAIN, F.; UMAIR, M. Evaluating selected soil physical properties under different soil tillage systems in arid southeast Rawalpindi, Pakistan. **Journal Clean WAS**, v.4, n.2, p.41-45, 2020.

NOURI, A., YOUSSEF, F., BASARAN, M., LEE, J., SAXTON, A. M., ERPUL, G. The effect of fallow tillage management on aeolian soil losses in Semi-arid Central Anatolia, Turkey. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v.1, n.180019, 2018.

OLIVEIRA DE, J. T.; DE OLIVEIRA, R. A.; DA CUNHA, F. F.; DOS SANTOS, E. S. Spatial autocorrelation of physical attributes of an oxisol. **Engenharia Agrícola**, v.41, n.2, p.255-262, 2021.

PARAHYBA, R. B. V.; DE ARAÚJO, M. S. B.; DE ALMEIDA, B. G.; ROLIM NETO, F. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CALDAS, A. M. Water retention capacity in Arenosols and Ferralsols in a semiarid area in the state of Bahia, Brazil. **Anais da academia Brasileira de ciências**, v.91, n.4, 2019.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

RAMOS, F. T., MAIA, J. C. S., ROQUE, M. W.; AZEVEDO, E. C. Qualidade física de um Neossolo Quartzarênico estimada via índice S e área sob a curva. **Enciclopédia Biosfera**, v.10, n.2543-2561, 2014.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, J., HORN, R., HAKANSSON, I. Referência de densidade aparente e grau crítico de compactação para a produção de plantio direto em solos subtropicais altamente intemperizados. **Pesquisa de Solo e Cultivo**, v;102, n.2, p.242-254, 2009.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.32, p.1805-1816, 2008.

RODRIGUES E SILVA, V.; TORRES, J. L. R.; COSTA, D. D. A.; SILVEIRA, B. S.; VIEIRA, D. M. S.; LEMES, E. M. Soil physical attributes in Long-Term soil management systems (Tillage and No-till). **Journal of Agricultural Science**, v.12, n.4, 2020.

SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; MIRANDA, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia legal. **Colloquium Agrariae**, v.14, p.1-15, 2018.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.

SHAN, L. I.; QI-QUAN, L. I.; CHANG-QUAN, W.; BING, L. I.; XUE-SONG, G. A. O.; YI-DING, L. I.; DE-YONG, W. U. Spatial variability of soil bulk density and its controlling factors in an agricultural intensive area of Chengdu Plain, Southwest China. **Journal of Integrative Agriculture**, v.18, n.2, p.290–300, 2019.

SILVA, E. F.; LOURENTE, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K. T.; FUJII, G. C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1321-1331, 2011.

SOARES, M. D. R. S.; CAMPOS, M. C. C.; DA CUNHA, J. M.; DE SOUZA, Z. M.; DE OLIVEIRA, I. A.; DE AQUINO, R. E.; MANTOVANELLI, B. C.; OLIVEIRA, L. S. Variabilidade espacial do estoque de carbono e atributos físicos do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Revista Ambiente & Água**, v.13, n.6, 2018.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília, DF : Embrapa, 2017. 574 p.

TORRES, J. L. R.; MAZETTO JÚNIOR, J. C.; SILVEIRA, B. S.; LOSS, A.; DOS SANTOS, G. L.; DE ASSIS, R. L.; LEMES, E. M.; VIEIRA, D. M. S. Physical attributes of an irrigated oxisol after Brassicas Crops under no-tillage system. **Agronomy**, v.12, n.1825, 2022.

USDA/NRCS. Soil Health – **Bulk Density/Moisture/Aeration**. Guides for Educators, 2014. 11p. Disponível em: [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_050936.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_050936.pdf). Acesso em 29 out. 2022.

VALADÃO JÚNIOR, D. D.; FIORILLIO, N. O.; VALADÃO, F. C. A.; GYIMARÃES, P. R.; TARGINO, C. M. S.; SILVA, J. L.; DALCHIAVON, F. C. Critical limits of the soil physical properties for cotton. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.15, n.1, e5809, 2020.

VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; MARIA, I. C.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v.166, n.2, p.92-101, 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade **Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, p.1-54, 2000.

## 4 ARTIGO III

### **Variabilidade espacial da produtividade da soja e sua correlação com atributos físicos do solo**

#### **Resumo**

Objetivou-se avaliar a variabilidade espacial da produtividade da soja em três safras, e sua correlação com atributos físicos do solo, em semeadura direta. O trabalho foi realizado em fazenda comercial, localizada em Ponta Porã/MS, cultivada sob semeadura direta. Os dados foram coletados por meio de grade amostral, com 73 pontos, sendo 1 amostra a cada 1,7 ha. Foram avaliados os atributos de solo: argila, silte, areia, macro e microagregação, índice de estabilidade de agregados, carbono orgânico, resistência à penetração, densidade, porosidade total, macro e microporosidade. Para a produtividade da soja foram consideradas três safras (2019/20, 2020/21 e 2021/22). Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e a produtividade por meio ainda da geoestatística, com mapas de variabilidade elaborados por meio dos interpoladores krigagem. A produtividade da soja apresentou moderada a forte dependência espacial. A variabilidade das produtividades de soja foi influenciada pela textura do solo. Em condições de déficit hídrico, a produtividade foi menor nas regiões com maiores teores de areia. As produtividades da soja apresentaram correlação negativa com os atributos areia, microagregação e densidade do solo, e correlação positiva com argila, silte, macroagregação, índice de estabilidade de agregados, carbono orgânico, resistência a penetração, microporosidade e porosidade total. O atributo macroporosidade do solo não apresentou correlação significativa com as produtividades da soja.

Palavras-chave: Textura, agregação, resistência a penetração, densidade do solo, porosidade do solo, geoestatística.

#### **Abstract**

**Spatial variability of soybean yield and its correlation with soil physical attributes**

The objective was to evaluate the spatial variability of soybean yield in three seasons, and its correlation with soil physical attributes, in no-tillage. The work was carried out in a commercial farm, located in Ponta Porã/MS, cultivated under direct seeding. Data were collected through a sampling grid, with 73 points, with 1 sample every 1.7 ha. Soil attributes were evaluated: clay, silt, sand, macro and microaggregation, aggregate stability index, organic carbon, resistance to penetration, density, total porosity, macro and microporosity. For soybean productivity, three harvests were considered (2019/20, 2020/21 and 2021/22). Data were analyzed using descriptive statistics and productivity using geostatistics, with variability maps prepared using kriging interpolators. Soybean productivity showed moderate to strong spatial dependence. Soybean yield variability was influenced by soil texture. Under conditions of water deficit, productivity was lower in regions with higher sand content. Soybean yields showed a negative correlation with sand, microaggregation and soil density, and a positive correlation with clay, silt, macroaggregation, aggregate stability index, organic carbon, resistance to penetration, microporosity and total porosity. The soil macroporosity attribute did not present a significant correlation with soybean yields.

