

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DA SOJA E  
SUA CORRELAÇÃO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS E TEXTURA  
DO SOLO**

**KARINI APARECIDA DE MATOS INACIO**

**DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2023**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DA SOJA E SUA  
CORRELAÇÃO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS E TEXTURA DO SOLO**

**KARINI APARECIDA DE MATOS INACIO**

Engenheira Agrônoma

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez

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

Dourados  
Mato Grosso do Sul  
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

I35v Inacio, Karini Aparecida De Matos

VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DA SOJA E SUA CORRELAÇÃO  
COM ATRIBUTOS QUÍMICOS E TEXTURA DO SOLO [recurso eletrônico] / Karini Aparecida  
De Matos Inacio. -- 2023.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Jorge Wilson Cortez.

Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

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

1. Agricultura de precisão. 2. Geoestatística. 3. Glycine Max.. 4. Solos. I. Cortez, Prof<sup>o</sup>. Dr.  
Jorge Wilson. II. Título.

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

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

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DA SOJA E SUA  
CORRELAÇÃO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS E TEXTURA DO SOLO**

por

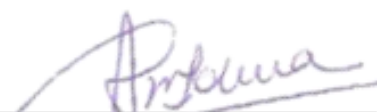
**KARINI APARECIDA DE MATOS INACIO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título  
de MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovado em 17/02/2023



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



Prof. Dr. Alessandra Mayumi Tokura Alovise  
UFGD/FCA



Prof. Dr. Eber Augusto Ferreira do Prado  
IFMS – Ponta Porã

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela minha vida e por todas as pessoas que fazem parte dela.

Aos meus pais José Oliveira Inácio e Celina Bitencourt de Matos Inácio, por desde criança me incentivarem a estudar e ir atrás dos meus objetivos sempre com humildade e fé.

Aos meus irmãos Katia de Matos Inácio e Jeferson de Matos Inácio, por me apoiarem em todas minhas escolhas e estarem juntos em todos os momentos.

Ao meu esposo Eng. Agrônomo Bruno Souza Martins, por todo amor, carinho, parceria, incentivo, paciência e ajuda durante todo o trabalho.

À empresa Incampo Produtos Agropecuários por ceder a área experimental e os insumos para realização do trabalho a campo.

À UFGD e seus colaboradores pela oportunidade de cursar a pós-graduação de forma gratuita, com boa infraestrutura e excelente corpo docente.

Ao Dr. Jorge Wilson Cortez pela orientação durante todo o curso, principalmente na elaboração e execução da dissertação.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudos.

## **BIOGRAFIA DO AUTOR**

KARINI APARECIDA DE MATOS INACIO, nascida em 26 de agosto de 1996 e criada no sítio da família, onde predomina a pecuária leiteira no Município de Nova Andradina/MS. Cursou o ensino fundamental na Escola Municipal Machado de Assis-Pólo (2003-2010). O ensino médio foi integrado ao Técnico em Agropecuária pelo Instituto Federal de Mato Grosso do Sul- IFMS, campus de Nova Andradina (2011-2014). Também, pelo IFMS cursou o Bacharelado em Agronomia (2015-2020), onde participou de projetos de pesquisa e apresentou trabalhos na área de solos. Trabalhou como Engenheira Agrônoma com vendas agropecuárias e atendimento a produtores rurais em Nova Andradina e atualmente cursa pós-graduação na Universidade Federal da Grande Dourados-UFGD, almejando o título de Mestre em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal com ênfase em Agricultura de Precisão.

# SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	9
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	9
2.1 Cultura da soja.....	9
2.2 Agricultura de precisão e mapas de produtividade .....	10
2.3 Textura e atributos químicos do solo .....	11
2.4 Índices de vegetação .....	13
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1 Localização e caracterização da área .....	15
3.2 Esquema amostral .....	17
3.3 Implantação e condução do experimento.....	17
3.4 Avaliações .....	18
3.4.1 Granulometria e atributos químicos do solo.....	18
3.4.2 Índices de vegetação .....	19
3.4.3 Produtividade de grãos.....	20
3.5 Análise dos dados.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	22
4.1 Granulometria e atributos químicos do solo .....	22
4.2 Índices de Vegetação.....	30
4.3 Produtividade de Grãos .....	33
4.4 Matriz de Correlação.....	35
5 CONCLUSÕES .....	38
6 REFERÊNCIAS .....	39

INACIO, K. A. M. **Variabilidade espacial da produtividade da soja e sua correlação com atributos químicos e textura do solo.** 44 f. 2023. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

## RESUMO

Sendo o Brasil o maior produtor mundial de soja (*Glycine Max L.*), as pesquisas com esta cultura crescem, assim como sua área plantada. Buscando a intensificação da produção, a agricultura de precisão tem contribuído para melhorar a gestão das propriedades agrícolas e aumentar a produtividade. Objetivou-se com este trabalho avaliar a variabilidade espacial da produtividade da soja e sua correlação com atributos químicos e textura do solo. O experimento foi desenvolvido em área comercial localizada no Município de Nova Andradina/MS. A grade amostral foi de 1 ponto para cada 2,9 hectares com mais 30% de pontos adicionais, totalizando 102 pontos. A coleta das amostras de solo foi realizada na camada de 0,00 - 0,20 m. Foram analisados: granulometria, atributos químicos do solo, índices de vegetação e produtividade. Os dados obtidos foram interpolados utilizando a krigagem ordinária no programa Qgis para gerar os mapas de variabilidade espacial de cada atributo. Todos os atributos foram correlacionados com a produtividade. Observou-se que a textura e os atributos químicos estão presentes de forma heterogênea no solo e devem ser manejados como tal. Os mapas de recomendação de calagem e adubação em taxa variada permitem aplicar os insumos de maneira mais eficaz. Os índices de vegetação NDVI e NDRE demonstram os locais de possíveis perdas de produtividade. A correlação positiva entre areia e produtividade demonstrou que solos com maiores concentrações de areia podem atingir boas produtividades.

**Palavras-chave:** Agricultura de precisão. Geoestatística. *Glycine Max*. Solos.



INACIO, K. A. M. **Spatial variability of soybean yield and its correlation with chemical attributes and soil texture.** 44 f. 2023. Dissertation (MSc in Agronomic Engineering), Federal University of Grande Dourados, Dourados-MS.

### ABSTRACT

As Brazil is the world's largest producer of soy (*Glycine Max L.*), research on this crop is growing, as is its planted area. Seeking to intensify production, precision agriculture has contributed to improving the management of agricultural properties and increasing productivity. The objective of this work was to evaluate the spatial variability of soybean productivity and its correlation with chemical attributes and soil texture. The experiment was carried out in a commercial area located in the municipality of Nova Andradina/MS. The sampling grid was 1 point for every 2.9 hectares with 30% additional points, totaling 102 points. The collection of soil samples was carried out in the 0.00 - 0.20 m layer. The following were analyzed: granulometry, soil chemical attributes, vegetation and productivity indices. The data obtained were interpolated using ordinary kriging in the Qgis program to generate spatial variability maps for each attribute. All attributes were correlated with productivity. It was observed that texture and chemical attributes are heterogeneously present in the soil and should be managed as such. The liming and fertilization recommendation maps at varying rates allow you to apply inputs more effectively. The NDVI and NDRE vegetation indices demonstrate the locations of possible productivity losses. The positive correlation between sand and productivity demonstrated that soils with higher concentrations of sand can achieve good productivity.

**Keywords:** Precision agriculture. Geostatistics. *Glycine Max.* Soils.

## 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max L.*) é uma das culturas de grãos mais cultivadas no Brasil, que se tornou o maior produtor mundial em 2021. O país cresceu tanto em área plantada, quanto em produção, com 38,5 milhões de hectares plantados e 136 milhões de toneladas na safra 2020/21. O estado de Mato Grosso do Sul acompanhou o aumento e totalizou 11,4 milhões de toneladas do grão (CONAB, 2021).

