



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA – CCCh
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

ADRIANA COSTA FERREIRA

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO SOB ARÉA DE
PRODUÇÃO DE SOJA NO LESTE MARANHENSE

CHAPADINHA – MA

2024

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO SOB ARÉA DE
PRODUÇÃO DE SOJA NO LESTE MARANHENSE.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Maranhão como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Khalil de Menezes Rodrigues.

ADRIANA COSTA FERREIRA

CHAPADINHA – MA

2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Ferreira, Adriana Costa.

Variabilidade espacial de atributos do solo em área de produção de soja no leste maranhense / Adriana Costa Ferreira. - 2024.

55 p.

Orientador(a): Khalil de Menezes Rodrigues.

Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, 2024.

1. Geoestatística. 2. Resistencia do Solo À Penetração. 3.
Ph. 4. . 5. . I. Rodrigues, Khalil de Menezes. II.

Título.

ADRIANA COSTA FERREIRA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO SOB ARÉA DE
PRODUÇÃO DE SOJA NO LESTE MARANHENSE.**

TCC defendido e _____, em _____ de _____ de
_____ pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Khalil de Menezes Rodrigues (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Eduardo Silva dos Santos
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Marcus Willame Lopes Carvalho
Universidade Federal do Maranhão

Dedico

Dedico em primeiro lugar a Deus por me inspirar a acreditar que é possível, e me dar forças e coragem para realizar, a meus pais, Antonio Costa Ferreira e Maria Eunice Costa, por me apoiar, me ajudar em tudo incansavelmente, a meus irmãos, e a todos os amigos e familiares que de alguma forma me ajudaram e acreditaram em mim e na minha capacidade.

A condição para um milagre é a dificuldade.
A condição para um grande milagre é a impossibilidade.
(trecho do filme o fazendeiro e as batatas)

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço a Deus pela oportunidade de realizar meu sonho de fazer faculdade na Universidade Federal. Sei que de mim mesma não teria forças e coragem para enfrentar essa jornada cheia de obstáculos, desafios e sacrifícios. Contudo sei que Deus cuidou de cada detalhe durante todo esse processo, pois vi, senti e vivi o seu cuidado. Sei que tudo que fiz não veio de mim e sim dele, pois a minha capacidade vem dele, e sem ele nada posso fazer.

Agradeço a todos os professores que contribuíram com conhecimento, conselhos e dedicação ao longo desses seis anos de formação. Muito obrigado, vocês são profissionais maravilhosos. Ao professor Telmo Mendes, deixo minha gratidão pelos conselhos e exemplo de pessoa e profissional.

Professor Jocélio de Araújo, em todo lugar que eu for usarei seu exemplo como ser humano, sua humildade e profissionalismo são inspiradores. Fabiano Simas, lembrarei para sempre das aulas de cálculo e do medo que sentia das derivadas e integral. Levarei como exemplo de profissional competente e comprometido, externo aqui minha profunda gratidão.

Às amigas Francilene Cardoso e Valquíria Carneiro, que me ajudaram e me incentivaram a superar as dificuldades logo que cheguei na UFMA. Vocês foram fonte de inspiração e exemplo de força e perseverança. Deixo aqui meu muito obrigado.

Letícia, Alan e Girlene, que conheci no desenvolvimento deste trabalho, sem vocês teria sido muito mais difícil. Agradeço o companheirismo, a disponibilidade e solidariedade. Ao meu amigo Wilke, que me ajudou em tudo durante todo este trabalho.

Ao meu amado grupo de amigos que carinhosamente chamamos de “Quarteto Bobó “. Vocês são anjos em minha vida. Trilhar esse caminho sem vocês é inimaginável. Foram minha alegria em momentos difíceis, meu socorro na dificuldade, ao me ajudar em um trabalho difícil, dividir uma quentinha no almoço, um café na lanchonete. Fomos um para o outro, fonte de inspiração, de alegria, riamos das nossas dificuldades e nos apoiávamos um ao outro para superar cada uma delas. Estou certa de que serão profissionais competentes. Wilke Oliveira, Luiziane Sousa da Costa, Elinalva Rodrigues, eu amo vocês.

À minha família, que me ajudou e me apoiou em tudo, em especial à minha mãe que foi incansável nessa luta junto comigo. Minha irmã, Regiane Costa Ferreira

agradeço pelo apoio incondicional, por viver o meu sonho e lutar junto para realização do mesmo. Meu irmão Elton Costa Ferreira, Regina Costa Ferreira e Andréa Costa Ferreira não caberá aqui o quanto sou grata.

Faço aqui uma menção especial ao meu pai Antonio Costa Ferreira, você é meu exemplo, minha inspiração, homem justo, de caráter, determinado, trabalhador, sempre fez de tudo para que estudássemos e tem na educação uma grande esperança de transformação social. Agradeço a Deus pelo que és, pela educação que recebi, pelos valores que me fizeram ser quem sou. O senhor é o verdadeiro homem de sucesso. Muito obrigado por tudo. Eu te amo.

Professor Khalil de Menezes, não caberia em palavras e um pouco espaço minha gratidão pelo que fez por mim de forma incansável durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Desde a coleta das amostras e processamento das mesmas e dos dados. Reconheço em você um profissional incomparável e um ser humano incrível. Levarei seu exemplo de humildade, responsabilidade, compromisso e dedicação para a minha vida profissional.

RESUMO

O objetivo do estudo foi verificar a relação entre a condutividade elétrica, pH e demais atributos físicos do solo que atuam diretamente no desenvolvimento da cultivar de soja PP LENDA IPRO da Sementes Pampeana[®]. O estudo foi realizado entre os meses de março a maio de 2024 na fazenda Europa que está localizada no município de Mata Roma - MA. A área avaliada possui 40 hectares com cultivo de soja (*Glycine max*). Para avaliar a variabilidade espacial das variáveis analisadas foi utilizada uma grade com 34 pontos georreferenciados e espaçados, aproximadamente, a 130 x 130 metros. Foram avaliadas as seguintes variáveis: resistência do solo à penetração, umidade gravimétrica do solo de 0-20 cm e de 20-40 cm, condutividade elétrica e pH (1:2,5) nas profundidades de 0-20 cm e de 20-40 cm e variáveis da planta: n° de plantas, altura da planta, n° de vagens/planta, massa seca da raiz, massa seca da parte aérea, diâmetro do caule e produtividade. Foram calculados os parâmetros da estatística descritiva: média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo, coeficiente de variação de assimetria e de curtose. Foi realizada uma análise de correlação linear de Pearson aplicando o teste t a 5% de significância. Para avaliação da dependência espacial entre as amostras foram construídos semivariogramas utilizando o modelo gaussiano, e os dados foram interpolados por krigagem. Posteriormente, também foi realizada uma análise multivariada de redundância (RDA) para verificar simultaneamente a dependência entre os atributos estudados. Dos atributos de planta, o maior coeficiente de variação foi obtido na massa seca da parte aérea e dos atributos do solo o maior valor de CV foi obtido na resistência do solo à penetração de 10-20 cm. A elevação e a condutividade elétrica não apresentaram distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Na umidade gravimétrica, e na condutividade elétrica, os maiores valores de CV foram obtidos na profundidade de 0-20 cm. Houve correlação linear positiva da elevação com a número de plantas, altura de planta e massa seca da parte aérea. A umidade gravimétrica de 0-20 cm correlacionou positivamente com a altura de planta e com a massa seca da parte aérea e o pH e a condutividade elétrica de 20-40 cm com a massa seca da raiz. A condutividade elétrica de 0-20 cm correlacionou negativamente com a altura de planta e a umidade de 20-40 cm com o número de planta. De acordo com a análise multivariada, a produtividade correlacionou positivamente e com a mesma tendência que a elevação da área, ou seja, maiores valores de elevação resultaram em maiores valores de produtividade. A produtividade também foi correlacionada positivamente com a condutividade elétrica de 0-20 cm e de 20-40 cm, além do pH de 0-20 cm indicando que as áreas com maior teor de nutrientes e maior valor de pH foram as mais produtivas. As demais variáveis de resistência do solo à penetração, pH de 20-

40 cm e umidade do solo de 0-20 cm correlacionou negativamente com a produtividade, ou seja, maiores valores dessas variáveis resultaram em menor produtividade.

Palavras-chave: geoestatística; resistência do solo à penetração; pH.

ABSTRACT

The objective of the study was to verify the relationship between electrical conductivity, pH and other physical attributes of the soil that act directly on the development of the soybean cultivar PP LENDA IPRO from Sementes Pampeana®. The study was carried out between March and May 2024 at the Europa farm, which is located in the municipality of Mata Roma - MA. The evaluated area has 40 hectares with soybean (*Glycine max*) cultivation. To evaluate the spatial variability of the analyzed variables, a grid with 34 georeferenced points spaced approximately 130 x 130 meters was used. The following variables were evaluated: soil resistance to penetration, gravimetric soil moisture of 0-20 cm and 20-40 cm, electrical conductivity and pH (1:2.5) at depths of 0-20 cm and 20- 40 cm and plant variables: number of plants, plant height, number of pods/plant, dry mass of the root, dry mass of the aerial part, stem diameter and productivity. The descriptive statistics parameters were calculated. A Pearson linear correlation analysis was performed. To evaluate the spatial dependence between samples, semivariograms were constructed and the data were interpolated by kriging. A multivariate redundancy analysis (RDA) was also performed. Of the plant attributes, the highest coefficient of variation was obtained in the dry mass of the aerial part and of the soil attributes, the highest CV value was obtained in the soil resistance to penetration of 10-20 cm. Elevation and electrical conductivity did not show normal distribution. In gravimetric humidity and electrical conductivity, the highest CV values were obtained at a depth of 0-20 cm. There was a positive linear correlation between elevation and number of plants, plant height and dry mass of the shoot. Gravimetric humidity of 0-20 cm positively correlated with plant height and shoot dry mass and pH and electrical conductivity of 20-40 cm with root dry mass. Electrical conductivity of 0-20 cm correlated negatively with plant height and humidity of 20-40 cm with plant number. According to the multivariate analysis, productivity correlated positively and with the same trend as area elevation, that is, higher elevation values resulted in higher productivity values. Productivity was also positively correlated with electrical conductivity from 0-20 cm and 20-40 cm, in addition to pH from 0-20 cm, indicating that the areas with the highest nutrient content and highest pH value were the most productive. The other variables of soil resistance to penetration, pH of 20-40 cm and soil moisture of 0-20 cm correlated negatively with productivity, that is, higher values of these variables resulted in lower productivity.

Keywords: geostatistics; soil resistance to penetration; pH.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista aérea da área de estudo e dos 34 pontos de amostragem. Mata Roma, MA.	13
Figura 2 - Penetrômetro de impacto IAA/Planalsucar – Stolf. FONTE: Kamaq.....	14
Figura 3 – Mapas de variabilidade espacial: a) altitude; b) resistência do solo à penetração de 0-10 cm; c) resistência do solo à penetração de 20-30 cm; d) resistência do solo à penetração de 30-40 cm.	26
Figura 4 - Mapas de variabilidade espacial: a) resistência do solo à penetração de 40-50 cm; b) resistência do solo à penetração de 50-60 cm; c) média da resistência do solo à penetração de 30-40 cm; d) número de batidas do penetrômetro de impacto.	27
Figura 5 - Mapas de variabilidade espacial: a) umidade gravimétrica do solo de 0-20 cm; b) umidade gravimétrica do solo de 20-40 cm; c) condutividade elétrica de 0-20cm; d) condutividade elétrica de 20-40 cm.....	28
Figura 6 - Mapas de variabilidade espacial: a) pH de 20-40 cm; b) número de plantas; c) altura de planta; d) número de vagens/planta.	29
Figura 7 - Mapas de variabilidade espacial: a) massa seca da raiz; b) massa seca da parte aérea; c) diâmetro do caule; d) produtividade.....	30
Figura 8 - Análise multivariada de redundância com ordenação canônica dos atributos físicos do solo e das variáveis de planta para a cultura da soja. Mata Roma - MA.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos físicos do solo e das variáveis da soja. Mata Roma – MA.....	19
Tabela 2 - Matriz de correlação de Pearson das variáveis estudadas. Mata Roma – MA.	22

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1.	OBJETIVO GERAL	3
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1.	CULTURA DA SOJA: USO E IMPORTÂNCIA NO MERCADO NACIONAL	4
3.2.	VARIABILIDADE ESPACIAL E GEOESTATÍSTICA	5
3.3.	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO	7
3.4.	UMIDADE DO SOLO	8
3.5.	RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO	9
4.	MATERIAL E MÉTODOS	12
4.1.	ÁREA DE ESTUDO	12
4.2.	VARIÁVEIS ANALISADAS	14
4.2.1.	RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO	14
4.2.2.	UMIDADE GRAVIMÉTRICA DO SOLO	15
4.2.3.	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E PH	15
4.2.4.	VARIÁVEIS DA PLANTA	16
4.3.	ANÁLISE DE DADOS	16
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5.1.	ESTATÍSTICA DESCRITIVA	18
5.2.	CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON	20
5.3.	MAPAS DE VARIABILIDADE ESPACIAL	23
5.4.	ANÁLISE MULTIVARIADA DE ATRIBUTOS DO SOLO E PLANTA	31
1.	CONCLUSÕES	33
2.	REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

Inovações e transformações tecnológicas significativas têm sido aplicadas à agricultura em uma busca constante de conciliar o manejo conservacionista e a redução do custo de produção através de uma gestão eficiente dos recursos maximizando os resultados, pois os elevados níveis de produtividade estão intrinsecamente associados ao uso intenso de insumos, sendo necessário a adoção de sistemas que racionalizem seu uso, diminuindo os custos e o impacto ambiental, incrementando a produção (Modolo *et al.*, 2008; Molin; Rabelo, 2011; Mantovani *et al.*, 2020).

Assim, o conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em determinada área é importante para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental, pois pode indicar locais que necessitam de tratamento diferenciado quanto ao manejo, possibilitando que futuras intervenções possam ser realizadas para potencializar a produtividade e a obtenção de áreas mais homogêneas, possibilitando maior detalhamento da área, afim de otimizar a aplicação de corretivos, fertilizantes e água (Cancian *et al.*, 2015; Guimarães *et al.*, 2016). O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos de solo e da cultura configura-se como ferramenta na análise da variabilidade de rendimento, considerando informações pontuais de solo e da cultura, permitindo a racionalização de fertilizantes e corretivos aumentando o rendimento das culturas, a qualidade da água e o lucro líquido da propriedade, trazendo ganhos econômicos e ambientais (Schons, 2014).

