

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

HERNANDES ANDRADE QUEIROZ

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO DE UM LATOSSOLO
VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO COM ROTAÇÃO DE CULTURA NO BIOMA
CERRADO**

**Ilha Solteira
2024**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

HERNANDES ANDRADE QUEIROZ

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM
LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO COM ROTAÇÃO DE
CULTURA NO BIOMA CERRADO**

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira – UNESP
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Doutor.

Especialidade: Sistemas de Produção.

Rafael Montanari
Orientador

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Q3

Queiroz, Hernandes Andrade.

Variabilidade espacial dos atributos físico de um latossolo vermelho sob plantio direto com rotação de cultura no bioma cerrado / Hernandes Andrade Queiroz. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
77 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2024

Orientador: Rafael Montanari
Inclui bibliografia

1. Degradação. 2. Pé-de-arado. 3. Qualidade do solo. 4. Compactação do solo.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO EM DUAS PROFUNDIDADES SOB PLANTIO DIRETO COM ROTAÇÃO DE CULTURA NO BIOMA CERRADO

AUTOR: HERNANDES ANDRADE QUEIROZ

ORIENTADOR: RAFAEL MONTANARI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Dr. RODOLFO DE NIRO GAZOLA (Participação Virtual)
Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio-Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Documento assinado digitalmente
 CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA
Data: 04/03/2024 08:30:48-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Prof. Dr. RAYNER SVERSUT BARBIERI (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / Faculdade Associadas de Uberaba - FAZU

Dr. DIEGO DOS SANTOS PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
 MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Data: 02/03/2024 10:29:34-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 DIEGO DOS SANTOS PEREIRA
Data: 01/03/2024 11:39:28-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Ilha Solteira, 01 de março de 2024

Documento assinado digitalmente
 RAYNER SVERSUT BARBIERI
Data: 04/03/2024 12:32:09-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 RODOLFO DE NIRO GAZOLA
Data: 05/03/2024 08:26:33-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

DEDICO

Aos meus pais Nelson Alves Queiroz,
Maria de Lourdes Andrade Queiroz, a minha prima Irany Nunes Queiroz.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, se cheguei até aqui foi porque Ele permitiu.

Aos meus pais, Nelson Alves Queiroz e Maria de Lourdes Andrade Queiroz, por me ajudarem e me apoiarem em mais esta conquista, pela compreensão, incentivo, amor, respeito, confiança, sem vocês não teria chegado até aqui.

Ao meu orientador Professor Dr. Rafael Montanari e sua família, por ter me aceitado como orientado, pelos ensinamentos, dedicação, orientação, paciência e principalmente pela amizade que construímos nessa trajetória e que tenho certeza que permanecerá.

Ao Professor Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho sempre me incentivou a realizar o Doutorado

Aos amigos de infância Gustavo de Lima Barbosa e seus pais, Eduardo Gonçalves Minhoto Teixeira e seus pais, Leandro (Lelê), Danilo, Cleiton, Carlos Henrique Rossi. Aos amigos da UNESP, Dr. Douglas Henrique Bandeira, meu tutor aconselhador que esteve no campo em coletas de solos, Nilton Mario, pela amizade e compreensão e horas de dúvidas, vocês foram muito importantes para que eu conseguisse chegar até o final do doutorado, muito obrigada pela amizade e companheirismo de todos vocês, nunca me esquecerei de vocês. Aos amigos das republicas: Overgasmio, ST (São Tomé), Bola Azul, Sócio, Oca, Canta Galo, que sempre me ajudaram e me fizeram companhia em horas de risadas e entretenimento.

Ao Grupo GEOISA e Grupo PIBIC, orientados pelo Professor Dr. Rafael Montanari, Maysa Sumaraiva Rodrigues (pinga), Carlos Matheus Santos da Costa (um dia), Miro Junior de Souza (tesouro), Raul Stabile de Araujo, Jônatas Milan Coelho (dunga), Bruno Henrique Volpato Rodriguês (rabicó), pelo esforço de ir no Campo fazer coletas de solos em dias de preocupação Global provocada por uma Pandemia da Covid- 19 todos e toparam em passar essa situação.

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP, pela concessão da vaga e infraestrutura oferecida.

Aos técnicos do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos – DEFERS, em especial Marcelo Rinaldi da Silva e Diego Gonçalves Feitosa do laboratório de nutrição de plantas e física do solo, Carlos Araújo da Silva do laboratório de fertilidade do solo, pela paciência e ajuda todas as vezes que precisei de vocês.

A todos os professores do curso de Agronomia da UNESP do campus de Ilha Solteira - SP, que tive o prazer de conhecer e aprender muito. Aos funcionários da fazenda que estiveram sempre à disposição quando precisei de ajuda.

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

A todos que contribuíram direta ou indiretamente em mais esta etapa da minha vida, muita gratidão.

“Faça as coisas o mais simples que você puder, porém não se restrinja às mais simples.”

Albert Einstein

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, com que se sintam humildes.”

Leonardo da Vinci

“Um trabalho te dá um propósito e um significado”.

Stephen Hawking

RESUMO

A agricultura de precisão utiliza informações sobre propriedades locais e condições climáticas para otimizar o uso de insumos agrícolas, aumentar a produtividade e reduzir o impacto ambiental na agricultura. Na agricultura de precisão, a GEO (geoestatística) é uma ferramenta importante para estudar a variabilidade espacial das propriedades do solo, incluindo aspectos físicos. Muitas dessas tecnologias agrícolas, utiliza o sistema de plantio direto (SPD) com ferramentas estatísticas, visando recuperar solos degradados utilizando resíduos vegetais com intuito de incorporar a matéria orgânica do solo. A degradação subsuperficial, devido ao pé-de-grade ou pé-de-arado, prejudica o crescimento das raízes e a absorção de nutrientes pelas plantas. A pesquisa foi realizada em uma área com mais de 10 anos de plantio direto na fazenda da UNESP (FEPE) de Ilha Solteira – SP em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico. Foram usadas a GEO e análise de componentes principais (CPA). A GEO envolveu a coleta de dados em 60 pontos, avaliando macroporosidade - Ma ($m^3 m^{-3}$), microporosidade - Mi ($m^3 m^{-3}$), porosidade total - PT ($m^3 m^{-3}$), densidade de partículas - DP $kg dm^{-3}$, resistência à penetração do solo RP (MPa) e densidade do solo - DS ($kg dm^{-3}$) em duas profundidades 0,00-0,20m e 0,20-0,40m. Assim analisou atributos físicos do solo na superfície e subsuperfície no SPD. Foram usadas análises estatísticas clássicas, como o teste de Shapiro-Wilk, e a matriz de correlação de Pearson para identificar relações entre esses atributos. Também aplicou a análise de componentes principais (CPA) para avaliar a influência dos atributos físicos entre si. Os valores médios de umidade do solo melhoraram com 10 anos de implementação do sistema de plantio direto (SPD) na camada superficial. Alguns atributos físicos do solo, como areia, Mi , DS e PT e mostraram forte dependência espacial, tornando possível a criação de mapas de Krigagem. A dependência espacial da areia (ARE) pode ser influenciada por práticas anteriores ao SPD. A porosidade total, influenciada pela quantidade de resíduos vegetais, afeta a condutividade hídrica do solo. O uso prolongado do Sistema Plantio Direto (SPD) provocou compactação natural pelo rearranjo das partículas na superfície e subsuperfície, e a degradação do solo devido ao pé-de-grade ou pé-de-arado. A densidade do solo (DS) está próxima do limite crítico, indicando recuperação lenta da estrutura do solo motivado pelo acúmulo de resíduo vegetal perante o tempo que está implantado o SPD. Os atributos de umidade gravimétrica UG e DS na subsuperfície são semelhantes, demonstrando homogeneização. Compactação anterior à implantação do SPD provocou uma alta correlação entre atributos relacionados à compactação. A variabilidade espacial dos atributos físicos na subsuperfície reflete influência, observado nos mapas de krigagem, principalmente entre UG e Mi . O SPD

está gradualmente melhorando a qualidade do solo, mas a DS ainda não atingiu os padrões ideais. A área experimental como um todo está compactada e homogênea para UG, devido aos efeitos do pé-de-grade e pé-de-arado na subsuperfície.

Palavras-chave: degradação; pé-de-arado; qualidade do solo; compactação do solo.

ABSTRACT

Precision agriculture uses information about local properties and climate conditions to optimize the use of agricultural inputs, increase productivity and reduce the environmental impact of agriculture. In precision agriculture, GEO (geostatistics) is an important tool for studying the spatial variability of soil properties, including physical aspects. Many of these agricultural technologies use tillage system management (SPD) with statistical tools, aiming to recover degraded soils using plant residues with the aim of incorporating organic matter from the soil. Subsurface degradation, due to harrowing or plowing, impairs root growth and nutrient absorption by plants. The research was carried out in an area with more than 10 years of direct planting on the UNESP (FEPE) farm in Ilha Solteira – SP on a OXISOL. Geostatistics (GEO) and principal component analysis (CPA) tools were used. GEO involved data collection at 60 points, evaluating macroporosity - Ma ($m^3 m^{-3}$), microporosity - Mi ($m^3 m^{-3}$), total porosity - PT ($m^3 m^{-3}$), particle density - DP $kg dm^{-3}$, resistance to soil penetration RP (MPa) and soil density – DS ($kg dm^{-3}$) at two depths 0.00-0.20m and 0.20-0.40m. The study analyzed soil physical attributes on the surface and subsurface in the SPD. Classic statistical analyzes were used, such as the Shapiro-Wilk test, and the Pearson correlation matrix to identify relationships between these attributes. It also applied PCA analysis to evaluate the influence of physical attributes on each other. Average soil moisture values improved after 10 years of implementing the direct planting system (SPD) in the surface layer. Some soil physical attributes, such as sand, Mi , DS and PTc , showed strong spatial dependence, making map creation complex. Sand spatial dependence (ARE) may be influenced by practices prior to SPD. Total porosity, influenced by the amount of plant residue, affects water conductivity. Prolonged use of the direct planting system (SPD) caused natural compaction due to the arrangement of particles on the surface and subsurface, and soil degradation due to the plowshare on grader blade. The soil density (DS) is close to the critical limit, indicating slow recovery of the soil structure caused by the accumulation of plant residue over the time that the SPD has been implemented. The gravimetric unit (UG) and DS attributes in the subsurface are similar, demonstrating homogenization. Compaction prior to SPD implementation caused a high correlation between attributes related to compression. The spatial variability of physical attributes in the subsurface reflects influence, observed in the kriging maps, mainly between UG and Mi . SPD is gradually improving soil quality, but DS has not yet reached ideal standards. The experimental area as a whole is compacted and homogeneous for UG , due to the effects of the Plowshare and Grader blade in the subsurface.

Keywords: degradation; plowshare; soil quality; compaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização geográfica da área experimental da fazenda FEPE com pontos de coleta para amostra de solo.....	30
Figura 2- Componentes principais dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico na profundidade 0,00-0,20m sob mais dez anos de plantio direto.....	40
Figura 3- Semivariogramas simples dos atributos físicos do solo (ARE, Mi, PT, DS) na profundidade 0,00-0,20 m de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico.....	41
Figura 4- Mapas de krigagem de alguns atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico (ARE, Mi) na profundidade de (0,00-0,20 m) com plantio do cultivo da soja soSPD.....	42
Figura 5- Localização da área geográfica da fazenda FEPE com pontos de coleta para amostra do so.....	48
Figura 6- Impacto da passagem de tráfego de máquinas na compactação.....	53
Figura 7- CPA para atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico em subsuperfície.....	58
Figura 8- Semivariograma simples ajustados e mapas de krigagem de alguns atributos do solo ra subsuperfície de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico sob SPD no bioma cerrado.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Análise descritiva dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrofico na profundidade de 0,00 - 0,20 m sob plantio direto.....	35
Tabela 2 -Matriz de correlação dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico na profundidade de 0,00 - 0,20m sob plantio direto.....	37
Tabela 3 -Análise dos CPA que apresentaram escore $\geq 0,300$ (positivo ou negativo) com os componentes principais 1,2 e 3 para profundidade 0,00-0,20m.....	38
Tabela 4 -Influência dos pontos nos atributos físicos do solo no gráfico de componentes principais na profundidade 0,00-0,20m.....	39
Tabela 5 -Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico sob plantio direto em sequeiro na profundidade 0,00 -0,20m.....	40
Tabela 6 -Análise descritiva dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico na profundidade de 0,20 – 0,40 m sob plantio direto no sequeiro.....	53
Tabela7 -Correlação de Persson para atributos físicos do solo de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico na profundidade de subsuperfície 0,20-0,40m.....	54
Tabela 8 -Matriz de correlação dos atributos físicos de um LATOSSOLO Vermelho distrofico na profundidade de 0,20 - 0,40 m sob plantio direto.....	56
Tabela 9 -Análise dos CPA que apresentaram escore $\geq 0,300$ (positivo ou negativo) com os componentes principais 1,2 e 3 para profundidade 0,20-0,40m.....	57
Tabela 10 -Influência dos pontos nos atributos físicos do solo no gráfico de componentes principais na profundidade 0,20-0,40m.....	58
Tabela 11 -Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos físicos de um LATOSSOLO Distrofico sob plantio direto em sequeiro na profundidade 0,20-0,40m.....	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	DEGRADAÇÃO DO SOLOS AGRICULTÁVEIS.....	17
2.2	PLANTIO DIRETO NO BRASIL.....	19
2.3	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.....	21
2.4	GEOESTATISTICA NOS ESTUDOS DE SOLOS.....	24
3	VARIABILIDADE ESPACIAL DE ALGUNS ATRIBUTOS FÍSICOS EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO COM ROTAÇÃO DE CULTURAS.....	26
3.1	INTRODUÇÃO.....	27
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
3.4	CONCLUSÕES.....	43
4	ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ALGUS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO NA SUBSUPERFÍCIE NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO.....	43
4.1	INTRODUÇÃO.....	45
4.2	MATERAI E MÉTODOS.....	47
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.4	CONCLUSÕES.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICE A: GRÁFICOS.....	73
	APÊNDICE B: FOTOS DO EXPERIMENTO.....	75

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o planeta vem acompanhando uma preocupação na produção de alimentos demandado pelo crescimento populacional. Ao mesmo momento vem pressionando o meio ambiente e seus elementos sendo um deles os solos que vem sendo degradado e motivado pela intensa produção agrícola, com isso pode elevar a consequências irreparáveis. Dados contidos em relatório da FAO (2017) dão conta de que 30% das terras do planeta estão degradadas por processos como diversidade de erosões em solos agricultáveis variando cem mil vezes a taxa de erosão natural provocando desequilíbrios de nutrientes, perda de matéria orgânica elevando um gasto anual de reparos com fertilizantes de U\$ 150 bilhões, trazendo perspectiva de perdas na produção que pode chegar a 10% até 2050 (Ferreira, 2020).

Hoje, cerca de 20% dos solos agricultáveis no mundo estão no território brasileiro Batista Filho (2007), com uma área 65.913.738 de hectares Embrapa Territorial (2023). Os dados mostram que 10% do território brasileiro é utilizado para a produção de alimentos, fibras, biocombustíveis e matéria-prima com aproximação de 81 milhões de hectares (Ferreira, 2020).

Com a preocupação mundial na sustentabilidade com a produção de alimentos, há aumento na busca de alternativas do uso racional do solo como uso de parâmetros de manejo para evitar compactação do solo que dificulta o crescimento radicular e nas perdas de nutrientes pela erosão. Um desses parâmetros que encontramos hoje é a rotação de culturas (RC) que promove a diversidade de culturas, melhorando a física do solo, química do solo e a biológica, quebrando ciclos de doenças e diminuindo os gastos de manejos de solo e da planta, que está introduzida em 16 milhões de hectares no Brasil, aproveitando o máximo da janela anual para plantar como segunda safra (Savage, 2022).

Dentre os manejos mais utilizados e adequado promovendo a rentabilidade e mantendo e restaurando a saúde do solo tem-se o Sistema Plantio Direto (SPD) que acompanhado com a rotação de cultura viabiliza os efeitos sobre a produção agrícola e o meio ambiente, na totalidade se tornando o mais praticado em 33 milhões de hectares da área cultivada em 20% território do Brasil (FEBRAPDP, 2023).

Nesse contexto, um dos estados com maior avanço em hectares com manejo de SPD encontra-se o Mato Grosso do Sul, com área de 2,3 milhões de hectares sob bioma do cerrado (FAMASUL, 2021). Dessa forma o sistema de manejos como (SPD) vem se atualizando principalmente pelas próximas transformações que estão acontecendo com clima (mudanças climáticas), o qual pode afetar toda cadeia produtiva.

Com isso, surgiram técnicas inovadoras para solucionar ou diagnosticar problemas dentro

e fora da agricultura, principalmente no solo que sofre degradações mais severas pelas mudanças. Uma das ferramentas que vem ajudando nessa agricultura tecnológica chamada Agricultura de Precisão (AP) é a Geoestatísticas (GEO). Desse modo, os solos agricultáveis possuem alta variabilidade espacial nas propriedades físicas, pode interferir diretamente na produtividade, principalmente com levantamentos tradicionais baseado na intuição.

Dessa forma surge modelos matemáticos, estatísticos (quantitativos) que analisam as variações do solo no espaço e tempo em relação aos comportamentos físicos, contribuindo em noções do espaço de cada atributo perante as classes do solo (TEN CATEN *et al.*, 2012).

Nessas circunstâncias a GEO entra nos modelos quantitativos buscando analisar dados dos atributos físicos do solo e diagnosticar aleatoriedade na formação de correlação espacial e posteriormente interpolar mapas de krigagem que quantificam dependências espaciais por análises de semivariogramas (Oliver; Webster, 2014).

A análise multivariada, desempenha uma função crucial na pesquisa, associada à caracterização de solos e à sua gestão agronômica. Ao lidar simultaneamente com diversos atributos, essa abordagem estatística possibilita ao pesquisador explorar as inter-relações complexas entre distintas variáveis do solo Almeida (2012). No âmbito da geoestatística em práticas agronômicas, essa metodologia se revela especialmente valiosa, uma vez que viabiliza uma compreensão mais aprofundada e abrangente dos padrões espaciais e das interações entre as diversas variáveis do solo.

A implementação dessas técnicas multivariadas proporciona uma análise mais precisa e abrangente do sistema de manejo agronômico do solo, permitindo ao pesquisador formular conclusões mais sólidas e abrangentes sobre as condições do solo e suas repercussões para práticas agrícolas sustentáveis. Desse modo, a análise multivariada em geoestatística em solos se configura como uma ferramenta crucial para a otimização de estratégias de manejo e tomada de decisões embasadas na agricultura e na gestão agronômica.

Dessa maneira a GEO tende a ser uma ferramenta essencial para estudo dos atributos físicos no SPD, por ser um manejo de elevada complexidade, sendo relevante analisar o comportamento do solo e buscar exibir uma baixa ou alta variabilidade no espaço (Grego *et al.* 2006).

Nesse sentido objetivo-se avaliar a variabilidade espacial usando a ferramenta da GEO e da CPA para os atributos físicos em duas profundidades 0,00-0,20m 0,20-0,40m em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico sob (RC) rotação de cultura com mais de dez anos (SPD) sistema de plantio direto no Bioma Cerrado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DEGRADAÇÃO DO SOLOS AGRICULTÁVEIS

O solo é fundamental no desenvolvimento das plantas se fixando e absorvendo nutrientes para elaborar toda sua função fisiológica, nessa ocasião e baseados nas questões naturais sem transformações, a partir do momento que solo passa ser um espaço geográfico com mudanças severas em sua cobertura, condiciona positivamente no processo de degradação principalmente pela erosão. Nos países produtores de alimentos tendo características diferentes com relevo, clima. (Araujo et al., 2010) cita que as noções de degradação de terras agricultáveis se expõe à degradação ou perda total da aptidão dos solos para uso, ligado diretamente com futuro. A sustentabilidade na agricultura é crucial diante do aumento significativo da população humana, exigindo maiores cuidados com o solo, que é um indicador de grande relevância para a produção de alimentos de qualidade (Ahmed *et al.*, 2019)

A partir dessas transformações no solo pelas atividades antrópicas pode-se gerar um agravamento das taxas naturais de perdas, chegando a perdas de milhões de toneladas por erosão hídrica em regiões agricultáveis em diversas sociedades (Dotterweich, 2013). A erosão hídrica é a principal forma de degradação de solos no planeta Terra. Os fatores que contribuem para essa degradação são a erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos, o relevo (declividade e comprimento da pendente) e os sistemas de manejo empregados. Dessa forma a perda da camada superficial diminui a espessura, ocasionando a redução da capacidade do solo em reter água em todo seu perfil, provocando como consequência o escoamento superficial e o aumentando das taxas de erosão.

Quando se fala em degradações por erosão hídrica do solo, atribuindo pelas perdas de matéria orgânica de camadas superficiais e subsuperficiais do solo, contribuindo para um fator importante no condicionamento de toda estrutura física como redução da compactação e aumento da porosidade, segundo Telles *et al.*, (2011) cita que os efeitos da erosão hídrica provoca perdas de água, terra, matéria orgânica, nutrientes e os custos gerados por estas, lavados pela água da chuva apresentando prejuízos econômicos nas receitas com despesas de insumos.

Nessa condição, todas as perdas de nutrientes e manejo do relevo usados para práticas mecânicas com finalidade de evitar erosão hídrica, elevam os gastos com fertilizantes e maquinários, apresentando entre 20% a 41% dos custos de produção na soja, milho, trigo (Souza *et al.*, 2012).