Dentro do Estado do Mato Grosso do Sul, Nova Andradina é um dos municípios que mais expandiu sua área de produção, nos últimos cinco anos migrou da pecuária de corte para a produção de grãos, principalmente soja e milho. De acordo com o levantamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Município passou de 12 mil hectares semeados em 2015 para 38,6 mil hectares na safra 2021/22, atingindo produção total de 140 mil toneladas de soja (IBGE, 2023).

Apesar do recorde de produção alcançado pelo país, pode-se melhorar ainda mais a produtividade das lavouras. Para tal, é preciso que as propriedades rurais possuam um sistema de gerenciamento de suas áreas que permite identificar eventuais problemas e direcionar o manejo. Deste modo, a agricultura de precisão (AP) se apresenta como um conjunto de tecnologias e ferramentas que promovem melhorias na gestão, pois leva em consideração a variabilidade espacial da lavoura no tempo e no espaço.

O ponto de partida para identificar a variabilidade é a coleta de dados, que pode ser realizada a partir de análises de solo georreferenciadas, imagens de satélite, sensoriamento remoto e mapas de produtividade. Esses dados são manuseados em softwares desenvolvidos especificamente para a AP com programas que usam o método de interpolação de dados.

O interpolador é escolhido ao proporcionar menor erro amostral e as melhores estimativas dos parâmetros. Os interpoladores mais utilizados na agricultura são o Inverso da Distância ao Quadrado (IDW) que se baseia nos valores dos pontos vizinhos e a Krigagem que considera a dependência espacial entre os pontos.

Desta forma, com a Krigagem é possível construir o semivariograma da amostra, ou seja, gerar o gráfico que demonstra o comportamento destes dados, permitindo quantificar a variação e os valores do Patamar (quando o semivariograma se estabiliza), do Alcance (região espacial onde a variável é auto correlacionada

definindo sua dependência), e do Efeito Pepita (diferença no início do semivariograma que revela a descontinuidade para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras) (MOLIN, 2015).

Após a interpolação dos dados, a interpretação dos resultados é parte fundamental da AP, pois identifica a fonte da variação e direciona a tomada de decisão. Porém, pode ser que o problema seja decorrente de fatores abióticos, como o clima, ou características de formação do solo, como a textura e a disponibilidade de nutrientes.

No Brasil, por predominar os Latossolos e os Argissolos que são solos profundos, altamente intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade natural e, muitas vezes, com alta saturação por alumínio (SANTOS et al., 2018), a agricultura se utiliza da aplicação de insumos, como fertilizantes e corretivos para atender às exigências nutricionais das culturas. Então, é preciso que o manejo seja realizado levando em consideração as limitações existentes na área.

Portanto, é preciso que pesquisas sejam feitas para demonstrar que é possível aumentar a produtividade das lavouras utilizando as ferramentas e tecnologias disponibilizadas pela agricultura de precisão. Desta forma, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial da produtividade da soja e sua correlação com atributos químicos e textura do solo. Especificamente:

- Elaborar mapas de variabilidade espacial da textura e dos atributos químicos do solo, índices de vegetação (NDVI e NDRE) e produtividade;
- Elaborar mapas de recomendação de calagem, adubação fosfatada e potássica;
- Correlacionar textura do solo e produtividade, atributos químicos do solo e produtividade, índices de vegetação e produtividade.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Cultura da soja**

O primeiro registro da cultura da soja é de plantas rasteiras que surgiram ao longo do rio Yangtzé, na China. Entre 2883 e 2838 a.C, cientistas chineses começaram a seleção de plantas e apenas no século XV a soja chegou à Europa e no século XX aos Estados Unidos (GAZZONI e DALL'AGNOL, 2018). No Brasil, foi introduzida em 1880 na Bahia e 1890 em São Paulo, sendo que o primeiro cultivo comercial ocorreu em 1914 no Rio Grande do Sul com espécie importada dos Estados Unidos.

Os estudos foram aumentando, desenvolvendo assim, materiais genéticos adaptados as condições climáticas tropicais, que possibilitou o cultivo da soja na região Centro-Oeste do Brasil nos anos 1980. Logo, a região se tornou a maior produtora de soja do país, responsável por 45% da produção nacional em 2020/21 (CONAB, 2021).

Botanicamente, a soja pertencente à família Fabaceae, é uma planta herbácea com caule híspido, raiz pivotante, folhas trifolioladas (exceto o primeiro par de folhas simples). Têm flores de fecundação autógama, desenvolvem vagens (legumes) levemente arqueadas que podem conter de uma a cinco sementes. É uma cultura anual que pode apresentar crescimento indeterminado, determinado ou semideterminado (NEPOMUCENO et al., 2008).

Possui ciclo de 120 dias dependendo da cultivar, dividido em fases fenológicas descritas por Fehr e Caviness (1977), sendo V para vegetativo e R para reprodutivo. A fase vegetativa compreende a emergência (VE), estágio cotiledonar (VC) e número de folhas completamente desenvolvidas (VN). O reprodutivo, começa no florescimento (R1), florescimento pleno (R2), início da formação de legumes (R3), plena formação de legumes (R4), início do desenvolvimento de grãos (R5), grão cheio ou completo (R6), início da maturação (R7) e maturidade de colheita (R8).

Os fatores climáticos influenciam diretamente no desenvolvimento da cultura e na produtividade. As chuvas ou a irrigação é um dos principais, visto que, a soja possui em torno de 90% de água em sua constituição e é muito sensível ao déficit de água na semeadura, floração e enchimento de grãos (TAIZ e ZEIGER, 2013). De acordo com Tagliapietra et al., (2021), a demanda hídrica aumenta com o aumento da duração do

ciclo de desenvolvimento, sendo que cultivares com grupo de maturação menor ou igual à 5.5 é de 765 mm, entre 5.6 e 6.4 é de 830 mm e acima de 6.5 é de 875 mm.

A temperatura também influencia os estágios de desenvolvimento da soja, pois atua como catalisador ou desacelerador de processos metabólicos como a germinação, floração, fotossíntese, respiração e transpiração. Para a soja a temperatura do ar considerada ótima para o desenvolvimento é de 31,5°C (TAGLIAPIETRA et. al, 2022).

Os grãos de soja são ricos em proteínas, podendo apresentar de 36% até 45% de proteína dependendo da variedade. Isso fez com que a soja se tornasse a base da alimentação animal, sendo utilizada na fabricação de rações. Também, dos seus grãos é extraído o óleo amplamente utilizado na indústria para fabricação de diversos produtos como cosméticos, fármacos, sorvetes e margarinas (CÂMARA, 2015).

Dada a importância comercial do complexo da soja (grãos, óleo e farelo), as propriedades agrícolas brasileiras se transformaram em grandes empreendimentos financeiros. Nesse sentido, destaca-se o aumento na eficiência do uso da terra e na utilização das tecnologias disponíveis no mercado, para manter a sustentabilidade do empreendimento.

## **2.2 Agricultura de precisão e mapas de produtividade**

Ao longo dos anos a agricultura foi se aprimorando por meio do surgimento de novas técnicas, ferramentas, métodos e tecnologias para facilitar os processos produtivos, assim como, aumentar a produtividade das áreas e garantir o uso sustentável dos recursos naturais disponíveis.

Dessa maneira, surgiu a agricultura de precisão (AP), definida em 2019 pela Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão como “uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa dados temporais, individuais e espaciais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gestão de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agropecuária” (ISPA, 2019).

A AP é realizada em etapas, sendo a primeira a coleta de dados utilizando sensoriamento remoto, amostragem de solo e planta. A segunda etapa é o processamento destes dados por meio do processamento de imagens, análise, filtragem e softwares específicos. Logo, a interpretação dos dados e a tomada de decisão por especialistas na

área, recomendando as aplicações, seja de corretivos, fertilizantes e defensivos (PUSH et al., 2019). Estas aplicações podem ser realizadas por meio do tratamento localizado ou aplicações em taxas variadas, isto é, os insumos são aplicados no solo levando em consideração a demanda de cada porção da lavoura.