A condutividade elétrica (CE) também é utilizada como indicador das características do solo como a salinidade, conteúdo de água, teor de argila, capacidade de troca catiônica (CTC), temperatura e teor de matéria orgânica (Molin; Rabelo, 2011; Westphalem, 2022). A condutividade elétrica tem se destacado como um método bem sucedido de avaliação da condição geral de fertilidade do solo por estar associada às suas propriedades físico-químicas sendo um parâmetro decisivo para a estratificação do campo em zonas homogêneas para um manejo diferenciado, devido a quantidade de variáveis que influenciam simultaneamente a CE como; porosidade, formato, tamanho e distribuição dos poros, e quantidade de água (Schons, 2014).

A compactação do solo pode ser definida como a diminuição do seu volume ocasionada pela compressão e redução do espaço poroso do mesmo, onde há reorganização densa das partículas constituintes causada pela ação do homem ao manejar o solo, uso de máquinas e implementos agrícolas de maneira inadequada. causam severas restrições a fatores

que afetam crescimento radicular das plantas, como aeração, retenção de água, resistência a penetração compactação é uma das causas mais relevantes e principais que contribui efetivamente para a deterioração do solo, além de aumentar a susceptibilidade a erosão (De Sá; Santos Junior, *et al.*, 2005).

A resistência do solo à penetração é um dos atributos físicos do solo mais adotados como indicativo de compactação por apresentar relações diretas com a produtividade das culturas uma vez que a habilidade exploratória das mesmas depende da distribuição das raízes no perfil, que por sua vez, tem suas características físicas alteradas devido ao manejo aplicado (Freddi *et al.*, 2006).

Tendo em vista a função essencial do solo em oferecer as condições essenciais para o desenvolvimento das plantas, é imprescindível a avaliação do nível de compactação do solo, aumentando a resistência à penetração e impedindo o sistema radicular das plantas de se deslocar no perfil (Filho, 2017).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a variabilidade espacial de atributos do solo em cultivo de soja irrigado com pivô central em ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico na região de Mata Roma na região Leste Maranhense.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar a relação entre a condutividade elétrica, pH e demais atributos físicos do solo que atuam diretamente no desenvolvimento da cultivar de soja PP LENDA IPRO da Sementes Pampeana®.

Avaliar altura de plantas, diâmetro do caule, massa seca e fresca da parte aérea e das raízes, número de vagens, e produtividade da soja.

Analisar a relação multivariada entre a condutividade elétrica e os atributos do solo que influenciaram diretamente na produtividade da soja.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CULTURA DA SOJA: USO E IMPORTÂNCIA NO MERCADO NACIONAL

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) destaca-se como a principal cultura do agronegócio brasileiro e uma das mais importantes na economia mundial, pelo uso abrangente de seus grãos, seja na agroindústria, indústria química e de alimentos, e mais recentemente como fonte alternativa de biocombustível. Nesse contexto, é de sobremaneira importante considerar fatores que podem ser limitantes de produtividade, não só pela sua importância social, mas pela sua capacidade de geração de renda para os mais diversos setores envolvidos no processo produtivo (Freitas, 2011; Carvalho; Ferreira e Bueno, 2012).

A produção de soja em 1941 no Brasil foi de apenas 457 toneladas. No entanto, a partir da década de 70, a sojicultura passou a ter grande relevância para o agronegócio brasileiro observada pelo aumento das áreas de plantio e pelo incremento da produtividade passando de 86 milhões de toneladas cultivadas em trinta milhões de hectares na safra 2013/2014, o que representa apenas 8,9% da área utilizada por plantações agrícolas no país, sendo deste total, 42 milhões de toneladas para exportação, para impressionantes 269,3 milhões de toneladas na safra 2021/2022, firmando essa oleaginosa como um dos produtos mais destacados da agricultura e na balança comercial brasileira (Espindola e Cunha, 2015; Dall’Agnol, 2016; Colussi *et al.*, 2016; Conabe, 2022).

Esses números representam cerca de 5,4% ou 13,8 milhões de toneladas superior à obtida na safra 2020/21 (Nunes; Silva, 2023). Ainda, de acordo com os mesmos autores, no Brasil, a região Centro-Oeste é a principal região produtora deste grão e teve na safra de 2020/2021 incremento de 3,5% na área plantada, totalizando 17,2 milhões de hectares, com uma produção de 61,39 milhões de toneladas, representando aumento de 1,1% em relação ao ano anterior.

Tal crescimento está intrinsecamente associado aos avanços científicos e a disponibilização de tecnologias ao setor produtivo como; a mecanização, criação de cultivares altamente produtivas adaptadas aos fatores ambientais de diversas regiões, manejo de solos, manejo de adubação e calagem, manejo de pragas e doenças, além da identificação e solução para os principais fatores relacionados à heterogeneidade dos solos, e suas variações dentro de uma mesma área como o tipo de solo, produtividade, declividade, nutrientes (Johan, 2004; Freitas 2011).

A produção de grãos tem aumentado linearmente nos últimos anos. O Brasil está entre os maiores produtores de soja do mundo. Mato Grosso, Rio Grande do Sul, Paraná e Goiás são os maiores estados produtores nacionais de soja, sendo o manejo um dos principais responsáveis pelos incrementos de produtividade. O crescimento de plantas e a produtividade estão relacionados com o adequado aporte de nutrientes e metabolismo vegetal. A deficiência nutricional pode causar problemas como menor crescimento radicular, menor crescimento da parte aérea e comprometimento de todo o metabolismo da planta que irão refletir diretamente na produtividade (Pollnow *et al.*, 2020).

A crescente demanda mundial por alimentos mantém a soja como umas das principais fontes de proteína vegetal. Componente essencial na fabricação de rações animais e de importância cada vez maior na alimentação humana, a oleaginosa é a cultura agrícola que mais cresceu no Brasil nas últimas três décadas, chegando a 49% da área plantada com grãos no país (Colussi *et al.*, 2016). Seu crescimento está intrinsecamente associado aos avanços científicos e a disponibilização de tecnologias ao setor produtivo, como o desenvolvimento de pacotes tecnológicos relacionados ao manejo de solos por exemplo (Freitas, 2011).

A criação de cultivares altamente produtivas adaptadas às diversas regiões, condições edafoclimáticas ideais para o cultivo da soja, estabeleceram uma nova fronteira agrícola chamada de MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). No entanto, o crescimento contínuo da área cultivada na região enfrenta desafios como avanço em logística para o transporte do grão, além de impasses na questão ambiental (Freitas, 2011).

De acordo com Alcântara *et al* (2015), o conhecimento quantitativo dos fatores e interações que afetam a produtividade é essencial para o manejo localizado do solo, com menor uso de insumos, maior rentabilidade econômica e menor dano ambiental.

3.2. VARIABILIDADE ESPACIAL E GEOESTATÍSTICA

A variabilidade espacial de atributos do solo interfere nas práticas agrícolas acarretando variações em seus atributos que influenciam principalmente no acúmulo de material orgânico, no movimento de água no solo, na compactação do solo e na erosão hídrica, e deve ser considerada, uma vez que existe uma relação intrínseca entre atributos de solo e planta. No entanto, áreas pedologicamente idênticas podem apresentar variabilidade distinta em atributos, quando submetidas a práticas distintas de manejo. (Cavalcante *et al.*, 2011; Montanari *et al.*, 2015).

As características de um solo podem variar de acordo com os processos secundários de formação, como: adição, perda, translocação e transformação do material de origem e os fatores de formação como clima, relevo, material de origem, e organismos, e tempo e pelo tipo de uso e manejo, que acarretam diferenças de ordem química do solo produzindo um padrão de distribuição com arranjo espacial (Menezes, 2010).

A predição e o mapeamento da variabilidade espacial de atributos agrícolas possibilitam racionalizar o manejo aumentando sua eficiência e a sustentabilidade da agricultura, além de otimizar o uso de insumos agrícolas reduzindo os riscos econômicos e ambientais, obtendo maior rentabilidade e qualidade final dos produtos, definindo uma abordagem estratégica, com zonas de manejo específicas mantendo a mínima heterogeneidade e reduzindo potenciais fatores limitantes de produtividade. (Pereira *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2018; Cintra *et al.*, 2020).

De acordo com Machado *et al.* (2004) e Molin *et al.* (2005), o conhecimento da variabilidade espacial da produtividade e dos fatores a elas relacionados, facilita a condução do manejo das lavouras, sendo assim, o sucesso da agricultura de precisão está em utilizá-la para identificar, gerenciar e avaliar esta variabilidade no espaço e no tempo da produção agropecuária.

A Geoestatística é uma ferramenta aplicada ao estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo com mapas de alta precisão com menor erro aleatório que engloba um conjunto de métodos estatísticos para análise e mapeamento de dados em estudos físicos, químicos e biológicos do solo distribuídos no espaço e/ou no tempo (Menezes, 2010).

Inovações tecnológicas em conjunto com a utilização de boas práticas de cultivo estão cada vez mais presentes nos sistemas de produções agrícolas, contribuindo para a maximização dos resultados e proporcionando, por meio da agricultura de precisão (AP), um contínuo melhoramento dos sistemas produtivos visando a maximização dos resultados em uma conjuntura de crescimento de custos. A eficiência de uma gestão de alto nível não depende só da capacidade técnica da gestão, como também é necessário ter o controle do uso eficiente dos recursos, maximizando os resultados para a obtenção do lucro. (Mantovani *et al.*, 2020; Cardoso *et al.*, 2021).

Nesse contexto há uma pressão adicional quanto à assertividade na tomada de decisão nos sistemas de produção agropecuários. A Geoestatística enfoca o estudo estatístico de variáveis regionalizadas tendo como objetivo a caracterização espacial de uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espacial com reduzido número

de amostras e de custos mantendo a precisão das estimativas realizadas. (Mantovani *et al.*, 2020; Francisco *et al.*, 2023).

A geoestatística considera a localização geográfica e a respectiva distância entre as amostras coletadas, permitindo a verificação da dependência espacial entre elas, que, de acordo com a teoria fundamental da geoestatística, haverá similaridade na média das amostras próximas no tempo e no espaço (Cardoso *et al.*, 2021; Francisco *et al.*, 2023).

3.3. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

Ganhos de produtividade das culturas, otimização do uso de insumos e força de trabalho, passam, obrigatoriamente, por um adequado manejo do solo, buscando garantir sua qualidade química, física e biológica. Com o uso de tecnologias para este fim através da agricultura de precisão, é possível definir zonas de manejo estratégicas e específicas que representam uma combinação homogênea de potenciais fatores limitantes da produtividade a partir do mapeamento da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo (Pereira *et al.*, 2018; Bottega *et al.*, 2022).

Westphalen (2022) enfatiza que a condutividade elétrica (CE) do solo é resultante de diversos componentes do meio e pode ser um forte indicador das propriedades do solo como: granulometria, umidade, ou ainda da ocorrência de salinidade. A condutividade elétrica é um fator de interesse por se relacionar com propriedades condicionantes do desenvolvimento das plantas, pois varia em função da textura, estrutura, teor de água, matéria orgânica e solutos do solo (Godoy *et al.*, 2019; Westphalen, 2022).

O conhecimento dos níveis de condutividade elétrica do solo permite correlação com outros fatores do solo, aos quais se referem à interação de processos que contem corpos dinâmicos contendo matéria viva capazes de sustentar a produtividade agrícola, onde sua variação espacial e temporal pode ser atribuída às variações nos teores de água, de argila, de sais dissolvidos (Lepsch, 2007; Grego *et al.*, 2020; Francisco *et al.*, 2023). Conhecer a variabilidade dos atributos do solo no espaço e no tempo é o princípio básico para um manejo preciso orientando a tomada de decisões e correção de fatores que afetam a produção, facilitando a gestão dos recursos naturais, especialmente no contexto pedológico, de uso do solo, e preservação ambiental (Mantovani *et al.*, 2020; Cardoso *et al.*, 2021; Francisco *et al.*, 2023).

A magnitude da relação da CE com atributos do solo e com a produtividade das culturas depende do teor de argila do solo, e da topografia, que por sua vez, pode causar perda de nutrientes por lixiviação e erosão, sendo uma das causas de variação espacial da produtividade em áreas agrícolas (Bottega, 2011; Alcântara, 2015; Carmo e Silva, 2016).

Vários aspectos estão relacionados à capacidade produtiva da cultura da soja como: qualidade das sementes, textura do solo, teor de argila, topografia e fertilidade. Embora áreas distintas em atributos sejam tratadas como homogêneas, o solo apresenta heterogeneidade dentro de uma mesma área de produção, sendo necessário dividir essa mesma área em zonas homogêneas, onde as mesmas zonas dentro de uma gleba podem ser diferentes para diferentes insumos, e sua delimitação envolve apenas os fatores que influem diretamente a eficiência de um insumo específico. Portanto, é importante dividir as áreas em zonas de manejo, pois as propriedades físicas do solo, por exemplo, afetam diretamente na capacidade de retenção de água, retenção de cátions, produtividade, capacidade produtiva e na dinâmica de nutrientes (Machado *et al.*, 2004; Oliveira, 2022).

3.4. UMIDADE DO SOLO

Euriques *et al.* (2021) definem a umidade do solo como a quantidade de água presente na zona insaturada do solo, região que contém a zona de raízes das plantas e que de forma mais abrangente está ligada aos ciclos de água e biogeoquímicos. Ainda de acordo com os mesmos autores, a umidade do solo é um parâmetro que deve ser considerado uma vez que a água é um agente relevante de deslocamento de massa e pela explícita importância da mesma para o desenvolvimento saudável das plantas.

A determinação da umidade do solo é essencial para estudos de movimento e disponibilidade de água no solo, sendo fundamental em várias situações na agricultura e é imperativa para definir o momento de operações mecanizadas, visto que exerce influência na geração do escoamento superficial, na evaporação do solo e na transpiração das plantas (Gomes *et al.*, 2017).

O monitoramento da umidade do solo permite otimizar o uso de recursos hídricos, deste modo, seu manejo contribui para o aumento da produção concomitantemente com a preservação do meio ambiente. O solo é formado por partículas agregadas complexas tendo o armazenamento de água como uma das suas propriedades mais importantes, mesmo em condições edafoclimáticas diversas, o que ratifica a importância da umidade para as culturas

em que a disposição de água para as mesmas tem relação direta com a textura, estrutura e o grau de compactação do solo (Silva e Neves, 2020; Euriques *et al.*, 2021). De acordo com Menezes (2010) a topografia é um fator importante no controle da variabilidade espacial da umidade do solo pela ação gravitacional e influência direta no processo de decomposição.