Hoje na conjuntura global em valores mundiais há uma perda de 75 bilhões de toneladas de solos FAO (2017). No Brasil aproximadamente 847 milhões de toneladas são perdidos de solos agricultáveis (Merten; Minella, 2013) totalizando um altíssimo custos de U\$ 1,65 bilhões nas restaurações pela degradação provocado pela erosão hídrica Hernani et al. (2002). Com a erosão hídrica sendo uns dos fatores de degradação de terras agricultáveis do Brasil e no mundo aproximadamente um terço superando uma taxa de 10 milhões de hectares ano (Yang *et al.*, 2016).

No Brasil, 39% da área agrícola se encontra sob o bioma do Cerrado, segundo Embrapa (2013). Entre 1985 e 2020 o Cerrado teve um aumento em áreas agrícolas de 464%, o que representa um aumento de 16,8 milhões de hectares, principalmente devido à expansão da cultura da soja (Inacio, 2023).

Boa parte hoje da degradação dos solos agricultáveis no Brasil são consequências de décadas anteriores, principalmente antes de 1960, com mau uso da máquina da política agrícola brasileira em elaborar leis e incentivos para controle de degradações dos nossos biomas, e uma boa parte dos agricultores que não tinham conhecimento da importância de conservação do solo. Após a década de 60, com a revolução verde, esse cenário mudou, uma vez que atribuíram para diversos setores importantes do governo, principalmente nas universidades com seus centros de pesquisas trabalhando com as empresas privadas em buscar soluções para evitar a degradações dos solos e proliferações de pragas na época.

No ano de 2021 já se estabeleceu um programa junto ministério da agricultura e IICA (instituto interamericano de cooperação da agricultura) com objetivos de que solos tem que ser sumidouro de carbono para mitigar a mudança do clima, sendo que os Gases de efeitos estufas (GEE) representam 42% das emissões gerais diversas regiões brasileiras sendo que 18% do uso do solo incorpora novamente o carbono armazenado em todo seu processo de uso IICA (2023).

Em períodos na história da conservação de solo do Brasil serviu como exemplos napráticas conservacionistas com maquinários e uso de técnicas inovadoras na época como os terraços ou barragens e faixas, colocando alguns pesquisadores como (Quintiliano; Bertoni, Lombardi Neto; Mondardo) com reconhecimento no planeta no tema da conservação do solo por repassar técnicas para os americanos em solucionar a erosão hídrica no período de 1970, (Ferreira, 2020).

2.2 PLANTIO DIRETO NO BRASIL

O Surgimento do SPD foi com uma pesquisa simples via Sygenta, antiga empresa Reglone da Inglaterra, a combate a ervas daninhas na década de 50. Com desenvolvimento do sucesso da pesquisa, o sistema ganhou outros continentes indo à técnica para Estados Unidos e Canadá elaborando testes em fazendas em 430.000 hectares no ano de 1973 e posterior ganhou mundo (Carvalho, 2003).

No Brasil a técnica chegou em 1972 no norte do Paraná, no município de Riolândia, por um produtor Herbert Bartz, que comprou uma máquina Ali Chalmers elaborando a técnica em sua própria propriedade e posteriormente espalhando para vários municípios do Paraná, Cornélio Procópio e em toda região de Campo Mourão (Carvalho, 2003).

No Brasil nas décadas de 70 tinham preocupações com problemas com degradação dos solos, principalmente com surgimento de novas fronteiras agrícolas em diversas regiões, que acelerou o desmatamento descontrolado provocado pelo aumento em hectares de diversas culturas, principalmente a soja, o qual acarretou problemas sérios no cerrado brasileiro, como aumento de uma problemática dos países agrícolas tropicais com altos índices pluviométricos, sendo os processos da erosão hídrica provocada pelo mau uso do solo (Carvalho, 2003).

O Brasil foi pioneiro do Sistema Plantio Direto SPD na América Latina baseado no combate a degradação do solo com princípios em harmonia com meio ambiente com seus três pilares, não revolvimento do solo, a cobertura permanente do solo e a diversificação de plantas na rotação de culturas, barrando a erosão hídrica FEBRAPDP (2023). Oades (1984) explica que o SPD aliada com RC proporciona a estabilização de agregados perante perfil do solo pela própria ação da matéria orgânica gerada por restos vegetais de plantações anteriores.

Em comparação a outros sistemas de manejos de plantio no Brasil, o SPD tem em sua principal características o benefício de todo o perfil do solo com resíduos vegetais motivados pelas altas temperaturas em regiões brasileiras, sudeste, centro-oeste e no nordeste em comparação das baixas latitudes na região sul do Brasil (Casão Junior; Araújo; Llanillo, 2013).

Manter a estrutura do solo e potencializar a produção é uma das vantagens do SPD, que pode aumentar a produtividade. No entanto, a mudança de sistemas de plantio ainda tem um alto custo, o que dificulta a adoção dessa técnica pelos pequenos produtores, melhora a capacidade produtiva, acumula matéria orgânica na superfície, preserva a umidade do solo e diminui a evaporação da água do solo para a atmosfera (Medeiros, 2023).

A importância de um solo que não passa pelo procedimento de ser revolvido por grade ou outra técnica que tem como característica o tráfego de máquinas e de implementos atribuindo

a compactação do solo, segundo Marschner (1995) explica que a maneira do comportamento da compactação atribui uma alta densidade do solo diminuindo consideravelmente a macroporosidade e dificultando a entrada de água e prejudicando o crescimento radicular e suscetivelmente limitando a troca de gases principalmente oxigênio entre solo e atmosfera.

Cardoso (1997) menciona que a entrada da água no solos com suavidade ligado ao processo de capilaridade sobre um solo não degradado ou perturbado tem uma redução drástica nas ações erosivas. Os solos como as camadas superficiais compactadas tendem a sofrerem a carência de água limitando as raízes com obstáculos absorção de nutrientes das camadas subsuperficiais (Rosolem *et al.*, 1994).

O processo de revolvimento do solo com práticas convencionais deixa suscetível à exposição dos agentes externos, vento, sol, radiação solar por longos prazos, favorecendo ações das intempéries sem proteção da camada superficial (Denardin *et al.*, 2008).

Para que o SPD reduza o efeito salpicamento da água da chuva e outros processos degradantes como a erosão hídrica, é preciso a manutenção da cobertura do solo, o qual contribui significativamente na qualidade química, física e biológica do solo, protegendo dos raios solares mantendo umidade e sendo um obstáculo servindo como incorporação de teor de carbono. Segundo Adams (2016) a cobertura do solo na plantação e de forma contínua, por meio de restos vegetais de outras produções, atribuída a prática de manejo como da rotação de cultura (RC) que deixa a massa vegetal (resíduos vegetais) segmento superior do perfil do solo (camada superficial). No Brasil com biomas com características com clima tropical bem definidos verões chuvosos e invernos secos como cerrado, algumas safras passaram por problemas de degradação associado pelo mau manejo do SPD (Denardin *et al.*, 2008).

No Brasil de hoje, a agricultura é a segunda maior fonte de emissão de GEE (gases de estufa), presente em diversos setores, perdendo apenas para as modificações no revolvimento do solo e para o desflorestamento, sendo responsável por 56% da liberação desses gases na atmosfera (Cerri *et al.*, 2009).

Os solos do Brasil estão ligados diretamente com setores responsáveis em descargas de gases estufas para atmosfera afetando diretamente o clima, com isso preparos e manejos de solos vêm ganhando força e mitigar e combater a mudanças que o clima vem sofrendo. O sistema de SPD evita revolver o solo para não lançar gases para atmosfera e fazer o máximo para incorporar CO₂ no solo. Castêlões (2023). Atualmente o Brasil vem diminuindo a quantidade de GEE junto a uma agricultura inovadora em manejar com técnicas visando combater a degradação como os desflorestamentos que mudam o uso do solo liberando quantidades gigantescas de GEE na atmosfera, isso acontece principalmente na região

amazônica com 76,7% na liberação CO₂ no período de 2005 a 2010 MCTI (2013).

O aumento da produção em escala regional e participando na contribuição global fornecimento de alimentos com recordes em super safras inseridas em solos agricultáveis atribuídas por conhecimentos adquiridos pelos vários anos de sucesso da introdução (SPD). O uso de práticas conservacionistas fundidas com SPD e RC faz com que o solo passa a ser um dreno com acúmulo carbono Vieira (2009) participando diretamente em acumular e diminuir as porcentagens de gases estufados para atmosferas provocadas pelo mau uso do solo. Sendo que o Brasil até 2030 estará implantando o (SPD) em 75% das plantações dos pais, tendo que até 2022 já estamos com 36 milhões de hectares, podendo sequestrar até 56 milhões de toneladas de CO₂ atuando diretamente como uma das soluções para as maiores demandas do país FEBRAPDP (2023).

No ano de 2017 o Brasil possuía uma área de 32.878.660 com SPD, nesse contexto na safra 2020/2021, a área plantada com grãos no país foi de 67,74 milhões de hectares, com potencial de produção de 276,32 milhões de toneladas em áreas com 33 milhões hectares com implantação do SPD WWF (2023). Já para produção de alimentos no ano de 2020 atingiu 36 milhões de hectares com SPD.

2.3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

As degradações pelo mau uso do solo sempre tiveram preocupações pelos índices de produtividade através da qualidade ambiental. Quando as forças antrópicas quebram o equilíbrio, pode-se agravar problemas sérios com erosões hídricas, terras improdutivas e, sobretudo, aumentar os custos e a perda da produtividade (Costa *et al.*, 2007)

Para entender os atributos físicos, condutividade hídrica do solo, os agregados do solo, compactação do solo, densidade e a própria retenção de água através do comportamento da porosidade é importante observar a correlação entre históricos da área na questão dos manejos implantados com as técnicas atuais, que pode representar positividade nos processos iniciais das culturas como germinações, crescimento radicular. Dessa forma, aumentar as preocupações ligadas à determinação quantitativa e qualitativa dos atributos físicos estará ligado à qualidade química e biológica do solo, o que aumentará o monitoramento de mudanças a longo e curtos prazos ligadas diretamente à produtividade (Marchini *et al.*, 2015).

A técnica de manejo SPD reduz a entrada de máquinas e evita revolver o solo, aumentando a qualidade física do solo. Segundo Meek *et al.*, (1998), 80 a 90% da compactação

do solo tem como potencial a entrada de máquinas, principalmente com as primeiras entradas para manejar do solo. O solo conservado numa condição natural, por feito da vegetação nativa, expõe as características físicas a ser propícias para o desenvolvimento das plantas, mas, com cultivos e transformações no ambiente se tornando o meio antrópico com uso agrícola, as propriedades físicas são alteradas, na maior parte das vezes, as culturas não se desenvolvem bem Spera et al., (2004). Em áreas mecanizadas manejadas sob SPD que visam elevadas produtividades, a compactação do solo é um grande desafio a ser superado (Stefanoski *et al.*, 2013).

A compactação do solo influenciada pelos tráficos de máquinas modifica a estrutura do solo diminuindo a porosidade, impossibilitando a entrada de água, reduzindo aeração e criando dificuldades das raízes em explorar e absorver os nutrientes Boeni et al., (1997). Segundo (Arshad *et al.*, 1996), os valores de resistência à penetração de 2,0 a 4,0 MPa dificulta ou limita o desenvolvimento das raízes no solo. Reichert *et al.* (2007) afirma que o crescimento das raízes ou desenvolvimento das plantas se caracteriza com tipo de solo, solos muito argilosos e argilosos podem sofrer compactação nas camadas superficiais com restrições no uso do plantio direto (Tormena et al., 1998). Valores que extrapolam mais que 2 Mpa criam problemas de compactação para os LATOSSOLOS (Beutler; Centurion 2004). Para o desenvolvimento das raízes das plantas em aproveitar os nutrientes do solo, com valores críticos entre 1,5 a 4,0 Mpa, sendo 2 Mpa já é um valor de restrição nos crescimentos das raízes (Blainski *et al.*, 2008).

A compactação altera toda naturalidade do solo, reduzindo o volume de poros, principalmente a macroporosidade, evoluindo ao adensamento e restringindo a locomoção e penetração das raízes no solo e alterando a troca de gases entre o solo e atmosfera, contribuindo negativamente na condutividade hídrica que irá interferir na absorção de nutrientes das raízes na solução do solo (Reichert *et al.*, 2010).

Nessa circunstância o atributo físico do solo que apresenta mais características positivas internas é a distribuição dos poros (porosidade total) que vai favorecer crescimento das raízes (Alves; Cabeda, 1999).

No processo de compactação do solo, o mesmo é aumentado através de uma pressão inserida sobre ele, o qual está ligado ao tráfego de máquinas, provocando o pé-de-grade. Segundo EMBRAPA (2006), locais com excessivas arações e gradagens modificam as primeiras camadas do perfil do solo compactando subsuperficialmente e contribuindo no selamento do topo de superfície aumentando a suscetibilidade do solo e a erosão hídrica, podendo reduzir a produtividade. Em locais com produção de carne usando a pecuária intensiva o solo sofre com pisoteio de animais. Segundo Bertol *et al.* (2000), o manejo de animais em

pastos transforma e modifica as propriedades físicas adensando e diminuindo a porosidade total na primeira camada de 0,00- 0,05m.

Dessa forma, a principal fonte de compactação do solo é a pressão externa, como tráfego de máquinas e o pisoteio animal, dessa forma à uma redução do volume de poros atribuída pela pressão externa de máquinas, implementos, animais e também motivada pelo mau uso do manejo do solo e falta de conhecimentos técnicos.

Nas últimas décadas, com aumento da tecnologia no campo, desde da parte computacional à surgimentos de novos implementos agrícolas mais atualizados, que busca maiores extensões, com surgimento de máquinas gigantescas e pesadas, estando ligado diretamente ao processo de compactação, principalmente na profundidade de 0,20m. Dessa forma, o rompimento das camadas superficiais compactadas é deslocado para setores subsuperficial do perfil do solo, sendo uma característica do plantio convencional (PC) que modifica drasticamente toda camada superficial compactada, desagregando e modificando a estrutura do solo, diferente do (SPD) que o solo não sofre revolvimento, tendo uma compactação na superfície explicada pelo rearranjo natural das partículas do solo (Reichert et al., 2007). Dessa maneira o solo adensa pela própria progressão do manejo que irá interferir no volume dos poros. Segundo Reichert *et al.* (2007) a compactação do solo é caracterizada pelo adensamento em que há uma evolução e progressão do solo em seus manejos, contribuindo para a diminuição da porosidade total, tendo como rearranjo da estrutura das partículas do solo.

Os solos com textura mais argilosa sofrem maior compactação. De acordo com Bodmam e Constantin (1996), solos argilosos contém mais microporos dando condição dos solos armazenar mais água, provocado pela dimensão dos argilominerais. Sendo assim, possibilita o solo entrar em estado de compactação ao nível crítico. Nesse contexto, a textura em solos mais argilosos pode relacionar com armazenamento da água no solo, densidade e a compactação, interferindo no desenvolvimento radicular Beutler et al. (2004). Entretanto, solos está ligado a sua formação intrínseca (gênese) com suas particularidades como o tamanho das partículas (textura) influência no transporte (Sousa; Paula, 2019).

O processo de erosão hídrica está relacionado com as frações de areia fina e muito fina e a fração de silte que são mais suscetíveis ao transporte, diferenciando da areia grossa resistema mobilização, e fração argilosa tem uma maior resistência aos processos de salpicamento (destacamento) da gota da chuva pela sua condição de agregação quando não está degradado (Harchegani *et al.*, 2017). Todo processo da erodibilidade do solo são estabelecidos com infiltração de água no solo, impacto da gota de chuva e o pelo transporte do fluxo superficial sendo encarregados aos processos erosivos (Viel *et al.*, 2017). Denardim (1990) desenvolveu

cálculos para solos brasileiros para a erodibilidade através parâmetros físicos, principalmente a textura, areia, silte, argila, permeabilidade, diâmetro médio, ponderado das partículas menores 2mm com matéria orgânica. Silva *et al.* (2012) explica que granulometria se relaciona diretamente com a estrutura do solo, consistência e aptidão do solo a reter água, a drenagem e as interações entre as raízes e os coloides do solo para que participa na absorção de nutrientes na contribuição do desenvolvimento das plantas.

2.4 GEOESTATISTICA NOS ESTUDOS DE SOLOS

Com a agropecuária avançando rumo a aumentar a produtividade, auxiliada pela velocidade tecnológica atribuída aos avanços em estudar variação espacial e temporal, os quais influenciam no aproveitamento das culturas sem os altos custos, torna-se necessário a aplicação da variabilidade espacial e seus históricos através da (AP) agricultura de precisão (Souza et al., 2010). O gerenciamento de áreas agrícolas pela agricultura de precisão e pelo uso de técnicas de manejo, permite apresentar propostas mais eficientes para controlar insumos e beneficiar o rendimento das culturas e aumentar a produtividade beneficiando o agricultor. Vinculada diretamente à agricultura de precisão, faz-se uso de tecnologias inovadoras criadas para a vigilância detalhada do ambiente agrícola. Esse procedimento inclui a incorporação de distintos sensores destinados a coletar informações que possibilitam a mensuração exata dos principais elementos de produção com extrema precisão espacial (Whelan, 1998).

Dessa forma, uma das ferramentas da agricultura de precisão AP que gerencia o manejo adequado em aproveitar todos os recursos necessários nos quesitos dos atributos solos e plantas, com estudo da variabilidade espacial, é a ferramenta chamada de geoestatística (GEO), a qual diferencia-se da estatística clássica.

O estudo das correlações da variabilidade do solo em relação com produtividade são uma das ferramentas de tomadas de decisões dos gerenciamentos de manejos com visão na exploração sustentável, relacionando com as maiores produtividades e sempre mais homogêneas (Freddi *et al.*, 2006).

Portanto, as técnicas fundamentadas na estatística espacial, tal como a (GEO) que admite identificar a existência da dependência espacial, em analisar a descrição minuciosa das variáveis ambientais, tendo a ferramenta aliada a todo ao processo Yamamoto e Landim (2013).

Nas décadas de 50 e 60 a estatística, com estudo na variabilidade espacial, começou a ser manipulado com dados quantitativos favorecendo a percepção da variabilidade espacial (Burrough *et al.*, 1994). Os estudos da variabilidade espacial considera uma análise de

populações como (atributos dos solos ou planta) verificando com foi implantado a pesquisa e sempre com as principais características dessa população, de acordo com Carvalho (1999) é imprescindível estabelecer limites para as observações da população, a fim de que elas representem suas características de maneira precisa.

Cavalcante et al. (2007) a GEO vem sendo usado com mais frequência na ciência do solo, sendo uma relevante ferramenta nas pesquisas dos comportamentos dos atributos físicos, correlacionando-os no espaço e ajudando na percepção da variabilidade espacial, além de fornecer uma base de dados. Montanari (2010) explica que é importante identificar a localização dessas variações e suas causas, para então determinar a melhor abordagem de manejo para cada local, visando aplicar insumos de maneira variável, buscando padronizar a produtividade e/ou diminuir despesas para, assim, aumentar a lucratividade da área.

Entretanto, a variabilidade espacial para os atributos dos solos tende a explicar através da heterogeneidade na vertical e horizontal, pelo motivo que o próprio material de origem não é homogêneo, favorecendo para que os atributos do solo distingam-se, espacialmente e continuamente em toda a sua abrangência (Mattioni *et al.*, 2013) Para analisar essas mudanças espaciais, são empregadas técnicas da GEO, sendo a análise quantitativa do solo uma das mais utilizadas, para estabelecer a distribuição espacial dos nutrientes necessários para as plantas na lavoura (Molin *et al.*, 2010), além de detalhar e avaliar os fatores limitantes na obtenção de alta produtividade (Vieira *et al.*, 2010).

No entanto, a técnica da GEO, além de pesquisar a dependência espacial desses valores ou das propriedades físicas, químicas do solo ou (outros) e da produtividade, ainda possibilita por meios que sejam preparados os referentes mapeamentos da área estudada por meio de krigagem, considerando que o padrão de dependência espacial seja determinado pelo semivariograma, Silva *et al.* (2010) explicam que um gráfico que define o arranjo do atributo pesquisado como uma variável pela localidade na atribuição da distância do terreno. Com entendimento da variabilidade espacial das características do atributo do solo, sendo (GEO) uma ferramenta que favorece as pesquisas dos rendimentos das culturas e benefícios para qualidade dos solos agricultáveis, por informações específicas (Amado *et al.*, 2009).