Para essa finalidade, é imprescindível dispor-se de máquinas agrícolas com capacidade de aplicação em taxa variada, para conforme a máquina se deslocar na lavoura, acontecer as alterações nos mecanismos dosadores e modificar as dosagens aplicadas (WERNER et al., 2007).

Outra ferramenta da AP são os mapas de produtividade, usados para avaliar os dados de produtividade das lavouras em cada ponto da área georreferenciada, visto que a quantidade de grãos de cada área é medida pelo monitor de colheita. Empregado nas colhedoras, o monitor possui sensores gravimétricos de fluxo de massa, velocidade da roda, umidade, posição da plataforma e de rotação do elevador de grãos. A leitura desses sensores ocorre durante todo o tempo em que a máquina está com a plataforma abaixada, resultando em grande quantidade de dados, que antes de serem transformados em mapas devem passar por filtragem para retirada dos erros (MOLIN, 2015).

Por fim, utilizando softwares específicos, é possível elaborar mapas de distribuição espacial de diversas características do solo, como a textura e os atributos químicos.

### **2.3 Textura e atributos químicos do solo**

Os atributos físicos, químicos e biológicos do solo são estudados por meio da fertilidade do solo e são importantes para o estudo e aplicação da Agricultura de Precisão, devendo sempre serem analisados em conjunto. Dentre eles, os atributos físicos, que compreendem a cor, textura, estrutura, densidade do solo, resistência à penetração, capacidade de água disponível e percolação da água, influenciam na produtividade das lavouras.

De acordo com a proporção entre as partículas de areia, silte e argila formam-se os diferentes grupos texturais, sendo: textura arenosa – teor de areia menos o teor de argila > 700 g kg<sup>-1</sup>; textura média – material com menos de 350 g kg<sup>-1</sup> de argila e mais de 150 g kg<sup>-1</sup> de areia; textura argilosa – material com argila entre 350 e 600 g kg<sup>-1</sup>; textura

muito argilosa – conteúdo de argila superior a  $600 \text{ g kg}^{-1}$ ; textura siltosa – material com menos de  $350 \text{ g kg}^{-1}$  de argila e menos de  $150 \text{ g kg}^{-1}$  de areia (SANTOS et al., 2018).

Para realizar a classificação da textura de um solo é necessário fazer a análise granulométrica, que consiste na amostragem, coleta e avaliação em laboratório do tamanho das partículas existentes. A areia possui partículas de diâmetro 0,05 mm a 2 mm; partículas de 0,05 mm a 0,002 mm são classificadas como silte, e, partículas menores que 0,002 mm de diâmetro são de argila (ALMEIDA, 2005).

É importante conhecer a classe textural do solo para planejar o manejo, pois, o arranjo das partículas influencia na infiltração e capacidade de retenção de água, na aeração e na coesão e adesão das partículas (ANDRADE, 2020).

Já, os atributos químicos do solo, compreendem os elementos químicos da tabela periódica, sendo alguns tóxicos para as plantas, outros benéficos e os considerados essenciais. Para que seja classificado como essencial, a ausência do elemento impede que a planta complete seu ciclo, também sua deficiência é específica, podendo ser corrigida somente mediante seu fornecimento e o elemento deve estar diretamente envolvido na nutrição da planta (ARNON e STOUT, 1939).

Carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H) são elementos essenciais para as plantas provenientes do ar atmosférico e da água. Também, são essenciais os macronutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e enxofre (S). Os micronutrientes também são essenciais, porém, exigidos em menores quantidades: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn) (MALAVOLTA, 2006).

Cobalto (Co), sódio (Na), selênio (Se) e silício (Si) são considerados benéficos para algumas plantas. Os elementos benéficos para as plantas vêm de estudos mais recentes que demonstram que sob determinadas condições, para algumas espécies ou grupos de plantas, estes elementos proporcionam e estimulam o crescimento ou até mesmo ajudam a suportar estresses.

Deste modo, é importante conhecer a dinâmica dos elementos, o destino dos fertilizantes utilizados e a nutrição das plantas, visto que, as plantas compõem o sistema e são usuárias dos recursos naturais e químicos adicionados ao solo e que a partir destes respondem com a produtividade (REETZ, 2017).

## 2.4 Índices de vegetação

O sensoriamento remoto começou a ser usado no Brasil por volta dos anos 40, através do projeto RADAMBRASIL, que obteve imagens áreas para fazer a representação da cobertura vegetal de todo o país. A partir dos anos 90 passou a ser utilizado na agricultura, como uma ferramenta para avaliação das plantas de acordo com sua atividade fotossintética, índice de área foliar (IAF) e biomassa (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

As plantas apresentam diferentes níveis de atividade fotossintética durante o seu desenvolvimento, sendo valores maiores para a fase vegetativa e menores quando próximos da maturação fisiológica. Sabendo disso, é possível monitorar grandes lavouras de maneira mais eficaz utilizando as imagens de satélite para o cálculo do índice de vegetação destas áreas. As culturas também se comportam de maneira diferente sob diversas condições de solo e clima (LUCIANO et al., 2018).

Índice de vegetação é um modelo matemático criado para aferir a cobertura vegetal e associa a assinatura espectral e os parâmetros mensuráveis no campo tanto quantitativamente quanto qualitativamente (BARBOSA, 2006). São utilizados para realçar as diferenças espectrais de um par de bandas, na maioria das vezes, nas faixas do vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético.

Existem diversos tipos de índices, sendo os mais utilizados na agricultura o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Diferença Normalizada na Banda de Borda Vermelha (NDRE) que permitem avaliar o desenvolvimento da lavoura e identificar problemas de deficiência de nutrientes, estresse hídrico, pragas e doenças (DUAN et al. 2017).

Os dois basicamente possuem a mesma equação de normalização, sendo para o NDVI ( $Nir-Red/Nir+Red$ ) e para o NDRE ( $Nir-RedEdge/Nir+RedEdge$ ). Ou seja, o NDVI é calculado a partir das refletâncias do Nir (Banda infravermelho próximo) e do Red (Banda infravermelho), enquanto o NDRE utiliza as bandas Red Edge (Banda borda do vermelho) e Nir (Banda infravermelho próximo).

Os valores de NDVI e NDRE variam em uma escala de -1 a 1, sendo que quanto maior o seu valor, maiores são as diferenças entre a reflectância do Nir com o Red para NDVI e RedEdge para NDRE, o que indica maior quantidade de clorofila e vigor de



desenvolvimento e, conseqüentemente, maior o potencial produtivo das plantas (RISSINI et al., 2015).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização da área

O experimento foi desenvolvido em área comercial de 230 hectares, localizada na latitude  $22^{\circ}3'7.37''$  Sul e longitude de  $53^{\circ}36'30.32''$  Oeste, no município de Nova Andradina, no estado do Mato Grosso do Sul, região Centro-Oeste do Brasil (Figura 1).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen é Aw (tropical com inverno seco). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (SANTOS et al., 2018). A área experimental encontra-se em altitude de 270 a 350 metros (Figura 2).

A fazenda era explorada predominantemente para pecuária extensiva de corte até o ano de 2018, quando foi arrendada para o cultivo de grãos. Os dados coletados referem-se à terceira safra de soja da propriedade.