Monitorar a dinâmica de umidade do solo é de suma importância para o planejamento agrícola e uso do solo, sendo influenciada por atividades agrícolas em diferentes escalas. Entender como esse atributo funciona é crucial para a adoção de manejo adequado e práticas conservacionistas assertivas visando a mitigação de danos ambientais e manutenção da qualidade do solo, cultivando-o sem depauperá-lo significativamente (Lepsch, 2010; Alves *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2015).

A umidade do solo pode ser utilizada com indicador do tipo e qualidade do solo. A umidade nas camadas do solo, apresentam uma variabilidade importante nos domínios espacial e temporal, que pode levar a manejos inadequados da água e do solo, e deve ser considerada nas atividades iniciais de preparo do solo, pois exerce influência sobre importantes processos no solo e na planta tais como: movimento de água, compactação do solo, aeração do solo e desenvolvimento radicular (Mion *et al.*, 2012; Dalchavion *et al.*, 2014).

As principais alterações evidenciadas pela degradação dos atributos físicos do solo são a diminuição da taxa de infiltração de água no solo e o aumento da resistência à penetração de raízes ocasionando decréscimo de produção (Dalchavion *et al.*, 2014). O solo é um sistema trifásico disperso que está estreitamente ligado aos processos bioquímicos das plantas, sobretudo aqueles relacionados com a produtividade (Mion *et al.*, 2012).

3.5. RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

A resistência do solo à penetração é fundamental para a avaliação dos efeitos dos sistemas de preparo no ambiente físico do solo para o crescimento radicular das plantas. A exploração agrícola provoca um dos danos mais sério ao solo, a compactação, que, por ser uma alteração estrutural, altera fatores como aeração, retenção de água, resistência à penetração de raízes, que por sua vez, afetam o crescimento radicular, altera o equilíbrio na proporção de gases do solo e a disponibilidade de água e nutrientes às plantas afetando o seu funcionamento bioquímico, restringindo a taxa fotossintética e o crescimento da parte aérea, além de aumentar a susceptibilidade do solo à erosão, devido ao escoamento superficial (Dalchavion *et al.*, 2011; Marasca, 2011; Neto *et al.*, 2015). Para Valente *et al.* (2019), a resistência do solo à penetração

é a propriedade adequada para determinar o grau de compactação do solo. O seu conhecimento é de fundamental importância para a tomada de decisão na realização de práticas agrícolas, para elaboração de estratégias de conservação do solo, e avaliação dos efeitos dos sistemas de preparo no ambiente físico do mesmo.

Os solos são compostos por espaços vazios denominados macro e microporos e são responsáveis pela dinâmica dos fluidos, ou seja, pela rápida infiltração de água e difusão de ar. No entanto, tais características são alteradas pelo tráfego de veículos pesados na lavoura, que sob pressão diminuem o volume com conseqüente aumento da resistência à penetração e da densidade do solo, restringindo seu volume e acarretando a redução da aeração do solo comprometendo o fornecimento de oxigênio para as raízes, reduzindo o volume das mesmas e limitando o desenvolvimento da planta (Ralisch *et al.*, 2008; Buehrmann *et al.*, 2016; Stolf *et al.* 2018).

A compactação é uma conseqüência direta do manejo inadequado que altera as propriedades físicas do solo na qual a umidade é o fator que controla a quantidade de deformação que poderá ocorrer. Geralmente, ocorre por processo mecânico, pelo manejo incorreto de máquinas e equipamentos agrícolas, tipos de equipamentos utilizados, manejo dos resíduos vegetais, e condições do solo no momento do preparo que podem levar à formação de camada subsuperficial compactada devido à aglutinação de partículas primárias do solo, tornando-se uma das principais causas da degradação da estrutura do solo e do decréscimo da produtividade das culturas (Ralisch *et al.*, 2008; Buehrmann *et al.*, 2016; Bottega *et al.*, 2022).

O impedimento mecânico do solo provoca redução do comprimento e maior espessura das raízes. A redução no comprimento radicular diminui o volume de solo explorado pelas raízes refletindo em menor produtividade de matéria seca da parte aérea e de grãos devido ao inadequado suprimento de água e nutrientes a parte aérea pelo impedimento ou restrição mecânica do solo (Beutler; Centurion, 2004; Carvalho *et al.*, 2006).

A qualidade física do solo e o desenvolvimento de plantas estão relacionados à compactação do solo. Alterações em sua estrutura devido à compactação influenciam o fluxo de gases, de água e de calor, a resistência do solo à penetração (RP), o crescimento radicular e de plântulas e a produtividade (Lima *et al.*, 2010).

A perda da qualidade física do solo implica em condições desfavoráveis à estruturação do solo como formação de agregados pouco estáveis, elevada densidade do solo e maior resistência à penetração das raízes. Monitorar estes atributos no solo é crucial para identificar nas áreas cultivadas, as zonas com restrições físicas, químicas e biológicas, o que permite ainda

planejar atividades de recuperação e aplicação de insumos agrícolas de acordo com a necessidade do solo, no local e quantidade adequados (Silva *et al.*, 2017).

Drescher *et al.* (2011) ressaltam que os processos de compactação do solo também interferem diretamente no desempenho de máquinas e implementos agrícolas, promovendo, dentre outros, incremento na demanda de potência para tração. Medidas mitigatórias de compactação como escarificação e aração são práticas onerosas e não implicam aumento de rendimento das culturas, ocasionando, por vezes, até mesmo redução, pois o aumento do volume do solo e redução da densidade é de curta duração devido ao processo natural de consolidação do solo, resultante da ação da chuva e dos ciclos de umedecimento e secagem mesmo na ausência de tráfego, limitando a adsorção e absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea (Drescher *et al.*, 2011; Mandarino *et al.*, 2015).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na fazenda Europa que está localizada no município de Mata Roma no Estado do Maranhão. A área foi escolhida por ser uma área irrigada com pivô central e apresentar diferença na altura de plantas e na produtividade na cultura da soja. O estudo foi desenvolvido entre março e maio de 2024. De acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (SANTOS *et al.*, 2018), o solo da área em estudo foi classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso típico, e possui relevo suave ondulado

O município de Mata Roma está localizado na Região Leste do estado do Maranhão, inserido na microrregião da Chapadinha. O clima da região, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo tropical quente e úmido (Aw), com temperatura média anual superior a 27 °C e precipitação pluvial média anual de 1835 mm, com períodos de chuva entre os meses de janeiro e junho e de seca de julho a dezembro com umidade relativa do ar anual entre 73 e 79 %. A vegetação primária predominante na região de estudo é do tipo Cerrado, com uma composição florística diversificada passando por formas como o campo cerrado, cerrado ralo, cerrado típico e cerrado denso (Passos *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2023).

A área avaliada possui 40 hectares com cultivo de soja (*Glycine max*), variedade PP LENDA IPRO da Sementes Pampeana[®]. Foram utilizadas 280.000 sementes/ha em espaçamento de 0,50 m entre linhas. Antes da cultura da soja estava instalada na área um mix de milheto (*Pennisetum glaucum*) e braquiária ruzizensis (*Urochloa ruzizensis*) de setembro a dezembro. Na cultura da soja foi utilizada uma adubação de plantio com 300kg/ha de NPK 05-26-30 e uma adubação de cobertura com 60 kg de sulfato de amônio e 90 kg de cloreto de potássio.

Para avaliar a variabilidade espacial das variáveis analisadas foi utilizada uma grade com 34 pontos espaçados, aproximadamente, a 130 metros na linha e 130 metros nas entrelinhas (Figura). Para a marcação e posterior localização dos pontos de amostragem foi utilizado GPS Garmin[®] Montana 680 e configurado o sistema de coordenadas cartesianas bidimensional em UTM e o modelo matemático do *datum* utilizado foi o WGS84.

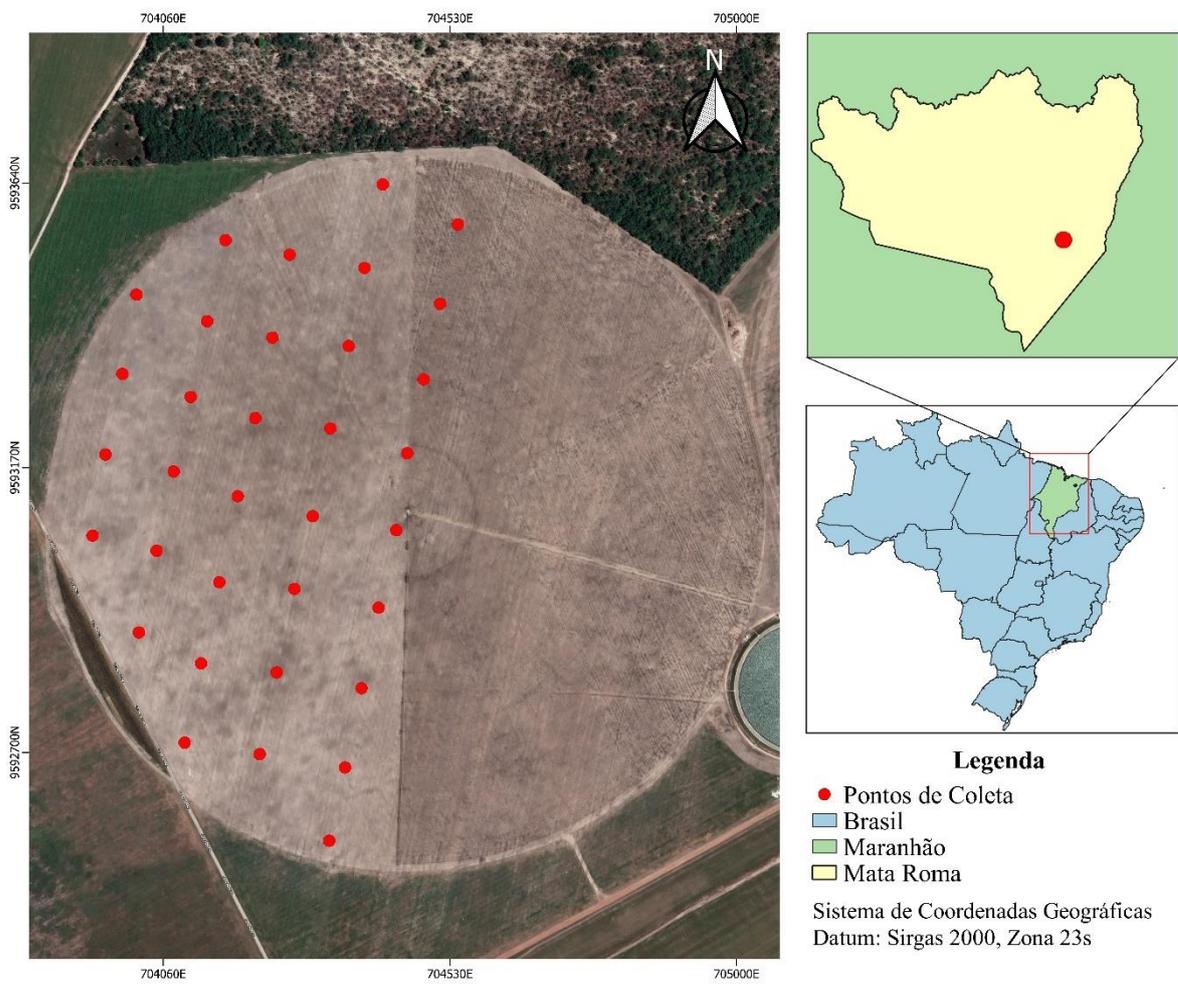


Figura 1 – Vista da área em estudo e dos pontos da amostragem – Mata Roma – MA

4.2. VARIÁVEIS ANALISADAS

4.2.1. RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

Para avaliar a resistência do solo à penetração, foi utilizado o penetrômetro de impacto dinâmico modelo IAA/Planalsucar – Stolf (Stolf *et al.*, 1983) (Figura) e sua operação seguiu a metodologia recomendada por Stolf (1984). As coletas dos dados foram realizadas com o solo próximo à capacidade de campo até a profundidade de 60 cm. Para os cálculos da resistência do solo à penetração foram utilizados os métodos descritos por Stolf (1990) e Stolf (1991) norteando – se pela Equação 1, onde para obter – se a força (F) por unidade de área todas as variáveis representadas foram divididas pela área da base do cone (A) de acordo com Stolf (1991). Os resultados dos impactos foram agrupados em camadas de 10 cm para melhor visualização e análise até a profundidade de 60 cm de acordo com STOLF.

Eq. 1

$$R = \left(\frac{(M+m)g + \left(\frac{M}{M+m} * \frac{Mgh}{x} \right)}{A} \right) * 10$$

R: resistência do solo à penetração (MPa); M: massa que provoca o impacto (kg); m: massa dos demais componentes (Kg); g: aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$); h: altura de queda (cm); A: área da base do cone cm^2 .



Figura 2 - Penetrômetro de impacto IAA/Planalsucar – Stolf. FONTE: Kamaq

4.2.2. UMIDADE GRAVIMÉTRICA DO SOLO

Na amostragem do solo para avaliação da umidade gravimétrica foi utilizado um trado tipo holandês nas profundidades de 0-20 cm e de 20-40 cm. As amostras foram acondicionadas em saco plástico devidamente identificado e colocadas em caixa térmica para a manutenção da umidade até o laboratório. No laboratório foram obtidas as massas dos cadinhos de porcelana, e posteriormente, pesou-se, aproximadamente 10 gramas da amostra de solo úmido. Após a pesagem as amostras foram colocadas em estufa a 105°C por 24 horas. Passado esse tempo, foi feita uma nova pesagem com o solo seco. O cálculo da umidade seguiu a recomendação de Teixeira *et al.* (2017) de acordo com a equação 2.

Eq. 2

$$\text{Umidade gravimétrica (\%)} = \left(\frac{\text{msu} - \text{mss}}{\text{mss}} \right) * 100$$

msu: massa de solo úmido (g); mss: massa de solo seco (g).

4.2.3. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E PH

Para a análise da condutividade elétrica e pH, as amostras foram colocadas nas bancadas do laboratório papel sulfite identificado para secarem naturalmente. Passados três dias, as amostras foram peneiradas em malha de 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA).