3 VARIABILIDADE ESPACIAL DE ALGUNS ATRIBUTOS FÍSICOS EM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO COM ROTAÇÃO DE CULTURAS

RESUMO

O Brasil, na safra 2020/2021, assumiu a posição de maior produtor de soja do mundo. A utilização de técnicas geoestatísticas permite a elaboração de semivariogramas, que quantificam a dependência espacial em relação aos atributos físicos do solo, permitindo obter estimativas mais precisas dos atributos do solo em locais não amostrados. A pesquisa foi realizada em uma área com mais de 10 anos de plantio direto na fazenda da UNESP (FEPE) de Ilha Solteira – SP em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico Formou-se um plano cartesiano com 60 pontos e, em cada um dos pontos, foram avaliados: macroporosidade ($Ma\ m^3\ m^{-3}$), microporosidade ($Mi\ m^3\ m^{-3}$), a porosidade total determinada ($PTd\ m^3\ m^{-3}$), densidade de resistência à penetração do solo ($DS\ kg\ dm^{-3}$), resistência à penetração do solo com penetrômetro de impacto ($RPI\ MPa$), resistência à penetração do solo com penetrômetro de bancada ($RPpb\ KPa$), umidade gravimétrica ($UG\ kg\ kg^{-1}$), densidade granulométrica ($DP\ kg\ dm^{-3}$), porosidade total calculada ($PTc\ m^3\ m^{-3}$) em profundidade (0,00-0,20 m). Para cada atributo foi realizada uma análise descritiva, auxiliada pela estatística clássica e uma análise da distribuição de frequência pelo teste de Shapiro e Wilk com 1% de probabilidade de erro e posteriormente foi feita análise estatístico de ((CPA)em que levou consideração da influência dos atributos físicos entre si. Concluiu-se que as mudanças ocorridas no solo em termos de propriedades físicas foram desencadeadas antes da implantação do sistema no plantio direto (SPD), com aumento do resíduos vegetais por dez anos, o que deu condições para a recuperação da física do solo. Também os atributos físicos formam grupos de influência simultânea entre si, afetando as variáveis de resistência do solo à penetração e as variáveis que influenciam a porosidade, em lados opostos do componente 2.

Palavras chave: resíduo vegetal; umidade gravimétrica; semivariograma; textura argilosa.

ABSTRACT

Brazil, in the 2020/2021 harvest, assumed the position of the largest soybean producer in the world. The use of geostatistical techniques allows the creation of semivariograms, which quantify the spatial dependence in relation to the physical attributes of the soil, allowing to obtain more accurate estimates of soil attributes in non-sampled locations. The research was carried out in an area with more than 10 years of tillage on the UNESP (FEPE) farm in Ilha Solteira – SP in a dystrophic Oxisol. A Cartesian plane with 60 points was formed and, at each point, the following were evaluated: macroporosity ($M_a \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), microporosity ($M_i \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), the determined total porosity ($PT_d \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), soil penetration resistance density ($DS \text{ kg dm}^{-3}$), soil penetration resistance with impact penetrometer ($R_{Pi} \text{ MPa}$), soil penetration resistance with bench penetrometer ($R_{Ppb} \text{ KPa}$), gravimetric moisture ($UG \text{ kg kg}^{-1}$), granulometric density ($DP \text{ kg dm}^{-3}$), calculated total porosity ($PT_c \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) in depth (0.00-0.20 m). For each attribute, a descriptive analysis was performed, aided by classical statistics and an analysis of the frequency distribution by the Shapiro and Wilk test with 1% error probability, and subsequently a statistical analysis of principal components was performed, which took into account the influence of the attributes physical with each other. It was concluded that the changes that occurred in the soil in terms of physical properties were triggered before the implementation of the no-tillage system (SPD), with an increase in plant residues for ten years, which provided conditions for the recovery of soil physics. It also concluded that the physical attributes form groups of simultaneous influence with each other, affecting the variables of soil resistance to penetration and the variables that influence porosity, on opposite sides of component 2.

keywords: plant residue; gravimetric moisture; semivariogram; clay texture.

3.1 INTRODUÇÃO

O aumento gradativo do custo de produção e a forte pressão pela qualidade ambiental, tem exigido do setor agrícola uma cultura de sustentabilidade com manutenção de níveis de competitividade internacionais. Desta forma, o uso, a exploração e sobretudo o monitoramento os atributos do solo torna-se, cada vez mais, um pré-requisito para o alcance de altos rendimentos das culturas.

Técnicas de agricultura de precisão tem contribuído para a utilização consciente dos insumos agrícolas. O manejo regionalizado do solo, com base no uso de informações sobre a variabilidade de propriedades locais e climáticas, visando o aumento da produtividade,

otimização no uso dos recursos e redução do impacto da agricultura ao meio ambiente, tem sido parte integrante de um planejamento agrícola.

Dentro das técnicas que envolvem a agricultura de precisão, uma ferramenta amplamente utilizada a GEO, a qual tem sido aplicada na investigação e interpretação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo nos últimos anos, através da variabilidade espacial dos atributos do solo. Tanto os processos, como os atributos do solo que determinam o desempenho e a produção das culturas, variam no espaço e no tempo. Por essa razão, o conhecimento da variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção das culturas tem se tornado primordial para o sucesso das atividades agrícolas (CORÁ *et al.*, 2004).

Ainda, dentre as técnicas da agricultura moderna, destaca-se o sistema de plantio direto. Esse sistema consiste em uma das mais eficientes estratégias para a melhoria da qualidade e do potencial produtivo do solo agrícola (Amado *et al.*, 2007). Envolve o uso de técnicas para produzir preservando a qualidade ambiental, fundamentando-se na ausência de preparo do solo e na presença de cobertura permanente sobre o terreno, por meio da rotação de culturas (Machado *et al.*, 2004).

Em sistemas de produção pouco diversificados ou em áreas com intenso tráfego de máquinas e animais, problemas de compactação do solo podem aparecer, reduzindo expressivamente a produtividade das culturas, principalmente em condições de baixa disponibilidade hídrica, além de aumentar as perdas de água e solo por erosão hídrica.

Portanto, o monitoramento periódico torna-se importante para conhecer a variabilidade espacial de atributos do solo que influenciam a produtividade das culturas e os riscos de contaminação do ambiente são fatores importantes em um sistema de produção.

A GEO é usada para diagnosticar a variabilidade do solo e atribuir mapas de krigagem, sendo um método estatístico que explica as complexidades da homogeneidade e heterogeneidade que o solo pode ter. Além disso, uma das relações das estatísticas que pode ajudar na redução de variáveis dos atributos do solo e o método dos componentes principais da análise multivariada.

Os métodos estatísticos auxiliam na agricultura de precisão para diagnosticar o solo e as variabilidades e degradações, tendo os CPA (Neto *et al.*, 2011). Dessa maneira, os CPA atribuem uma diminuição nos números de variáveis originais (atributos físicos do solo) contribuindo na compreensão dos resultados. As variáveis com maior peso são mais relevantes considerando uma melhor abordagem estatística na investigação das associações complexas do solo, relacionando a influência de um atributo físico com outro. O objetivo desse trabalho foi

determinar a variabilidade espacial de atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico, com métodos estatísticos de CPA e GEO conduzido há 10 anos sob sistema plantio direto, com rotação de culturas em uma profundidade.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no ano agrícola de 2020/2021, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) pertencente à Faculdade de Engenharia – UNESP, Campus de Ilha Solteira, situada à 51° 22' de longitude Oeste de Greenwich e 20° 22' de Latitude Sul, com altitude de 335 m (Figura 1). O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO distrófico, textura argilosa Demattê, (1980). A classificação climática da região, de acordo com Köppen, é Aw, definida como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, A temperatura média anual é de 23,5° C e a precipitação pluvial média anual é de 1,370 mm.

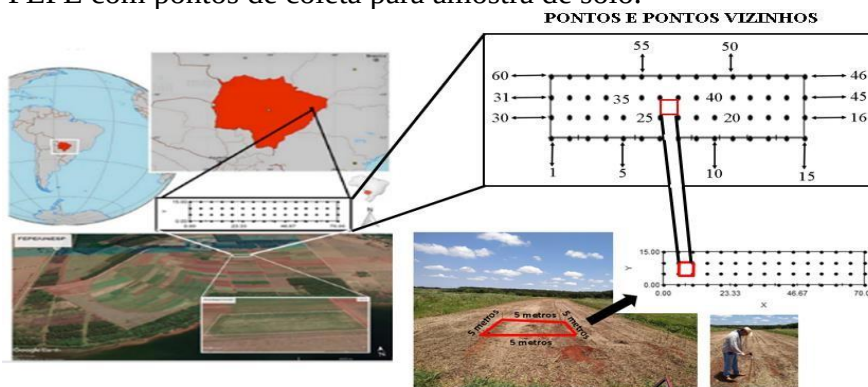
Histórico da área – A área tem sido cultivada com culturas anuais sob plantio direto há mais de 10 anos, com leguminosa produtora de grãos no verão e gramíneas, e de grãos e forragem no momento da estação de outono, obedecendo a sequência soja-milho-pastagem e, soja-sorgo-pastagem. Foi executado a aplicação de calcário dolomítico (PRNT 85%) em superfície, sem inserção, na dose de 2,0 t ha⁻¹ em setembro de 2015. O preparo da área agrícola antes da semeadura das culturas no outono foi realizado com dessecação da flora daninha com herbicida Glyphosate (1.560 g ha⁻¹ do ingrediente ativo) e após usou a ceifa utilizando triturador horizontal de rejeitos vegetais (Triton) (Nakao, 2021).

A coleta de solos para adquirir os dados foram no período do plantio da soja em área de sequeiro, realizada em talhão com área total de 0,532 ha⁻¹, a qual vem sendo cultivada, nos últimos 10 anos, sob semeadura direta, em sistema de rotação de culturas: soja, milho/sorgo, pastagem.

Para o mapeamento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo foi elaborada uma grade amostral composta por 60 pontos. Para orientação, foram definidas as direções x e y em sistema de coordenadas cartesianas, figura 1.

Os pontos amostrais foram determinados com espaçamento de 5 metros regulares entre os pontos. Foram coletadas amostras de solo deformada e indeformada no mês de fevereiro 2021 logo após a colheita, na profundidade de 0,00 – 0,20 m.

Figura 1 - Localização geográfica da área experimental da fazenda FEPE com pontos de coleta para amostra de solo.



Fonte: Próprio autor.

Os atributos físicos do solo avaliados foram: a textura do solo, mensurada pelas frações areia (ARE), silte (SIL) e argila (ARG) definida pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2017); umidade gravimétrica (UG) EMBRAPA (2017); macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT), determinados pelo método da mesa de tensão, com coluna de água de 0,60 m (EMBRAPA, 2017), densidade do solo (DS) foi calculada pelo método do anel volumétrico e (DP) determinada pelo método do balão volumétrico EMBRAPA (2017), resistência mecânica à penetração do solo (RP), obtido com o auxílio do penetrômetro de impacto, modelo IAA/PLANALSUCAR/STOLF, de acordo com a metodologia de STOLF (1991).

Para a obtenção das medidas da resistência à penetração do solo em laboratório realizado pelo penetrômetro estático de bancada (RPb) usou – se o equipamento - Penetrômetro Eletrônico de Solos de bancada – solotest, com a ponteira de 4 mm e com uma velocidade constante de penetração de 5 mms^{-1} . Foram realizados com amostras indeformadas coletadas em cada ponto da área experimental da área do sequeiro nas profundidades 0,00-0,20m com anéis volumétricos sendo os mesmos coletados para análises da porosidades. Seguindo nesse contexto, esses anéis foram saturados 24 horas posteriormente foram colocado na mesa de tensão de 100 cm e pesado após 24 horas para observar o solo na capacidade de campo, em seguida os anéis úmidos foram colocados na mesa para leituras da resistência a penetração com unidade de medida em KPa (quilos pascal) e posterior transformados para MPa (mega pascal) EMBRAPA (2011). Com os valores dos atributos do solo, foram realizadas análises descritivas clássicas: média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de curtose e assimetria com a distribuição de frequência, através do software estatístico SAS (Schlotzhaver; Littell, 1997), O coeficiente de variação (CV) foi classificado de acordo com as seguintes classes e relevâncias: baixa ($CV \leq 10\%$), média ($10\% < CV \leq 20\%$),

alta ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito alta ($CV > 30\%$), de acordo com (Pimentel Gomes; Garcia, 2002).

Posteriormente, foram analisados os Outliers e realizado a substituição dos seus valores, dos circunvizinhos contidos na grade amostral. Para a hipótese da normalidade foi realizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 5% de probabilidade. Ainda, foram elaboradas as matriz de correlação para combinações dos atributos estudados.

A análise de dependência espacial das variáveis estudadas foi determinada pelo ajuste dos dados ao semivariograma experimental, ignorando anisotropia local (modelo isotrópico), com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca. Para isso, utilizou-se o do pacote Gamma Design Software (2004).

Os ajustes dos semivariogramas simples foram realizados em função de seus modelos e definidos pela seleção inicial: a) menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR); b) maior coeficiente de determinação (r^2) e c) maior avaliador da dependência espacial (ADE).

Para os atributos estudados, foram escolhidos o efeito pepita (C_0), o alcance (A_0) e o patamar ($C_0 + C$). Para determinação do avaliador da dependência espacial (ADE), utilizou-se a metodologia de Cambardella *et al.*, (1994), modificada pelo Gamma Design Software (2004), conforme a seguinte expressão:

$$ADE = [C/(C + C_0)] \cdot 100 \text{ onde:}$$

ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; e

$C + C_0$ é o patamar,

A interpretação proposta para o ADE foi dada de acordo com (Dalchiavon e Carvalho 2012): a) $ADE < 20\%$ = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b) $20\% \leq ADE < 40\%$ = baixa dependência (BA); c) $40\% \leq ADE < 60\%$ = média dependência (ME); d) $60\% \leq ADE < 80\%$ = alta dependência (AL) e $80\% \leq ADE < 100\%$ = muito alta dependência (MA).

A definição final do modelo que melhor descreveu o ajuste foi determinado através da validação cruzada. Uma vez observada a dependência espacial, produziu-se o mapa temático da distribuição espacial de cada atributo, através da krigagem ordinária. Para análise dos (CPA) usou três métodos estatísticos usados foram para classificar acessos em grupos: análise de agrupamentos hierárquicos, análise de agrupamentos não hierárquicos (k-means) e análise de CPA. Todas as análises multivariadas foram após a padronização dos atributos, com média 0 e variância 1.

Para começar estabeleceu os (CPA) para os atributos físicos do solo pesquisados, sendo elaborados combinações de correlação entre atributos em ordem decrescente usando pacote do

software estatístico (SAS Schlotzhaver; Littell, 1997).

A categorização das correlações foi realizada de acordo com Coelho (2003), utilizando autovetores que descrevem os caracteres dos componentes que oscilam de -1 a +1: <0,30 (pouco significativo), 0,30-0,40 (mediamente) significativo e >0,50 (altamente significativo).

Em seguida, os dados foram sujeitos à avaliação de agrupamentos pelo método hierárquico seguindo a distância euclidiana para avaliar a similaridade entre as amostras com método de Ward que facilitou a formação de grupos, e posteriormente nos dados originais para análise dos grupos utilizou-se o método do algoritmos K-means Hair Junior *et al.*, (2005) caracterizando padronizando os grupos.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos físicos do solo observam-se que os dados foram coerentes para determinar um solo com de 10 anos de Sistema de plantio direto SPD apontando para homogeneidade dos atributos físicos do solo relacionando com as atividade de manejo enquadrado com histórico de correções químicas. Atuação dos benéficos do SPD adequa positivamente a qualidade física do solo. Pocay (2000) estudou mudanças do solo em seu estado natural para solos agricultáveis dispõe com uma alta variabilidade espacial para atributos físicos, identificou maior intensidade de manejo do solo ficou mais homogêneo diferenciando de solos recém abertos para implantação de cultura tabela 1.

Analisando o coeficiente de variação para os atributos físicos do solo (Tabela 1) para a profundidade 0,00-0,20m a RP foi de 26,50%, UG de 84,41%, SIL de 22,59%, Ma de 40,51% e RPb de 52,23% ocorreram CV's alto a muito alto. Enquanto para os atributos DP de 2,74%, ARG de 3,9%, ARE de 4,12%, Mi de 10,13%, DS de 9,01%, porosidade total determinada PTd de 18,38%, porosidade total calculada PTc de 14,37% obtiveram CV's baixo, na profundidade de 0,00-0,20m. Segundo Bono (2013) a densidade do solo na profundidade de 0,00-0,10 em diversos sistemas de manejo em LATOSSOLO VERMELHO distrófico obteve maiores CVs comparando no sentido das profundidades (subsolo). O CV's mais baixos ocorreram para os atributos de granulometria da ARG e ARE relacionado com sua pedogênese e material de origem, tendo relação para baixa variação dos CV's. Já o CV para a UG foi alto relacionado com sistema de sequeiro sob a rotação de cultura com o plantio direto SPD tendo uma forte influência dos resíduos vegetais, (Apêndice A, grafico C).

Com relação a resistência do RPb (52,23% e 54,11%) apresentou também CV muito alto

semelhante a (Martins *et al.*, 2021) que obtiveram o valor de CV na camada de 0,00-0,10 m (RP) (30,87 %) em LATOSSOLO VERMELHO distrófico sob cultivo do eucalipto. (Calvacante *et al.*, 2011) pesquisando CV's em profundidades em LATOSSOLO VERMELHO distrofico com cultivos de leguminosas e gramíneas repetidos por 8 anos no bioma cerrado sob SPD reportou que a DS nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20m e UG, apresentaram baixos CV's (< 12 %) podendo a não basear-se na média, representando uma homogeneidade em camadas mais profundas.

Nesse contexto o valor para média do atributo UG foi 0,250 kg kg⁻¹, considerando superior ao ideal com valores de 0,200 kg kg⁻¹, dessa forma a resíduos vegetais atribuída em décadas contribuiu na agregação do solo condicionado uma boa estabilidade de agregados e garantindo a umidade. Lima (2010) estudou atributos físicos principalmente umidade gravimétrica em reflorestamento de *Eucalyptus camaldulensis* em LATOSSOLO VERMELHO distrófico que obteve uma maior variabilidade com médias de 0,121 kg kg⁻¹ em camadas superficiais 0,00-0,10m diferenciando nas maiores profundidades 0,15-0,30m com médias 0,146 kg kg⁻¹ relacionando umidade e compactação.

Observando a (RP) com valor de 4,9 MPa considerado muito alto indicando compactação, (tabela 1), (Cunha, 2007) altos valores de resistência do solo à penetração são admitidos para o (SPD) com 4,0 MPa, nesse contexto o crescimento das raízes tem uma relação com a (UG) diferenciando com solos mais seco que podem ter os maiores níveis de compactações (Tavares Filho; Tessier, 2009), (Apêndice A, grafico a,c).

Um solo ideal apresenta 45% de material mineral, 5% de matéria orgânica, 33,5% de microporos e 16,5% de macroporos, em média os solos brasileiros tem índices que fica entre 2,5 a 5% de matéria orgânica planejando para longos prazos (Futini Neto *et al.*, 2001).

O crescimento das plantas é afetado diretamente pelo conteúdo de água e oxigênio e da resistência do solo para penetração das raízes, Ranzani (1969), o volume total dos poros do solo quase nunca é inferior à 30%, e raramente ultrapassam 60%. Para Mi com uma média de 0,204 m⁻³ m⁻³ ou 20,4%, os microporos, normalmente estão situados dentro dos agregados ou nas partes estruturais do solo, em consequência da pequena medida, são capazes de segurar e armazenar água pela capilaridade, contribuindo na manutenção da umidade.

Para DS solo com valor médio de 1,44 kg dm⁻³, com ARG com valor 489,58 g kg⁻¹ aproximando a 50% é indicando que o solo argiloso, com uma PTd de 0,309 m³ m⁻³ aproximando 31%, observado na (tabela 1). (Hickmann; Costa, 2012) reportam que a organização e consolidação de poros como resultado a ausência de revolvimento no solo em SPD diferenciando do sistema de plantio convencional SPC. Na falta de preparo do solo, há

acréscimo do carbono orgânico aumentando os poros contribuindo na agregação do solo.

O SPD proporciona a introdução da matéria orgânica participando nos benefícios positivos para os elementos da estabilização dos agregados aumentando a porosidade do solo e diminuindo a DS, segundo Bowen (1981) para ter níveis críticos da DS argilosos tem que estar com valores em torno de $1,53 \text{ kg dm}^{-3}$ considerado compactado dificultando o desenvolvimento das raízes e apresentando aspectos negativos para a produtividade.

Para a distribuição de frequência para as profundidades 0,00-0,20 m, ARG, ARE, SIL, Ma, DS, PTd, PTc apresentaram a distribuição de frequência do tipo normal. Desse modo, as referentes medidas de tendência central serão referidos pelos valores médios, com coeficientes de assimetria positiva entre 0,191 a 0,696, com assimetria negativas entre -0,129 a -0,223.

Para coeficientes de curtose positiva tiveram 0,044 a 0,443 tal como com um valor negativo -0,060, todos os coeficientes foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de (Shapiro; Wilk, 1965), já que as probabilidades variou 0,0854 a 0,8190 (tabela 1). A distribuição normal dos atributos analíticos (ARG e SIL) é inconsistente com Lima (2012), que estudou solos a 0,00-0,20 m de profundidade nas lavouras de café conilon em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico e não obteve significância de 5% com 109 pontos em uma grade irregular de acordo, já (Carvalho *et al.*, 2002) estudou as propriedades físicas e químicas de LATOSSOLO VERMELHO distrófico, sob o cultivo do milho no verão e feijão no inverno, sob irrigação direta por aspersão em 49 pontos com uma grade de pontos (7x7) com espaçamento de 4 x 4 m na profundidade de 0-0,05 e 0,05-0,20 m.

Na tabela 2 consta a matriz de correlação linear simples entre os atributos do solo (RP, UG, DP, ARG, ARE, SIL, Ma, Mi, DS, PT, RPb, PTc).