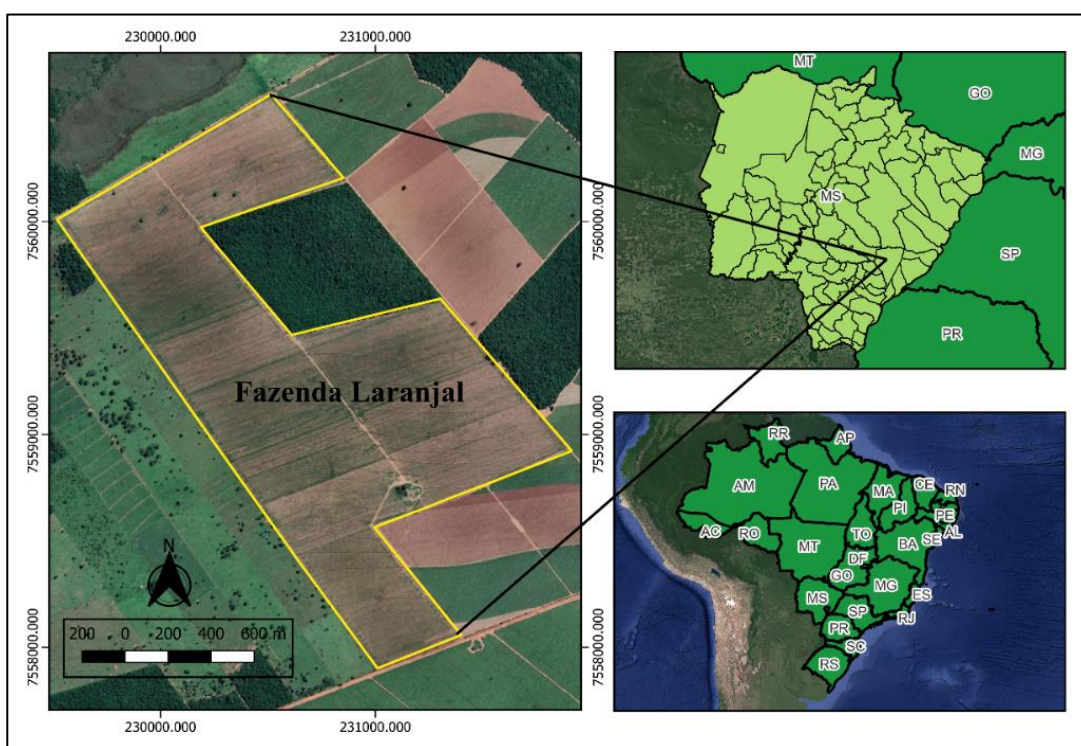


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

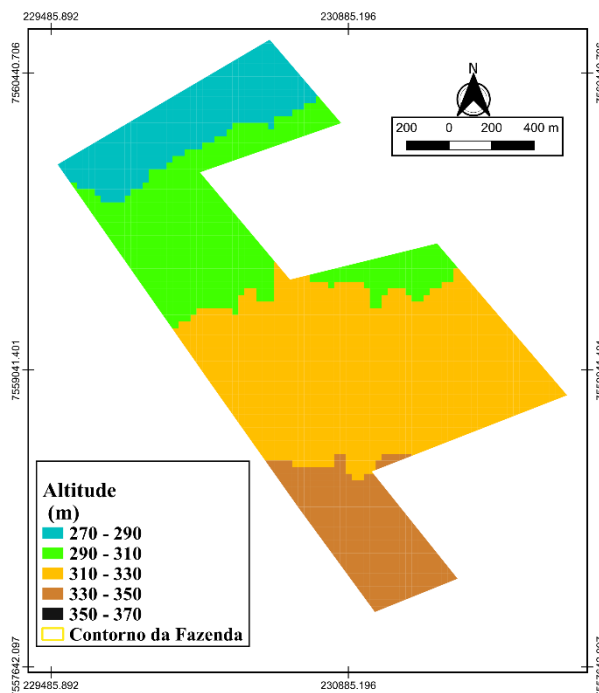


Figura 2. Mapa de altitude da área experimental.

Os dados meteorológicos do período em que o experimento esteve a campo (novembro de 2021 a março de 2022) foram coletados pela estação meteorológica automática localizada no Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS) campus de Nova Andradina e seguem apresentados na Figura 3.

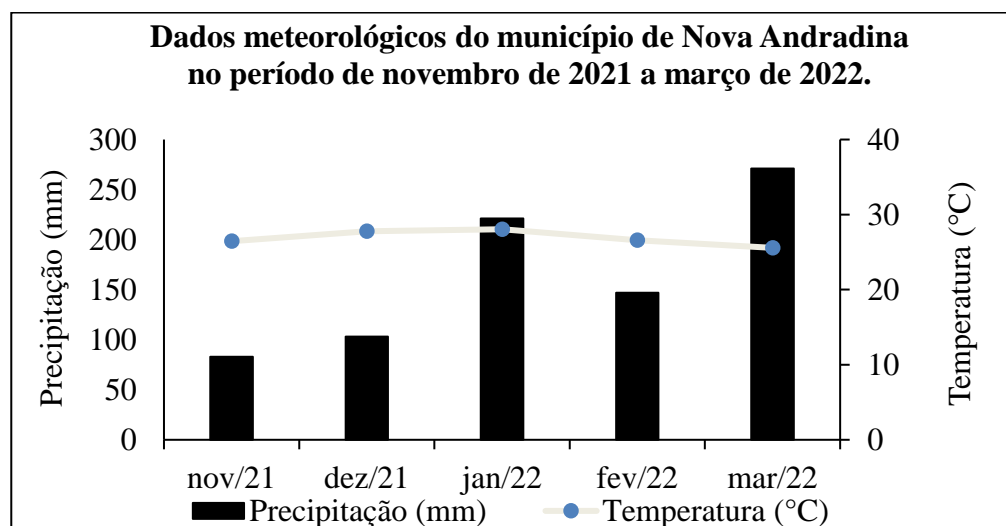


Figura 3. Dados meteorológicos do município de Nova Andradina.  
Fonte: <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/INOVAA1>

### 3.2 Esquema amostral

A grade amostral foi de 1 ponto para cada 2,9 hectares, sendo assim, 79 pontos (Figura 4). Para uma melhor estimativa, mais 30% de pontos, ou seja, mais 23 pontos foram adicionados, de acordo com o índice de vegetação da cultura antecessora (milho), totalizando 102 pontos de coleta.

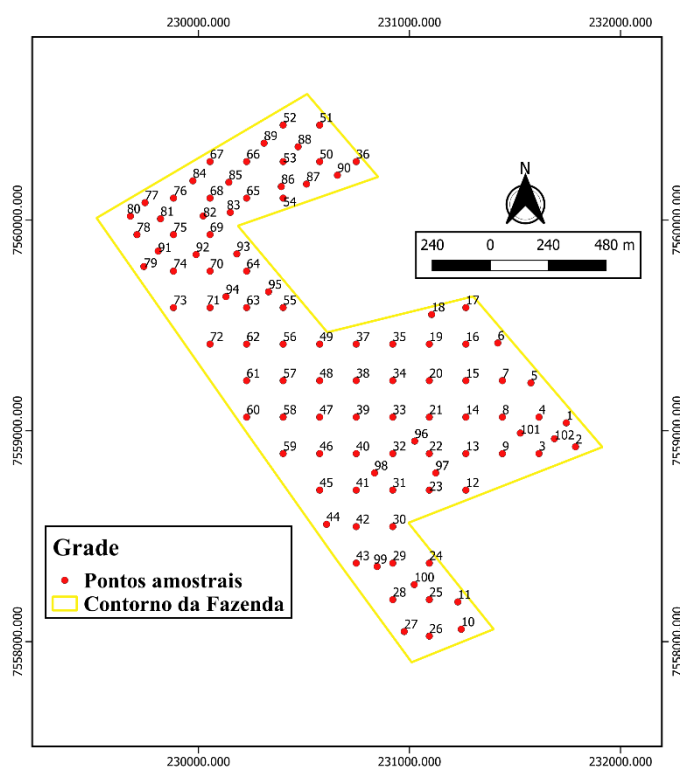


Figura 4. Grade amostral do experimento.

### 3.3 Implantação e condução do experimento

Análise de solo da área na camada de 0-0,20 m de profundidade foi realizada no dia 19 de setembro de 2021. De acordo com os resultados da análise e utilizando o método de saturação por bases para o cálculo, foi feita a recomendação de calagem para a área, que foi realizada com o distribuidor de calcário John Deere DN1006, no dia 30 de setembro de 2021, em taxa variável seguindo o mapa de recomendação (ver item 4.1).