Keywords: Texture, aggregation, resistance to penetration, bulk density, soil porosity, geostatistics.

#### **4.1 Introdução**

O Brasil é o maior país produtor de soja do mundo (FAO, 2022), com 38,9 milhões de hectares semeados na safra 2020/21, alcançando produtividade média de 3.528 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2021). Na última década (safra 2011/12 a 2020/21), a área nacional destinada a produção de soja aumentou 1,4 milhão ha ano<sup>-1</sup>, enquanto a produtividade da cultura aumentou 93 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no mesmo período (CONAB, 2021).

Apesar dos aumentos na produtividade, isso pode ocorrer às custas de maiores cargas ambientais (AKHTAR et al., 2019), de modo que não se pode maximizar a produtividade de soja sem sacrificar a qualidade da água e os recursos do solo



(NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES AND MEDICINE, 2018). De acordo com Martinez et al. (2020), o aumento da frequência da soja nas sequencias de cultivo impactam negativamente a qualidade do solo, comprometendo a sustentabilidade dos agroecossistemas (CRESPO et al., 2021).

A adoção de sistemas conservacionistas associado ao manejo de culturas de cobertura e manutenção de resíduos na superfície do solo são os esforços necessários para alcançar elevada produtividade e sustentabilidade agrícola. Estes sistemas melhoram a saúde e qualidade do solo, garantem menor potencial de erosão, maior incorporação e estabilização do carbono, melhor agregação das partículas do solo, aumentam as taxas de infiltração de água e reduzem a evaporação da água do solo (LI et al., 2019; NOURI et al., 2019; XAVIER et al., 2019; MUONI et al., 2020; WULANNINGTYAS et al., 2021).

Na produtividade agrícola, além dos cuidados com a fertilidade, deve-se buscar adequadas condições físicas ao solo durante o desenvolvimento das culturas (CORTEZ et al., 2018). Segundo a FAO (2020), nos últimos 50 anos dois terços das terras agrícolas foram afetadas por diferentes processos de degradação, resultando em dois bilhões de hectares degradados em escala global.

Desse modo, é necessário adotar técnicas padronizadas que agregam atributos do solo sensíveis ao manejo para monitorar a dinâmica da qualidade do solo agrícola que dependendo do uso e manejo antropogênico da terra (BÜNEMANN et al., 2018). A qualidade física do solo é vital para identificar práticas de manejo para uso sustentável da terra e avaliar a extensão da sua degradação (CRESPO et al., 2021).

Alterações nas propriedades físicas do solo podem afetar diretamente o estabelecimento e a produção das culturas (BLANCO-CANQUI E RUIS, 2018). Além disso, o monitoramento da qualidade do solo é essencial para as decisões sobre o manejo sustentável do agroecossistema (OBADE, 2019).

Assim, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial da produtividade da soja em três safras, e sua correlação com atributos físicos do solo, em semeadura direta.

## **4.2 Material e Métodos**

### **Localização e descrição da área de estudo**

O trabalho foi realizado em uma fazenda comercial, localizada no município de Ponta Porã – MS, cultivada no sistema de sequeiro e adota a semeadura direta a mais de 30 anos. O local situa-se em na latitude de 22°22' S, longitude de 55°10' W e altitude média de 440 m. O clima é do tipo tropical úmido com inverso seco - Cwa (KÖPPEN, 1948). O solo da área é um Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2018), com relevo suavemente ondulado.

A área experimental possui 120,6 ha, cultivados com o predomínio do sistema de sucessão soja e milho safrinha, em semeadura direta a mais de 30 anos. Os insumos utilizados estão descritos no Quadro 1. O uso de herbicida, inseticida e fungicida foram utilizados conforme recomendação técnica.

Quadro 1. Histórico de culturas e de aplicação de fertilizantes e corretivos na área de estudo.

Ano agrícola	Safr	Cultura	Correção/Adubação		
			Fonte	Quantidade (kg/ha)	Modo de aplicação
2017/18	Outono	Milho 2ª safra	NPK <sup>1</sup> 16-16-16	160	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	300	Linha
2018/19	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	160	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	297	Linha
2019/20	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	300	Linha
2020/21	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	320	Linha
2021/22	Outono	Milho 2ª safra	NPK 16-16-16	260	Linha
	Verão	Soja	NPK 02-23-23	310	Linha

<sup>1</sup>Nitrogênio-Fósforo-Potássio.

O solo da área possui textura argilosa, de acordo com a classificação de Santos et al. (2018), com teor médio de 43% de argila. Os mapas de variabilidade dos teores de areia, argila e silte encontram-se na Figura 1.