A correlação entre os atributos físicos do solo foram significativo para os pares 1) DP x ARG ($r=0,383^{**}$), 2) DP x Ma ($r=0,268^{*}$), 3) DP x DS ($r=-0,300^{*}$), 4) DP x RPb ($r=-0,322^{*}$), 5) DP x PTc ($r=0,542^{**}$), 6) ARG x ARE ($r=-0,088^{**}$), 7) ARG x SIL ($r=0,014^{**}$), 8) ARE x SIL ($r=-0,448^{**}$), 9) ARE x Mi ($r=-0,267^{*}$), 10) ARE x PT ($r=-0,254^{*}$), 11) SIL x RPb ($r=-0,314^{*}$), 12) Ma x Mi ($r=0,366^{**}$), 13) Ma x DS ($r=-0,81014$) Ma x PT ($r=0,871^{**}$), 15) Ma x RPb ($r=-0,700^{**}$), 16) Ma x PTc ($r=0,772^{**}$), 17) Mi x DS ($r=-0,492^{**}$), 18) Mi x PT ($r=0,625^{**}$), 19) Mi x RPb ($r=-0,578^{**}$), 20) Mi x PTc ($r=0,467^{**}$), 21) DS x PT ($r=-0,810^{**}$), 22) DS x RPb ($r=0,803^{**}$), 23) DS x PTc ($r=-0,944^{**}$), 24) PT x RPb ($r=0,712^{**}$), 25) PT x PTc ($r=0,769^{**}$), 26) RPb x PTc ($r=-0,784^{**}$).

Analisando a tabela 2 foram observados a melhor representatividade dos dados que foram analisados através das correlações negativas e positivas com (r) superior a 0,800 de

significância que envolvem atributos físico relacionados com características intrínseca do solo e correlações do manejo do solo.

Para correlações negativas para os atributos da granulometria ARG x ARE e podemos relacionar o solo argiloso na área da malha experimental com 48%, por ser um solo tropical são muito intemperizado pelas próprias condições edáficas quanto maior porcentagem de ARG menor a quantidade de ARE e SIL.

Para a correlação inversa da ARE x SIL está relacionado com condições intrínsecas do solo quanto mais SIL teremos menos ARE. Na Figura 3 foram apresentados seus respectivos semivariogramas. Assim, ficou atestado que os atributos RP, UG, DP, ARG, SIL, Ma, RPb e PTc apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial

Tabela 1 - Análise descritiva dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrofico na profundidade de 0,00 - 0,20 m sob plantio direto.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
									Pr<w	DF
Atributos físicos do solo										
RPi (MPa)	4,991	4,752	2,870	8,460	1,320	26,503	0,078	0,740	0,0161	IN
UG(kg kg ⁻¹)	0,250	0,162	0,110	1,320	0,260	84,413	7,590	2,880	0,0001	IN
DP (kg dm ⁻³)	2,470	2,226	2,240	2,660	0,067	2,748	1,570	-0,073	0,0120	IN
ARG(g kg ⁻¹)	489,58	491,50	429,000	532,00	19,090	3,900	1,01	0,520	0,2313	NO
ARE(g kg ⁻¹)	441,98	441,50	388,000	479,00	18,215	4,121	0,256	-0,223	0,8190	NO
SIL(g kg ⁻¹)	67,016	65,000	21,000	99,00	15,142	22,595	0,086	-0,185	0,1806	NO
Ma (m ³ m ⁻³)	0,109	0,192	0,0300	0,242	0,044	40,511	0,443	0,696	0,0854	NO
Mi (m ³ m ⁻³)	0,204	0,204	0,540	0,247	0,028	10,173	12,868	-2,993	0,0001	IN
DS (kg dm ⁻³)	1,440	1,422	0,130	1,752	0,130	9,019	0,014	0,191	0,4720	NO
PTd (m ³ m ⁻³)	0,309	0,306	0,188	0,462	0,057	18,389	0,044	0,459	0,2530	NO
RPb (MPa)	1,388	1,165	0,396	3,121	0,725	52,236	0,257	0,786	0,0007	IN
PTc (m ³ m ⁻³)	0,412	0,422	0,264	0,547	0,059	14,379	-0,060	-0,129	0,6508	NO

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

No respectivo ao desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2), foi a seguinte: 1) ARE = 0,597, DS = 0,394, Mi = 0,337, PT = 0,187 com o atributo ARE obteve um baixo coeficiente de determinação espacial tabela 5.

Para ARE teve o valor do r^2 (0,597) indicou que o atributo físico com o melhor teve o

melhor ajuste semivariográfico (figura 3a). Em relação ao (ADE-Avaliador da dependência espacial), foi muito alta a dependência verificada, com modelo esférico modelado, no qual o ADE observado foi de 94%, e o alcance (15,9 m). Para o segundo atributo físico do solo DS (figura 3d), seu valor do r^2 (0,394), indicou o segundo com melhor ajuste para o semivariograma, com o ADE com valor de (76%) alta dependência, com o modelo ajustado exponencial obtendo o alcance de (28 m). Para o terceiro melhor ajuste para semivariograma Mi (figura 3b), seu valor do r^2 (0,337), com modelo ajustado exponencial, sendo o ADE considerado como muito alta dependência com valor verificado (95%), com alcance (14 m), Para o quarto melhor ajuste de semivariograma do atributo físico do solo foi a PT (figura 3c) obtendo o modelo exponencial, com valor para r^2 (187), resultando o valor do (ADE) de 83% considerado muito alto, apresentando alcance de (14 metros), (tabela 5).

Tabela 2 - Matriz de correlação dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico na profundidade de 0,00 - 0,20 m sob plantio direto.

<i>ATRIBUTOS</i> ^(a)	<i>COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO</i> ^(b)											
	RP	UG	DP	ARG	ARE	SIL	Ma	Mi	DS	PT	RPb	PTc
UG	-0,092	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DP	0,039	-0,033	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ARG	0,159	0,081	0,383**	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ARE	0,059	-0,088	-0,121	-0,088**	-	-	-	-	-	-	-	-
SIL	-0,172	0,014	-0,024	0,014**	-0,448**	-	-	-	-	-	-	-
Ma	-0,089	0,091	0,268*	0,091	-0,234	0,039	-	-	-	-	-	-
Mi	-0,183	0,061	0,131	0,061	-0,267*	0,216	0,366**	-	-	-	-	-
DS	0,122	-0,094	-0,300*	-0,094	0,198	-0,186	-0,810**	-0,492**	-	-	-	-
PT	-0,148	0,113	0,206	0,113	-0,254*	0,140	0,871**	0,625**	-0,810**	-	-	-
RPb	0,181	-0,027	-0,322*	-0,027	0,170	-0,314*	-0,700**	-0,578**	0,803**	0,712**	-	-
PTc	-0,101	0,089	0,542**	0,089	-0,218	0,187	0,772**	0,467**	-0,944**	0,769**	-0,784**	-

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

Para os CPA dos atributos físicos para profundidade 0,00-0,20m foram agrupados pelas características que interferem entre si. Foram selecionados 3 grupos: 1 (DS – densidade do solo, RP – resistência a penetração (0,355) componente 2, RPb – resistência a penetração de bancada (0,392) componente 1 negativo do gráfico, 2 (ARG – Argila (0,65) componente 2, DP – densidade da partícula (0,36) componente 2 do lado positivo, 3 (Mi–microporosidade, PTd– Porosidade Total determinada, PTC–porosidade Total calculada, Ma–macroporosidade) componente 1 positivo no gráfico. O ajuste do modelo explicou 54% das variâncias dos atributos físicos do solo com desvios padrões maiores que 1, tendo o componente 1 com 41%, componente 2 com 14%. Assim, para uma melhor compreensão das correlações, o componente 1 que representa mais de 40% das variações, Tabela 3.

Tabela 3 - Análise dos (CPA) que apresentaram escore $\geq 0,300$ (positivo ou negativo) com os CPA - 1,2 e 3 para profundidade 0,00-0,20m.

Componentes da variância	Componentes Principais		
	1	2	3
Desvio Padrão	2,218	1,302	1,163
Proporção (%)	0,410	0,141	0,112
Proporção Acumulada	0,410	0,541	0,669
Atributos	0,00-0,20m		
RP – Resistencia do Solo a Penetração	-	0,355¹	-
UG – Umidade Gravimétrica	-	-	0,139
DP – Densidade da Partícula	-0,192	0,369¹	-
ARG- Argila	-	0,655¹	-0,277
ARE – Areia	0,165	-0,124	0,750¹
SIL - Silte	-0,118	-0,482¹	-0,487¹
Ma – Macroporosidade	-0,339¹	-	0,157
Mi – Microporosidade	-0,292	-0,133	-0,129
DS – Densidade do Solo	0,417¹	-	0,154
PTd – Porosidade Total Determinada	-0,406¹	-	-
RPb – Resistência do Solo a Penetração – Bancada	0,392¹	0,160	-0,102
PTC- Porosidade Total Calculada	-0,419¹	-	0,125

⁽¹⁾ Caracteres com maiores cargas fatoriais (escores) selecionadas dentro de cada fator. O critério para classificação foi: valor absoluto < 0,30, considerado pouco significativo; 0,30 - 0,40, mediantemente significativo; e $\geq 0,50$, altamente significativo, de acordo com Coelho (2003). Fonte: Dados da pesquisa do autor.

O grupo 3 apresentou correlações superiores >0,30 ligados por influências entre si no lado positivo do gráfico considerando revelando que os atributos físicos se comportam de maneira diferente em condições simultâneas. Para o grupo 1 RP - Resistência a Penetração, RPb – resistência a penetração (bancada) e DS - densidade do solo e interfere quase em todos os atributos principalmente na compactação, Dexter (2004) explica que densidade similar com alterações na porosidade, estrutura e principalmente na compactação diminui os macroporos

modificando a distribuição da porosidade, Stone et al., (2002) pesquisou a compactação do solo aumenta a resistência a penetração diminuindo a porosidade total e macroporosidade. Em geral um alta densidade do solo influência diretamente na compactação degradando toda estrutura do solo e participando reduzindo a porosidade total, provocando barreiras para o crescimento do sistema radicular e evolução das plantas. Dessa forma o grupo 1 interfere nos valores de situado negativamente no componente 2 do gráfico fortalecendo o grupo 3 e suas características figura 2.

Tabela 4 - Influência dos pontos nos atributos físicos do solo no gráfico de (CPA)na profundidade 0,00-0,20m.

Grupos	Variáveis	Pontos de influência no gráfico	Localização das Variáveis	
			Positivo	Negativo
1	RP, RPb, DS	26,27,28, 32¹ ,34, 38¹ , 40¹ ,42,44,53,55,60		x
2	ARG, DS	14,25 ¹ ,31, 41¹	x	
3	PTc,PTd, Ma, Mi	3,4,5,6,7,9,11,12,13,16,17,18,19,50	x	

⁽¹⁾ Pontos com mais influências das variáveis no gráfico de (CPA).

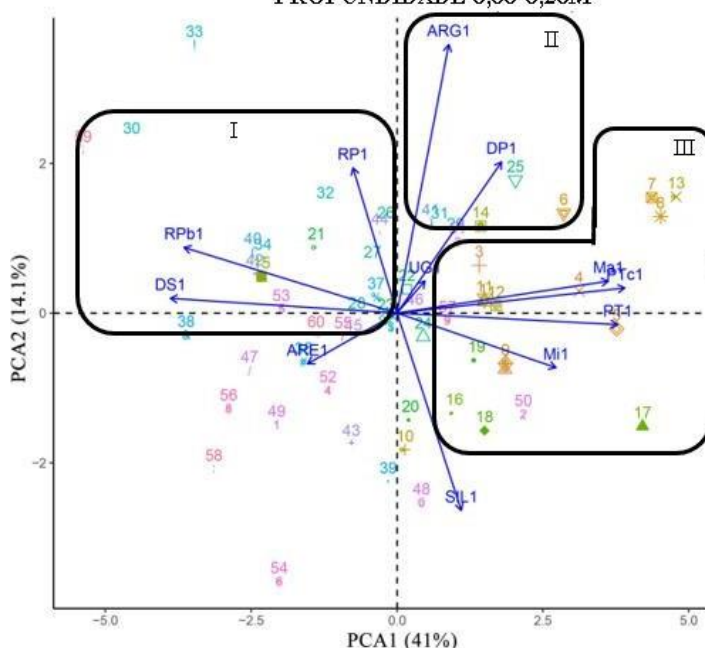
No grupo 2 ARG – argila, DP densidade de partículas, interfere nas propriedades da porosidade com na RP, a penetração pelas próprias características intrínsecas de sua formação, similaridade da argila participa com volume das partículas que se encontra no solo a partir de sua degradação pode influenciar em outros atributos físicos com na compactação (resistência do solo a penetração), assim o grupo 1 como 3 sofre influência do grupo 2, (Apêndice A, Graficos 2, grafico g). Na Figura 2 gráfico de CPA representa as direções que cada atributo físico e seus pontos que mais influenciaram nas correlações entre das (variáveis) e localizações no (componente 1 Grupo 2 e 3 positivo) e (grupo 1 negativo) tabela 4.

Na Figura 4 estão apresentados os mapas de krigagem dos atributos físicos do solo de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico na FEPE no município de Selvíria - MS com o sistema rotação de cultura. Em relação aos mapas apresentados serão aqueles de elevada semelhança espacial para efeito prático de manejo do solo.

Analisando a (figura 4a) para ARE, observa-se no mapa de krigagem que os maiores valores ocorreram, no sentido norte, nordeste e noroeste com valores entre 459 a 426 g Kg⁻¹, nas demais regiões os valores foram menores. Em relação a microporosidade, figura 4b houve valores maiores nos sentidos sul-suldeste e a leste da malha experimental com 0,190 a 0,210 m³ m⁻³ figura 4b.

Figura 2 - CPA dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico na profundidade 0,00-0,20m sob mais dez anos de SPD.

COMPONENTES PRINCIPAIS PARA ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE 0,00-0,20M



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5. Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico sob plantio direto em sequeiro na profundidade 0,00-0,20m.

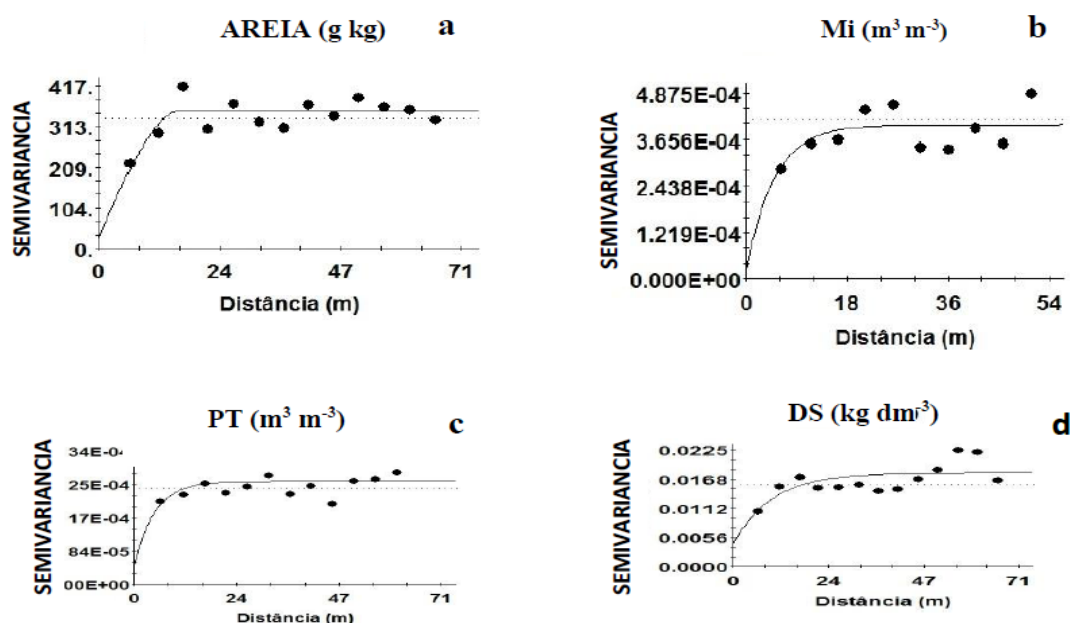
Atributos ^(a)	Parâmetros							Avaliador da dependência espacial	Classe
	Modelo	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		
RP	epp	-	1,745	-	-	-	-	-	-
UG	epp	-	3,03,10 ⁻²	-	-	-	-	-	-
DP	epp	-	4,140,10 ⁻³	-	-	-	-	-	-
ARG	epp	-	3,64,10 ⁻²	-	-	-	-	-	-
ARE	esf	2,13,10 ⁻²	3,53,10 ⁻²	15,9	0,597	1,219,10 ⁻⁴	94	MA	MA
SIL	epp	-	1,10 ¹	-	-	-	-	-	-
Ma	epp	-	1,99,10 ⁻³	-	-	-	-	-	-
Mi	exp	1,9,10 ⁻⁵	4,0,10 ⁻⁴	14	0,337	2,218,10 ⁻⁸	95	MA	MA
DS	exp	4,26,10 ⁻³	1,8,10 ⁻²	28	0,394	7,10 ⁻⁵	76	AL	AL
PT	exp	4,46,10 ⁻⁴	2,6,10 ⁻³	14	0,187	1,2,10 ⁻⁶	83	MA	MA
RPb	epp	-	5,25,10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-
PTc	epp	-	3,722,10 ⁻³	-	-	-	-	-	-

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

Analisando a porosidade total (Figura4c), atingiu-se os maiores valores ao centro, sul e sudeste com $0,302$ e $0,374 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para densidade do solo (figura 4d) obtiveram-se os maiores valores nas regiões norte, noroeste e nordeste com $1,39$ a $1,58 \text{ kg dm}^{-3}$, foram apresentadas

semelhanças espaciais inversa para os mapas de krigagem para atributos DS e PT, onde nos locais de baixa densidade do solo ao sul e sudeste dos mapas com 1,21 a 1,30 Kg dm⁻³ foi encontrado valores de (PT) entre 0,374 a 0,302 m³ m⁻³. Para similaridade espacial entre os atributos físicos (DS) e (Mi) podemos observar no mapa na região norte e noroeste maiores valores de (DS) 1,58 a 1,39 Kg dm⁻³ e (Mi) com valores de 0,190 m³ m⁻³

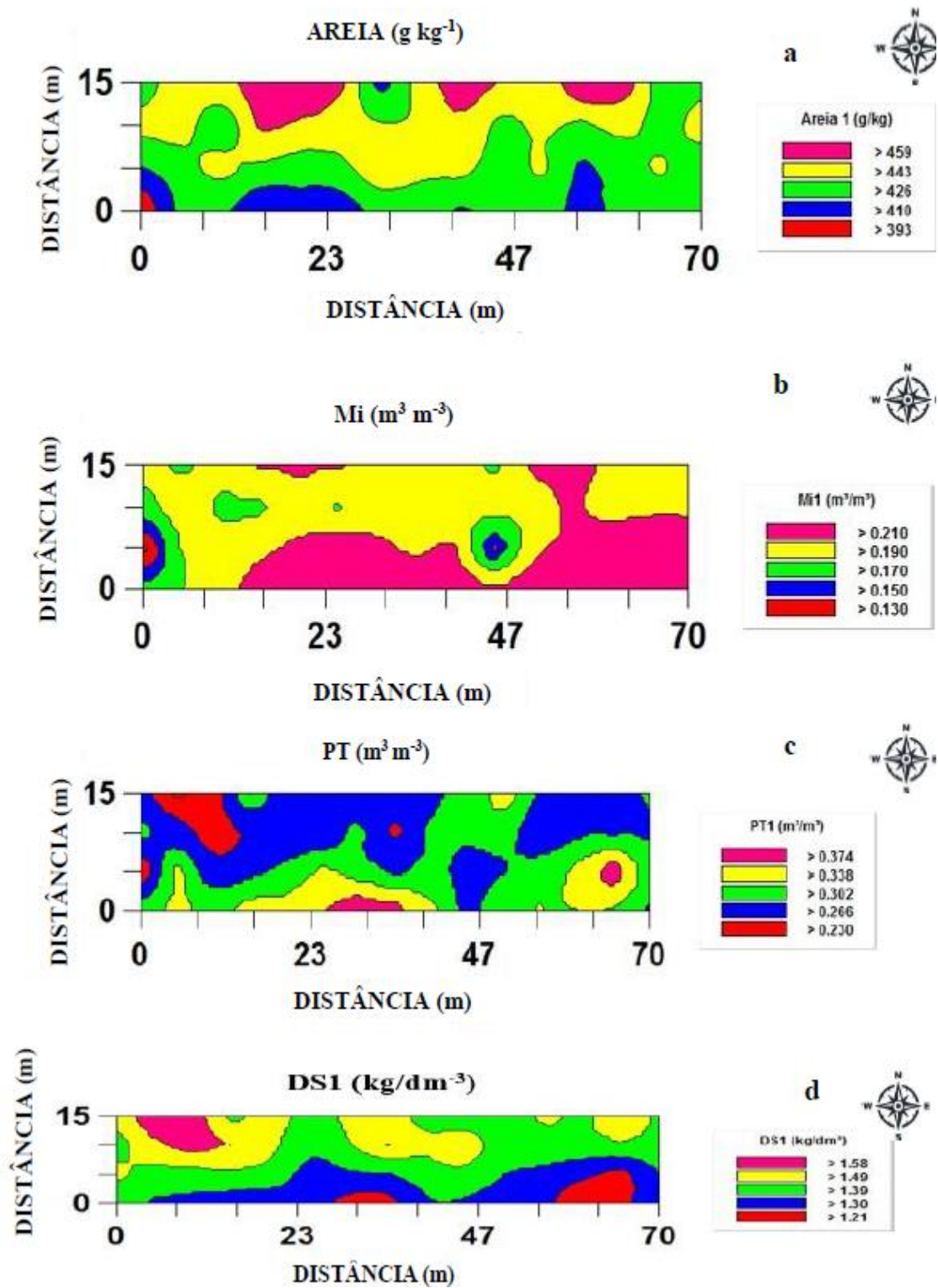
Figura 3: Semivariogramas simples dos atributos físicos do solo (ARE-Areia, Mi-Microporosidade, PT – Porosidade Total, DS-Densidade do solo) na profundidade 0,00-0,20 m de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico, sob SPD.