Em seguida, no dia 06 de outubro de 2021, foi realizada a dessecação da área, utilizando o pulverizador autopropelido Jacto modelo Uniport 3030, e os herbicidas com

os princípios ativos Diquate ( $2,0 \text{ l ha}^{-1}$ ), 2,4-D ( $1,25 \text{ l ha}^{-1}$ ) e Cletodim ( $0,80 \text{ l ha}^{-1}$ ) mais adjuvantes Ultra Fix ( $0,035 \text{ l ha}^{-1}$ ) e Crop Oil ( $0,200 \text{ l ha}^{-1}$ ).

Após a dessecação da área, a cultura da soja foi semeada nos dias 04 e 05 de novembro de 2021, utilizando a semeadora John Deere 1107 acoplada ao trator John Deere 7230J. A variedade semeada foi a MONSOY 6410, que possui ciclo precoce (100-110 dias), flor roxa, hábito de crescimento indeterminado, resistente ao acamamento e alto potencial produtivo.

As sementes foram previamente tratadas com inseticida Fipronil, fungicida Fludioxonil, fertilizantes cobalto e molibdênio e inoculadas com duas doses de *Bradyrhizobium japonicum*. Foram distribuídas a 3 cm de profundidade, espaçamento de 0,50 m entrelinhas, contendo 15 sementes por metro. Para adubação utilizou-se  $350 \text{ kg ha}^{-1}$  do formulado 04-30-10. O monitoramento da área foi realizado uma vez por semana, buscando identificar insetos-pragas, plantas daninhas e doenças na cultura.

Sendo assim, no dia 15 de dezembro de 2021 foi necessário fazer aplicação de herbicida Glifosato ( $1,66 \text{ l ha}^{-1}$ ), Cletodim ( $0,5 \text{ l ha}^{-1}$ ), Cloransulam-metílico ( $0,004 \text{ kg ha}^{-1}$ ), inseticida Lambda Cialotrina ( $0,105 \text{ l ha}^{-1}$ ), adjuvantes Ultra Fix ( $0,035 \text{ l ha}^{-1}$ ) e Crop Oil ( $0,200 \text{ l ha}^{-1}$ ). Aproveitando a pulverização, foram adicionados os fertilizantes foliares 10-08-08, cobalto e molibdênio.

Logo, adubação de cobertura com  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de cloreto de potássio foi aplicada no dia 22 de dezembro de 2021. A próxima aplicação foi realizada no dia 28 de janeiro de 2022, com inseticidas Lamba Cialotrina + Tiametoxan ( $0,200 \text{ l ha}^{-1}$ ) e adjuvante Ultra Fix ( $0,035 \text{ l ha}^{-1}$ ). A colheita ocorreu entre os dias 4, 5 e 6 de março de 2022 utilizando a colhedora John Deere S670.

### **3.4 Avaliações**

#### **3.4.1 Granulometria e atributos químicos do solo**

A coleta das amostras de solo foi realizada com o amostrador Saci Trail de comando automático, na camada de 0,00 - 0,20 m, formada por 6 subamostras, tomadas aleatoriamente ao redor de cada ponto amostral. As amostras foram enviadas a um laboratório particular para a análise de textura pelo método do Densímetro, utilizando como referência o Boletim Técnico 106, do Instituto Agronômico de Campinas (CAMARGO, 2009).

Os atributos químicos avaliados com foram: potencial hidrogeniônico (pH) com extrator  $\text{CaCl}_2$ ; teor de matéria orgânica (MO) pelo método colorimétrico; cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e alumínio (Al) trocáveis por ICP-OES, acidez potencial (H+Al) com (SMP), todos pelas metodologias descritas por Raij et al. (2001). Para o fósforo (P) disponível em Mehlich<sup>-1</sup>, seguiu a metodologia da EMBRAPA (2009) com o método ICP-OES.

Também, nos resultados enviados pelo laboratório, constavam: Soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC) e, saturação por bases (V%). A partir destes resultados, foi possível elaborar os mapas de distribuição espacial para textura e atributos químicos do solo no programa Qgis, utilizando os padrões de referências indicados por Souza e Lobato (2004) para a interpretação dos atributos químicos.

### **3.4.2 Índices de vegetação**

Para calcular os índices de vegetação, inicialmente foi preciso obter as imagens de satélite da área. Para isso, foi acessado o site Sentinel Hub (<https://www.sentinel-hub.com>) que disponibiliza imagens gratuitas dos satélites Sentinel e Landsat. Para baixá-las, foi necessário realizar um cadastro simples no site, preenchendo nome, e-mail e criando uma senha de login.

Foi preciso encontrar a área desejada, procurando no mapa ou adicionando o contorno existente. Em seguida, escolheu-se o satélite e o período que deseja ver as imagens. Neste trabalho, foi escolhido o Satélite Sentinel 2A por disponibilizar imagens corrigidas, que podem ser prontamente utilizadas no programa Qgis. O período foi entre novembro e dezembro de 2021, na qual a cultura da soja encontrava-se em estágio vegetativo.

O sentinel 2A gera imagens a cada 5 dias, então, as datas que possuíam imagem limpa da área, ou seja, sem nuvens para não interferir no cálculo, foram baixadas selecionando somente as bandas que seriam utilizadas nos cálculos de NDVI e NDRE. Nenhuma imagem de novembro foi selecionada, pois a soja estava no início do seu desenvolvimento. Já, para o mês de dezembro foi possível baixar as imagens dos dias 06, 11, 21 e 26, visto que não possuíam nuvens sobre a área.

Baixadas as imagens, descompactas as pastas, foi possível abri-las no Qgis para elaborar os mapas dos índices de vegetação, calculando o NDVI com a banda B4 Vermelho (Red) com comprimento de onda de 665 nm e a banda B8 referente ao Infravermelho Próximo (Nir) com 842 nm, na seguinte fórmula proposta por Rouse et al. (1973):

$$NDVI = (Nir - Red) / (Nir + Red)$$

Para o NDRE, utilizou-se as bandas B5 (RedEdge) com comprimento de onda 705 nm e a banda B8 Infravermelho Próximo (Nir) com 842 nm, na seguinte fórmula:

$$NDRE = (Nir - RedEdge) / (Nir + RedEdge)$$

### 3.4.3 Produtividade de grãos

Para a correta leitura dos dados de produtividade, foi feita a calibração da colhedora John Deere s670. O fundamental para a calibração do sensor de produtividade é a coleta e a pesagem de uma amostra de grãos para conferir se os dados apresentados pelo monitor estão corretos. A calibração também é feita nos sensores de fluxo de massa, de inclinação, de altura de plataforma e de umidade.

Depois de calibrada, foi realizada a colheita da soja entre os dias 04, 05 e 06 de março de 2022, sendo obtida a produtividade por meio do monitor de colheita que faz leituras da produtividade, umidade do grão, velocidade de deslocamento e altura de plataforma durante a colheita, por meio dos sensores instalados na colhedora.

Ao término da colheita, os dados foram importados do monitor, utilizando um pen drive, para o programa QGIS para filtragem dos dados e elaboração do mapa de produtividade. A filtragem é realizada para retirar os *outliers* que são dados muito discrepantes do conjunto, ou seja, dados muito baixos ou muito altos. Como por exemplo, os dados com valores 0 (zero) que são gerados quando a plataforma está abaixada fazendo leitura em locais que não tem grãos, como em curvas e manobras.

Após a filtragem dos dados, foi possível realizar a interpolação no Qgis por meio do Smart-Map que emprega a Krigagem Ordinária e elaborar o mapa de produtividade da área.

### 3.5 Análise dos dados

Os dados foram inicialmente submetidos à análise descritiva para obtenção dos valores de mínimo, máximo, média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose de cada atributo avaliado. Logo após, os dados foram analisados no programa Qgis, utilizando como interpolador a Krigagem Ordinária, por meio do complemento Smart-Map (PEREIRA et. al, 2022).