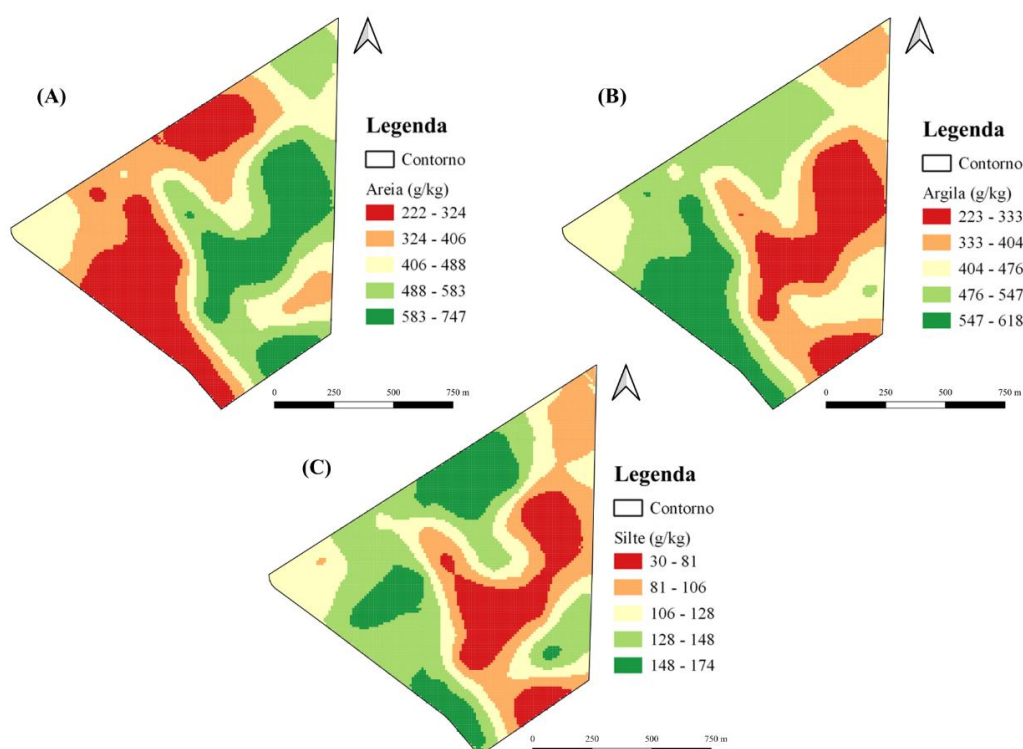


Figura 1. Mapas de variabilidade dos teores de areia total (A), argila (B) e silte (C) do solo.

Os dados de precipitação e temperatura durante o cultivo da soja nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22 encontram-se na Figura 2.

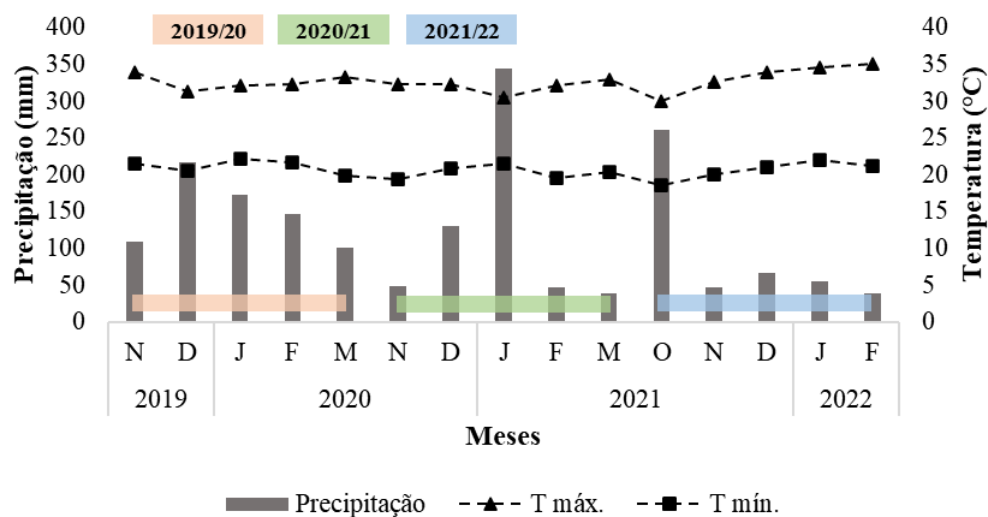


Figura 2. Precipitação e temperatura durante o cultivo da soja nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22, Ponta Porã – MS, Brasil. Fonte: Embrapa Agropecuária Oeste.

### Plano de amostragem de solo

Para a espacialização das coletas de atributos físicos do solo na área foi gerado grade amostral (Figura 3), em que 60 pontos foram alocados de forma regular com um ponto a cada 2,0 hectares (143,61 x 143,61 m) somados 13 pontos amostrais (o equivalente a aproximadamente 20% dos pontos da grade amostral original), alocados de forma aleatória conforme a variabilidade espacial da produtividade observada nos mapas de colheita de milho e soja para os anos de 2018 e 2019. Portanto, a grade amostral adotada possuiu 73 pontos amostrais na densidade de 01 amostra a cada 1,7 hectares.

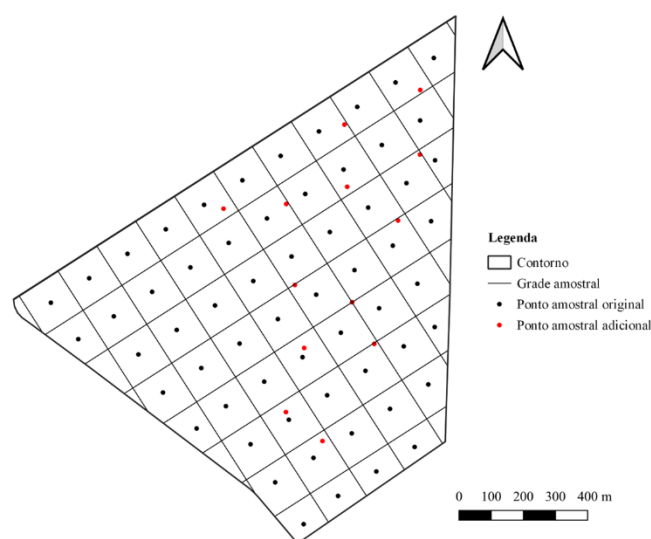


Figura 3. Grade regular com ponto amostral original e ponto amostral adicional para a coleta de amostras de solo.

### Atributos físicos do solo

Para determinação dos atributos de solo granulometria (frações areia, silte e argila), macro e microagregados, índice de estabilidade de agregados (IEA) e carbono orgânico (CO), foram coletadas cinco subamostras por ponto amostral. Já para os atributos densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), tanto macro e microporosidade, foram coletadas três subamostras por ponto amostral.

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada por meio de um penetrômetro eletrônico acoplado a um quadriciclo.

Todos os atributos foram considerados na camada de 0,00 - 0,20 m, e analisados por meio da metodologia proposta por Teixeira et al. (2017).

### **Produtividade da soja**

Os dados de produtividade foram coletados no período de 3 anos (safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22) por colhedoras equipadas com sensor de massa, monitor e receptor GNSS com capacidade de coleta de dados a cada 1 segundo. Os dados foram extraídos utilizando o software do fabricante e posteriormente tratados por software geoestatístico em plataforma livre.

O processo de filtragem foi realizado visando eliminação de dados discrepantes (“*outliers*”) da massa de dados gerados pela colhedora, por meio do software Map Filter (versão 2.0) (MALDANER E MOLIN, 2020).

### **Análise de dados**

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística exploratória (estatística descritiva), obtendo-se medidas de posição (mínimo, média e máximo) e de dispersão (desvio padrão, coeficientes de variação (CV%), assimetria e de curtose). Com base nos valores de assimetria ( $C_s$ ) obtidos, visando caracterizar quanto e como a distribuição de frequências se afasta da simetria, foram classificados como:  $C_s = 0$  distribuição simétrica,  $C_s > 0$  distribuição assimétrica à direita e  $C_s < 0$  distribuição assimétrica à esquerda. Os valores de curtose ( $C_k$ ), que expressam a dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, geralmente utilizada a curva normal, foram classificados em:  $C_k = 0$  distribuição mesocúrtica,  $C_k < 0$  distribuição platicúrtica e  $C_k > 0$  distribuição leptocúrtica.