Na análise da condutividade elétrica e pH foram pesadas 10 gramas de TFSA e colocadas em copos descartáveis de 50 mL, em seguida foram adicionados 25 mL de água destilada com o auxílio de uma pipeta de 25 ml para uma proporção de 1:2,5 (solo:água destilada) misturando com um bastão de vidro e deixando-as descansar por 30 minutos. A leitura do pH foi feita com o equipamento modelo IS649 pH/EC/TDS&TEMP686, previamente calibrado com as soluções de pH 6,86; 4,00 e 9,18 a 25°C. A limpeza do eletrodo foi feita a cada leitura com água destilada, seco com papel absorvente e o equipamento foi recalibrado a cada 20 leituras de pH.

As leituras padronizadas de condutividade elétrica foram feitas com uma solução padrão de 1,413 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e uma solução tampão padrão de 12,880 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Na avaliação também foi considerada a profundidade das amostras coletadas de 0-20 cm e de 20-40 cm.

4.2.4. VARIÁVEIS DA PLANTA

Afim de verificar a relação entre os dados físicos coletados e o desenvolvimento da cultivar, foram coletadas amostras de plantas inteiras em uma área de 0,95 m² em cada ponto amostral. A partir dessas amostras foram obtidos o número de vagens por planta, altura da parte aérea, massa seca da parte aérea, e da raiz, diâmetro do caule e massa de grãos.

Inicialmente, foi feita a separação da raiz-parte área com o auxílio de um alicate de poda e posterior secagem das raízes para obtenção da massa das raízes com o auxílio de uma balança semi-analítica. Foram retiradas e contadas todas as vagens de cada para obter o número de vagens por planta. Para obter o diâmetro do colmo foi utilizado um paquímetro digital medindo aproximadamente uma polegada a partir do primeiro nó. Após a retirada das raízes e da contagem das vagens, todas as plantas foram secas para posterior medição da altura de da massa da parte aérea. Para a obtenção da massa de grãos, estes foram colocados em estufa durante 72 horas a 65 °C para posterior pesagem.

Eq. 3

$$umidade = \left(\frac{\text{massa do grão úmido} - \text{massa do grão seco}}{\text{massa do grão úmido}} \right) * 100$$

4.3. ANÁLISE DE DADOS

Para a o cálculo da resistência do solo à penetração foi utilizado o programa Penetrômetro-Stolf[®] e os resultados, em MPa, de cada ponto foram organizados em planilha para posterior análise estatística. Com o uso do Microsoft Excel[®] e do programa Surfer[®] versão 11.0 (2012). foram calculados: valor mínimo, valor máximo, média, desvio padrão, e os coeficientes de variação (CV), coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e verificada a normalidade dos dados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (Kolmogorov e Smirnov, 1933) a 5 % de significância.

Foi realizada uma análise de correlação linear de Pearson utilizando o programa Microsoft Excel[®]. Para verificar a significância entre os valores, foi realizado o teste t para o coeficiente de correlação utilizando o programa ASSISTAT[®] (Silva *et al.*, 2016).

Para avaliação da dependência espacial entre as amostras foram construídos semivariogramas aplicando o modelo estatístico que melhor representava o comportamento dos

dados utilizando o programa SURFER® versão 11 .0 (2012), no caso deste estudo foi utilizado o modelo Gaussiano, em seguida os dados foram interpolados por krigagem.

Foi utilizada a análise de redundância (RDA) que é uma análise multivariada de ordenação canônica para avaliar a covariação das variáveis com o objetivo de diminuir a dimensionalidade dos dados utilizando o programa CANOCO® versão 4.5 (Ter Braak e Smilauer, 2002)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ESTATÍSTICA DESCRITIVA

De acordo com a análise da estatística descritiva dos dados representados na Tabela 1, observou-se que para os atributos de plantas, o maior coeficiente de variação (CV) foi obtido na massa seca da parte aérea (MSPA) seguido do número de vagens (N° vagens) com a segunda maior variação. Warrick & Nielsen (1980), classificam a variabilidade de atributos do solo de acordo com o coeficiente de variação como: variabilidade baixa ($CV < 12\%$); média ($12\% < CV < 60\%$) e alta ($CV > 60\%$). De acordo com essa classificação, somente os atributos de solo de umidade de 20-40 cm (Umi40), pH de 0-20 e 20-40, altura de planta e diâmetro do caule apresentaram variação baixa, os demais atributos analisados tiveram variação média. Tal comportamento dos dados pode ser explicado pelo alto desenvolvimento da parte aérea da variedade analisada, e, conseqüentemente do número de vagens que variou significativamente de um ponto para outro, explicado pela alta variação dos valores máximo, mínimo, média e desvio padrão para estes mesmos atributos. O menor CV das variáveis da planta foi observado para o diâmetro do colmo. Essa variação pode ter ocorrido devido a uma baixa expressão genética devido a fatores físicos do solo, ou acúmulo de umidade pela configuração topográfica da área.

No que concerne aos atributos do solo, os maiores valores de coeficiente de variação foram obtidos na resistência do solo à penetração nas camadas de 10-20 cm (RP 10-20) e de 20-30 (RP 20-30). Os maiores valores de CV nestas profundidades, é explicado devido o acúmulo de água em alguns pontos da área, reduzindo os valores de resistência do solo à penetração e também pela mecanização da área com gradagem para retirar o milho e a braquiária *ruziziensis* afetando as camadas subsuperficiais do solo, alterando o CV nessas profundidades. À medida que aprofunda a resistência do solo à penetração a partir da profundidade de 30-40 cm, percebe-se que o CV reduz gradativamente, indicando camadas mais homogêneas. Valores semelhantes foram encontrados por Rodrigues *et al.* (2014), em que a resistência a penetração apresentou um aumento na média à medida em que aumenta a profundidade, indicando que pode haver limitação física ao crescimento do sistema radicular em alguns pontos da área.

Segundo Maicá (2023), Miote *et al.* (2013), valores a partir de 1 e 1,5 MPa indicam perda de produtividade, e com valores de 1,30 a 1,64 já é perceptível essa perda na cultura. No

presente estudo alguns pontos apresentaram valores superiores a esse limite. Valores semelhantes de resistência foram encontrados por Martins (2017), ao estudar a produtividade do feijão-Caupi e sua relação com atributos químicos e a resistência do solo, em que a camada de 0-10 cm apresentou menores valores de correlação com as demais camadas estudadas. Semelhantemente, Filho (2017) e Albernás (2016) verificaram aumento na resistência nas camadas mais profundas, a partir de 20 cm até 50 cm.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos físicos do solo e das variáveis da soja. Mata Roma – MA.

	Unid.	V. Mín.	V. Máx.	\bar{X}	S	CV (%)	Coef Ass.	Coef Cur.	teste KS	Valor crítico
Elevação	m	71	111	101,21	9,60	9,49	-1,50	1,92	0,25	0,227
RP 0-10	MPa	0,56	1,25	0,82	0,22	27,34	0,27	-1,14	0,17	0,227
RP 10-20	MPa	0,56	4,05	2,20	0,78	35,42	0,12	0,05	0,08	0,227
RP 20-30	MPa	1,07	5,29	2,94	0,93	31,48	0,22	1,10	0,12	0,227
RP 30-40	MPa	1,67	4,21	2,93	0,55	18,91	-0,19	0,39	0,09	0,227
RP 40-50	MPa	1,70	3,66	2,90	0,49	16,71	-0,51	-0,16	0,10	0,227
RP 50-60	MPa	1,76	4,21	3,22	0,54	16,85	-0,22	0,16	0,08	0,227
RP média	MPa	1,35	3,32	2,50	0,37	14,96	-0,98	2,47	0,15	0,227
Nº batidas	Nº	8	23	18,26	3,21	17,59	-1,40	2,76	0,17	0,227
Umi 0-20	%	9,56	16	12,60	1,48	11,73	0,39	0,21	0,10	0,231
Umi 20-40	%	10,42	16,22	13,02	1,21	9,28	-0,07	0,86	0,15	0,227
pH 0-20	-	6,10	6,86	6,48	0,24	3,63	0,19	-1,37	0,17	0,227
pH 20-40	-	4,72	6,61	5,77	0,45	7,89	-0,49	0,15	0,12	0,227
CE 0-20	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	28	64	40,24	7,43	18,47	0,86	2,12	0,25	0,227
CE 20-40	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	26	62	41,59	7,13	17,15	-0,07	1,88	0,22	0,227
Nº planta	Nº	16	28	23,09	2,79	12,08	-0,49	-0,05	0,14	0,227
Altura planta	m	0,90	1,29	1,07	0,10	9,10	0,33	-0,50	0,10	0,227
Nº vagem	Nº	32,04	51,94	40,08	5,07	12,64	0,54	-0,11	0,10	0,227
MSR	g	56,35	88,49	73,09	8,98	12,29	0,17	-0,99	0,12	0,227
MSPA	g	176,05	432,49	293,50	60,67	20,67	0,11	-0,44	0,11	0,227
D. caule	mm	5,89	8,29	7,09	0,59	8,25	0,21	-0,57	0,15	0,227
Produtividade	kg/ha	2892,30	4746,78	3930,34	428,70	10,91	-0,18	-0,45	0,09	0,227

Unid.: unidade; V. Mín.: valor mínimo; V. Máx.: valor máximo \bar{x} : Média; S: Desvio padrão da média; CV: coeficiente de variação; Coef Ass.: Coeficiente de Assimetria; Coef Cur.: Coeficiente de Curtose; teste KS: teste de Kolmogorov-Smirnov; RP 0-10: Resistência do solo à penetração de 0-10 cm; RP 10-20: Resistência do solo à penetração de 10-20 cm; RP 20-30: Resistência do solo à penetração de 20-30 cm; RP 30-40: Resistência do solo à penetração de 30-40 cm; RP 40-50: Resistência do solo à penetração de 40-50 cm; RP 50-60: Resistência do solo à penetração de 50-60 cm; RP Média: Resistência média do solo à penetração; Nº de batidas: número de batidas até atingir a profundidade de 60 cm; Umi 0-20: Umidade gravimétrica de 0-20 cm; Umi 40: Umidade gravimétrica de 20-40 cm; pH 0-20: Potencial hidrogeniônico do solo de 0-20 cm; pH 20-40: Potencial hidrogeniônico do solo de 20-40 cm; CE 0-20: Condutividade elétrica de 0-20 cm; CE 20-40: Condutividade elétrica de 20-40 cm; Nºplanta: Numero de plantas coletadas por ponto de amostragem; Nº vagem: número de vagens por planta; MSR: Massa seca da raiz; MSPA: Massa seca da parte aérea; D. caule: Diâmetro do caule.

É possível perceber um forte aumento no coeficiente de variação à medida que há um aumento da profundidade, especialmente nas camadas de 10-20 cm e 20-30 que apresentou os maiores valores dentre os atributos estudados. Essa informação é importante quando se estabelece um limite crítico de 2,0 MPa para a resistência a penetração sem que a mesma prejudique o desenvolvimento das culturas, embora esse limite possa variar de acordo com o uso e manejo do solo (DRESCHER *et al.*, 2012), e RODRIGUES *et al.* (2014) indica que pode haver limitação física ao crescimento radicular da cultura.

Pode-se indicar um aumento no impedimento mecânico à penetração das raízes provocados pelo manejo, trânsito de máquinas, ausência de matéria orgânica em alguns pontos devido a topografia da área, ou pela quantidade de argila devido ao tipo de solo da área em estudo, o que de fato explicaria as diferenças de desenvolvimento da soja pela diminuição da área de exploração das raízes culminando em menor absorção de nutrientes, acúmulo de água e umidade excessiva, sendo estes, alguns dos fatores determinantes de produtividade.

A resistência a penetração para a camada de 0-10 cm obteve o menor desvio padrão para este atributo em virtude de menores valores máximo e mínimo, o que resultou em menor média e menor desvio padrão em relação a todos os outros atributos analisados.

Os menores valor de CV foi obtido no pH de 0-20 cm (pH 0-20) e de 20-40 cm (pH 20-40 cm). Isso mostra como essa variável varia pouco na área de estudo, indicado também pela difícil alteração, uma vez que seus valores são calculados com base em função logarítmica.

Analisando o coeficiente de assimetria (Coef Ass.), o coeficiente de curtose (Coef. Cur.) o teste de Kolmogorov-Smirnov (teste KS) e o valor crítico para o teste a 5% de significância, percebe-se que apenas a elevação indicou uma frequência com valores de maior altitude e a condutividade elétrica de 0-20 cm (CE 0-20) que tinha muitos valores altos próximos a média aritmética e porisso não apresentaram distribuição normal. As demais variáveis apresentaram distribuição normal.

5.2. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON

De acordo com a análise de correlação linear de Pearson entre os atributos do solo e de plantas, a massa seca da parte aérea (MSPA), altura de planta e número de plantas tem relação positiva e direta com a elevação (Tabela 2). Essa relação explica a expressividade genética da parte folhosa da cultura, o desenvolvimento do porte e do número de plantas. Esses resultados,

segundo Vian *et al.* (2014) podem ser atrelados a uma série de fatores como aos eventos meteorológicos ocorridos durante a semeadura e ao erro associado à distribuição de sementes pela semeadora, podendo ser a deposição das sementes e a profundidade destas, prejudicando o estande inicial e o estabelecimento das plantas na lavoura e o aumento do CV na distribuição espacial de plantas na linha impacta negativamente a produtividade de grãos.

A resistência do solo à penetração média e o número de batidas apresentaram correlação positiva e significativa com os valores de resistência a penetração do solo de 20-30, 30-40, 40-50, 50-60 cm. Queiroz *et al* (2019) constataram que a resistência à penetração tende a aumentar ao longo do tempo, em função da consolidação da superfície do solo, pois as partículas de argila apresentam maiores forças de adesão e coesão. Esses fatores comprometem o espaço poroso, causando degradação da qualidade física do solo, aumentando a densidade do solo e a resistência à penetração após sucessivos ciclos de cultivo e que diferentes formas de manejo promovem alterações significativas para esse atributo.

A umidade gravimétrica de 0-20 cm (Umi 0-20) apresentou valor não significativo com a altura da planta e a massa seca da parte aérea (MSPA), afirmando as condições encontradas na área em estudo que apresentou um acúmulo de água nessa camada, fato que explica essa relação e o comprometimento do desenvolvimento desses atributos nessas condições. Contudo, Serafim *et al.* (2012) em seu estudo sobre doses fixas de potássio na cultura da soja para diferentes teores de umidade, não observaram variação no rendimento dos grãos em função da umidade e atributos de planta, ao contrário, observa-se incremento de rendimento para todos os níveis de umidade. Nelson *et al* (2005), Foloni; Rosolem (2008) e Serafim *et al* (2012) relatam a adubação potássica como responsável por incremento de rendimento de grãos.