Fonte: Pesquisa do proprio autor.

Diversos autores (Vieira, 1981; Vieira; Oades, 1984; Corrêa, 1985) observaram solos nas camadas superficiais, sob SPD com 4 anos, e encontraram maiores valores de DS e Mi, com diminuição da (Ma) quando comparados ao do preparo convencional, motivado pelo arranjo natural do solo com restrição de tráficos de máquinas. Nessa situação não há pressão externas por implementos agrícolas, principalmente, em solos úmidos e argilosos (Apêndice A, Graficos 2, gráfico g).

Figura 4: Mapas de krigagem de alguns atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico (ARE, Mi, PT e DS) na profundidade de 0,00-0,20 m sob SPD



Fonte: Pesquisa do próprio autor.

3.4 CONCLUSÕES

Conforme os valores médios da UG ($0,250 \text{ kg kg}^{-1}$) foi possível observar indícios de que o SPD, na camada superficial de 0,00-0,20m, melhorou as condições da condutividade hídrica, passando do ideal ($0,200 \text{ kg kg}^{-1}$), motivado pelo tempo de implantação do sistema (10 anos).

Com exceção dos atributos: ARE, Mi, DS e PT, na camada de 0,00-0,20m, os quais apresentaram forte razão de dependência espacial, os demais atributos apresentaram efeito pepita puro, confirmando a heterogeneidade da área experimental, não sendo possível a geração de mapas de krigagem.

A dependência espacial para ARE pode ser atribuída pelos manejos antes da implantação da SPD com dez anos.

A dependência espacial da porosidade total PT, evidenciada pela correlação negativa, influenciada pela densidade do solo DS e pelo aumento microporosidade Mi, contribuiu no aumento do teor de carbono, o qual atua na formação de agregados do solo e, consequentemente, melhorando a condutividade hídrica.

O gráfico estatístico de CPA apresenta os atributos físicos que estão sob influência entre si em lados opostos no componentes 1 e 2, o que fortalece a influência entre si explicando heterogeneidade. A densidade e a porosidade estão relacionadas, sendo que solo com maiores resistência possui uma porosidade menor ou o contrário.

4 ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ALGUNS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO NA SUBSUPERFÍCIE NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

RESUMO

A produção mundial de alimentos emprega um papel crucial na garantia da segurança alimentar para uma população global em constante crescimento. O Brasil vem participando na agregação de cooperação na produção de alimentos acompanhando as novas tecnologias. Muitas dessas tecnologias pressionam o meio ambiente e seus recursos, principalmente no bioma do cerrado brasileiro que está ligado diretamente aos novos recordes na safra brasileira, tendo uma dessas tecnologias envolve o manejo do solo com sistema de plantio direto (SPD) que envolve pesquisas na recuperação de solos degradados usando o resíduo vegetal com axiliador de matéria orgânica, tendo a degradação em camadas subsuperficiais com fator impactante no desenvolvimento das raízes das plantas no aproveitamento da absorção de nutrientes provocado pelo fenômeno do pé-de-grade ou pé-de-arado camadas compactadas em subsuperfície. Dessa forma foi elaborado uma pesquisa em uma área com mais de anos de plantio direto na fazenda da UNESP a (FEPE) que utilizou ferramenta da GEO e dos componentes principais CPA, para a GEO formou-se um plano cartesiano com 60 pontos e, em cada um dos pontos, foram avaliados: macroporosidade ($Ma \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), microporosidade ($Mi \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), a porosidade total determinada ($PTd \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), densidade de resistência à penetração do solo ($DS \text{ kg dm}^{-3}$), resistência à penetração do solo com penetrômetro de impacto ($RPI \text{ MPa}$), resistência à penetração do solo com penetrômetro de bancada ($RPpb \text{ MPa}$), umidade gravimétrica ($UG \text{ kg kg}^{-1}$), densidade de partículas ($DP \text{ kg dm}^{-3}$), porosidade total calculada ($PTc \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em profundidade (0,00-0,20 m). Para cada atributo foi realizada uma análise descritiva, auxiliada pela estatística clássica e uma análise da distribuição de frequência pelo teste de Shapiro e Wilk com 1 e 5% de probabilidade de erro e posteriormente foi feita a matriz de correlação de Pearson para analisar as correlações mais fortes entre os atributos e posteriormente o análise estatístico de CPA em que levou considerações a influência dos atributos físicos entre si. Objetivo deste trabalho é estudar a variabilidade espacial utilizando ferramentas de geoestatística e CPA para os atributos físicos na subsuperfície e avaliar o (pé-de-arado ou pé-de-grade) de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico sob um sistema de SPD.

Palavras chave: pé-de-grade; compactação; resíduo vegetal.

SPATIAL VARIABILITY ANALYSIS OF SELECTED PHYSICAL ATTRIBUTES IN A DYSTROPHIC OXISOL SUBSURFACE UNDER NO-TILL CROPPING SYSTEM

ABSTRACT

Global food production plays a crucial role in ensuring food security for an ever-growing global population. Brazil has been participating in the aggregation of cooperation in food production, following new technologies. Many of these technologies have put pressure on the environment and its resources, especially in the Brazilian cerrado biome, which is directly linked to new records of the Brazilian harvest. One of these technologies involves soil management with a direct planting system (SPD) that involves research into recovery of degraded soils using a plant residue with organic matter aid, with manipulation in subsurface layers with an impacting factor on the development of plant roots in taking advantage of the absorption of nutrients caused by the phenomenon of the foot-of-degree or foot-of-plow layers compacted in the subsurface. In this way, research was carried out in an area with more than years of direct planting on the UNESP a farm (FEPE) using a Geostatistics tool and the main components. For geostatistics, a Cartesian plane was formed with 60 points and, in each one of the points, the following were evaluated: macroporosity ($Ma \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), microporosity ($Mi \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), total porosity determined ($PTd \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), density of resistance to soil penetration ($DS \text{ kg dm}^{-3}$), resistance to soil penetration with impact penetrometer ($RPI \text{ MPa}$), resistance to soil penetration with bench penetrometer ($RPPb \text{ KPa}$), gravimetric humidity ($UG \text{ kg kg}^{-1}$), particle density ($DP \text{ kg dm}^{-3}$), calculated total porosity ($PTc \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) at depth (0.00-0.20 m). For each attribute, a descriptive analysis was carried out, aided by classical statistics and an analysis of the frequency distribution using the Shapiro and Wilk test with a 1% probability of error and subsequently the Persson demonstration matrix was made to analyze the strongest correlations between the attributes and subsequently the statistical analysis of main components in which the influence of physical attributes on each other was taken into account. The objective of this work is to study spatial variability using geostatistics and PCA tools (main components) for physical attributes in the subsurface and discover the depth (plough-foot or degree-foot) of a dystrophic OXISOL under a system of SPD.

Keywords: harrow; grader blade; compaction; plant residue.

4.1. INTRODUÇÃO

A produção mundial de alimentos emprega um papel crucial na garantia da segurança alimentar para uma população global em constante crescimento FAO (2022). No entanto, esse aumento populacional coloca uma pressão crescente sobre os recursos naturais, em especial sobre os solos agrícolas.

Um dos problemas que afetam a fertilidade e a saúde dos solos é a compactação, um fenômeno resultante da sobrecarga no solo, que leva à redução da porosidade e à limitação do movimento da água, ar e nutrientes. O Brasil vem participando na agregação de cooperação na produção de alimentos acompanhando as novas tecnologias. Muitas dessas tecnologias pressionam o meio ambiente e seus recursos, principalmente no bioma do cerrado Brasileiro que está ligado diretamente no novos recordes na safra brasileira.

Hoje no cerrado Brasileiro está maior força do campo na produção agrícola com potencial com aproximadamente 45,6 milhões de toneladas de oleaginosas num recorde de 315, 8 milhões toneladas para safras nacional brasileira 2022/2023 batendo um recorde das safras anteriores CONAB (2023). Essa produção está situada em áreas de cerrado com aptidão agrícola de 139 milhões de hectares de 207 milhões de hectares sob o bioma do cerrado EMBRAPA (2005).

Na região do Cerrado Brasileiro tem sido observado um problema recorrente de compactação/adensamento do solo. Isso ocorre devido aos sistemas convencionais de manejo do solo, que causam a desagregação excessiva da camada arável, formando crostas incorporadas e camadas coesas ou compactadas. Essas são chamadas de "pé-de-grade" ou "pé-de-arado" que representam um desafio para a produtividade agrícola na região segundo Freitas (1994). Assim, a força aplicada por pressão externa por maquinários no solo causa a compactação do solo, ou seja, o solo fica mais denso diminuindo a porosidade provocando mudanças na estrutura do solo (Lepsch *et al.*, 2015).

Para estudos no fortalecimentos dos aspectos positivos para sustentabilidade do solo em SPD, são as tecnologias empregadas na agricultura de precisão como a GEO que representa a elaboração de mapas em caracterizar comportamentos do solo como variabilidade positiva ou negativa facilitando o diagnósticos no solo principalmente no comportamento físico do solo.

Nessa condição, a física do solo e a GEO podem ser aplicadas em representar as condições que solos se encontra, como a resistência do solo à penetração, entre outros atributos. Isso permite descrever que a estrutura e o padrão de variação dos atributos, permitindo a tomada de decisões mais precisas em relação ao manejo e uso do solo. No estudo do comportamento

das variáveis regionalizadas, duas ferramentas são fundamentais, os métodos estatísticos, GEO e o semivariograma e a krigagem Landim (2006). Ao aplicar a geostatística e possível verificar dados de pontos amostrais em diversas profundidades em áreas de interesse principalmente para observar o comportamento e variabilidade espacial. A GEO é uma ferramenta que possibilita uma interpretação dos resultados da variabilidade na base estrutural construída com base nos atributos físicos avaliados, levando em conta a dependência espacial nos pontos de amostragem Cambardella *et al.*, (1994) junto à ferramenta da Geoestatística, encontramos o PCA (Análise de Componentes Principais), que é um método estatístico que estuda múltiplas variações simultâneas para identificar padrões, relações e tendências, explorando as influências entre si. Com isso, ele serve para agrupar indivíduos (atributos físicos do solo) com características semelhantes e estudar suas influências e correlações. Entretanto, o objetivo deste trabalho é estudar a variabilidade espacial utilizando ferramentas de GEO e PCA (componentes principais) para os estudos dos atributos físicos na subsuperfície e descobrir o (pé-de-arado ou pé-de-grade) de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico sob um sistema de SPD implantado, aplicando-o à rotação de culturas.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no ano agrícola de 2020/2021, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) pertencente à Faculdade de Engenharia – UNESP, Campus de Ilha Solteira, situada à 51° 22' de longitude Oeste de Greenwich e 20° 22' de Latitude Sul, com altitude de 335 m (Figura 1). O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO distrófico, textura argilosa Demattê (1980). A classificação climática da região, de acordo com Köppen, é Aw, definida como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, A temperatura média anual é de 23,5° C e a precipitação pluvial média anual é de 1,370 mm.

Histórico da área experimental tem sido cultivada com culturas anuais sob plantio direto há mais de 10 anos, com leguminosa produtora de grãos no verão e gramíneas e de grãos e forragem no momento da estação de outono, obedecendo a sequência soja-milho-pastagem e, soja-sorgo-pastagem. Foi executado a aplicação de calcário dolomítico (PRNT 85%) em superfície, sem inserção, na dose de 2,0 t ha⁻¹ em setembro de 2015. O preparo da área agrícola antes da semeadura das culturas no outono foi realizado com dessecação da flora daninha com herbicida Glyphosate (1.560 g ha⁻¹ do i.a.), e após usou a ceifa utilizando triturador horizontal de rejeitos vegetais (Triton) (Nakao, 2021).

A coleta de solos para adquirir os dados foram no período do plantio da soja em área de

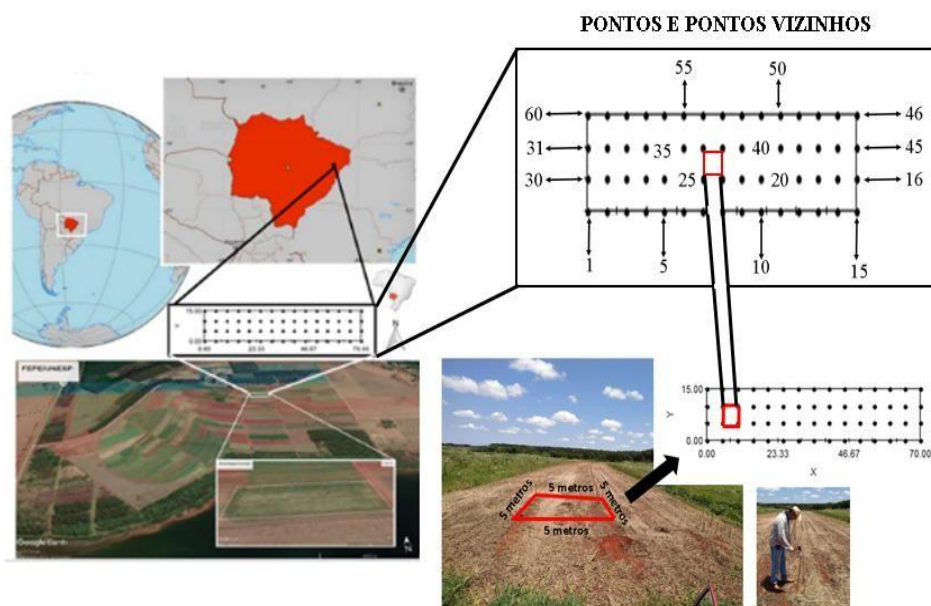
sequeiro, realizada em talhão com área total de $0,532 \text{ ha}^{-1}$, a qual vem sendo cultivada, nos últimos 10 anos, sob semeadura direta, em sistema de rotação de culturas: soja, milho/sorgo, pastagem.

Para o mapeamento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo foi elaborada uma grade amostral composta por 60 pontos. Para orientação, foram definidas as direções x e y em sistema de coordenadas cartesianas figura 4.

Os pontos amostrais foram determinados com espaçamento de 5 metros regulares entre os pontos. Foram coletadas amostras de solo deformada e indeformada no mês de fevereiro 2021 logo após a colheita, na profundidade de $0,020 - 0,40\text{m}$.

Os atributos físicos do solo avaliados foram: a textura do solo, mensurada pelas frações areia (ARE), silte (SIL) e argila (ARG) definida pelo método da pipeta EMBRAPA (2017); umidade gravimétrica (UG) EMPAPA (2017); macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT), determinados pelo método da mesa de tensão, com coluna de água de $0,60 \text{ m}$ EMBRAPA (2017), densidade do solo (DS), determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2017), resistência mecânica à penetração do solo (RP), obtido com o auxílio do penetrômetro de impacto, modelo IAA/PLANALSUCAR/STOLF, de acordo com a metodologia de STOLF (1991).

Figura 5. Localização geográfica da área experimental da fazenda FEPE com pontos de coleta para amostra de solo.



Fonte: Pesquisa elaborado pelo proprio autor.

Para a obtenção das medidas da resistência à penetração do solo em laboratório realizado pelo penetrômetro estático de bancada (RPb) usou – se o equipamento - Penetrômetro Eletrônico de Solos de bancada – solotest, com a ponteira de 4 mm e com uma velocidade constante de penetração de 5 mms^{-1} . Foram realizados com amostras indeformadas coletadas em cada ponto da área experimental da área do sequeiro nas profundidades 0,20-0,40m com anéis volumétricos sendo os mesmos coletados para análises da porosidades. Seguindo nesse contexto, esses anéis foram saturados 24 horas posteriormente foram colocado na mesa de tensão de 100 cm e pesado após 24 horas para observar o solo na capacidade de campo, em seguida os anéis úmidos foram colocados na mesa para leituras da resistência a penetração com unidade de medida em KPa (quilos pascal) e posterior transformados para MPa (mega pascal) EMBRAPA (2011).

Com os valores dos atributos do solo, foram realizadas análises descritivas clássicas: média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de curtose e assimetria com a distribuição de frequência, através do software estatístico (SAS Schlotzhaver; Littell, 1997), O coeficiente de variação (CV) foi classificado de acordo com as seguintes classes e relevâncias: baixa ($CV \leq 10\%$), média ($10\% < CV \leq 20\%$), alta ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito alta ($CV > 30\%$), de acordo com (PIMENTEL GOMES; GARCIA, 2002).

Posteriormente, foram analisados os Outliers e realizado a substituição dos seus valores, dos circunvizinhos contidos na grade amostral. Para a hipótese da normalidade foi realizado o teste de (Shapiro; Wilk, 1965) a 5% de probabilidade. Ainda, foram elaboradas as matriz de correlação para combinações dos atributos estudados.

A análise de dependência espacial das variáveis estudadas foi determinada pelo ajuste dos dados ao semivariograma experimental, ignorando anisotropia local (modelo isotrópico), com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca. Para isso, utilizou-se o do pacote Gamma Design Software 7,0 (GS+, 2004).

Os ajustes dos semivariogramas simples foram realizados em função de seus modelos e definidos pela seleção inicial: a) menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR); b) maior coeficiente de determinação (r^2) e c) maior avaliador da dependência espacial (ADE).

Para os atributos estudados, foram escolhidos o efeito pepita (C_0), o alcance (A_0) e o patamar ($C_0 + C$). Para determinação do avaliador da dependência espacial (ADE), utilizou-se a metodologia de (Cambardella et al., 1994), modificada pelo Gamma Design Software (2004), conforme a seguinte expressão:

$$ADE = [C/(C + C_0)] \cdot 100 \text{ onde:}$$

ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; e

$C + C_0$ é o patamar,

A interpretação proposta para o ADE foi dada de acordo com (Dalchiavon; Carvalho 2012): a) $ADE < 20\%$ = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b) $20\% \leq ADE < 40\%$ = baixa dependência (BA); c) $40\% \leq ADE < 60\%$ = média dependência (ME); d) $60\% \leq ADE < 80\%$ = alta dependência (AL) e $80\% \leq ADE < 100\%$ = muito alta dependência (MA).

A definição final do modelo que melhor descreveu o ajuste foi determinado através da validação cruzada. Uma vez observada a dependência espacial, produziu-se o mapa temático da distribuição espacial de cada atributo, através da krigagem ordinária.

Para análise dos CPA usou três métodos estatísticos usados foram para classificar acessos em grupos: análise de agrupamentos hierárquicos, análise de agrupamentos não hierárquicos(k-means) e análise de CPA.Todas as análises multivariadas foram após a padronização dos atributos, com média 0 e variância 1.

Para começar estabeleceu os (CPA)para os atributos físicos do solo pesquisados, sendo elaborados combinações de correlação entre atributos em ordem decrescente usando pacote do software estatístico SAS (Schlotzhaver; Littell, 1997).

A categorização das correlações foi realizada de acordo com Coelho (2003), utilizando

autovetores que descrevem os caracteres dos componentes que oscilam de -1 a +1: <0,30 (pouco significativo), 0,30-0,40 (mediamente) significativo e >0,50 (altamente significativo).

Em seguida, os dados foram sujeitos à avaliação de agrupamentos pelo método hierárquico seguindo a distância euclidiana para avaliar a similaridade entre as amostras com método de Ward que facilitou a formação de grupos, e posteriormente nos dados originais para análise dos grupos utilizou-se o método do algoritmo K-means (Hair Junior *et al.*, 2005) caracterizando e padronizando os grupos.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor compreensão dos dados da observados tabela 6 foram escolhidos os atributos físicos - RP, Ma, PT, DS, tendo relação com a compactação em subsuperfície.

Ao analisar a Tabela 6 para os atributos físicos na profundidade de subsuperfície, observaram-se coeficientes de variação (CV's) altos para PT, com 20,240%, e CV médios para RP- 13,656%, UG - 11,137%, DS - 11,663%, Mi - 14,024%, PTc - 16,280%, e CV muito alto para SIL - 41,092%, Ma - 45,506%, e RPb - 54,170%. Por outro lado, foram encontrados CV's baixos para DP - 2,673%, ARE - 5,897%, e ARG - 5,727% pela metodologia de (Pimentel-Gomes e Garcia, 2002). Já para distribuição de frequência encontramos dados normais para os atributos ARE, DS, Mi, PTc com valores > 0,005 (Shapiro; Wilk, 1965), com tendência a normalidade o atributo PT com distribuição entre 0,003 a 0,005, a distribuição de frequência indeterminada para os atributos RP, UG, DP, ARG, SIL, Ma, RPb com valores <0,005.

Nesse sentido, os atributos físicos que participam nas características edáficas estão relacionados com as transformações no solo promovidos pelo manejo, apresentando as maiores variações na profundidade de subsuperfície. Isso difere dos atributos que possuem uma relação com a pedogênese as condições intrínsecas do solo, como o material de origem e as condições climáticas, como os atributos de granulometria e densidade de partícula. De acordo com Carvalho *et al.*, (2003), a variabilidade dos atributos físicos do solo é resultado de complexos processos de sua formação e das práticas de manejo do solo e da cultura, o que afeta principalmente nas camadas superficiais e subsuperficiais.