A dispersão relativa dos dados, fornecida pelos valores de coeficiente de variação (CV%), foram classificadas como baixa quando CV for inferior a 10% (alta precisão), média quando o CV estiver entre 10% e 20% (boa precisão), alta de 20% a 30% (baixa precisão) e muito alta com CV maior que 30% (baixíssima precisão) (PIMENTEL-GOMES E GARCIA, 2002).

A hipótese de normalidade foi testada pelo teste de Shapiro e Wilk ( $W$ ,  $p < 0,05$ ), sendo considerados como distribuição normal os dados que obtiveram  $p$ -valor  $> 0,05$ .

A análise geoestatística dos dados de produtividade da soja foi realizada por meio de semivariogramas experimentais (VIEIRA, 2000), sendo os ajustes realizados por meio de modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano e linear). A determinação dos modelos foi ajustada com base no melhor coeficiente de

determinação ( $r^2$ ) e avaliados pela técnica de validação cruzada, por meio do melhor coeficiente angular e menor erro quadrático médio (RMSE). Do ajuste de um modelo matemático aos dados, foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita ( $C_0$ ), contribuição ( $C_1$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ) e alcance ( $a$ ). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado por meio da equação:  $IDE = [C_0 / (C_0 + C_1)] * 100$ . Com base nos IDE, foi classificado o grau de dependência espacial (GDE) como: forte, para  $IDE \leq 25\%$ ; moderado, para IDE entre 25 e 75%; e fraco, para  $IDE > 75\%$  (CAMBARDELLA et al., 1994).

Tanto a análise geoestatística como a espacialização por meio da krigagem foi utilizando o complemento Smart-Map (PEREIRA et al., 2022) do software de plataforma livre o QGIS (QGIS, 2022).

As correlações entre a produtividade da soja e os atributos físicos do solo foram determinadas por meio de correlação simples de Pearson ( $p < 0,05$ ). Para a interpretação do grau de correlação ( $R^2$ ) seguiu-se a classificação de Callegari-Jacques (2011) onde: nula se igual a zero, fraca entre zero e 0,3, regular entre 0,3 a 0,6, forte entre 0,6 e 0,9, muito forte entre 0,9 e 1,0 e absoluta se igual a 1,0.

### 4.3 Resultados e Discussão

A produtividade da soja apresentou valores médios de 3.062,51, 3.744,62 e 933,55 kg ha<sup>-1</sup> para as safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22, respectivamente, com CV baixo para as safras 2019/20 e 2020/21, e muito alto para a safra 2021/22 (PIMENTEL-GOMES E GARCIA, 2002) (Quadro 2).

Quadro 2. Estatística descritiva da produtividade da soja nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22.

Atributo	Mínimo	Média	Máximo	Dp <sup>1</sup>	CV <sup>2</sup>	Cs <sup>3</sup>	Ck <sup>4</sup>	W <sup>5</sup>
Soja 2019/20	2750,77	3062,51	3354,48	168,56	5,50	-0,0430	-1,2360	0,979*
Soja 2020/21	3054,68	3744,62	4280,64	305,01	8,15	-0,1522	-0,6191	0,992 <sup>ns</sup>
Soja 2021/22	373,62	933,55	1459,76	306,50	32,83	-0,0711	-1,1432	0,983*

<sup>1</sup>DP: Desvio padrão; <sup>2</sup>CV%: Coeficiente de variação; <sup>3</sup>Cs: Coeficiente de assimetria; <sup>4</sup>Ck: Coeficiente de curtose; <sup>5</sup>Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde (\*) significativo em níveis de  $p < 0,05$  e (<sup>ns</sup>) não significativo. Quando significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

A baixa produtividade obtida na safra 2021/22 está ligada a má distribuição de chuva entre os meses de cultivo da cultura (Figura 2). De acordo com Battisti e Sentelhas (2019), a principal causa da variabilidade da produtividade da soja entre safras e regiões são as condições climáticas.

Os índices de assimetria e curtose (Quadro 2) foram próximos de zero para todas as safras. Entretanto, apenas a safra 2020/21 apresentou distribuição normal. Apesar da condição de normalidade na distribuição dos dados não ser uma exigência para a análise geoestatística (CRESSIE, 1991), estes não podem apresentar assimetria muito acentuada (Lopes *et al.* 2020), pois a distribuição de dados com calda muito alongada pode comprometer a análise em estimativas via krigagem (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989).

O modelo esférico foi o que mais se ajustou aos parâmetros do semivariograma (Quadro 3) para todas as safras de soja. De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), o modelo esférico descreve propriedades com alta continuidade espacial.

Quadro 3. Parâmetros para o ajuste dos semivariogramas das safras de soja 2019/20, 2020/21 e 2021/22.

Safra	Modelo	Semivariograma			Validação cruzada		Dependência Espacial	
		C <sub>0</sub> <sup>1</sup>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> <sup>2</sup>	A <sup>3</sup>	a <sup>4</sup>	RMSE <sup>5</sup>	IDE <sup>6</sup>	GDE <sup>7</sup>
2019/20	Esférico	20455,64	35339,62	114,83	0,99	164,51	57,88	Moderado
2020/21	Esférico	35320,12	76553,85	150,47	1,00	222,83	46,14	Moderado
2021/22	Esférico	6688,37	100966,40	521,43	1,01	107,94	6,62	Forte

<sup>1</sup>C<sub>0</sub>: efeito pepita; <sup>2</sup>C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>: patamar; <sup>3</sup>A: alcance (m); <sup>4</sup>a: coeficiente angular; <sup>5</sup>RMSE: raiz quadrada do erro médio; <sup>6</sup>IDE: índice de dependência espacial; <sup>7</sup>GDE: grau de dependência espacial.

O ajuste do modelo matemático aos semivariogramas experimentais foi realizado por meio dos critérios de seleção da técnica da validação cruzada, considerando maior coeficiente angular (a) e menor erro quadrático médio (RMSE). As três safras da soja apresentaram coeficiente angular acima de 0,99 (Quadro 3), indicando que os semivariogramas apresentam ajustes adequados, capazes de captar as estruturas de variação espacial do meio amostral, além de garantir bom desempenho da interpolação pela krigagem ordinária (AZEVEDO, 2004). Quanto mais próximos de 1 os valores da validação cruzada, maior a confiabilidade e maior a eficiência do modelo apresentado (ALHO *et al.*, 2014).