A condutividade elétrica de 0-20 cm (CE20) teve correlação significativa com a massa seca da raiz (msraiz) e o pH de 20-40 cm (pH40) correlacionou-se negativamente com a altura de planta. Valores como esses eram esperados em virtude do manejo da área e estão de acordo com Faulim e Molin (2006) e Valente *et al.* (2012) que encontraram uma correlação entre a condutividade elétrica com a umidade do solo e o teor de argila.

Tabela 2 - Matriz de correlação de Pearson das variáveis estudadas. Mata Roma – MA.

	<i>Alt.</i>	<i>R</i> 0-10	<i>R</i> 10-20	<i>R</i> 20-30	<i>R</i> 30-40	<i>R</i> 40-50	<i>R</i> 50-60	<i>R</i> média	<i>N°</i> batidas	<i>Umid</i> 0-20	<i>Umid</i> 20-40	<i>pH</i> 20	<i>pH</i> 40	<i>CE</i> 20	<i>CE</i> 40	<i>N</i> planta	<i>A</i> planta	<i>N°</i> vagem	<i>MS</i> raiz	<i>MS</i> pa	<i>D</i> colmo	<i>Prod.</i>	
Alt.	1,00																						
R0-10	-0,02	1,00																					
R10-20	-0,09	0,42	1,00																				
R20-30	0,00	0,06	0,60	1,00																			
R30-40	-0,25	-0,04	0,00	0,32	1,00																		
R40-50	-0,09	-0,05	0,13	0,23	0,66	1,00																	
R50-60	-0,20	0,03	0,02	0,07	0,36	0,69	1,00																
Rmédia	-0,16	0,26	0,67	0,77	0,61	0,68	0,52	1,00															
N°batidas	-0,11	0,24	0,66	0,74	0,61	0,69	0,49	0,98	1,00														
U20	0,04	-0,47	-0,01	-0,12	0,16	0,23	0,17	0,03	0,07	1,00													
U40	-0,09	-0,19	-0,19	-0,08	0,27	0,26	0,19	0,05	0,03	0,37	1,00												
pH20	-0,06	0,06	0,16	0,11	0,04	0,00	0,02	0,12	0,08	-0,16	0,00	1,00											
pH40	-0,17	0,07	0,06	-0,02	0,07	0,13	0,21	0,12	0,09	-0,10	0,28	0,42	1,00										
CE20	0,10	-0,23	-0,18	-0,10	-0,24	-0,20	0,00	-0,23	-0,22	-0,20	-0,15	0,25	0,06	1,00									
CE40	0,18	0,11	0,13	0,33	-0,02	0,21	0,16	0,27	0,21	-0,29	0,02	0,12	0,21	0,21	1,00								
N°planta	0,42	-0,03	0,08	0,16	-0,17	-0,09	-0,31	-0,05	0,00	-0,21	-0,34	0,08	-0,32	0,24	0,21	1,00							
Aplanta	0,48	-0,18	-0,21	-0,23	-0,11	-0,09	-0,14	-0,27	-0,25	0,41	0,19	-0,13	-0,39	0,00	-0,23	0,00	1,00						
N°vagem	-0,11	-0,24	-0,18	-0,06	0,15	0,21	0,29	0,04	-0,01	0,22	0,27	0,05	0,02	-0,07	0,01	-0,59	0,22	1,00					
MSraiz	0,11	0,05	-0,14	-0,39	-0,10	0,06	0,08	-0,19	-0,18	0,09	0,09	0,20	0,10	0,34	0,21	0,21	0,13	0,09	1,00				
Mspa	0,38	-0,42	-0,17	-0,13	-0,06	0,13	-0,07	-0,16	-0,15	0,49	0,16	-0,02	-0,32	0,08	0,05	0,17	0,72	0,33	0,38	1,00			
Dcolmo	-0,14	-0,18	-0,16	-0,14	0,11	0,12	0,21	-0,03	-0,07	0,29	0,29	-0,08	-0,07	-0,02	-0,04	-0,60	0,46	0,68	0,12	0,44	1,00		
Produ	0,18	-0,07	-0,12	0,15	-0,05	0,16	0,13	0,07	0,06	-0,07	0,09	0,19	-0,19	0,28	0,25	0,34	0,22	0,24	0,34	0,38	0,16	1,00	

Valores de coeficiente de correlação $\leq 0,42$ em negrito é significativo a 5%. Valores de coeficiente de correlação $> 0,42$ é significativo a 1%. Elev: Elevação; RP 0-10: resistência do solo à penetração de 0-10 cm; RP 10-20: resistência do solo à penetração de 10-20 cm; RP 20-30: resistência do solo à penetração de 20-30 cm; RP de 30-40: resistência do solo à penetração de 30-40 cm; RP 40-50: resistência do solo à penetração de 40-50 cm; RP de 50-60: resistência do solo à penetração de 50-60 cm; RP média: resistência à penetração média; ;Umi 0-20: Umidade gravimétrica de 0-20 cm; Umi 40: Umidade gravimétrica de 20-40 cm; pH 0-20: pH de 0-20 cm; pH 20-40: pH de 20-40 cm; CE0-20: Condutividade elétrica de 0-20 cm; CE 20-40: Condutividade elétrica de 20-40 cm; Aplanta: altura de planta; Nvagem: número de vagens; MSraiz: Massa seca da raiz; Mspa: Massa seca da parte aérea; Dcolmo: diâmetro do colmo; Prod: Produtividade.

Os valores de pH e condutividade elétrica mantiveram estabilidade para todos os pontos e para as duas camadas analisadas, de 0-20 e de 20- 40 cm. A condutividade elétrica pode ser utilizada como estimador das condições da fertilidade do solo e sua variabilidade, mas, esses valores podem estar ligados às frequentes adubações que são realizadas na área e de acordo com o nível de tecnologia com que a mesma é cultivada (Zonta *et al.*, 2014). Essas relações podem estar ligadas a argila presente na área, teor de matéria orgânica e irrigação. O conteúdo de água no solo é um fator crucial para produtividade da soja, portanto, fatores impeditivos como a resistência mecânica à penetração faz com que as raízes não se aprofundem para locais com maior disponibilidade de água (Rigon *et al.*, 2019).

A variabilidade da condutividade elétrica e pH podem estar relacionadas ao sistema de irrigação como afirmam Rigon *et al.* (2019), que os fatores químicos e físicos do solo são limitantes quando há água suficiente para o desenvolvimento da cultura, como em sistemas de irrigação por pivô central, mas os fatores do solo impedem que as culturas atinjam seu maior potencial. Considerando que a soja possui um sistema de adaptação ao ambiente que as vezes pode esconder a real situação da área, maior sensibilidade aos fatores climáticos e ambientais. Para Rigon *et al.* (2019) pode ocorrer que o mais limitante na produtividade da soja não esteja no solo, e sim em um período de semeadura errado, um posicionamento de cultivar equivocado ou até mesmo anos com baixa radiação.

Os atributos de planta são resultados da absorção de nutrientes conforme verificado por Libreloto (2022), e corroborados por Brasil Neto (2018) em que o autor constatou que a umidade não teve relação com ao aumento da resistência em profundidade. As variáveis de solo tiveram relação significativa com os atributos de planta, sendo a massa seca da parte aérea (M_{spa}) a mais significativa, demonstrando que essa variável respondeu satisfatoriamente ao solo.

5.3. MAPAS DE VARIABILIDADE ESPACIAL

Ao compararmos os mapas de resistência do solo à penetração de 20-30 cm com o mapa de resistência do solo à penetração de 30-40 cm (Figura) com os mapas de umidade gravimétrica 0-20 cm (Figura) e umidade gravimétrica de 20-40 cm (Figura) há um aumento na resistência a penetração e uma diminuição da umidade gravimétrica.

Comparando os mapas de pH 20-40 cm (Figura), condutividade elétrica de 0-20 cm (Figura) e condutividade elétrica de 20-40 (Figura), observamos que o pH e a condutividade elétrica mantiveram valores próximos que variou de 5,20 a 6,20 para o pH na camada de 20-40 cm, e 26 a 61 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ de condutividade para as duas camadas analisadas. Valores semelhantes de pH foram verificados por Hanke *et al.* (2022), que encontraram valores entre 5,1 a 6,0 e de 4,8 a 5,7, nas profundidades de 0-50 cm para semeadura direta, contudo, esse tipo de sistema pode levar ao aumento de determinados compartimentos da acidez ativa pelo acúmulo de matéria orgânica no solo. A condutividade elétrica teve aumento de uma camada para a outra conforme constatado por Hanke *et al.* (2022) ao estudar a produtividade da soja em sistema de plantio direto nas profundidades de 0-50 cm.

Ao analisarmos a Figura , percebe-se que o número de plantas foi maior nos pontos de maior elevação, da mesma forma para a altura da planta (Figura), número de vagens (Figura) e a condutividade elétrica de 20-40 cm (Figura), fato que pode estar ligado com a declividade da área com foi descrito por Tabalde (2013), isso ocorre porque variações de altimetria alteram componentes estáticos como os teores de argila e dinâmicos como salinidade e umidade que inferem variações de CE ao longo da área. Essa variação na condutividade elétrica na camada de 20-40 cm (CE 20-40) provavelmente é o parâmetro crucial para o maior desenvolvimento da cultivar que refletiu em diversos atributos de planta como: maior massa seca da parte aérea (Figura), massa seca da raiz (Figura), número de vagens (Figura), altura da planta (Figura). Segundo Valente *et al.* (2012), esses parâmetros são alterados por propriedades físicas e químicas do solo como salinidade, teor de água, textura do solo, CTC, pH e soma de bases. Essa dependência a diversos fatores faz com que esse parâmetro dificilmente esteja correlacionado com apenas um desses componentes em um ponto (Johnson *et al.*, 2001).

Tabalde (2013) também constatou que 83% das variações da condutividade elétrica está ligado à saturação por bases e teor de magnésio. Castro; Molin (2004) e Faulin (2005) encontraram resultados semelhantes onde a CTC, cálcio e magnésio explicam 36% da variação da condutividade elétrica. Contudo, Motomiya *et al* (2011) encontraram uma baixa relação entre a produtividade e atributos do solo, esse comportamento indica que outros fatores estejam afetando a máxima expressão genética da cultura.

O relevo tem papel importante na formação dos solos e exerce influência em atributos como: profundidade das camadas de solo, espessura e conteúdo de matéria orgânica do horizonte superficial, umidade relativa do perfil, reação do solo, conteúdo de sais solúveis, espécie e grau de desenvolvimento de horizontes adensados e temperatura (Flores; Alba, 2014),

corroborado por (El Nahrya; Ali; El Baroudy, 2011), que também descreveram a influência do relevo para agricultura irrigada por pivô central. Castione *et al.* (2013) descrevem que alterações em atributos físicos e químicos no solo são consequência da desagregação do solo associada a alterações eletroquímicas, que favorece a dispersão de argila e desestruturação de agregados, pelos ciclos de umedecimento e secagem e ainda pelo uso indiscriminado de irrigação ao solo, sendo fatores cruciais para explicar a formação de camadas compactadas no perfil do solo.

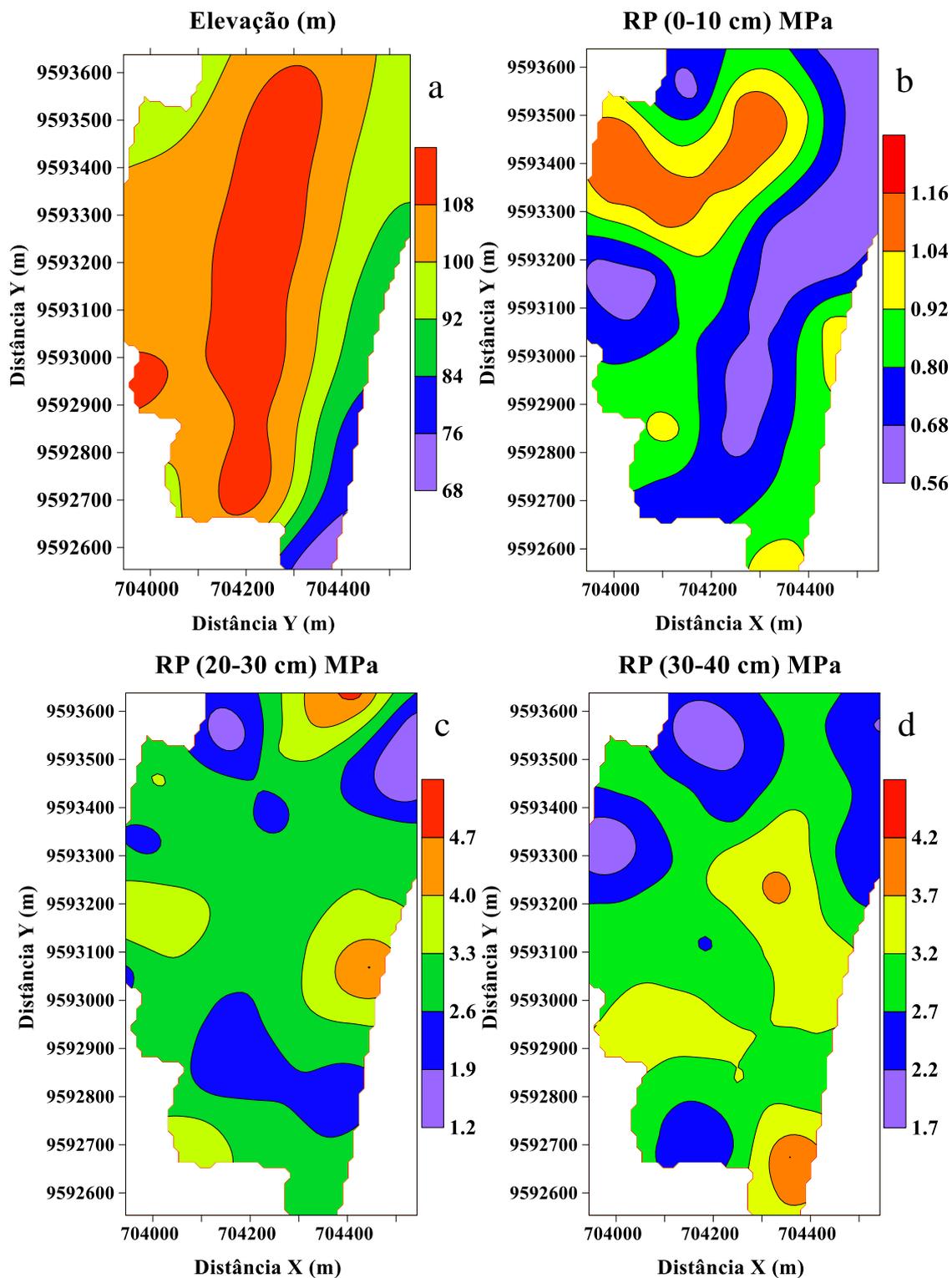


Figura 3 – Mapas de variabilidade espacial: a) altitude; b) resistência do solo à penetração de 0-10 cm; c) resistência do solo à penetração de 20-30 cm; d) resistência do solo à penetração de 30-40 cm.