Os resultados de Bergamin *et al.* (2002) foram confirmados, uma vez que o solo da mata apresentou os menores valores de densidade e os maiores valores de macroporosidade e porosidade total, independentemente da profundidade e do sistema de rotação de culturas, a presença de uma cobertura densa do solo e abundância de resíduo vegetal da vegetação nativa, juntamente com a ausência de atividades com máquinas e equipamentos, têm um impacto

positivo nas propriedades físicas do solo.

Analisando a tabela 6, observa-se a média de 4,053 MPa para o atributo RP em subsuperfície considerado compactado segundo os autores (Merotto; Mundstock, 1999) e Canarache (1990) apontaram valores de 5 MPa, respectivamente, como o ponto crítico de resistência à penetração de raízes. Muitos pesquisadores empregam o valor de 2 MPa como o limite crítico segundo Taylor et al. (1966), relacionado à granulometria com elevada taxa de argila. Na tabela 6, apresentou RP em subsuperfície com um baixo coeficiente de variação de 13,656% tendo uma homogeneização em (Apêndice A. gráficos 2, gráfico f).

Seguindo nesse contexto, a UG apresentou uma média de 0,175 kg kg⁻¹ ou 17%, há uma variação na compactação do solo quando se eleva a umidade (Hamza; Anderson, 2005). De acordo com Resende (1995), a camada compactada é definida como um limite crítico para LATOSSOLOS ARGILOSOS quando a umidade do solo está abaixo de 50% e a densidade do solo ultrapassa 1,40 Mg m⁻³, (Apêndice A, Gráficos 1, gráficos b,d).

A resistência do solo à penetração é influenciada pelos sistemas de manejo do solo e varia de acordo com a profundidade Colombo et al., (2017). Nessa circunstância no que diz respeito à granulometria argila, a média encontrada foi de 526 g/kg⁻¹. A UG mostra que a quantidade de água presente no solo é relativamente baixa. Já a granulometria com argila apresentou uma média 526 g kg⁻¹ indica uma presença significativa de argila no solo tabela 6.

Analisando a DS apresentou uma média de 1,375 kg dm⁻³, com um coeficiente de variação de 11%, tabela 6. Isso significa que, em média, o solo apresenta uma densidade relativamente alta, indicando uma maior compactação ou concentração de partículas. Contudo Cortez et al., (2014) apresentou dados que a partir da subsuperfície 0,20-0,40m de profundidade, constatou-se acréscimo nos valores de RP, devido, provavelmente, a estruturas mais densas do solo oriundas do sistema convencional, e inadequadamente corrigidas para implantação do SPD. Por outro lado, a RP na profundidade de 0,20-0,40 m apresentou uma média 4,053 MPa, com coeficiente de variação de 13% tabela 6, influenciado por fatores como a densidade, umidade, indicando uma mudança moderada nos valores de resistência do solo à penetração em profundidade, Beutler et al. (2007) constataram que densidades de solo acima de 1,26 e 1,29 kg dm⁻³ limitou a produtividade de soja cultivada em LATOSSOLO VERMELHO eutrófico. A média para a Ma foi de 0,122 m³ m⁻³, conforme a Tabela 6, destacando negativamente, impactando a capacidade de infiltração de água e aeração do solo. Foloni et al. (2003) que analisou o crescimento radicular do milho em LATOSSOLO VERMELHO distroférico textura média que foi prejudicado em 50 % quando a RP foi de 0,75 MPa e totalmente inibido quando aproximou a 1,4 MPa.

O solo manejado sempre com a mesma profundidade de corte no preparo inicial pode ter colaborado para o aumento rápido da resistência à penetração no SPD (Neto *et al.*, 2014). Segundo (Richart *et al.* 2005), mesmo com a adoção de práticas conservacionistas como o SPD, alterações nos atributos físicos são normalmente atribuídas ao tráfego de máquinas agrícolas em condições de alta umidade no solo.

Já para a DS, obteve-se uma média de $1,375 \text{ kg dm}^{-3}$, a qual é considerada alta o suficiente para indicar compactação quando exceder 1,6 a $1,7 \text{ kg dm}^{-3}$. Entretanto, segundo Bowen (1981), em relação aos solos argilosos, o limite crítico de densidade, quando em estado de capacidade de campo, é de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$. A utilização controlada de maquinários e implementos na agricultura pode promover e intensificar a formação de camadas compactadas (adensadas) em profundidades na subsuperficiais do solo. Isso tem sido identificado como uma das principais problemáticas da degradação do solo e pela redução da produtividade das colheitas, conforme observado por (Campos *et al.*, 1995).

Os fatores determinantes para os valores críticos para a DS em solos argilosos variaram de 1,40 a $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$, conforme (Reichert *et al.*, 2003).

Para o atributo PT, apresentou uma média de $0,342 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerado tamanho baixo de poros estando com processos de adensamento no solo, conforme Kiehl (1979), o solo perfeito para a produção agrícola precisa ter uma porosidade próxima a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em uma proporção percentual de 34% para poros grandes e 66% para poros pequenos, abaixo de 10-15%, valores de porosidade de aeração costumam ser considerados limitantes para o desenvolvimento e rendimento da maioria das culturas, embora esses limites variem de acordo com a espécie de planta e a atividade biológica do solo. Valores de porosidade de aeração abaixo de 10-15% são, geralmente, adotados como restritivos para o crescimento e a produtividade da maioria das culturas, apesar da dependência da espécie de planta e da atividade biológica do solo. Segundo Spera *et al.* (2004) relatou que os valores de porosidade decaem com profundidade nas matas nativas, o que está relacionado com a matéria orgânica em superfície.

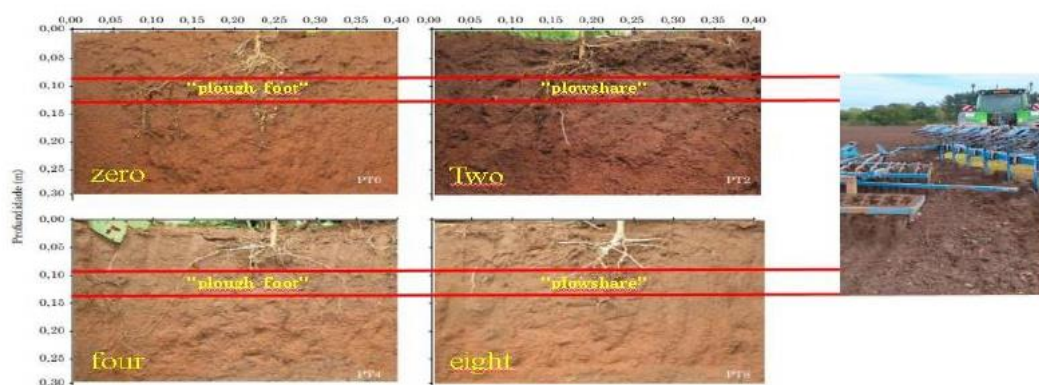
Tabela 6: Análise descritiva dos atributos físicos de um LATOSSOLO na profundidade de 0,20 – 0,40 m sob plantio direto no sequeiro.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Valor				Coeficiente					
	Média	Mediana	Desvio		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF	
			Mínimo	Máximo						Padrão
Atributos físicos do solo										
RP (MPa)	4,053	3,928	2,933	5,730	0,553	13,656	1,928	1,004	0,002	IN
UG (kg kg ⁻¹)	0,175	0,180	0,113	0,199	0,019	11,137	2,649	-1,572	0,000	IN
DP (kg dm ⁻³)	2,555	2,564	2,326	2,740	0,068	2,673	3,655	-1,188	0,000	IN
ARG (g kg ⁻¹)	526.980	528,000	436,000	579,000	30,195	5,729	1,204	-0,878	0,012	IN
ARE (g kg ⁻¹)	404,660	403,000	367,000	463,000	23,860	5,897	-0,160	0,520	0,094	NO
SIL (g kg ⁻¹)	68,33	61,000	36,000	169,000	28,080	41,092	3,657	1,854	0,000	IN
Ma (m ³ m ⁻³)	0,122	0,105	0,047	0,291	0,055	45,506	0,196	0,838	0,001	IN
DS (kg dm ⁻³)	1,375	1,363	0,934	1,651	0,160	11,663	-0,206	-0,302	0,205	NO
PT (m ³ m ⁻³)	0,342	0,328	0,215	0,507	0,069	20,242	-0,793	0,379	0,049	TN
Mi (m ³ m ⁻³)	0,218	0,216	0,118	0,309	0,030	14,024	1,890	-0,178	0,135	NO
RPb (KPa)	1,033	0,911	0,090	2,603	0,559	54,170	0,053	0,784	0,004	IN
PTc (m ³ m ⁻³)	0,458	0,468	0,200	0,626	0,076	16,280	1,430	-0,606	0,193	NO

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

Segundo (Albuquerque *et al.* 2001), no sistema de SPD, as camadas superficiais encontram-se compactadas pela própria densidade e decaem com a profundidade. Nesse sentido, conseguiram localizar o pé-de-arado ou pé-de-grade no SPD na profundidade superior a 0,20 m, seguindo exemplo de figura 6 (Valadão, 2015)

Figura 6. Impacto da passagem de trafego de máquinas (trator) na compactação do solo.



Fonte: Valadão (2015).

Na tabela 8 consta a matriz de correlação linear simples entre os atributos do solo (RP, UG, DP, ARG, ARE, SIL, Ma, Mi, DS, PT, RPb, PTc), nesse sentido atribui para melhor entendimento representativo para atributos relacionados para tabela 7.

Analizando a Tabela 7, observou-se uma representatividade mais efetiva dos dados que

foram analisados por meio das correlações negativas e positivas, com (r) superior a 0,700 de significância para buscar o diagnóstico de pé de arado, envolvendo atributos físicos relacionados PT, DS, Ma, com características das correlações do manejo do solo em subsuperfície.

Tabela 7. Tabela de correlação de Persson para atributos físicos do solo de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico na profundidade de subsuperfície 0,20-0,40m.

Correlação (Pearsson) ^a	Valor (r) ^b	Significativo (%) ^c	
		1**	5*
PT x Ma	-0,910	X	
PT x DS	-0,818	X	
DS x Ma	-0,743	X	

^aCorrelação de Pearson para atributos físicos do solo respectivamente: PT=porosidade total, Ma=macroporosidade, DS=Densidade do solo, ^bvalores aproximados de 1 negativo e positivo alta correlação, ^c *significância a 1%, **significância a 5%.

A correlação entre PT e Ma possui alta significância, com 1%, relacionada às condições naturais e edáficas, tais mudanças na estrutura do solo causadas pelo tráfego de máquinas e animais em períodos prolongados, cria pressões externas com excessivas repetições. Consequentemente, isso gera impactos nos tamanhos dos poros, principalmente na Ma. A formação de camadas compactadas diminui a atividade biológica e a Ma no perfil do solo, resultando no aumento da DS, o que leva a uma maior resistência física à expansão das raízes (Jimenez *et al.*, 2008).

Valores de porosidade de aeração abaixo de 10-15% são geralmente adotados como restritivos ou limite crítico para o crescimento e produtividade na maioria das culturas. Apesar da dependência da espécie de planta e da atividade biológica do solo, a aeração depende das condições climáticas. Os valores críticos de porosidade de aeração devem ser ampliados sob condições mais úmidas Thomasson (1978).

Na correlação negativa entre DS e Ma, com significância de 1%, observamos uma interação entre o adensamento e a diminuição da Ma devido às atividades edáficas em décadas anteriores, as quais exerceram uma tensão e pressão externa sobre o solo e, consequentemente, levaram à redução dos poros, (Apêndice A, Gráficos 2, gráfico b). Os valores médios da Ma já evidenciam o problema do adensamento, tornando-se prejudiciais na subsuperfície, com 0,122 m³ m³, prejudicando a entrada de água e de ar, conforme relatado pela média de UG, que é de 0,175 kg/kg (tabela 6). No entanto, Montanari (2010) concluiu em um experimento com o plantio de feijão em LATOSSOLO VERMELHO distrófico sob o bioma do cerrado obteve UG

superior a 0,205 kg/kg atribuindo uma elevada produtividade.

Para os CPA dos atributos físicos para subsuperfície 0,20-0,40m foram agrupados pelas características que interferem entre si. Foram selecionados 3 grupos: 1 (DS (-0,406), RPb (-0,378) componente 1, negativo do gráfico, grupo: 2 (ARG (-0,682) componente 2, DP (-0,284) componente 2 positivo, grupo 3 (Mi (0,295), PTc (0,419), Ma (0,349), PTd (0,394) componente 1 positivo. O ajuste do modelo explicou 57,4% das variâncias dos atributos físicos do solo com desvios padrões menores que 1, tendo o componente 1 com 42,4%, componente 2 com 15%. Assim, para uma melhor compreensão das correlações, o componente 1 que representa mais de 42% das variações, Tabela 9.

Tabela 8. Matriz de correlação dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMLHO distrofico na profundidade de 0,20 - 0,40 m sob plantio

<i>ATRIBUTOS</i> ^(a)	<i>COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO</i> ^(b)											
	RP	UG	DP	ARG	ARE	SIL	Ma	Mi	DS	PT	RPb	PTc
UG	-0,250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DP	0,005	0,053	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ARG	-0,009	-0,001	0,354**	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ARE	0,024	-0,246	-0,557**	-0,485**	-	-	-	-	-	-	-	-
SIL	-0,010	0,214	0,092	-0,662**	-0,333**	-	-	-	-	-	-	-
Ma	0,266*	0,115	0,153	0,097	-0,274*	0,133	-	-	-	-	-	-
Mi	-0,000	0,006	0,288*	0,273*	-0,383**	0,035	0,298*	-	-	-	-	-
DS	-0,016	-0,109	-0,224	-0,136	0,417**	-0,213	-0,743**	-0,566**	-	-	-	-
PT	0,229	0,090	0,177	0,175	-0,368**	0,129	0,910**	0,647**	-0,818**	-	-	-
RPb	0,099	-0,177	-0,287*	-0,218	0,463**	-0,163	-0,615**	-0,477**	0,811**	-0,677**	-	-
PTc	0,018	0,162	0,405**	0,225	-0,539**	0,222	0,704**	0,558**	-0,947**	0,772**	-0,836**	-

direto.

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

Tabela 9. Análise dos (CPA) que apresentaram escore $\geq 0,300$ (positivo ou negativo) com os (CPA) 1, 2 e 3 para profundidade 0,20-0,40m.

Componentes da variância	Componentes Principais		
	1	2	3
Desvio Padrão	2,256	1,340	1,243
Proporção (%)	0,424	0,149	0,128
Proporção Acumulada	0,424	0,574	0,574
Atributos	0,00-0,20m		
RP – Resistência do Solo a Penetração	-	-	0,499¹
UG – Umidade Gravimétrica	-	0,133	-0,467¹
DP – Densidade da Partícula	0,195	-0,284	-0,314
ARG- Argila	0,136	-0,682¹	-
ARE – Areia	-0,281	0,185	0,396¹
SIL - Silte	-	0,578¹	-0,337¹
Ma – Macroporosidade	0,349¹	0,159	0,288
Mi – Microporosidade	0,295	-0,129	-
DS – Densidade do Solo	-0,406¹	-0,118	-
PTd – Porosidade Total Determinada	0,394¹	-	0,265
RPb – Resistência do Solo a Penetração – Bancada	-0,378¹	-	-
PTc- Porosidade Total Calculada	0,419¹	-	-

⁽¹⁾ Caracteres com maiores cargas fatoriais (escores) selecionadas dentro de cada fator. O critério para classificação foi: valor absoluto $< 0,30$, considerado pouco significativo; $0,30 - 0,40$, mediantemente significativo; e $\geq 0,50$, altamente significativo, de acordo com Coelho (2003). Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Avaliando os CPA de atributos físicos representativo para compactação na subsuperfície para atributos físicos DS, PTd, Ma, RPb, PTc, estão relacionada com escores positivos e mediantemente significativos, sendo para Ma (0,578) positivo para componente 2. Entretanto o grupo 1 estando negativo apresenta influências diretas com compactação, diferenciando do grupo 2 estando do lado positivo do gráfico exibe influências entre si com escores mais baixo favorecendo a ambiguidade entre grupos relacionado com aspectos de estruturação do solo envolvendo os poros do solo, nessa situação a composição de influências opostamente negativo e positivo atua diretas entre si tabela 10.

Para formação dos grupos acompanhando a significância mediantemente das correlações foi possível através das localizações dos pontos positivos e negativos das variáveis (atributos físicos do solo) no gráfico figura 7, ressaltando que ajuste do modelo ficou abaixo dos 70%, não sendo agrupado por altas significâncias mais por influências entre os atributos. Entretanto a variabilidade dos atributos de DS e RPb que indica a compactação se encontra negativamente, diferenciando da Ma, Mi, PTd, PTc que se encontrando do lado positivo. Dessa forma a exibindo a variabilidade espacial da área estando relacionado com as modificações histórica e edáficas que solo sofreu com mau manejo estendido em toda área do experimento degradando em profundidade acarretando o pé de arado ou pé de arado, pela própria desestruturação

dosolo, pelas mudanças do estado natural para cultivos agrícolas atribuindo transformações nos atributos físicos do solo, proporcionado a heterogeneidade Beckett e Webster (1971). Dessa forma errado argumentar o conceito de que quanto mais intenso for cultivado mais homogêneos para os atributos físicos com respectivo ao seu manejo POCA Y (2000).

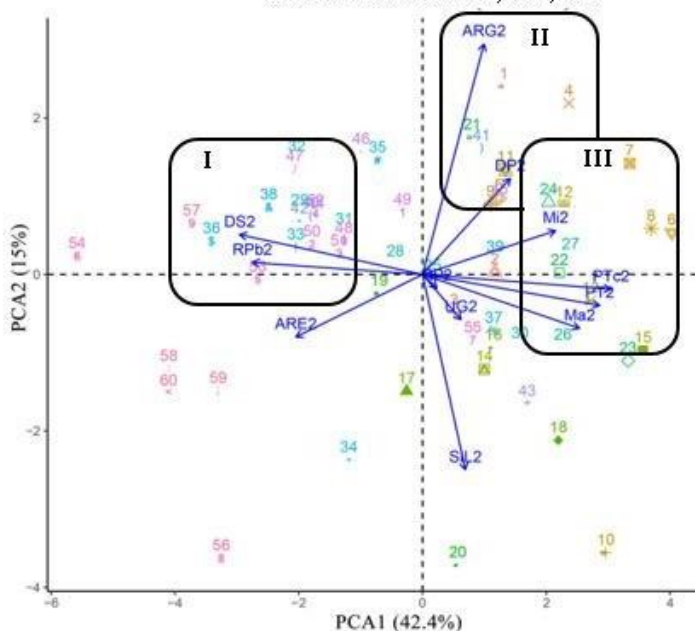
Tabela 10. Influência dos pontos nos atributos físicos do solo no gráfico de (CPA)na profundidade 0,20-0,40m.

Grupos	Variáveis	Pontos de influência no gráfico	Localização das Variáveis	
			Positivo	Negativo
1	RPb, DS	5,29,31,32,33, 36¹ , 38¹ ,42,47, 53¹ ,56,57		x
2	ARG, DS	1,4, 5¹ ,9, 11¹ ,21,41, 45¹	x	
3	PTc,PTd, Ma, Mi	6,7,8, 12¹ , 13¹ ,15,22,23, 24¹ , 26¹ ,27	x	

⁽¹⁾ Pontos com mais influências das variáveis no gráfico de CPA.

Figura 7. CPA para atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico em subsuperfície.

COMPONENTES PRINCIPAIS PARA ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE 0,20-0,40m



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

OS respectivos semivariogramas, ficaram atestado que os atributos RP, ARG, SIL, Ma, DS, PT, RPb e PTc apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial. No respectivo ao desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2), foi aseguinte: 1) UG = 0,729, Mi = 0,560, DP= 0,461, ARE= 0,381 com o atributo ARE obteve

menor coeficiente de determinação espacial tabela 11.

Para o atributo UG teve o valor do r^2 (0,729) indicando que o atributo físico com o melhor ajuste semivariográfico (figura 8a). Em relação ao (ADE-Avaliador da dependência espacial), foi muito alta a dependência verificada, com modelo exponencial modelado, no qual o ADE observado foi de 98%, e o alcance de 15 metros. Para o segundo atributo físico do solo Mi (figura 8h) com valor do r^2 (0,560), indicando o segundo melhor ajuste para o semivariograma, consequentemente com melhor ADE apresentando o valor de (78%) acompanhando uma alta dependência, com o modelo ajustado exponencial obtendo o alcance de 30 metros. Para o terceiro melhor ajuste para semivariograma foi atributo de DP (figura 8c), com valor do r^2 (0,461), com modelo ajustado exponencial, sendo o ADE considerado como alta dependência com valor verificado (98%), com alcance 12 metros.

Tabela 11. Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos físicos de um LATOSSOLO Vermelho Distrofíco sob plantio direto em sequeiro na profundidade 0,20- 0,40m.