Apesar dos elevados valores de efeito pepita (Quadro 3) o grau de dependência espacial foi classificado (CAMBARDELLA et al., 1994) como moderado para as safras 2019/20 e 2020/21, e forte para a safra 2021/22. De acordo com Lima et al. (2010), maiores precisões podem ser obtidas na estimativa de locais não amostrados quanto maior for a dependência espacial da variável de estudo.

O maior alcance (Quadro 3) foi observado na safra 2021/22 (521,43 m), demonstrando que, apesar a baixa produtividade resultante da baixa precipitação, apresentou menor variabilidade e maior continuidade espacial, permitindo melhor precisão na estimativa em locais não amostrados. O alcance representa a distância máxima entre dois pontos para que estes estejam correlacionados espacialmente, indicando que pontos localizados numa área de raio igual ou menor ao alcance são mais homogêneos entre si (LOPES et al 2020).

Nos mapas de variabilidade da produtividade da soja nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22 (Figura 4), os valores médios de produtividade foram agrupados em cinco classes de cores, o que permitiu verificar a variabilidade produtiva ao longo da área. Os mapas de produtividade indicam alta variabilidade existente na área, e refletem as condições climáticas (Figura 2) bem como as variações texturais da área (Figura 1).



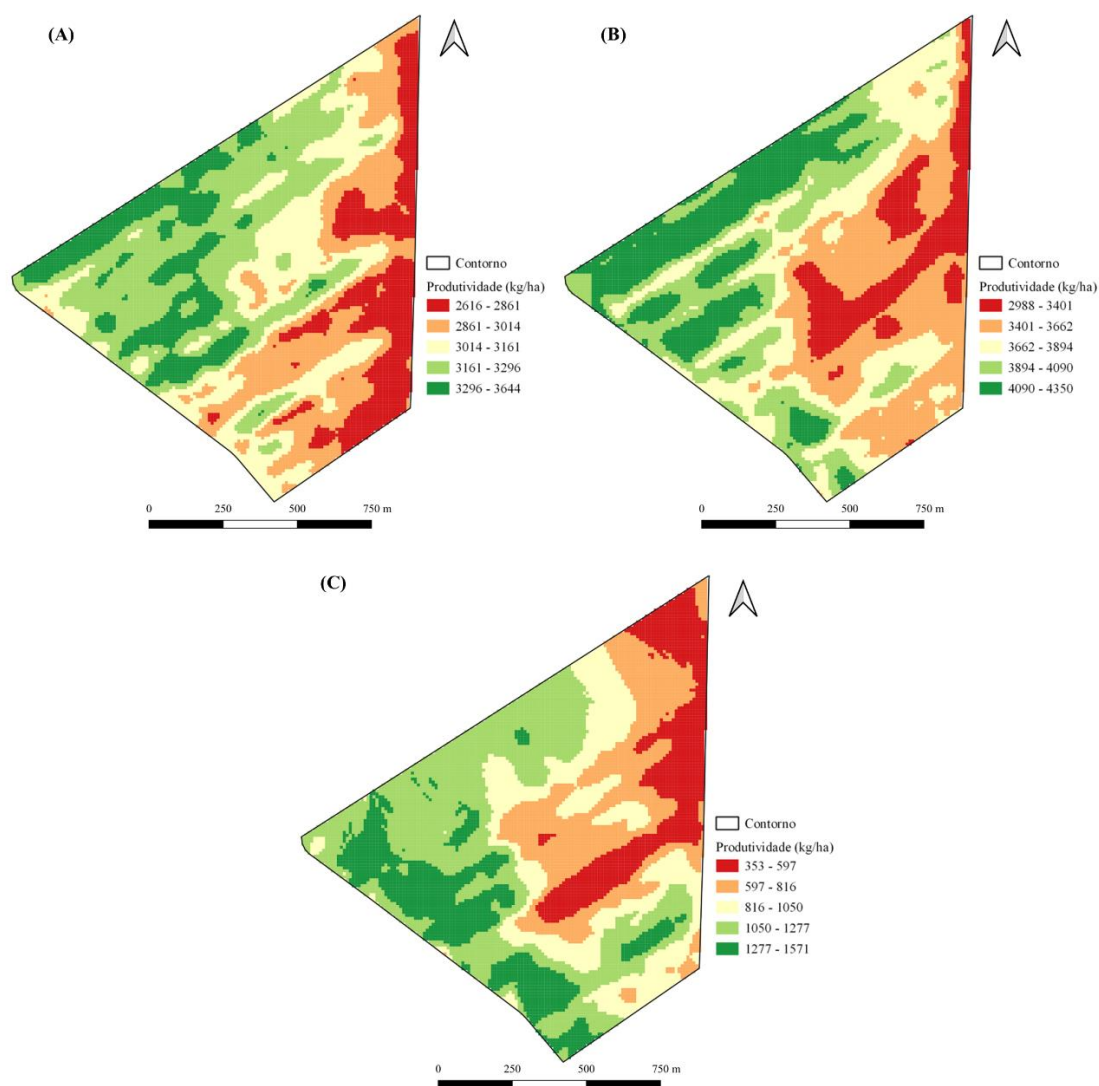


Figura 4. Mapas de variabilidade da produtividade da soja nas safras 2019/20 (A), 2020/21 (B) e 2021/22 (C).

A menor produtividade da soja na safra 2021/22, menos de 1.050 kg ha<sup>-1</sup> (17,5 sc ha<sup>-1</sup>) (Figura 4A) reflete a mesma região da área onde a concentração da fração areia é maior (entre 45 e 75%) (Figura 1A), ou seja, área com maior presença de macroporos, responsável pela drenagem livre e fácil movimentação de água e ar, enquanto a retenção de água que auxilia o desenvolvimento das plantas depende da presença de microporos (FU et al., 2019), presentes na fração argila do solo.

As safras 2019/20 e 2020/21 apresentaram produtividade da soja variando entre 2.616 e 3.644 kg ha<sup>-1</sup> (43,6 a 60,7 sc ha<sup>-1</sup>), e 2.988 e 4.350 kg ha<sup>-1</sup> (49,8 a 72,5 sc ha<sup>-1</sup>), respectivamente (Figura 4), superando em parte da área a média nacional para ambas as safras, sendo de 3.292 kg ha<sup>-1</sup> para a safra 2019/20 (CONAB, 2019) e

3.528 kg ha<sup>-1</sup> para a safra 200/21 (CONAB, 2021). Entretanto, a safra 2021/22 apresentou produtividade variando entre 353 e 1.571 kg ha<sup>-1</sup> (5,9 e 26,2 sc ha<sup>-1</sup>), 48% abaixo da média nacional de 3.029 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2022).