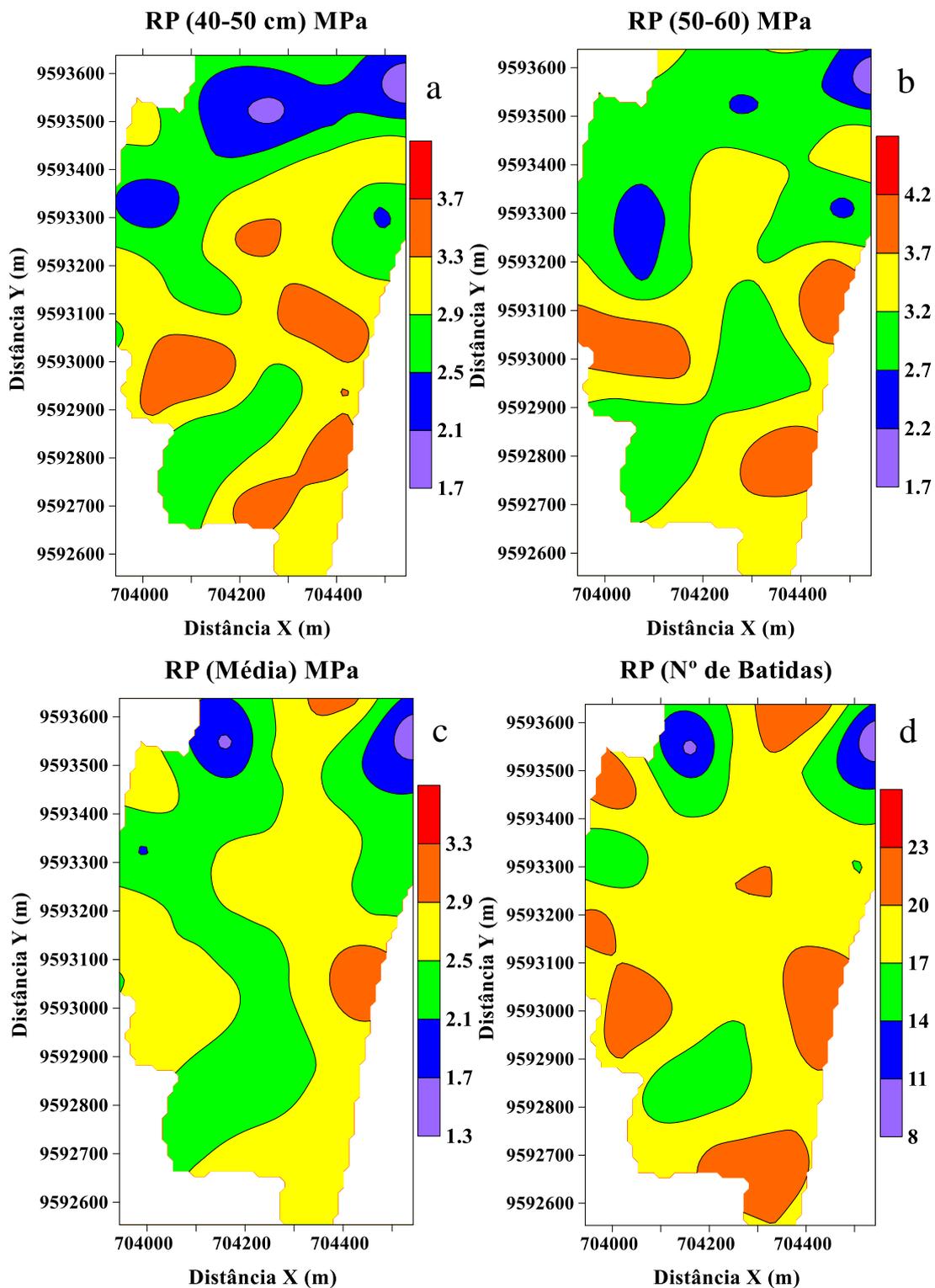


Figura 4 - Mapas de variabilidade espacial: a) resistência do solo à penetração de 40-50 cm; b) resistência do solo à penetração de 50-60 cm; c) média da resistência do solo à penetração de 30-40 cm; d) número de batidas do penetrômetro de impacto.

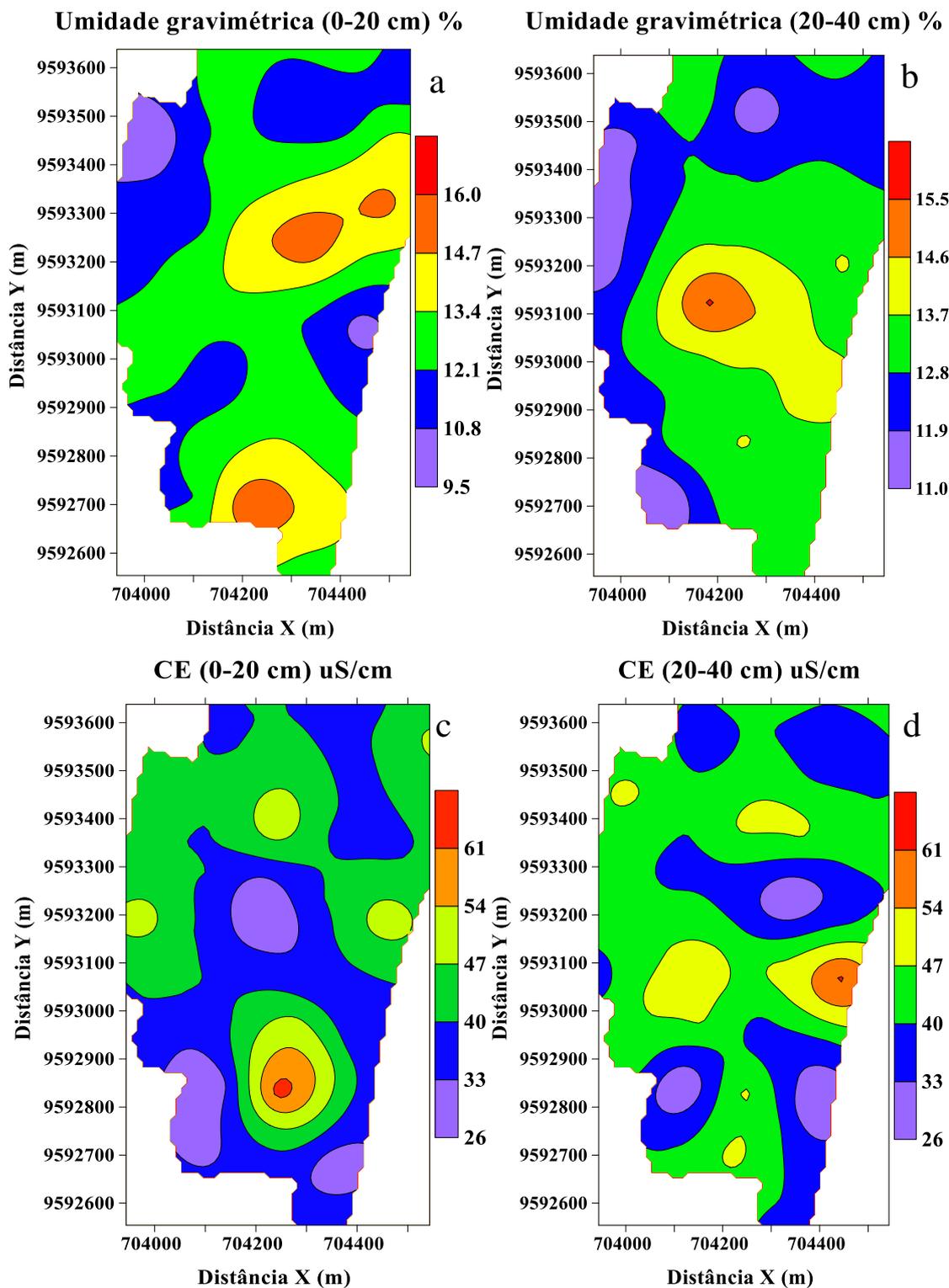


Figura 5 - Mapas de variabilidade espacial: a) umidade gravimétrica do solo de 0-20 cm; b) umidade gravimétrica do solo de 20-40 cm; c) pH de 20-40cm; d) condutividade elétrica de 0-20 cm.

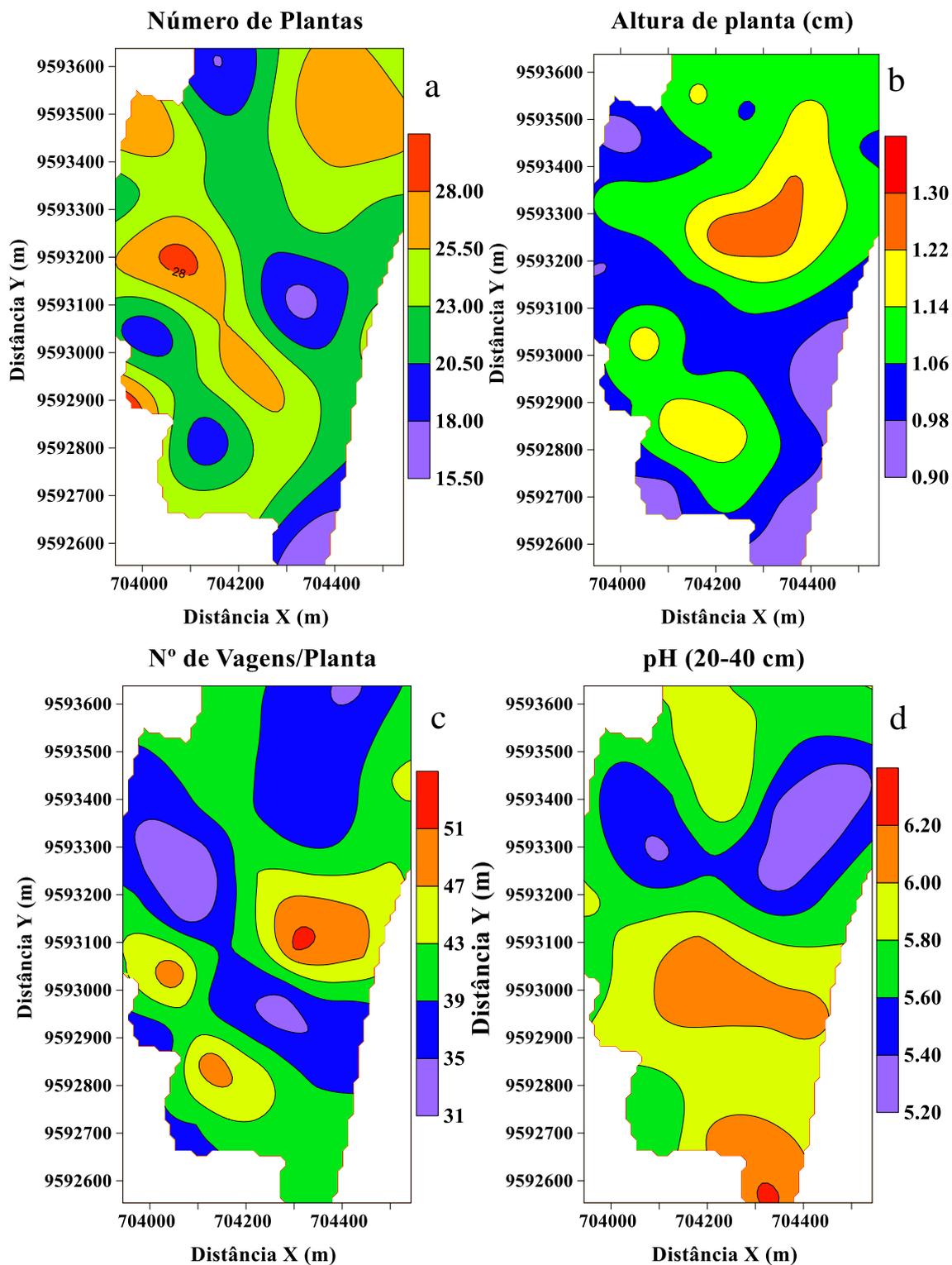


Figura 6 - Mapas de variabilidade espacial: a) condutividade elétrica de 20-40 cm; b) número de plantas; c) altura de planta; d) número de vagens/planta.