O Smart-Map permite importar apenas a coluna de dados dos atributos a serem interpolados, definir o contorno da área que está trabalhando, escolher o tamanho do pixel e ao interpolar, apresenta o gráfico do semivariograma. Assim, é possível ir alterando os modelos existentes (linear, linear com patamar, exponencial, esférico e gaussiano) e visualizar no gráfico como os dados se comportam.

Também, é capaz de modificar a distância e os valores do efeito pepita, alcance e patamar para melhorar a interpolação dos dados. Conforme altera esses valores, transforma o comportamento dos dados no gráfico. Então, para confirmar se os dados estão sendo interpolados corretamente existe a validação cruzada, utilizada para verificação de erros de estimativas, pois ao ser calculada, demonstra como está o ajuste dos dados na amostra através de um gráfico e uma expressão matemática.

Por fim, os dados interpolados foram extraídos do programa Qgis e submetidos à matriz de correlação de Pearson que determina o grau de relação entre duas variáveis através do coeficiente de correlação ( $r$ ). Este coeficiente expressa o grau de dependência com valores entre  $-1$  e  $+1$ , sendo que quando for  $0$  (zero) não há correlação.

Para classificar a correlação, há uma escala:

- 0,00 = Ausência de correlação;
- 0,01 a 0,19 = Correlação muito fraca;
- 0,20 a 0,39 = Correlação fraca;
- 0,40 a 0,69 = Correlação moderada;
- 0,70 a 0,89 = Correlação forte;
- 0,90 a 0,99 = Correlação muito forte;
- 1,00 = Correlação perfeita.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Granulometria e atributos químicos do solo

Os resultados de granulometria do solo são apresentados no Quadro 1. Com as médias de areia, silte e argila no triângulo textural (Figura 5), é possível classificar o solo em textura média, pois possui 776,60 g dm<sup>-3</sup> de areia, 192,65 g dm<sup>-3</sup> de argila e 30,73 g dm<sup>-3</sup> de silte (SANTOS et al., 2018).

QUADRO 1. Estatística descritiva da granulometria do solo.

	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>
Parâmetros	g dm <sup>-3</sup>		
Mínimo	693,00	20,00	150,00
Máximo	825,00	95,00	262,00
Média	776,60	30,73	192,65
DP <sup>1</sup>	27,60	12,86	22,06
CV (%) <sup>2</sup>	3,55	41,86	11,45
Assimetria	-0,68	2,22	0,48
Curtose	0,32	6,08	0,09

(<sup>1</sup>) DP: desvio padrão; (<sup>2</sup>) CV (%): coeficiente de variação.

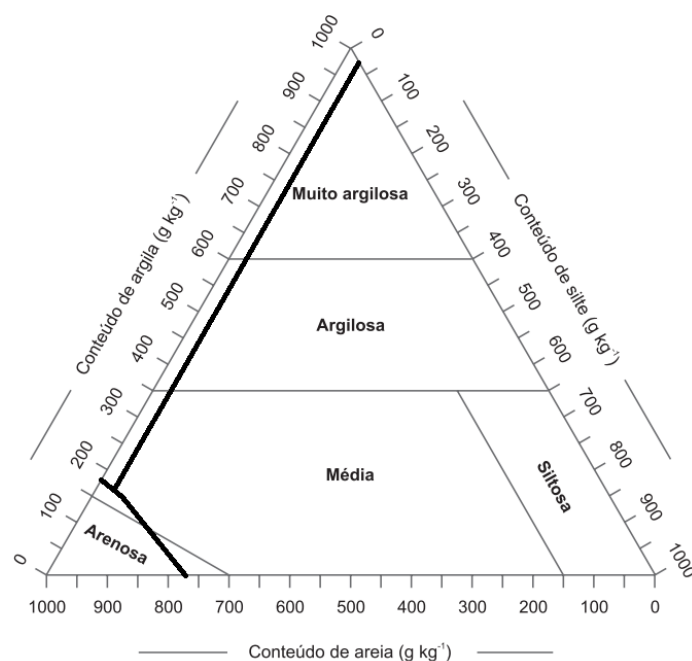


Figura 5. Triângulo textural.

Logo, na Figura 6 têm-se o mapa de distribuição espacial de areia e de argila na área, evidenciando que a maior parte da área possui mais de 770 g dm<sup>-3</sup> de areia. Esses valores se dão pelo material de origem e formação do solo, visto que no município de Nova Andradina predomina o solo arenito quartzoso de formação Caiuá (LACERDA FILHO et. al, 2006). O quartzo é um mineral rico em dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), considerado ácido, que origina solos de textura arenosa, com cores claras e baixa fertilidade natural (FONTES, 2012).

Alves et al. (2015) estudando a distribuição espacial de areia, silte e argila no cerrado mato-grossense, também encontraram maiores teores de areia em áreas de pastagem e cerrado, justificando este resultado pelo material de origem e formação.

Já, para distribuição espacial da argila, pode-se observar que há menores quantidades de argila onde houve maiores concentrações de areia. Veiga et al. (2012) concluíram que o teor de areia apresentou distribuição inversa à da argila, e o teor de silte predominou na faixa entre 30% e 45%.

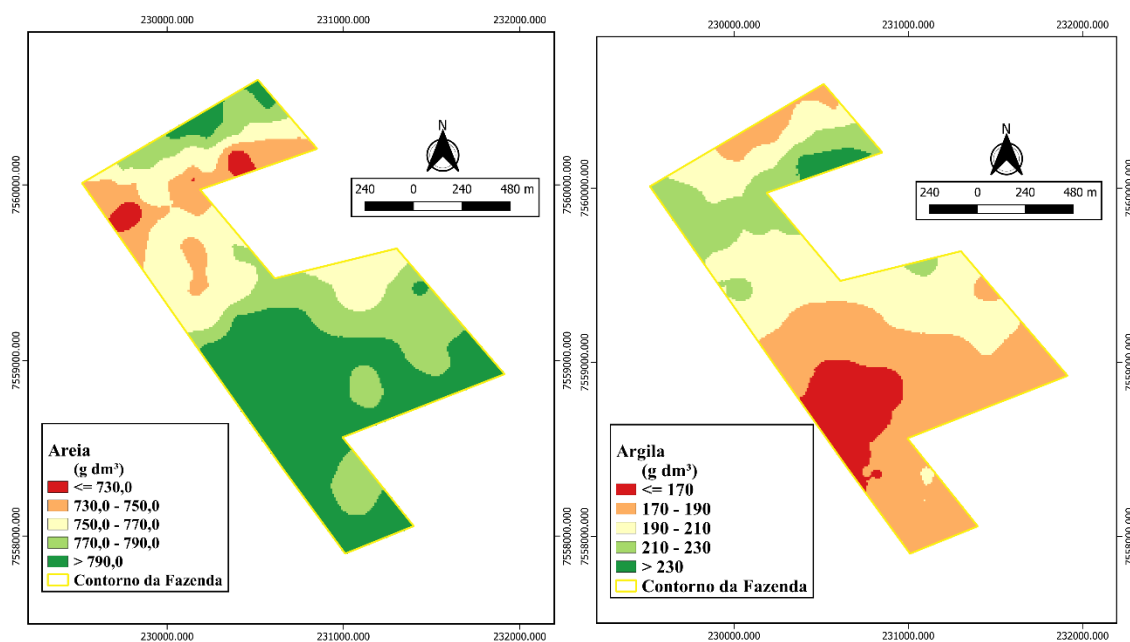


Figura 6. Mapas de distribuição espacial de areia e de argila.

A seguir, no Quadro 2, são apresentados os resultados para estatística descritiva dos atributos químicos do solo. Sendo que, as médias dos atributos químicos conforme Souza e Lobato (2004) são satisfatórias, como a saturação por bases de 59,5%, pH de 5,71 e saturação por alumínio de 1,32%. Considerando apenas estes valores médios a

fazenda possui boa fertilidade, porém, ao observar o mínimo e o máximo de cada atributo percebe-se um grande intervalo entre eles, como por exemplo, a CTC que o menor valor é 4,40 e o maior 10,50  $\text{cmmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Ao elaborar o mapa de sua distribuição espacial (Figura 7) é possível identificar no solo onde estão distribuídos estes valores.