Essa diferença de produtividade pode ser atribuída à seca sofrida no último ano (Figura 2 e Quadro 4). Segundo Seixas et al. (2020), a maioria das lavouras de soja brasileiras, apesar do elevado grau de tecnificação, ainda apresentam limitação para a obtenção do máximo potencial produtivo quando há baixa disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura.

Quadro 4. Demonstração do volume acumulado mensal e total, e, distribuição das chuvas durante o ciclo da cultura e período reprodutivo (R1 e R7) para as três safras na área de estudo.

	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Total
	----- mm -----						
	Safra 2019/20 <sup>1</sup>						
Ciclo completo	-	0,0	380,0	244,0	145,0	75,0	844,0
R1 - R7	-	-	-	119,0	145,0	-	264,0
	Safra 2020/21 <sup>2</sup>						
Ciclo completo	-	144,0	134,0	541,0	42,0	14,5	875,5
R1 - R7	-	-	-	359,5	22,0	-	381,5
	Safra 2021/22 <sup>3</sup>						
Ciclo completo	130,0	75,0	50,0	122,0	48,0	-	425,0
R1 - R7	-	-	0,0	122,0	10,0	-	132,0

<sup>1</sup>Semeadura a colheita: período de 30/11/2019 a 21/03/2020; R1 a R7: período de 22/01/2020 a 28/02/2020; <sup>2</sup>Semeadura a colheita: período de 01/11/2020 a 12/03/2021; R1 a R7: período de 18/01/2021 a 11/02/2021; <sup>3</sup>Semeadura a colheita: período de 15/10/2021 a 27/02/2022; R1 a R7: período de 15/12/2021 a 03/02/2022.

O volume total de água que a cultura da soja necessita varia entre 450 a 800 mm ciclo<sup>-1</sup> (SEIXAS et al., 2020). A safra 2021/22, que apresentou menor produtividade, teve precipitação acumulada abaixo do mínimo exigido pela cultura, com apenas 425 mm (Quadro 4).

A necessidade hídrica da soja aumenta à medida que a planta avança seu desenvolvimento, atingindo o máximo durante a floração – enchimento de grãos (SEIXAS et al., 2020). Nesse período reprodutivo, fase mais crítica à falta de água na cultura da soja, o volume de água ideal situa-se entre 120 a 300 mm (FARIAS et al., 2009). A safra 2021/22 apresentou precipitação próxima da mínima (132 mm) entre R1 e R7.

De acordo com Seixas et al. (2020), as reduções da produtividade são mais drásticas quando há déficit hídrico no período reprodutivo que no período vegetativo, resultando em queda prematura de flores, abortamento de vagens e “chochamento” de grãos, pois a seca, além de reduzir o acúmulo de matéria seca nos grãos, antecipa a maturação e diminui o tamanho dos grãos.

Observando os resultados da análise de correlação de Pearson entre os atributos físicos do solo e a produtividade de soja nas três safras avaliadas (Quadro 5), nota-se que as correlações, no geral, são consideradas regular, forte ou muito forte (entre 0,3 e 1,0) (CALLEGARI-JACQUES, 2011) para a maioria das correlações. Apenas os macroporos (Ma) não apresentaram correlação significativa com a produtividade de soja nas três safras, e o índice de estabilidade de agregados (IEA) com a safra 2019/20.

Quadro 5. Matriz de correlação de Pearson entre os atributos físicos do solo e produtividade da soja nas safras 2019/20, 2020/21 e 2021/22.

	Soja 2019/20	Soja 2020/21	Soja 2021/22
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	-0,52**	-0,75**	-0,75**
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	0,48**	0,73**	0,68**
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	0,53**	0,74**	0,75**
Macro (%) <sup>1</sup>	0,44**	0,71**	0,75**
Micro (%) <sup>2</sup>	-0,44**	-0,71**	-0,75**
IEA (%) <sup>3</sup>	0,22	0,59**	0,56**
CO (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>4</sup>	0,43**	0,62**	0,69**
RP (MPa) <sup>5</sup>	0,31**	0,54**	0,55**
Ds (kg dm <sup>-3</sup> ) <sup>6</sup>	-0,40**	-0,50**	-0,40**
Ma (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>7</sup>	0,02	-0,02	-0,18
Mi (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>8</sup>	0,42**	0,64**	0,74**
Pt (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) <sup>9</sup>	0,37**	0,55**	0,51**

(\*\*)Correlação linear de Pearson significativa ( $p < 0,01$ ). <sup>1</sup>Macro: macroagregados; <sup>2</sup>Micro: microagregados; <sup>3</sup>IEA: índice de estabilidade de agregados; <sup>4</sup>CO: carbono orgânico; <sup>5</sup>RP: resistência a penetração; <sup>6</sup>Ds: densidade do solo; <sup>7</sup>Ma: macroporos; <sup>8</sup>Mi: microporos; <sup>9</sup>Pt: porosidade total.

Na safra 2019/20, a produtividade da soja apresentou coeficientes significativos de -0,52, 0,48 e 0,53 com as frações areia, silte e argila, respectivamente, enquanto as safras 2020/21 e 2021/22 apresentaram coeficientes mais elevados entres os mesmos atributos de solo, chegando, chegando a 75% de correlação.

Esta correlação elevada das safras 2020/21 e 2021/22 pode ser visualizada espacialmente pela semelhança entre os mapas de produtividade (Figura 4A e 4B) e os mapas de variação textural, principalmente das frações areia (Figura 1A) e argila (Figura 1B).

Além disso, a produtividade da soja na safra 2019/20 resultou em coeficientes de correlação menores para todos os outros atributos de solo, quando comparado às demais safras. Isso indica que em um ano com melhor distribuição de chuva durante o ciclo da soja (safra 2019/20) (Quadro 4), a produtividade se torna menos sensível às variações dos atributos físicos da área, quando comparado à produtividade da soja em um ano de déficit hídrico (safra 2021/22) (Quadro 4), por exemplo.

Em todas as safras avaliadas, a produtividade da soja apresentou correlação negativa com a fração areia, com coeficientes entre 52 e 75% (Tabela x), sendo menos sensível na safra com maior disponibilidade hídrica (2019/20), refletido pela menor capacidade de retenção de água que este atributo possui devido à redução de microporos no solo (CRESPO et al., 2021), o que impacta diretamente na produtividade da cultura.