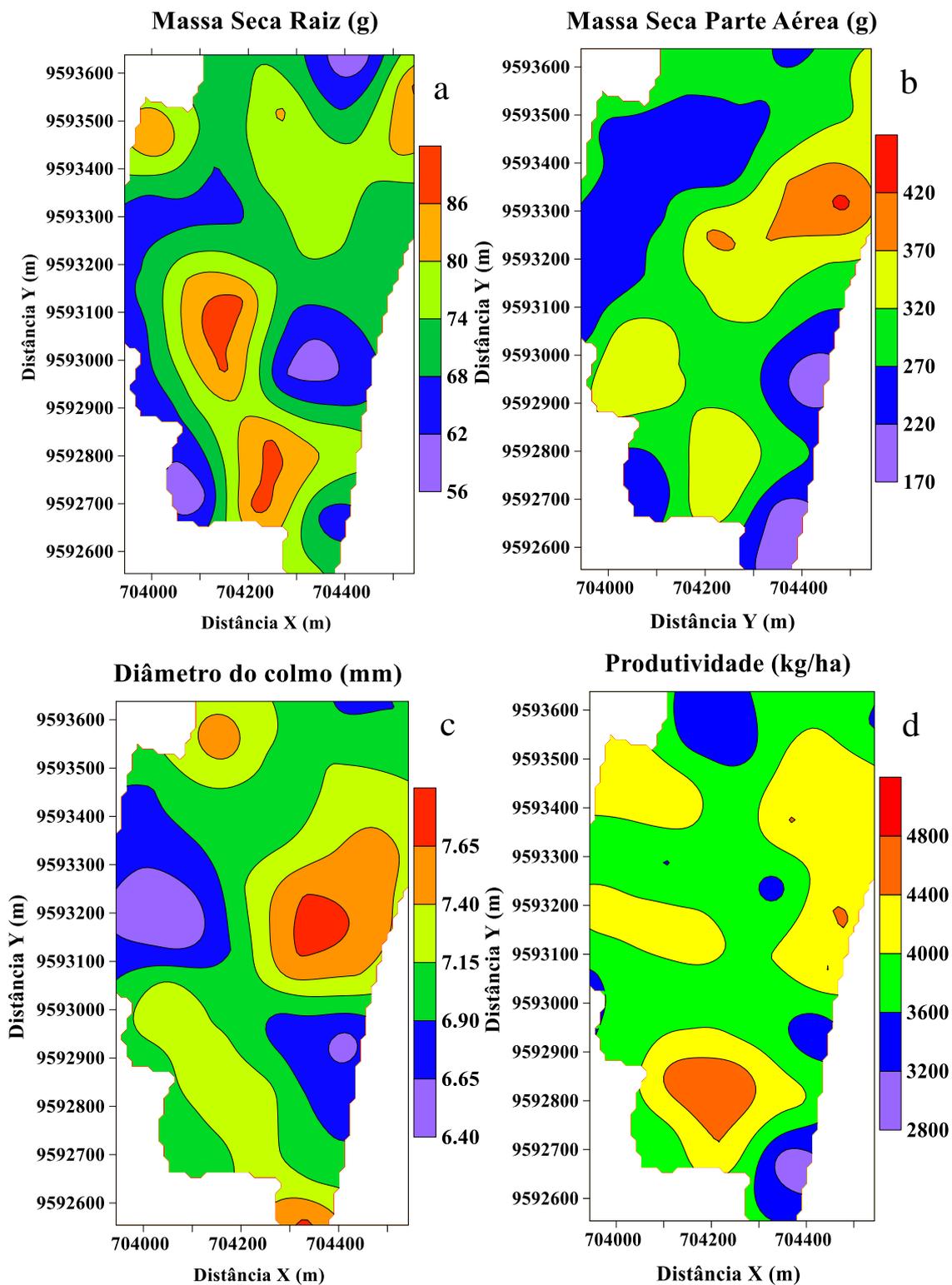


Figura 7 - Mapas de variabilidade espacial: a) massa seca da raiz; b) massa seca da parte aérea; c) diâmetro do colmo; d) produtividade.

5.4 ANÁLISE MULTIVARIADA DE ATRIBUTOS DO SOLO E PLANTA

De acordo com a análise multivariada de redundância de ordenação canônica (RDA) verifica-se que a produtividade correlacionou positivamente e com a mesma tendência que a elevação da área, ou seja, maiores valores de elevação resultaram em maiores valores de produtividade. As áreas de menor elevação acumularam muita água proveniente da chuva, causando uma redução no oxigênio do solo para as raízes da soja e conseqüentemente reduzido a produtividade. A produtividade também foi correlacionada positivamente com a condutividade elétrica de 0-20 cm e de 20-40 cm, além do pH de 0-20 cm indicando que as áreas com maior teor de nutrientes e maior valor de pH foram as mais produtivas. Percebe-se também que a produtividade não está correlacionada com a resistência do solo à penetração de 20-30 e de 40-50 cm, nessas profundidades, Balastreire (2005) aponta que esse comportamento pode ter sido causado pela tensão dos pneus dos implementos em camadas superiores culminando em deformação e compactação fazendo com que o sistema radicular da cultura não atingisse essas profundidades, o que pode ser agravado pelo não revolvimento do solo em sistema de plantio direto, e com a umidade do solo de 20-40 cm e que Moita Neto (2015) descreve como não dependência entre as mesmas. As demais variáveis de resistência do solo à penetração, pH de 20-40 cm e umidade do solo de 0-20 cm correlacionou negativamente com a produtividade, ou seja, maiores valores dessas variáveis resultaram em menor produtividade.

De uma forma em geral, a produtividade estava com a mesma tendência do número de plantas, da massa seca da raiz, da massa seca da parte aérea e da altura de planta. O diâmetro do caule e o número de vagens por planta que são variáveis estritamente correlacionadas ao fator genético não estavam correlacionadas com a produtividade. O diâmetro do caule e o número de vagens por planta estavam correlacionados positivamente com a umidade do solo de 0-20 cm e de 20-40 cm, com a resistência do solo à penetração em profundidades mais elevadas como: de 30-40 cm, de 40-50 e de 50-60 cm.

Nota-se uma distinção da parte superficial do solo em relação a parte subsuperficial, em relação à resistência do solo a penetração, esse fator é descrito por Oliveira *et al* (2010) como um adensamento pedogenético que ocorre naturalmente nos ARGISSOLOS AMARELOS Distrocoesos nas camadas inferiores a 35 cm em mata nativa em que não há revolvimento da camada superficial. Os valores de resistência do solo à penetração de 0-10 cm, 10-20 cm e de 20-30, número de batidas com o penetrômetro e resistência do solo à penetração média mostram-se totalmente inversos aos valores de 30-40 cm, 40-50 e de 50-60 cm indicando

grande diferença entre eles devido ao uso e manejo do solo adotado na área com escarificador e grade. Burak; Passos; Sarnaglia, (2010) constataram que maiores valores de resistência na camada de 10-20 cm são causados por maiores teores de argila, ao utilizarem a análise multivariada em seu estudo de atributos físicos e geomorfológicos do solo, Oliveira *et al* (2010) apontam que esse adensamento pedogenético que acarreta aumento da densidade é natural ou de origem antrópica, e que em solos coesos a mesma varia entre 1,4 a 1,8 kg/m³ em condições de cultivo.

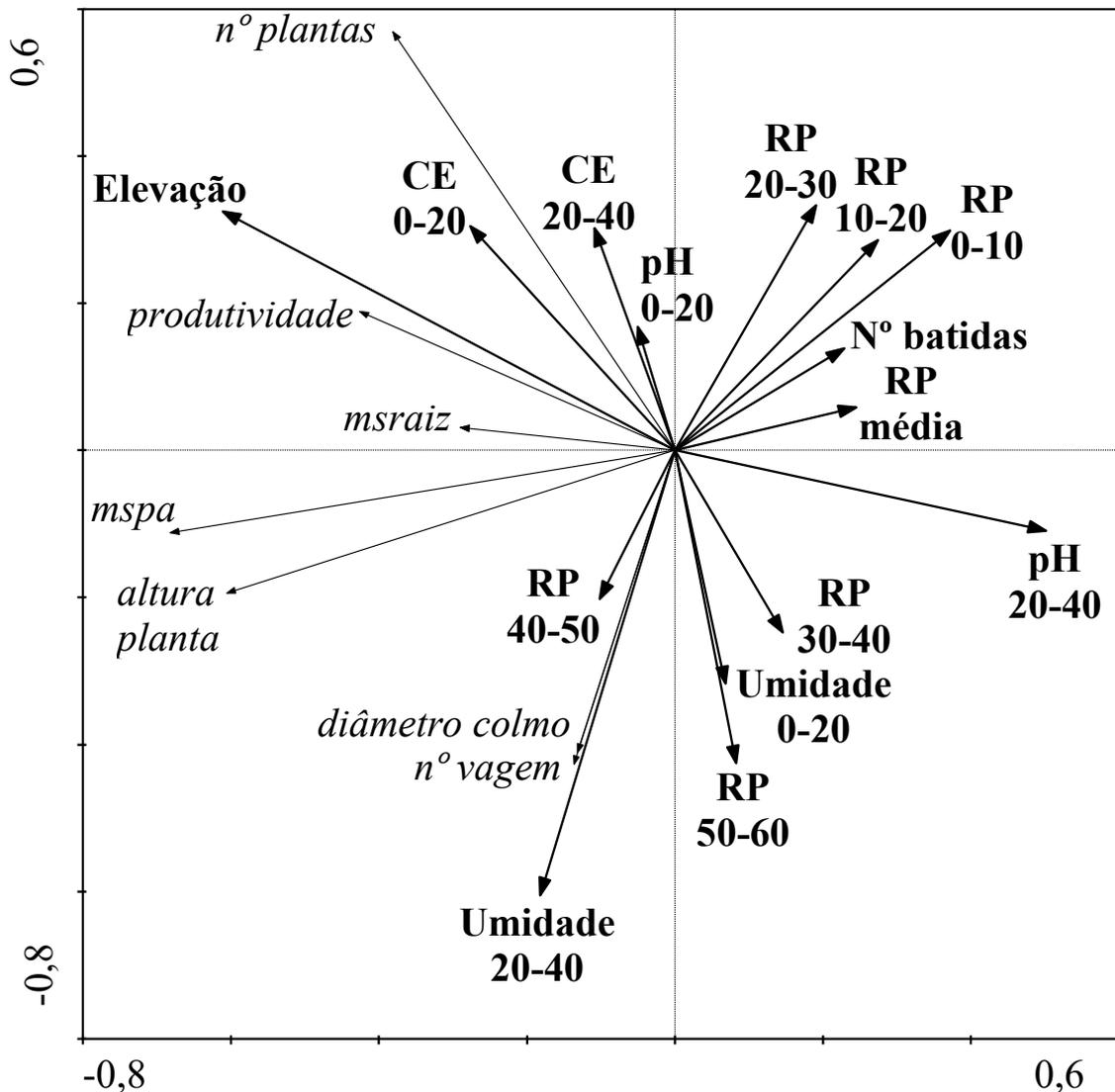


Figura 8 - Análise multivariada de redundância com ordenação canônica dos atributos físicos do solo e das variáveis de planta para a cultura da soja. Mata Roma - MA.

6. CONCLUSÕES

Dos atributos de planta, o maior coeficiente de variação foi obtido na massa seca da parte aérea e dos atributos do solo o maior valor de CV foi obtido na resistência do solo à penetração de 10-20 cm. Na umidade gravimétrica e na condutividade elétrica, os maiores valor de CV foram obtidos na profundidade de 0-20 cm.

Houve correlação linear positiva da elevação com a número de plantas, altura de planta e massa seca da parte aérea. A umidade gravimétrica de 0-20 cm correlacionou positivamente com a altura de planta e com a massa seca da parte aérea e o pH e a condutividade elétrica de 20-40 cm com a massa seca da raiz. A condutividade elétrica de 0-20 cm correlacionou negativamente com a altura de planta e a umidade de 20-40 cm com o número de planta. A produtividade também foi correlacionada positivamente com a condutividade elétrica de 0-20 cm e de 20-40 cm, além do pH de 0-20 cm indicando que as áreas com maior teor de nutrientes e maior valor de pH foram as mais produtivas. As demais variáveis de resistência do solo à penetração, pH de 20-40 cm e umidade do solo de 0-20 cm correlacionou negativamente com a produtividade, ou seja, maiores valores dessas variáveis resultaram em menor produtividade.

A elevação e a condutividade elétrica não apresentaram distribuição normal.

De acordo com a análise multivariada, a produtividade correlacionou positivamente e com a mesma tendência que a elevação da área, ou seja, maiores valores de elevação resultaram em maiores valores de produtividade.

7. REFERÊNCIAS

- ALBERNAS, K. K; SOUSA, M. K; JUNIOR, J. V .C; DOURADO, D. P; REINA, E; MURAISHI, C. T. Estudo da compactação do solo cultivado sob plantio direto. 1. **RIU-Revista de Integralização Universitária**. V. 11. N. 15. 2016.
- ALCÂNTARA, G. R. D. S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de milho e soja e sua relação com os atributos do solo. **Dissertação**. Viçosa, 2015.
- BALASTREIRE, L; A. Máquinas Agrícolas. Piracicaba, 2005
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em Latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. **Ciência Rural**, v. 34, p. 1793-1800, 2004.
- BOTTEGA, E. L. Variabilidade espacial da produtividade de soja e dos atributos do solo em sistema de plantio direto sob rotação de culturas. **Dissertação**. Viçosa, 2011.
- BOTTEGA, E. L; AMARAL, L. P; AMADO, T. J. C; SEVERO, F. S; PINTO, E. B; ASSMAN, J. Correlação entre a condutividade elétrica aparente e resistência à penetração em diferentes teores de água no solo. Congresso latino-americano de **agricultura de Precisão**. Manfredi, 2014.
- BRASIL, N. E. S. Variabilidade espacial da resistência do solo a penetração mecânica em áreas de várzea cultivadas com soja. **Dissertação de mestrado**. UFSM. 2018.
- BUEHRMANN, C.; HORN, M.; BALBINOT, M. **Compactação do solo: limitações na produção vegetal**. In: SIMPÓSIO DE AGRONOMIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 3., 2016, S. L. Simpósio. S.L.: Fai Faculdades, 2016.
- BURAK, D; PASSOS, R; SARNAGLIA, S. Utilização de análise multivariada na avaliação de parâmetros geomorfológicos e atributos físicos do solo. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 09, 2010.
- CAMPOS, M. C. C; DE AQUINO, R. E; OLIVEIRA, I. A; BERGAMIM, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 305-310, 2013.
- CANCIAN, L. C. Variabilidade espacial da resistência a penetração, granulometria e umidade do solo. **Dissertação de mestrado**. UFSM. 2015.
- CARDOSO, L. A. S; FARIAS, P. R. S; SOARES, J. A. C. Geoestatística aplicada à fitossanidade: Estado da arte e perspectivas futuras para o estado do Pará, Brasil. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 6, p. 48273-48279, 2021.
- CARMO, D. L; SILVA, C. A. Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1762-1772, 2016.

CARVALHO, G. J; CARVALHO, M.P; FREDDI, O. S; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 765-771, 2006.

CASTIONI, G. A.F; DE SOUZA, Z. M; DA SILVA, R. B. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob irrigação por pivô central na região de Cristalina-GO. **Congresso brasileiro de ciência do solo**. Florianópolis, 2013.

CASTRO, C N.; MOLIN, J. P. Definição de unidades de gerenciamento do solo através da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas utilizando classificação Fuzzy. In: **Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, Piracicaba. Anais... Piracicaba: USP/ESALq**. 2004.