QUADRO 2 - Estatística descritiva.

	MO	CO	V	M	Ca	Mg	K	CTC	pH	P
Parâmetros	g $\text{dm}^{-3}$		%		$\text{cmmol}_c \text{ dm}^{-3}$					$\text{mgdm}^{-3}$
Mínimo	12,00	7,00	35,00	0,00	1,02	0,59	0,09	4,40	5,20	1,40
Máximo	37,00	21,00	81,10	7,00	4,74	2,93	0,85	10,50	6,20	27,00
Média	21,30	12,36	59,50	1,32	2,22	1,18	0,21	6,03	5,71	9,58
DP <sup>1</sup>	5,27	3,01	10,41	1,13	0,58	0,32	0,09	0,83	23,75	14,30
CV (%) <sup>2</sup>	24,75	24,40	17,50	85,78	26,29	27,67	45,27	13,80	4,15	149,26
Assimetria	0,74	0,74	-0,21	2,36	0,94	1,53	3,39	1,66	-0,08	5,33
Curtose	0,50	0,35	-0,72	8,87	3,20	6,94	19,27	7,19	-0,20	35,18

(<sup>1</sup>) DP: desvio padrão; (<sup>2</sup>) CV (%): coeficiente de variação.

Deste modo, para todos os atributos do solo foram elaborados os mapas de sua distribuição espacial, utilizando a geoestatística como interpolador e com o modelo esférico de semivariograma, por ter sido o que os dados mais se ajustaram, concordando com outras pesquisas em que este modelo foi melhor quando estudadas propriedades do solo (SOUZA et al., 1997; CORÁ et al., 2004; SILVA et al., 2007, CARVALHO et al., 2010).

Na Figura 7 tem-se o mapa de distribuição espacial da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, que representa a quantidade total dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  nos colóides do solo (argila, matéria orgânica), sendo um indicativo da capacidade do solo em receber corretivos e adubações, visto que, quando há baixos valores de CTC, o solo não tem boa capacidade de reter os nutrientes e podem ocorrer perdas por lixiviação (TEIXEIRA et. al, 2017).

Ao contrário, na Figura 7 encontra-se valores considerados médios (4,8 a 6,0  $\text{cmmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e adequados (6,1 a 9,0  $\text{cmmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) por Souza e Lobato (2004), demonstrando que o solo possui boa capacidade de troca de cátions, em virtude, principalmente pela quantidade de matéria orgânica na área (Figura 10).

Também na Figura 7, contém o mapa de distribuição espacial da saturação por bases ( $V\%$ ), que é a proporção da CTC do solo preenchida pelas bases trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) expressa em porcentagem. Os valores encontrados foram de 40 a 80%, considerados adequados para o desenvolvimento da maioria das plantas. Segundo Souza e Lobato (2004), a produtividade de culturas como a soja e o milho no cerrado, aumenta com a saturação por bases até 40% e estabiliza entre os valores de 40% a 60%.

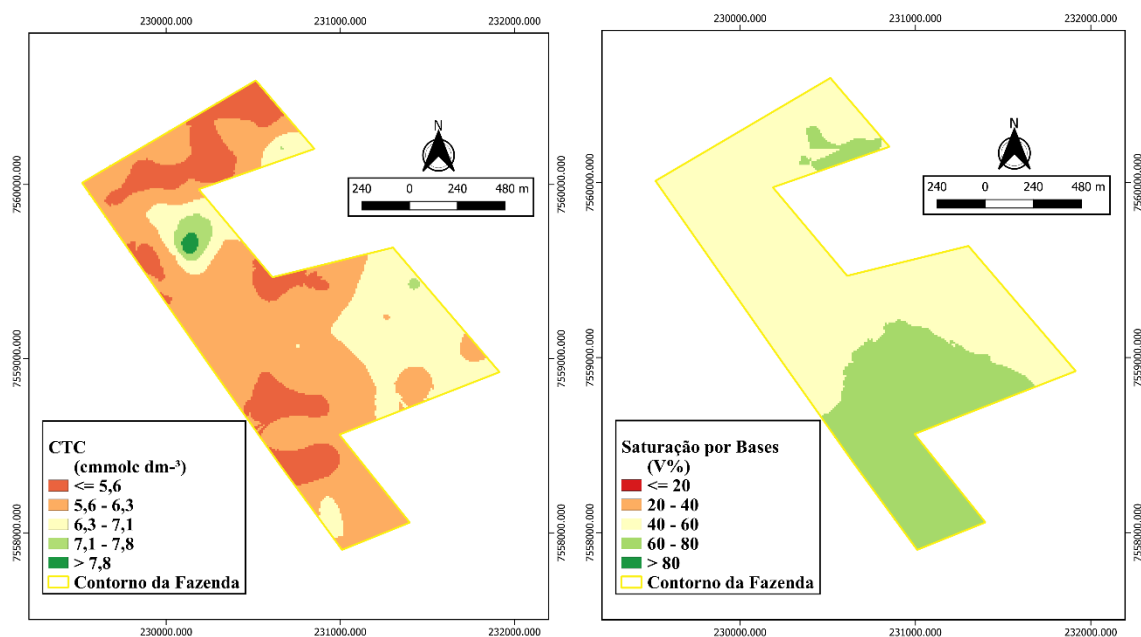


Figura 7. Mapas de distribuição espacial de CTC e de saturação por bases ( $V\%$ ).

Os valores de cálcio (Figura 8) apresentaram distribuição homogênea na área e são considerados adequados por Souza e Lobato (2004) ao se encontrarem na faixa de 1,5 a 7,0  $\text{cmmol}_c \text{dm}^{-3}$ . O mesmo aconteceu com o magnésio, sendo encontrados valores adequados, entre 0,5 a 2,0  $\text{cmmol}_c \text{dm}^{-3}$ . Estes resultados são provenientes de doses elevadas de calcário dolomítico adicionadas na área no preparo do solo no primeiro ano de cultivo.

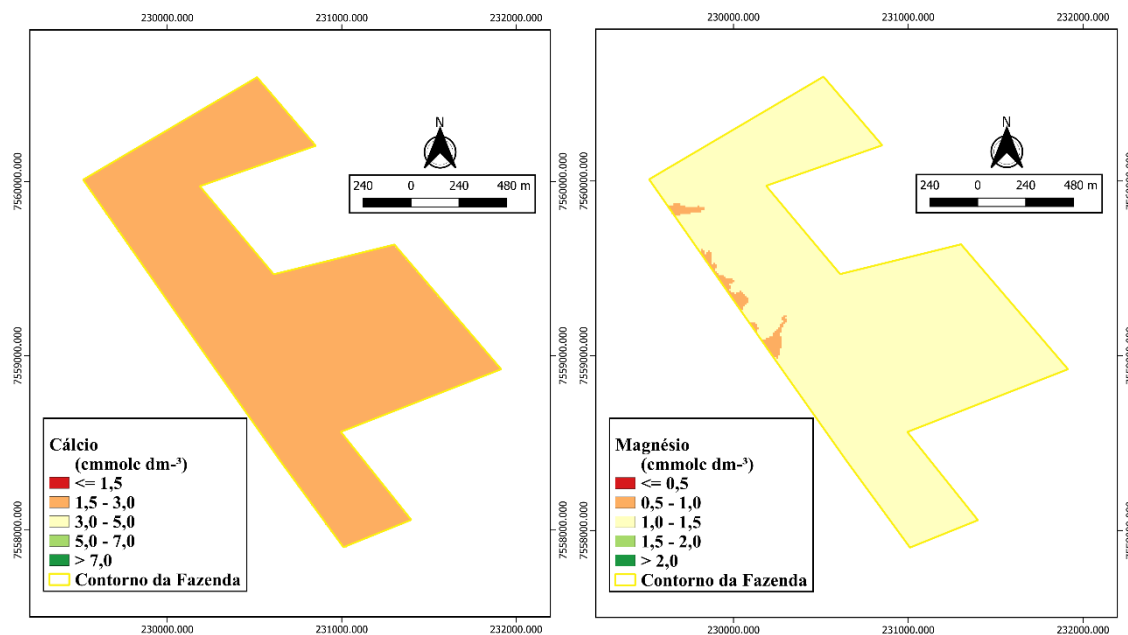


Figura 8. Mapas de distribuição espacial de cálcio (Ca) e magnésio (Mg).