A correlação da produtividade da soja com o carbono orgânico (CO) também foi elevada (Quadro 5), sendo classificada com regular para a safra 2019/20 e forte para as safras 2020/21 e 2021/22 (CALLEGARI-JACQUES, 2011), apesar do teor médio de carbono ( $12,95 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Quadro 2) ter sido classificado como baixo (SOUSA E LOBATO, 2004). De acordo com Wulanningtyas et al. (2021), o carbono orgânico é a chave para manter a qualidade e a saúde do solo, e a sua manutenção em teores elevados está associada a presença de resíduos culturais na superfície do solo (AKHTAR et al., 2018; BLANCO-CANQUI et al., 2018; BUSS et al., 2019; AKHTAR et al., 2019; KHAN et al., 2019).

A produtividade da soja apresentou correlação antagônica entre macro e microagregados, com coeficientes entre 44 e 75%, positivos para macro e negativos para microagregados (Quadro 5). Já o IEA resultou em coeficientes de correlação de 0,59 e 0,56 com a produtividade da soja nas safras 2020/21 e 2021/22, respectivamente. Segundo Crespo et al. (2021), sistemas de cultivo a base de soja podem reduzir a estabilidade dos agregados, pois são impulsionados pela qualidade dos resíduos, ao invés da sua quantidade.

Assim como o CO e o IEA, a RP, Porosidade total (Pt) e Microporos (Mi) apresentaram correlação significativa e positiva com a produtividade da soja nas três safras, com coeficientes entre 0,31 e 0,74 (Quadro 5), sendo os menores coeficientes obtidos na safra 2019/20.

Quanto a densidade do solo (Ds), apresentou correlação negativa com todas as safras de soja, classificada como regular (CALLEGARI-JACQUES, 2011), ou seja, quanto maior os teores de densidade do solo, menores foram as produtividades da soja. De acordo com Crespo et al. (2021), sistemas de cultivo a base de soja frequentemente apresentam compactação da superfície e aumento da Ds, alterando a distribuição dos poros no volume do solo. Uma alternativa para reduzir a Ds é a inclusão de gramíneas nas sequencias de cultivo (CHOUDHARY et al., 2018).

Considerando todos os coeficientes de correlação apresentados e pensando em regiões com má distribuição de chuva durante o ciclo de desenvolvimento da soja, pode-se visualizar a necessidade de manter o solo em condições mais próximas do ideal possível quanto à qualidade dos atributos físicos. De acordo com Faé et al. (2020), o fator final que limita a captação de nutrientes e água por meio do seu armazenamento e exploração das raízes no volume do solo, são as propriedades físicas do solo.

A interação entre o ambiente e as condições físicas, químicas e biológicas do solo resultam nas respostas das plantas (MORAES et al., 2020). Estudos voltados para o monitoramento da qualidade do solo por meio da análise dos atributos físicos são essenciais para a definição de sistemas agrícolas sustentáveis, além de permitir a definição de manejos adequados com foco na conservação (PESSOA et al., 2018). De acordo com Cortez et al. (2018), o grande desafio da sustentabilidade nos sistemas de produção está na quantidade e qualidade dos resíduos culturais provenientes da semeadura direta.

A adoção de sistemas conservacionistas associado ao manejo de culturas de cobertura e manutenção de resíduos na superfície do solo são os esforços necessários para alcançar elevada produtividade e sustentabilidade agrícola. Estes sistemas melhoram a saúde e qualidade do solo, garantem menor potencial de erosão, maior incorporação e estabilização do carbono, melhor agregação das partículas do solo, aumentam as taxas de infiltração de água e reduzem a evaporação da água do solo

(LI et al., 2019; NOURI et al., 2019; XAVIER et al., 2019; MUONI et al., 2020; WULANNINGTYAS et al., 2021).

Compreender os fatores que contribuem para altas produtividades e suas variações, pode ajudar a traçar caminhos para maior produtividade, lucratividade (FAÉ et al., 2020) e sustentabilidade dos sistemas de cultivo. Além disso, o monitoramento da qualidade do solo é essencial para as decisões sobre o manejo sustentável do agroecossistema (OBADE, 2019).

#### 4.4 Conclusões

A produtividade da soja apresentou moderada a forte dependência espacial.

A variabilidade das produtividades de soja foi influenciada pela textura do solo. Em condições de déficit hídrico, a produtividade foi menor nas regiões com maiores teores de areia.

As produtividades da soja apresentaram correlação negativa com os atributos areia, microagregação e densidade do solo, e correlação positiva com argila, silte, macroagregação, índice de estabilidade de agregados, carbono orgânico, resistência a penetração, microporosidade e porosidade total.

O atributo macroporosidade do solo não apresentou correlação significativa com as produtividades da soja.

#### 4.5 Referências

AKHTAR, K., WANG, W., REN, G., KHAN, A., FENG, Y., YANG, G. Changes in soil enzymes, soil properties, and maize crop productivity under wheat straw mulching in Guanzhong, China. **Soil Tillage Research**, v.182, p.94–102, 2018.

AKHTAR, K.; WANG, W.; REN, G.; KHAN, A.; FENG, Y.; YANG, G.; WANG, H. Integrated use of straw mulch with nitrogen fertilizer improves soil functionality and soybean production. **Environment International**, v.132, n.105092, 2019.

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de

carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, p.246-254, 2014.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Palotti, 2004. 100p.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v.240, p.95-105, 2019.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v.326, p.164-200, 2018.

BÜNEMANN, E.K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKELE, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – a critical review. **Soil Biology & Biochemistry**, v.120, p.105-125, 2018.

BUSS, R. N.; SILVA, R. A.; SIQUEIRA, G. M.; LEIVA, J. O. R.; OLIVEIRA, O. C. C.; FRANÇA, V. L. Spatial and multivariate analysis of soybean productivity and soil physical-chemical attributes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.6, p.446-453, 2019.

CALLEGARI-JAQUES, S. M. **Correlação linear simples. Bioestatística: Princípios e aplicações**. 1 ed. Artmed: Oficina de textos, 2011. p.84-93.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CHOUDHARY, M.; JAT, H. S., DATTA, A.; YADAV, A. K.; SAPKOTA, T. B.; MONDAL, S.; MEENA, R. P.; SHARMA, P. C.; JAT, M. L. Sustainable intensification influences soil quality, biota, and productivity in cereal-based agroecosystems. **Applied Soil Ecology**, v.126, p.189-198, 2018.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim da Safra de Grãos: 1º Levantamento - Safra 2019/20** - Tabela de levantamento. Brasília: CONAB, 2019.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra Brasileira de grãos**. Brasília : CONAB, v.8, n.12, 2021.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra Brasileira de grãos**. Brasília : CONAB, v.9, n.12, 2022.