Profundidade 0,20 - 0,40m.								
Atributos ^(a)	Parâmetros							Avaliador da dependência espacial
	Modelo	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)	
RP	epp	-	3,02.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
UG	exp	5.10 ⁻⁶	3,73.10 ⁻⁶	15	0,729	3,368.10 ⁻⁹	98	forte
DP	exp	6.10 ⁻⁵	4,55.10 ⁻³	12	0,461	1,206.10 ⁻⁶	98	forte
ARG	epp	-	8,59.10 ⁻²	-	-	-	-	-
ARE	esf	7,5.10	5,81.10 ⁻²	16	0,381	8,13.10 ²	87	forte
SIL	epp	-	7,62.10 ⁻²	-	-	-	-	-
Ma	epp	-	2,980.10 ⁻³	-	-	-	-	-
Mi	exp	1,5.10 ⁻⁴	7,14.10 ⁻⁴	30	0,560	6,66.10 ⁻⁸	78	forte
DS	epp	-	2,632.10 ⁻²	-	-	-	-	-
PT	epp	-	4,790.10 ⁻³	-	-	-	-	-
RPb	epp	-	3,22.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
PTc	epp	-	5,640.10 ⁻³	-	-	-	-	-

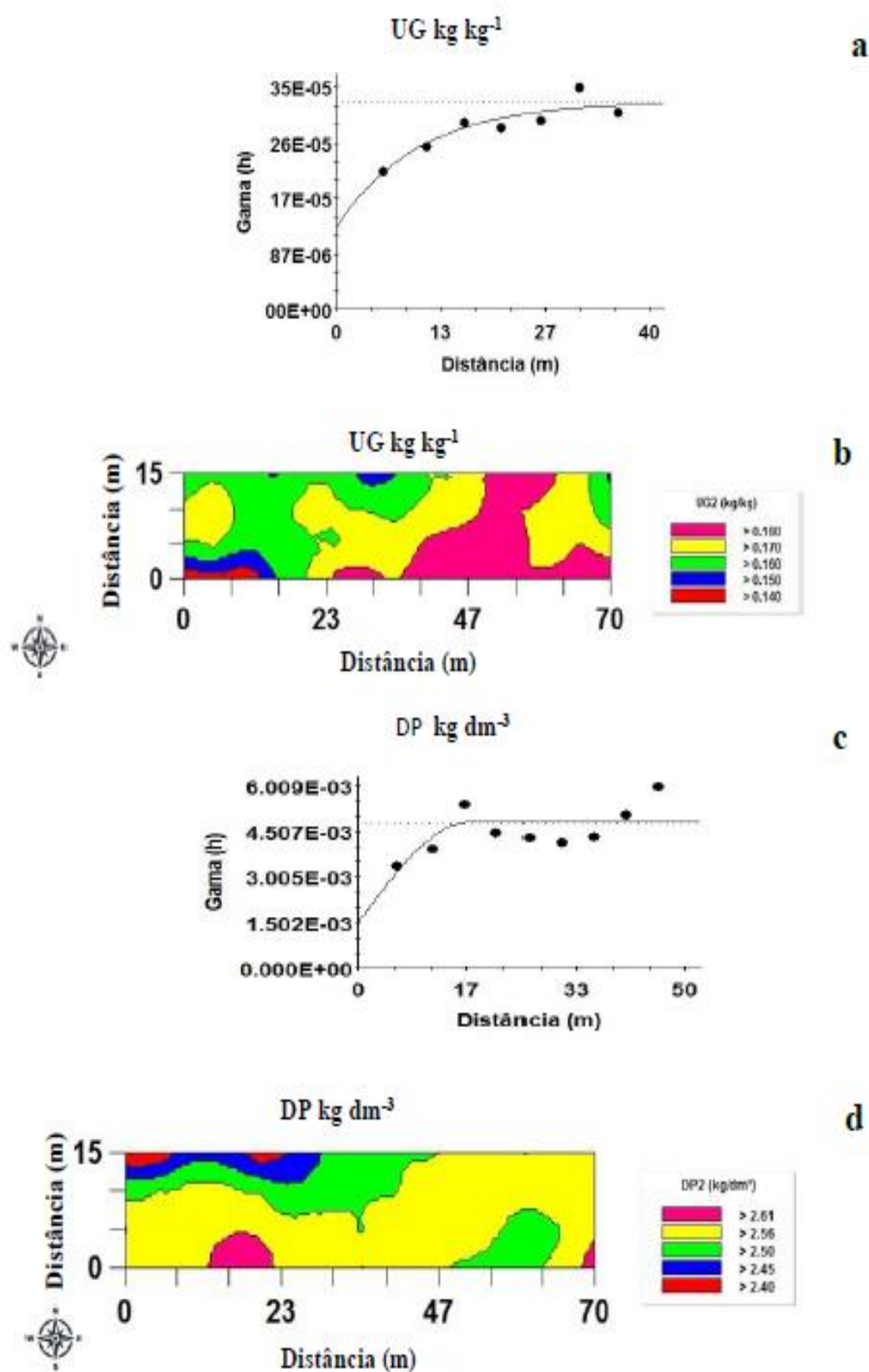
^(a)RP, UG, DP, ARG, ARE, SIL, Ma, Mi, DS, PTd, RPb, PTc, são respectivamente, resistência a penetração, umidade gravimétrica, argila, areia, silte, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, porosidade total determinada, resistência penetração análise de bancada, porosidade total calculada;

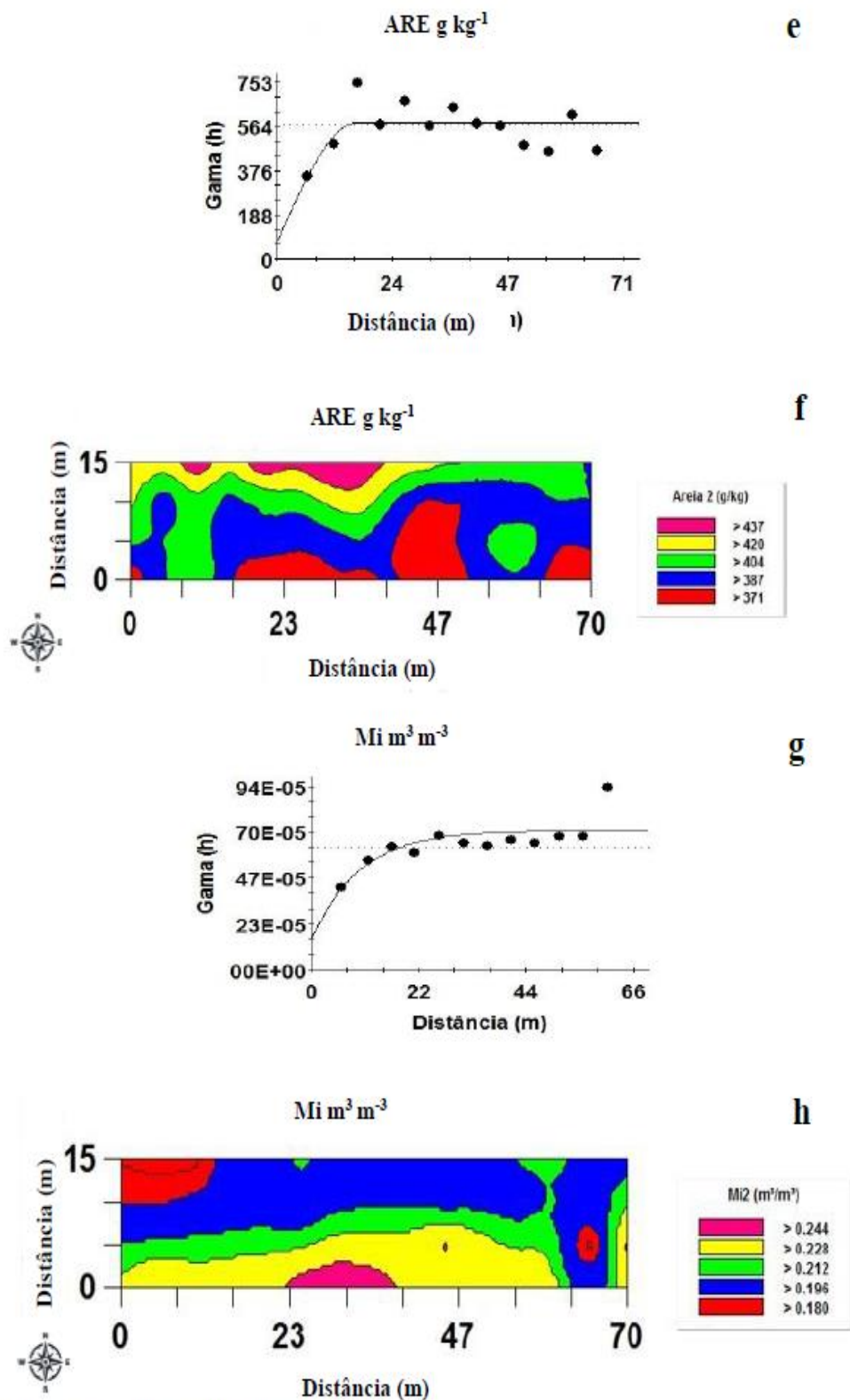
^(b) exp = exponencial, esf = esférico e epp = efeito pepita puro; modelo sucedido por número entre parêntesis, significando o número de pares no primeiro lag; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos;

^(d) ADE = avaliador da dependência espacial.

Para o quarto melhor ajuste de semivariograma do atributo físico do solo foi a ARE (figura 8e) obtendo o modelo esférico, com valor para r^2 (0,381), resultando o valor do (ADE) de 87% considerado muito alto, apresentando alcance de 16 metros, (tabela 11 e figura 8).

Figura 8. Semivariograma simples ajustados e mapas de krigagem de alguns atributos do solo ra subsuperfície de um LATOSSOLO VERMELHO distrófico sob SPD no bioma cerrado.





Fonte: Pesquisa do próprio autor.

Analisando os mapas de krigagem para UG figura 9b observamos que a leste encontramos os maiores valores variando entre 0,160 a 0,180 kg kg⁻¹, portanto os menores valores se localizaram a Sudoeste com valores que ficaram entre 0,140 a 0,150 kg kg⁻¹ diferenciando ao norte e sul se encontra valores de 0,150 a 0,170 kg kg⁻¹. Dessa forma o solo na área experimental

encontra-se fora dos padrões ideais com valores abaixo de $0,200 \text{ kg kg}^{-1}$ para UG Montanari (2010), nessa condição podemos relacionar a baixa umidade com caminho reverso em relação com RP que obteve uma média de $4,053 \text{ MPa}$ comparado com os valores baixos de UG fortalecendo uma compactação, diferenciando com altos valores de umidade provavelmente teremos valores mais baixos para RP, pelo mapa podemos observar que todos pontos analisados encontramos UG com valores baixos podendo alterar e aumentar RP. Entretanto foi observado no solo na profundidade em subsuperfície fica mais seco apresentando baixo conteúdo de água e suas partículas (coesão) se aproximam dificultando a separação por forças externas, nesse contexto vale ressaltar que conteúdo de água no solo está ligado diretamente ao valores de RP podendo sofrer modificações e alterar água existente no solo (BOTTEGA et al., 2011).

Analizando o mapa de krigagem para DP figura 9d encontramos ao noroeste menores valores variando de $2,40$ a $2,50 \text{ kg dm}^{-3}$ ao noroeste do mapa diferenciando do leste, sul, sudoeste e com pequena faixa ao sul com valores que ficaram entre $2,50$ a $2,61 \text{ kg dm}^{-3}$. Entretanto solos com constituição mineralógicas oriundas de rochas básicas pode chegar no valor $3,16 \text{ kg dm}^{-3}$, diferenciando de solos com grandes teores de matéria orgânica apresentam valores na ordem $1,90 \text{ kg dm}^{-3}$ Raij (1991), influenciando-se na porosidade estando ligado diretamente com a RP. Analizando a figura 9g para mapa de krigagem para o atributo ARE encontramos os maiores valores no norte, noroeste e nordeste apresentando valores entre 404 a 437 g kg^{-1} , com menores valores no sul e sudeste com valores entre 371 e 384 g kg^{-1} .

Dessa forma as condições para ARE está relacionado com a formação intrínseca, entretanto, mudanças e transformações provocada pelo manejo inadequado o solo provoca problemas na porosidade afetando a normalidade para entrada de água e ar, entretanto a há uma diminuição de poros maiores a M_a aumentando a M_i observado na figura 9h, que apresentou ao norte, oeste, nordeste e sudeste apresentou menores valores que ficaram entre $0,180$ a $0,212 \text{ g kg}^{-1}$ e os maiores valores para sul, sudeste e sudoeste, variando com valores $0,212$ a $0,244 \text{ g kg}^{-1}$ relacionando com valores de ARE. Dessa maneira o atributo de UG figura 9b apresentou maiores valores ao sul, sudeste e nordeste relacionando com mapas de krigagem simultaneamente com M_i notado pelas localidade nos mapas de Krigagem.

4.4 CONCLUSÕES

O SPD consolidado com mais de dez anos mostrou-se compactado na camada de subsuperfície pelo atribuido RP com valores fora do padrão ideal para crescimento das plantas e a D_s indicando que solo se encontra perto do limiti critico prejudicando o desenvolvimento

das raízes através do pé-de-grade ou pé-de-arado.

Os atributos físicos UG e DS se comportaram iguais na subsuperfície mostrando homogeneização analisada pelo baixo coeficiente de variação.

O comportamento das médias para RP, Ma e UG indica que o solo em subsuperfície apresenta uma compactação em toda a área, atribuindo o pé-de-grade provocado pelo mau manejo antes da implantação do SPD. Portanto, o atributo DS apresentou a média próxima do limite crítico, acarretando uma recuperação lenta da estrutura do solo e da porosidade.

Os atributos físicos que envolve a compactação com DS e Ma e P_{Tc} na subsuperfície apresentou uma forte correlação entre si pelo mapas de krigagem.

Os atributos físicos em subsuperfície apresentaram uma alta variabilidade espacial observados nos CPA em que atributos se influenciam entre si, relacionando diretamente com mapas de krigagem entre UG e Mi.

O SPD por mais de dez anos está conseguindo lentamente a recuperar a qualidade do solo analisado pela média do DS que apresentou fora dos padrões ideais mais mais estando próximo do limite crítico.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, G. A. Influência de diferentes tipos de plantas sobre a estrutura do solo em plantio direto. 45f, **Trabalho de conclusão de curso (TCC)**, Cerro Largo, 2016.
- AHMED, N; MASOOD, S; AHMAD, S; BASHIR, S. Soil Management for Better Crop Production and Sustainable Agriculture. **Agronomic Crops**, [s. l.], p. 47-71, 2019. Springer Singapore. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8_4.
- ALMEIDA, J, J. Aplicações da análise multivariada em solos que podem ser utilizadas em melhorias de processos produtivos agrícolas. In: SEMINÁRIO DE PRODUÇÃO NORTE E NORDESTE (SEPRONE), 7., 2012, Mossoró. **Anais [...]** Mossoró: UFERSA, 2012.
- ALVES, M. C.; CABEDA, M. S. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.753-761, 1999.
- AMADO, T. J. C; , PES Z, L; LEMAINSKI L, C; SCHENATO, B, R. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 831–843, 2009.
- AMARAL, G. **Compactação do solo em lavouras cafeeiras**: causas e efeitos no desenvolvimento das plantas. Disponível em: <https://icl-growingsolutions.com/pt-br/agriculture/knowledge-hub/soil-compaction-coffee-plantations/>. Acesso em: 27 jun. 2021.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 4, p. 857–865, 2000.
- ARAUJO, G. H. S; ALMEIDA, J. R; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.
- ARSHAD, M. A. C.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. **Physical tests for monitoring soil quality**. SSSA Special Publications. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, Viçosa, 2015. p. 123–141.
- BATISTA FILHO, M. O Brasil e a segurança alimentar. **Revista Brasileira de Saúde Materno Infantil**, [s. l.], n. 2, p. 121–122, 2007.
- BAVER, L. D; GARDNER W, H; GARDNER W, R. **Soil physics**. 4. ed. [S. l.: s. n.], 1972. v. 4.
- BECKETT, P.; WEBSTER, T.; VARIABILITY, S. Variabilidade do solo: uma revisão, **Fertilidade do Solo**, Viçosa, MG, v. 1, p. 1–15, 1971.
- BERGAMIN, E. M. et al. Alterações causadas pela pastagem e sistema agroflorestal na densidade do solo e porosidade total em Argissolo Vermelho distrófico na Amazônia. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Resumos [...]** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A.; ALMEIDA, E. X.; KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem capim-elefante-anão cv. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 1047-1054, 2000.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN, J.; W, A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 155–163, 2004.

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 581–588, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um latossolo vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1223-1232, 2007.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 146–151, 2007.

BLAINSKI, E.; CÁSSIO, T. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 975–983, 2008.

BOENI, M.; DALVAN, J. R.; REICHERT, J. M. C. **Densidade de raízes do milho e atributos do solo induzidos por pastejo e preparo do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997.

BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A. Qualidade física do solo em um latossolo vermelho da região sudoeste dos cerrados sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p. 743–753, 2013.

BOTTEGA, L. E.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. C. A.; CRISTIANO, M. S. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

BOWEN, H. D. **Modificando o ambiente radicular para reduzir o estresse das culturas**. St. Joseph: Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas, 1981.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERAÇÃO PARA AGRICULTURA - IICA. **Brasil lança o programa Solos Vivos das Américas, a iniciativa de restauração promovida pelo IICA e o reconhecido cientista Rattan Lal**. Disponível em: <https://iica.int/pt/prensa/noticias/brasil-lanca-o-programa-solos-vivos-das-americas-iniciativa-de-restauracao>. Acesso em: 21 ago. 2023.

BURROUGH, P. A.; BOUMA, J.; YATES, S. R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, n. 1–3, p. 311–326, 1994.

CAMARGO, E. C. G. fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de (org.) **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 2. ed. rev. ampl. São José dos Campos: INPE, 1998.

CAMBARDELLA, C. A; MOORMAN, T. B; NOVAK, M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, L. D; TURCO, F. R.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501–1511, 1994.

CANARACHE, A. Penetra generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage Research Journal**, Amsterdam, v. 16, p. 51–70, 1990.

CARDOSO, F. P. O. **Meio ambiente e o plantio direto**. Campinas: Editora Rural. 1997. 116 p.

CERRI, C. C. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 831–843, 2009.

CARVALHO, J. P. R.; SILVEIRA, M. P; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa. Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 695–703, 2003.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G; LLANILLO, R. F. **Brasil**: Fatores que promoveram a evolução do sistema e desenvolvimento de máquinas agrícolas. Piracicaba: [s. n.], 2013.

CASTELÕES, L. **Prosa rural**: plantio direto: controle da degradação do solo e de gases de efeito estufa. [S. l.]: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/2409436/prosa-rural---plantio-direto-controle-da-degradacao-do-solo-e-de-gases-de>. Acesso em: 13 mar. 2023.

CAVALCANTE, SILVA, E. G; ALVES M, C; PEREIRA, G, T; SOUZA, Z, M. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 394–400, 2007.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In: CURI, N.; MARQUES J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p. 259-290.

COLOMBO, A. G; LOPES, S. B. M.; CAMPESTRINI, R.; LIMA, O. S. Atributos físicos de um latossolo vermelho-amarelo distrófico sob diferentes sistemas de manejo no cerrado tocaninense. Em: Rev. **Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, Erechin, v. 12, n. 1, p.21-29, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Com novo recorde, produção de grãos na safra 2022/23 chega a 322,8 milhões de toneladas.** Brasília, DF, CONAB, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5157-com-novo-recorde-producao-de-graos-na-safra-2022-23-chega-a-322-8-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 12 jul. 2023.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 1013-1021, 2004.

CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 374-387, 2006.

CORREIA, J. Efeito de métodos de cultivo em algumas propriedades físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, p. 1317-1322, 1985.

COSTA, T. C. C.; UZEDA, M. C.; FIDALGO, E. C. C.; LUMBRERAS, J. F.; ZARONI, M. J.; NAIME, U. J.; GUIMARÃES, S. P. Vulnerabilidade ambiental em sub-bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro por meio de integração temática da perda de solo (USLE), variáveis morfometrias e o uso/cobertura da terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, [s. l.]. **Anais [...]** [S. l.: s. l.], 2007. p. 21-26.

CORTEZ, W. J.; OLSZEWSKI, N.; PIMENTA, A. W.; FILHO, P. P. A.; SOUZA, B. E.; NAGAHAMA, J. H. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um argissolo amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, n. 3, v. 38, p. 1000-1010, 2014.

CUNHA, E. Q.; BALBINO L, C; STONE, L, F.; LEANDRO, W, M.; OLIVEIRA, G, C. Influência de rotações de culturas nas propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 665-674, 2007.

DALCHIAVON, C. F.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, C. D.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 8-19, 2011.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P. E. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. **Semina**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 541-552, 2012.

DEMATTE, J. L. I. **Levantamento detalhado dos solos do campus experimental de Ilha Solteira**, Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1980. 44 p.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; BACALTCHUK, B.; SATTTLER, A.; DENARDIN, N.D'A.; FAGANELLO, A. e WIETHÖLTER, S. Sistema plantio direto: fator de potencialidade da agricultura tropical brasileira. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. (ed.) **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v. 1. p. 1251-1273.

DI, H. J. K, R. A.; TRANGMAR, B. B. Use of geostatistics in designing sampling strategies for soil survey. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 53, n. 4, p. 1163–1167, 1989.

DOTTERWEICH, M. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation a global synopsis.