CAVALCANTE, E. G. S; ALVES, M.C; SOUSA, Z.M; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 237-243, 2011.

CINTRA, P. H. M; COMPAGNOM, A.M; ARRIEL, F.H; VENTURA, G.S; SANTOS, M.L; NETO, A.M.P. Variabilidade espacial e qualidade na semeadura de soja. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 3, p. 1206-1221, 2020.

COLUSSI, J; WEISS, C.J; SOUSA, A. R. L; OLIVEIRA, L. O agronegócio da soja: Uma análise da rentabilidade do cultivo da soja no Brasil. **Revista ESPACIOS Vol. 37 (Nº 16) Año 2016**, 2016.

CUNHA, R. C; ESPÍNDOLA, C. J. A dinâmica geoeconômica recente da cadeia produtiva da soja no Brasil e no mundo. **GeoTextos**, 2015.

DA SILVA, F. J; OLIVEIRA, C.A.A; ALMEIDA, L. S; LIMA, L. P; GUIMARÃES, E.C. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da produtividade do milho. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 3, p. 77-84, 2017.

DA SILVA, R. P; NUÑEZ, D. N. C. Manejos sobre fitopatógenos e doses de Boro na cultura da soja. **Brazilian Journal of Science**, v. 2, n. 5, p. 87-97, 2023.

DALCHIAVON, F. C.; RODRIGUES, A. R.; DE LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos químicos de solo cultivado com soja em plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v.16, n.2, p.144-154, 2017

DALCHIAVON, F.C; CARVALHO, M. P; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M; DAL BEM, A. R. Inter-relações da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo. **Revista Ceres**, v. 61, p. 255-264, 2014.

DALL'AGNOL, A. A Embrapa Soja no contexto do desenvolvimento da soja no Brasil: histórico e contribuições. Brasília, DF: **EMBRAPA**, 2016.

MOTOMIYA, A. V. A; MOTOMIYA, W. R; MOLIN, J.P; LIRA, A; OLIVEIRA, J.R.G; BISCARO, G.A. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade do algodoeiro. **Agrarian**, v. 4, n. 11, p. 01-09, 2011.

DE GODOY, F. O, BERNARDI, A. A. C; ROSSI, F; BUENO, J. O.A. Mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo e sua relação com matéria orgânica e granulometria. **CONBEA**. Campinas, 2019.

DE OLIVEIRA, D. G; REIS, E. F; MEDEIROS, J. C; MARTINS, M. P. O; UMBELINO, A. S. Correlação espacial de atributos físicos do solo e produtividade de tomate industrial. **Revista Agro@ mbiente on-line**, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2018.

DRESCHER, M.S; ELTZ, F.L.F; DENARDIM, J.E; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1713-1722, 2011.

EL NAHRYA, A. H.; ALI, R. R.; EL BAROUDY, A. A. An approach for precision farming under pivot irrigation system using remote sensing and GIS techniques. *Agricultural Water Management*, v. 98, n. 4, p. 517-531, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.09.012>

EURIQUES, J. F; KRUEGER, C. P; MACHADO, W. C; SAPUCCI, L.F; NIEVINSKI, F. G. Estimativa da Umidade do Solo por Reflectometria GNSS: uma Revisão Conceitual. **Rev. Bras. Cartogr**, v. 73, n. 2, 2021.

FAULIN, G. D. C; MOLIN, J. P. Amplitude dos valores da umidade e sua influência na mensuração da condutividade elétrica do solo. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO**. 2006. p. 1-9.

FAULIN, G. C. Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo. 2005. 52 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) -Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

FLORES, Carlos Alberto; FILIPPINI, J. M. A. A Pedologia e a Agricultura de Precisão. **EMBRAPA**, 2014.

FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1549-1561, 2008.

FRANCISCO, P. R. M; SILVA, V. F; SANTOS, D; RIBEIRO, G. N; AYRES, G. D.J; RODRIGUES, R. C. M; FILHO, J. C. F; SILVINO, G. S. Geoestatística aplicada ao estudo da variabilidade espacial de indicadores de qualidade dos solos. **agroCiências**, p. 34, 2023.

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

FREITAS, M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, 2011.

GONTIJO, I; NICOLE, L. R; PARTELLI, F.L; BONOMO, R; SANTOS, E.O.J. Variabilidade e correlação espacial de micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta-do-reino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1093-1102, 2012.

GREGO, C R; ESPERANZA, E. A; RODRIGUES, G. C; JUNIOR, A. L; VENDRUSCULO, L. G; RODRIGUES, C. A. G; YNAMASU, L. Y; RABELO, L. M; JORGE, L.A.C; ZOLIN, C.A; SANTOS, J. C.F; RONQUIM, C.C. Tecnologias desenvolvidas em Agricultura de Precisão. **Embrapa**, 2020.

GUIMARÃES, E. V; SILVA, B. M; BATISTA, A. M; MELO, M. L.A; ARAÚJO, G. S. S; MOURA, M. S; MOTA, P. K; BORGHI, E. Resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico em fase inicial de estabelecimento de sistemas intensivos de cultivo de grãos. **Congresso nacional de milho e sorgo**. Bento Gonçalves, 2016.

Golden Software. Surfer v.11. Surface Mapping System, Colorado, 2012.
HANKE, D.; MACHADO, M. S; NASCIMENTO, S. G. S; ÁVILA, M. R; PILLON, C. N. Produção de soja sob plantio direto e convencional: análise de atributos químicos e físicos do solo. **Revista cultura agronômica**. v.31, n.2, p.64-76, 2022.

JOHNSON. C. K. *et al.* Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. **Soil Science Society of America Journal**. V. 65. P. 1829-1837, 2001.

KOLMOGOROV-SMIRNOV, A. N. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. **Giornale dell'Istituto degli Attuari**, Roma, v. 4, p. 83-91, 1933.

LEPSCH, I. F. 19 Lições de pedologia. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2011. 456p.

LIBRELOTTO, G. S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em área de sucessão soja-milheto em Buriti-MA. **Trabalho de conclusão de curso**. Buriti, 2022.

LIMA, C. L. R; REINERT, D.J; REICHERT, J.M; SUZUKI, L.E.A.S. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 45, p. 89-98, 2010.

MACHADO, P.L.O. A; BERNARDI, A.C.C; VALENCIA, L.I.O; MOLIN, J.P; GIMENEZ, L; SILVA, C.A; ANDRADE, A.G; MADARE, B.E; MEIRELES, M.S.P. Mapeamento da condutividade elétrica do solo e relação com os teores de argila de um latossolo vermelho sob plantio direto de grãos no Paraná. **ConBAP**. Piracicaba, 2004.

MAICÁ, V. H. F. Atributos físicos hídricos do solo no estudo da espacialização da produtividade da soja. 2023. **Trabalho de conclusão de curso**. Uberlândia, 2023.

MANDARINO, A. P; CREMON, C; MAPELI, M.C; SILVA, G.F; SILVA, A.N; FREITAS, S.E. Dinâmica da resistência do solo à penetração sob influência de soluções homeopáticas na cultura do milho. **Congresso brasileiro de ciência do solo**. Natal, 2015.

MANTOVANI, E. C; MIRANDA, R. A; LANDAU, E. C; PASSOS, A. M. A. Agricultura de precisão no contexto do sistema de produção: lucratividade e sustentabilidade. **EMBRAPA**, 2020.

MARTINS, M. L. Variabilidade espacial da produtividade do feijão-caupi, de atributos químicos e da resistência do solo à penetração. **Dissertação**. Mossoró, 2017.

MION, R. L.; NASCIEMNTO, E.M.S; SALES, F.A.L; SILVA, F.S; DUARTE, J.M.L; SOUSA, B.M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6, p. 2057-2066, 2012.

MIOTTI, A. A; COSTA, M. C. G; FERREIRA, T.O; ROMERO, R. E. Profundidade e atributos físicos do solo e seus impactos nas raízes de bananeiras. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, p. 536-545, 2013.

MODOLO, A. J; FERNANDES, H. C; SCHAEFER, C. E. G; SILVEIRA, J. C. M. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1259-1265, 2008.

MOLIN, J. P. GIMENEZ, M.L. PAULLETI, V. SCHMIDHALTER, U; HAMMER, J. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 420-426, 2005.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 90-101, 2011.

MONTANARI, R. PANACHUKI, E; LOVERA, L. H; CORREA, A. R; OLIVEIRA, I. R; QUEIROZ, H. A; TOMAZ, P. K. Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono Cerrado-Pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 385-396, 2015.

NELSON, K. A.; MOTAVALLI, P. P.; NATHAN, M. Response of No-Till Soybean [(L.) Merr.] to Timing of Preplant and Foliar Potassium Applications in a Claypan Soil. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 03, p. 832838, 2005.

NETO, J.M.M. Estatística multivariada: uma visão didática-metodológica. **Revista Crítica na rede, Filosofia da ciência**, v. 9, 2015.

PACHECO FILHO, Valber Ericeira. Análise multivariada da resistência do solo à penetração em solos coesos na cultura da soja em Buriti - MA. **Trabalho de conclusão de curso**. 2017.

PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço hídrico e classificação climática para uma determinada região de Chapadinha-MA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 4, p. 758-766, 2016.

PEREIRA, D. P; VIEIRA, E. H.F; FARIA, D. J. D; OLIVEIRA, L. S; PRADO, M. C. Variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo em área de integração lavoura pecuária FLORESTA. **Anais do Seminário de Pesquisa e Inovação Tecnológica-SEPIT**, 2018.

- POLLNOW, H. E; PIMENTEL, J. R; TROYJACK, C; PEDRO, M; MEDEIROS, L. B; PEDRO, M; AUMONDE, T. Z; PEDRO, T. Manejo da adubação de base em soja no Noroeste do Rio Grande do Sul. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 38913-38923, 2020.
- DE QUEIROZ, G, C. M; SILVA, F. W. A; PORTELA, J. C; OLIVEIRA, G. N. S; SANTOS, M. V. Densidade e resistência do solo à penetração de raízes em agroecossistemas no semiárido brasileiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 4, p. 497-505, 2019.
- RALISCH, R; MIRANDA, T.M; OKUMURA, R.S; BARBOSA, G. M .C; GUIMARÃES, M. F; SCOPEL, E; BALBINO, L. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 381-384, 2008.
- RIBEIRO, M. Relação entre a condutividade elétrica e o desempenho de sementes de soja em campo. **Trabalho de conclusão de curso**. Urutaí, 2022.
- RICHART, A; FILHO, J.T; BRITO, O. R; LANILLO, R. F; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-343, 2005.
- RIGON, E; AMADO, T.J.C; POTT, L.P; BUHSE, A.K; PEDRON, V. Estudo de correlações de atributos químicos e físicos do solo com a produtividade de milho e soja no município de cachoeira do sul-rs. **LIVRO DIGITAL**, p. 64. 2019.
- RODRIGUES, K. M. Variabilidade Espacial de Atributos Químicos, Físicos e Biológicos em Voçoroca Revegetada no Município de Pinheiral-RJ. **Dissertação**. Rio de Janeiro, 2010.
- RODRIGUES, M. S; RAMOS, R.R.D; AZEVEDO, T.P; FILHO, A.P.P; OLIVEIRA, L.G. Variabilidade espacial da resistência à penetração do solo em área de capineira irrigada no semiárido. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 10, n. 1, p. 161-166, 2014.
- SANTOS, F. F. L. Condutividade elétrica aparente do solo determinada pelo método da resistividade utilizando diferentes frequências. **Dissertação**. Viçosa, 2020.
- SANTOS, E. S. dos; GUERRA FILHO, P. A.; OLIVEIRA, S. S. de; SILVA, B. dos S.; VERAS, A. E. S.; SOUZA, D. A. de. Interannual rainfall variability and soybean yields in Mata Roma municipality, Maranhão. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG, [S. l.]**, v. 31, n. Contínua, p. 19–30, 2023. DOI: 10.13083/reveng.v30i1.14276. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/14276>. Acesso em: 14 jul. 2024.
- SCHONS, C. L. Mapeamento da compactação em área irrigada de grãos e sua correlação com condutividade elétrica do solo e produtividade da soja. **Dissertação**. Santa Maria, 2014.
- SERAFIM, M. E; ONO, F. B; ZEVIANE, W. M; NOVELINO, J. O; SILVA, J.V. Umidade do solo e doses de potássio na cultura da soja. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 222-227, 2012.

SILVA, A. L.; MARIANO, D. C.; EBLING, A.A.; NETO, C. F. O.; VIÉGAS, I. J. M.; OKUMURA, R. S. Geoestatística para o mapeamento da variabilidade espacial de atributos do solo em sistemas de manejo do solo na Amazônia brasileira. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 1, p. 1-16, 2023.

SILVA, S.; NEVES, E. Importância do manejo da irrigação. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, v. 17, n. 34, 2020.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. The ASSISTAT software version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**. 2016; v. 11,n. 39, p. 3733-40, 2016.

STOLF, R. **Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força/unidade de área**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19, 1990, Piracicaba. **Anais...** v. 2, p. 823-836.

STOLF, R. **Operação do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR., 1984. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n.2).

STOLF, R. **Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação de dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 15, n. 3, p. 229-35, 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar – Stolf**. São Paulo: MIC/IAA/PNMCA – Planalsucar, 1983. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto – Boletim, 1)

STOLF, R.; THURLER, A. M.; BACCHI, O. O.S.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. 2011, vol.35, n.2, pp.447-459.

SURFER. Surfer 11.0. **Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers**: New York, Golden Software Inc., 2012.

TABALDI, F. M. Uso de sensor de vegetação para avaliação da nutrição nitrogenada na cultura do algodoeiro e sensor de solo no estudo da condutividade elétrica na cultura do milho. **Dissertação**. Santa Maria, 2013.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TER BRAAK, C. J. F.; P. SMILAUER. **CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)**. Ithaca, Microcomputer Power, 2002, 500p.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A.C; SANTOS, N. T; SANTOS, F. L. Relação entre condutividade elétrica aparente e propriedades do solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 683-690, 2012.

VIAN, A. L.; SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J.M. Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Ciência Rural**, v. 46, p. 464-471, 2016.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1-53, 2000.

WESTPHALEN, M. F. Condutividade elétrica aparente do solo em áreas agrícolas brasileiras. **Dissertação**. Piracicaba, 2022.

ZONTA, J. H.; BRANDÃO, Z.N.; MEDEIROS, J. C.; SANA, R. S.; SOFIATTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 595-602, 2014.