CORTEZ, J. W.; DA SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; ARCOVERDE, S. N. S.; OLSZEWSKI, N. Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. **Revista Agrarian**, v.11, n.42. p.343-351, 2018.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York, John Wiley, 1991. 900p.

CRESPO, C.; WYNGAARD, N.; ROZAS SAINZ, H.; STUDDERT, G. A.; BARRACO, M.; GUDELJ, V.; BARBAGELATA, P.; BARBIERI, P. Effect of intensified cropping sequences on soil physical properties in contrasting environments. **Catena**, v.207, n.105690, 2021.

FAÉ, G. S.; KEMANIAN, A. R.; ROTH, G. W.; WHITE, C.; WATSON, J. E. Soybean yield in relation to environmental and soil Properties. **European Journal of Agronomy**, v.118, n.126070, 2020.

FAO. Food and Agriculture Organization (2022). **Countries by commodity**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations/FAOSTAT. Disponível em: <[https:// www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_ by\\_commodity](https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity)>. Acesso em 16 ago. 2022.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: Monteiro, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 263-277.



FU, Y.; TIANB, Z.; AMOOZEGAR, A.; HEITMAN, J. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. **Soil and Tillage Research**, v.193, p.114-121, 2019.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 560p

KHAN, A., MUHAMMAD, A., KHAN, A.A., ANWAR, S., HOLLINGTON, P.A. Nitrogen affects leaf expansion and elongation rates during early growth stages of wheat. **International Journal of Agriculture and Biology**, v.21, n.6, p.1117–1122, 2019.

KOPPEN, W. P. **Climatologia, com un estudio de los climas de la tierra**. México : Fondo de Cultura Económica, 1948. 478p.

LI, Y.; LI, Z.; CUI, S.; JAGADAMMA, S.; ZHANG, Q. Residue retention and minimum tillage improve physical environment of the soil in croplands: A global meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, v.194, n.104292, 2019.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, v.34, p.127-136, 2010.

LOPES, K. A. L.; PINTO JUNIOR, F. F.; AGUIAR, F. I. S.; SOUSA, A. E. S; DE OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S. Diferentes densidades amostrais na caracterização da variabilidade espacial de atributos granulométricos de um Argissolo amarelo distrocoeso típico. **Cultura Agronômica**, v.29, n.1, p.50-60, 2020.

MALDANER, L. F.; MOLIN, J. P. Data processing within rows for sugarcane yield mapping. **Scientia Agricola**, v.77, n.20180391, 2020.

MARTÍNEZ, J. P.; CRESPO, C.; SAINZ ROZAS, H.; ECHEVERRÍA, H.; STUDDERT, G.; MARTINEZ, F.; CORDONE, G.; BARBIERI, P. Soil organic

carbon in cropping sequences with predominance of soybean in the argentinean humid pampa. **Soil Use Manage**, v.36, p.173-183, 2020.

MORAES, M. T. DE.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIAN, R.; LEITER, D.; SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.200, n.104611, 2020.

MUONI, T.; KOOMSON, E.; ÖBORN, I.; MAROHN, C.; WATSON, C. A.; BERGKVIST, G.; BARNES, A.; CADISCH, G.; DUNCAN, A. Reducing soil erosion in smallholder farming systems in east Africa through the introduction of different crop types. **Experimental Agriculture**, v.56, n.2, p.183-195, 2020.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Scientific Breakthroughs to Advance Food and Agricultural Research by 2030**. The National Academies Press, Washington, DC, 2018.

NOURI, A.; LEE, J.; YIN, X.; TYLER, D. D.; SAXTON, A. M. Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. **Geoderma**, v.337, p.998-1008, 2019.

OBABE, V. P. Integrating management information with soil quality dynamics to monitor agricultural productivity. **Science of the Total Environment**, v.651, p.2036-2043, 2019.

PEREIRA, G. W.; VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. D.; COELHO, A. L. D. F.; COSTA, M. M.; GRIFT, T. Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging. **Agronomy**, v.12, n.1350, 2022.

PESSOA, M. M. C.; NUNESM L. A. P. L.; SOUSA, R. S.; ARAÚJO, A. S. F.; IBIAPINA, T. V. B.; SALVIANO, A. A. C. Physical attributes of yellow oxisol

under different monocultures in the savanna of Piauí state, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.13, n.4, e5576, 2018.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

QGIS.org, 2022. **QGIS Geographic Information System**. QGIS Association.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.

SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. C. **Tecnologias de Produção de Soja**. Londrina : Embrapa Soja, 2020. 347 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília, DF : Embrapa, 2017. 574 p.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F. et al. (Eds). *Tópicos em Ciência do Solo*. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, p.1-54, 2000.

WULANNINGTYAS, H. S.; GONG, Y.; LI, P.; SAKAGAMI, N.; NISHIWAKI, J.; KOMATSUZAKI, M. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil & Tillage Research**, v.205, n.104749, 2021.

XAVIER, C. V.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. B.; SANTOS, G. A. A.; BARBOSA, M. A.; MILORI, D. M. B. P.; RIGOBELLO, E.; CORÁ, J. E.; SCALA JÚNIOR, N. L. Crop rotation and succession in a no-tillage system: Implications for CO<sub>2</sub> emission and soil attributes. **Journal of Environmental Management**, v.245, p.8-15, 2019.

## 5 CONCLUSÕES GERAIS

O sistema de semeadura direta é eficiente na manutenção da estrutura do solo, porém, não assegura índices adequados de carbono orgânico e macroporosidade.

A variabilidade granulométrica interfere na distribuição de macro e microagregados, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados, carbono orgânico, resistência do solo à penetração, densidade, porosidade total e microporosidade do solo e produtividade da soja.

Em condições de déficit hídrico, a produtividade foi menor nas regiões com maiores teores de areia.

A área apresenta porosidade total, densidade e resistência a penetração adequados, indicando não haver compactação.

A produtividade da soja apresentou moderada a forte dependência espacial.

As produtividades da soja apresentaram correlação negativa com os atributos areia, microagregação e densidade do solo, e correlação positiva com argila, silte, macroagregação, índice de estabilidade de agregados, carbono orgânico, resistência a penetração, microporosidade e porosidade total.

O atributo macroporosidade do solo não apresentou correlação significativa com as produtividades da soja.