Geomorphology, Amsterdam, v. 201, p. 1–34, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Plantio direto: controle da degradação do solo e de gases de efeito estufa**. Brasília, DF: Embrapa, Disponível em:

<https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/2409436/prosa-rural---plantio-direto-controle-da-degradacao-do-solo-e-de-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 23 ago. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2011. 230 p.

EMBRAPA TERRITORIAL. **Agricultura e preservação ambiental: uma análise do cadastro ambiental rural**. Campinas: [s. n.], 2020. Disponível em: www.embrapa.br/car. Acesso em: 23 jul. 2023.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DA PECUARIA DO MATO GROSSO DO SUL - FAMASUL. **MS está entre os estados com maior adoção de sistemas de integração e plantio direto no Brasil**. Campo Grande: FAMASUL, 2023. Disponível em: <https://portal.sistemafamasul.com.br/noticias/ms-est%C3%A1-entre-os-estados-com-maior-ado%C3%A7%C3%A3o-de-sistemas-de-integra%C3%A7%C3%A3o-e-plantio-direto-no>. Acesso em: 17 ago. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS OF THE UNITED NATIONS - FAO. **FAO database**. [S. l.: s. n.], Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> . Acesso em: 25 ago. 2017.

FERREIRA, A. **Jornal do engenheiro agrônomo**. Ano 48, setembro,. v. 315, p. 6-9. 2020.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; JÚNIOR, V. V.; CARVALHO, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**., Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 113-121, 2006.

FREITAS, P. L. de. Aspectos físicos e biológicos do solo. In: LANDERS, J. N. (ed.). **Fascículos sobre experiências em plantio direto nos Cerrados**. Uberlândia: APDC, 1994. Cap.9. p.187-196.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO – FEBRAPDP. **Sistema plantio direto**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://febrapdp.org.br/noticias/680/sistema-plantio-direto-os-pilares-do-equilibrio>. Acesso em: 01 jul. 2021.

GS+. **Gamma Desing Software**. Michigan: Plainwell, 2004.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Global Soil Partnership endorses guidelines on sustainable soil management**. [S. l.]: FAO. Disponível em: <http://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/416516/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

GREGO, C. R. *et al.* Geostatistical analysis for soil moisture content under the no tillage cropping system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 341–350, 2006.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 121–145, 2005.

HERNANI, L. C; MANZATTO, C. V; FREITAS J, E; PERES, J. R. R. (Org.) **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA - IBGE. **Censo agropec**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

INACIO, S. B. **Dia do Cerrado: bioma desempenha papel fundamental para a agricultura**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://blog.sensix.ag/dia-do-cerrado-bioma-desempenha-papel-fundamental-para>. Acesso em: 16 jul. 2023.

JORGE, J.; CAMARGO, A.; VALADARES, A. Condições físicas de um latossolo vermelho-escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciências do Solos**, Viçosa, MG, v. 15, p. 237–240, 1991.

KIANI-HARCHEGANI, M.; SADEGHI, S. H. R.; ASADI, H. Changeability of concentration and particle size distribution of effective sediment in initial and mature flow generation conditions under different slopes and rainfall intensities. **Iranian Journal of Watershed Engineering and Management**, [s. l.], n. 9, p. 205–216, 2017.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. Ouro Fino: Agronômica Ceres, 264 p.

LEPSCH, I. F.; ESPINDOLA, C. R.; FILHO, O. J. V.; HERNANI, L. C.; SIQUEIRA, D. S. **Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2015. 170 p.

LIMA, C, G, R; CARVALHO, M, P; NARIMATSU K, C, P; SILVA, M, G; QUEIROZ, H, A. Atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 163-173, 2010.

LIMA, J. S. DE S.; OLIVEIRA, R. B. DE; SILVA, S. DE A. Spatial variability of particle size fractions of an Oxisol cultivated with conilon coffee. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 59, n. 6, p. 867–872, 2012.

MARCHINI, T. C. et al. Organic matter, water infiltration and tomographic images of Latosol in reclamation under different managements. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 6, p. 574–580, 2015.

MARSCHNER, H. **Nutrição mineral de plantas superiores**. 2. ed. London: Academic Press, 1995.

MARTINS, I. M. S.; SILVA, T. C.; TROLEIS, M. J. B.; SOUZA, P. T.; SENA, K. N.; MONTANARI, R. Variabilidade linear dos atributos dendrométricos do Eucalipto correlacionados com atributos de um latossolo do cerrado Sul Mato-Grossense. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 43, n. 1, p. 7-24, 2022.

MATTIONI, N. M.; SCHUCH, L. O. B.; VILLELA, F. A. Variabilidade espacial e efeito de atributos químicos de um Latossolo na população de plantas e produtividade da cultura da soja. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, n. 1, p. 20–32, 2013.

MEDEIROS, J. L. F. **Manejo da vegetação de cobertura, quantificação da fitomassa e variabilidade da resistência do solo em plantio direto irrigado no semiárido potiguar**. 2019. 70 f. Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró, 2019. Disponível em: https://ppgmsa.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/59/2019/06/TESE_PPGMSA_JONATAN-LEVI-FERREIRA-DE-MEDEIROS.pdf. Acesso em: 2 ago. 2023.

MEEK, B. D.; RECHEL, E. A.; CARTER, L. M.; W. R. Soil compaction and its effects on alfalfa in zone productions systems. **Soil Science Society Journal**, Madison, v. 52, p. 233–236, 1988.

MEROT TOJÚNIOR, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de. Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 197-202, 1999.

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

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO - MCTI. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, DF: SEPED, 2013.

MOLIN, J. P. et al. Variação Espacial na Produtividade de Milho Safrinha Devido aos Macronutrientes e à População de Plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 6, n. 3, p. 309–324, 2007.

MONTANARI, R. et al. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 6, p. 1811–1822, 2010.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 76, p. 319-337, 1984.

NAKAO, A. **Sorgo consorciado com capim paiaguás sob diferentes densidades de semeadura de guandú-anão na produção de silagem em rotação com soja no cerrado sob sistema plantio direto**. 2021. 94f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2015.

FURTINI NETO, A. E; Vale, F, B; Guilherme, G, R, L; Resende, V, A; Guedes, G, A, A. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.

NETO, F, N; ROLOFF, G; DIECKOW J; MOTTA, A, C, V. Atributos de solo e cultura espacialmente distribuídos relacionados ao rendimento do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1025–1036, 2011.

NETO, J. V. N.; SANTOS, A. C.; GUANIERI, A. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema plantio direto. Em: **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 1., p. 193–204, 2014.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, Amsterdam, v. 113, p. 56–69, 2014.

POCAY, V.G. **Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de latossolos sob cultivo intensivo de cana-de-açúcar**. 2000. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal, 2000.

PRONASOLOS. **Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos no Brasil 2021**. São Paulo: Xamã, 1998

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Ceres, Piracicaba, 1991. 343 p.

RANZANI, G. **Manual de levantamento de solos**. [S. l.: s. l.], 1969. v. 156,

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista de Ciência Ambiental**, Canoas, v. 27, p. 29–48, 2003.

REICHERT, J. et al. I, Reference bulk density and critical degree of compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Till Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 1–13, 2007.

REICHERT, J. M. et al. editor. **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 298.

RESENDE, P. C. S. **Resistência mecânica e sua variação com a umidade e com a densidade do solo em Latossolo Vermelho Escuro do Cerrado**. 1995 64 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de São Paulo, Botucatú, 1995.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. DA S.; SACRAMENTO, L. V. S. DO. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n. 2, p. 259–266, 1994.

SAVAGE, S. **EUA buscam pela rotação de culturas, prática comum no agro do Brasil**. [S. l.]: Forbes, 2023. <https://forbes.com.br/forbesagro/2022/08/eua-querem-fazer-rotacao-de-culturas-pratica-ja-comum-no-agro-do-brasil/>. Acesso em: 06 jun. 2023.

SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. **SAS system for elementary statcal analysis**. 2. ed. Cary: SAS, 1997.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysys of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v. 52, p. 591-611, 1965.

SILVA, A. M.; CANUTO D. S. O.; MORAES, M. L. T.; BUZETTI, S. Avaliação das propriedades químicas em solo de cerrado sob reflorestamento ciliar. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n.1, p.49 - 58, 2012.

SILVA, S. A. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1–8, 2010.
SOUSA, F. R. C.; PAULA, D. P. Análise de perda do solo por erosão na bacia hidrográfica do Rio Coreaú (Ceará-Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 491- 507, 2019.

SPERA, S. T.; SANTOS, P. H.; TOMM, O. G. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 533–542, 2004.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Compressibility of oxisol aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 1525–1533, 2009.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soilstrength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, Viçosa, MG, v. 102, n. 1, p. 18–22, 1966.

TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; DECHEN, S. C. F. The costs of soil erosion. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 287–298, 2011.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; MENDONÇA-SANTOS, M. D. L.; GIASSEN, E. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 11, 2012.

THOMASSON, A. J. Rumo a uma classificação objetiva da estrutura do solo. **Revista de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 38–46, 1978.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 2, p. 301–309, 1998.

VALADÃO, A. C. F.; WEBER, S. L. O.; JÚNIOR, V. D. D.; SCAPINELLI, A.; DEINA, R. F.; e BIANCHINI, A. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, n. 1, v. 39, p. 243–255, 2015.

VIEIRA, F. C. B. et al. Building up organic matter in a subtropical paleudult under legume cover-crop-based rotations. **Soil Science Society of America Journal**, Viçosa, MG, v. 73, n. 5, p. 1699–1706, 2009.

VIEIRA, M. Propriedades físicas do solo. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1981.

VIEIRA, S. R.; BRANCALIANO, S. R.; GREGO, C. R.; MARTINS, A. L. M. Variabilidade espacial de atributos físicos de um argissolo vermelho-amarelo cultivado com leguminosas consorciada com a seringueira. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 2, p. 423–432, 2010.

VIEL, J. A.; ROSA, K. K. DA; HOFF, R. Estudo da erosão superficial do solo por meio de sig na região da denominação de origem vale dos vinhedos (Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Uberlândia, v. 18, n. 3, 2017.

WHELAN, B. M. Reconciling continuous soil information and crop yield. 1998. 327 f. Tese (Doutorado)- The University of Sydney, Sydney, 1998.

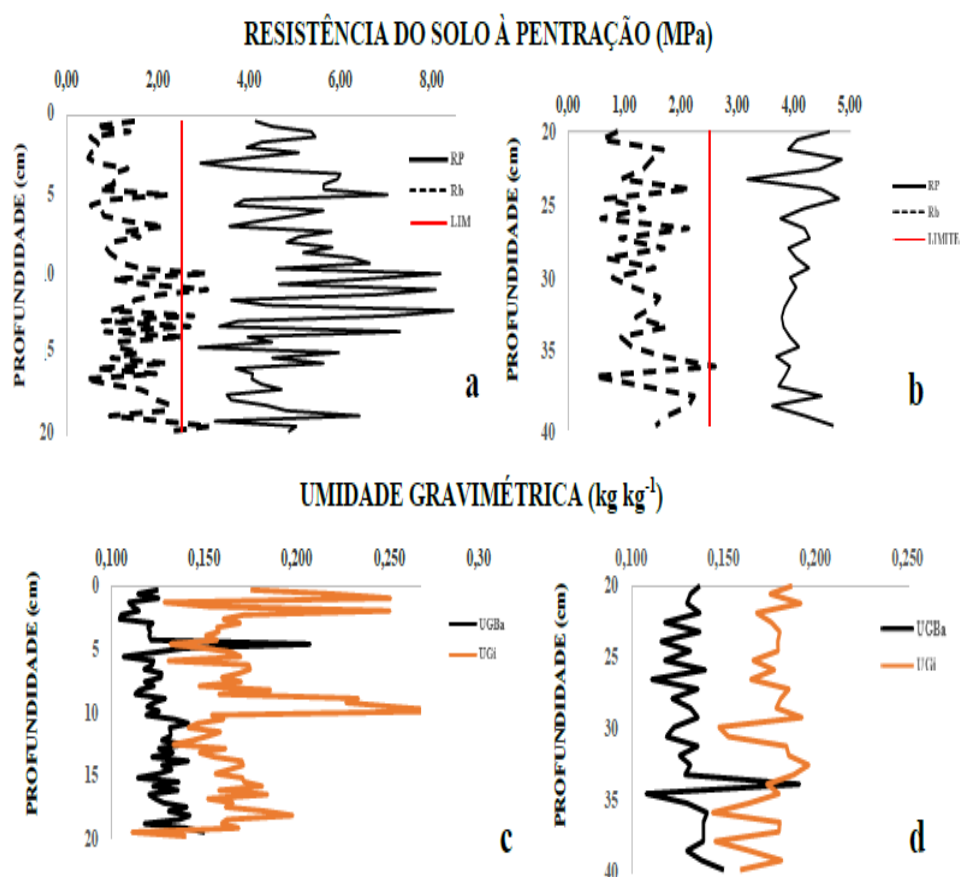
WEBSTER, R. Olivera M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. [S. l.]: Wiley, 2007. p. 366.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. [S. l.]: Landim, 2013. p. 216.

YANG, W. G.; ZHENG, F. L.; HAN, Y. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region. **Acta Pedologica Sinica**, [s. l.], v. 53, p. 572–581, 2016.

APÊNDICES A: Gráficos

Gráficos 1. Gráficos de resistência do solo à penetração com dois sistema de avaliação (RP-Impacto e RPb-Bancada).



Resistência do solo à penetração com dois sistema de avaliação (RP – impacto, RPBa - bancada) e (UGBa – Umidade gravimétrica posterior à mesa 100 cm de tensão, UGi – Umidade Gravimétrica coletada na hora das leitura no campo com de plantio direto no (LATOSSOLO VERMELHO distrófico), no município de Selvíria no bioma Cerrado Sul-matogrossense.

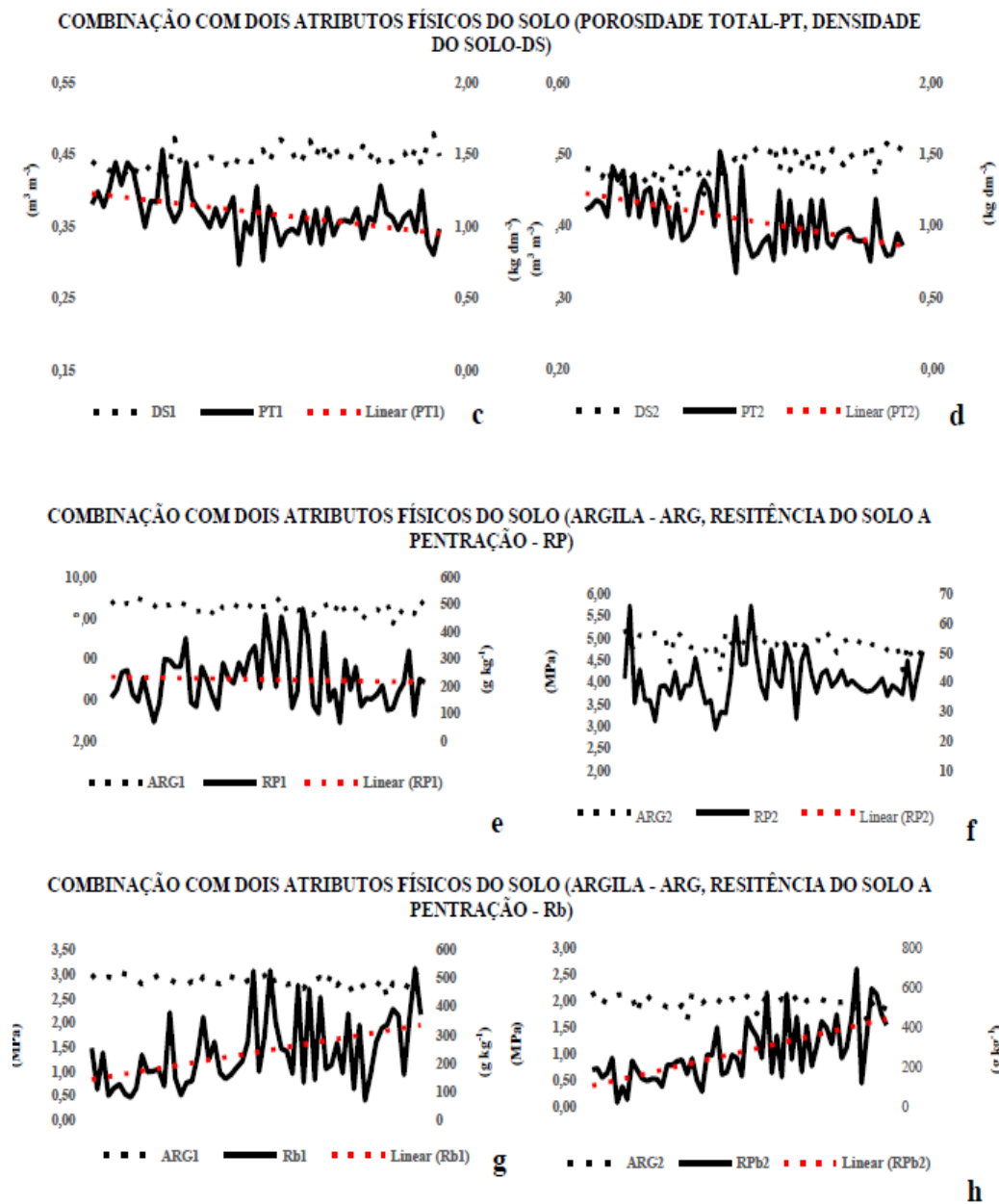
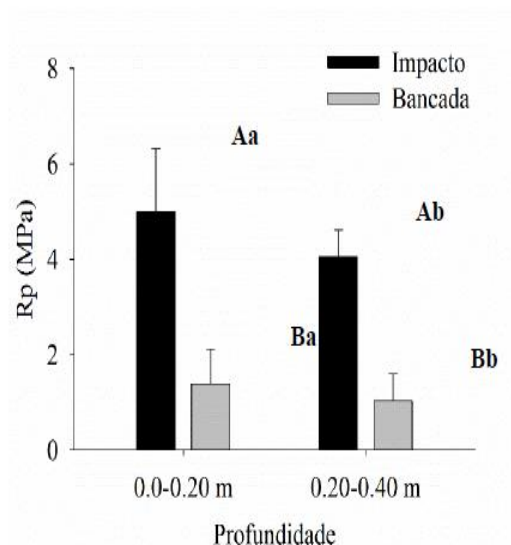


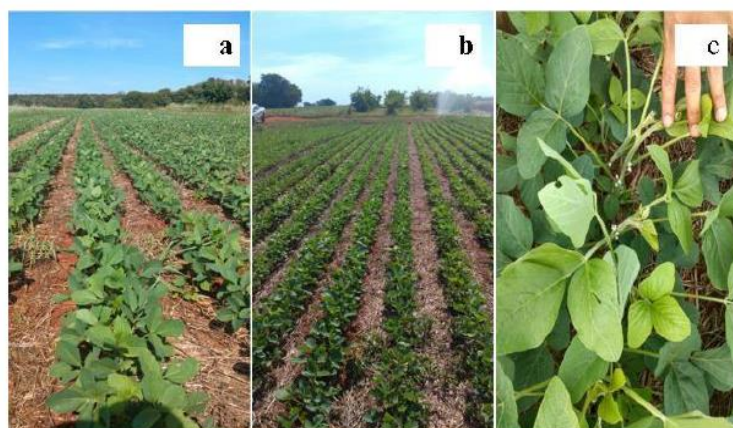
Gráfico de combinação entre atributos físicos respectivamente Ma, DS, PT, RP, ARG, Rb macroporosidade, densidade do solo, porosidade total, Resistência do solo à penetração (impacto), Resistência do solo à penetração (bancada), Argila, repectivamente: com números 1 (profundidade:0,00-0,20), 2 (profundidade: 0,20-0,40).

Gráfico 3: Gráfico para Teste de Tukey para os dois equipamentos.

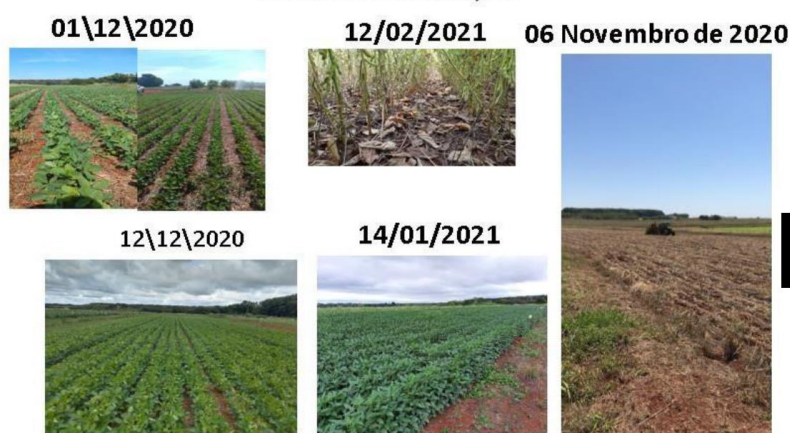


Letras Maiúsculas diferentes indicam diferença significativa (Teste de Tukey, $p \leq 0,05$) entre os equipamentos na mesma profundidade, Letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa (Teste de Tukey, $p \leq 0,05$) entre os equipamentos nas diferentes profundidades.

APÊNDICES B: FOTOS DO EXPERIMENTO



DATAS DE OBSERVAÇÃO





- ANEIS VOLUMETRICOS
- SOLO SECO AO AR LIVRE

E



F



COLHEMOS BONS TRABALHOS

EQUIPE – PIBIC