O fósforo apresentou no seu mapa de distribuição espacial (Figura 9), resultados muito baixos ( $0-5 \text{ mg dm}^{-3}$ ), baixo ( $5-10 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e médios ( $10-15 \text{ mg dm}^{-3}$ ) na maior parte da área. Essa característica aliada ao alto poder de retenção de P na fase sólida é considerada grande impedimento para a produção agrícola, como relatado por Souza e Lobato (2004). Desta forma, para alcançar altas produtividades a adubação fosfatada deve ter atenção redobrada.

Ainda na Figura 9, pode-se observar a repartição do potássio no solo que ficou entre  $0,12$  e  $0,20 \text{ cmmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , valores considerados de adequado a alto para Souza e Lobato (2004). Alguns autores associaram altos teores de K no solo com a quantidade de palha deixada pela cultura antecessora.

Segundo Ritchey (1982) há mais K na palha do que no grão e sob o efeito da chuva, o nutriente é lixiviado para o solo. Sendo assim, explica-se o fato de em sistemas de semeadura direta encontrar altos valores de K na superfície do solo. Do mesmo modo, Santos et al. (2008), estudando o balanço do potássio em solo do cerrado no sistema plantio direto, concluíram que a presença de resíduos culturais no solo contribuiu para o acúmulo de potássio.

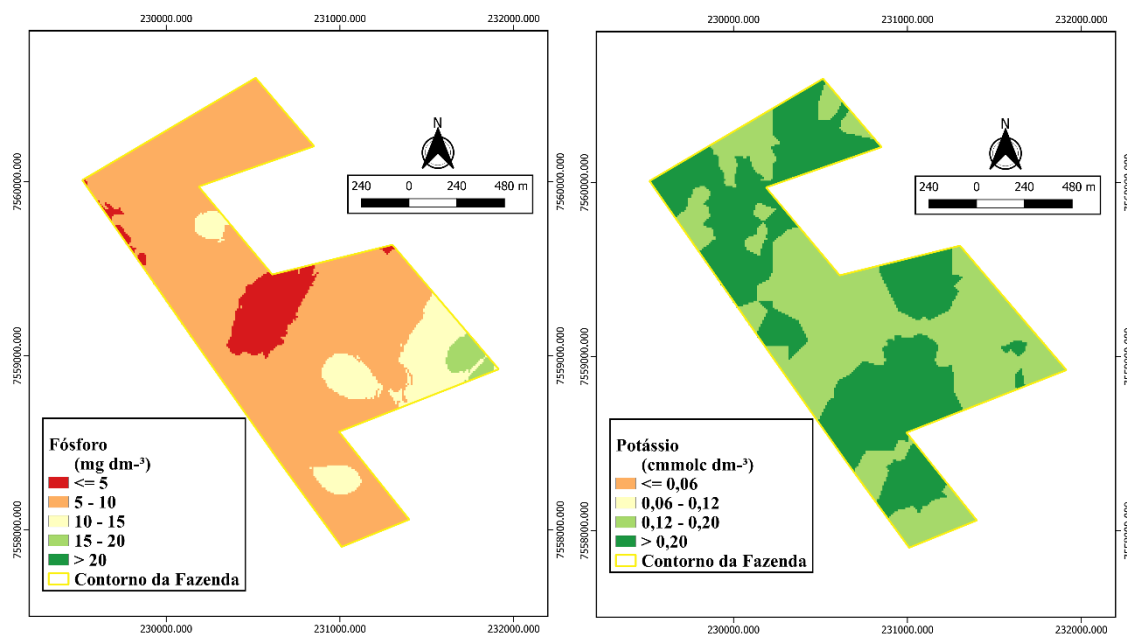


Figura 9. Mapas de distribuição espacial de fósforo (P) e potássio (K).

A Figura 10 apresenta os valores de matéria orgânica (7 a 40 g dm<sup>-3</sup>) e carbono orgânico (CO) no solo, que permaneceram no intervalo de 5 a 20 g dm<sup>-3</sup> em toda a área. A matéria orgânica é de suma importância não apenas para retenção de água e infiltração no solo, mas também, para o fornecimento de nutrientes através de sua decomposição. Segundo Ronquim (2020), em regiões tropicais a matéria orgânica em níveis satisfatórios no solo é fundamental para o equilíbrio dos nutrientes por aumentar o poder tampão do solo e elevar a capacidade de troca de cátions (CTC).

Para Bayer e Mielniczuk (2008) o carbono orgânico do solo tem implicações muito importantes para a qualidade do solo porque interfere na agregação, densidade, porosidade, aeração e capacidade de retenção de água e, além de, afetar a disponibilidade de nutrientes, como o nitrogênio, fósforo e enxofre.

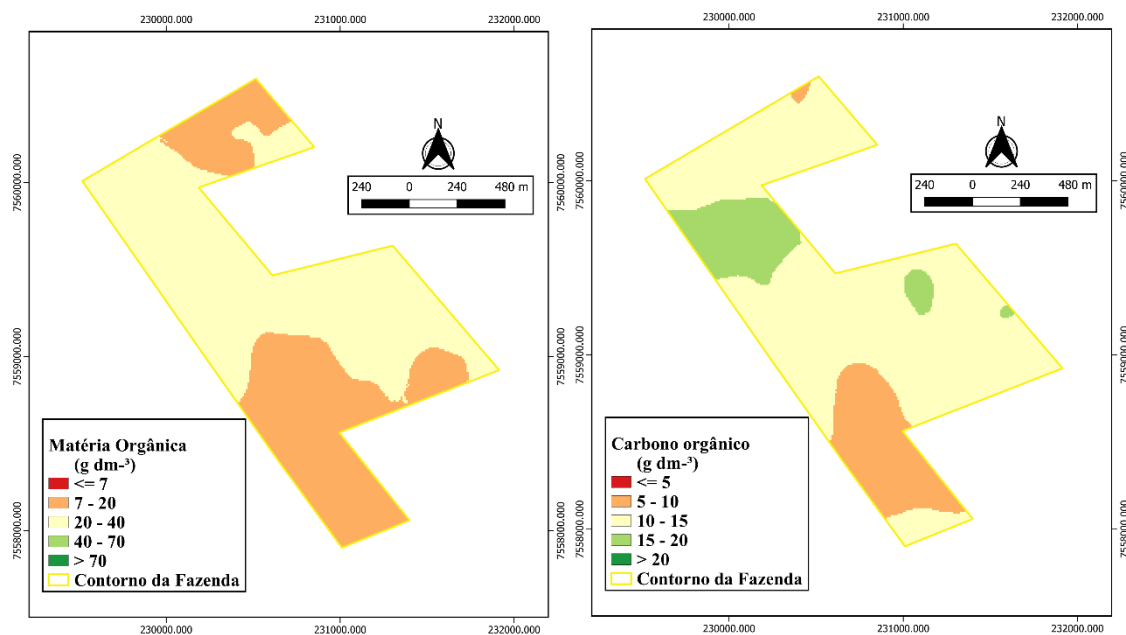


Figura 10. Mapas de distribuição espacial de matéria orgânica e carbono orgânico.

Já, na Figura 11 observa-se a distribuição espacial dos indicativos de acidez no solo: pH e alumínio. Para o potencial hidrogeniônico (pH), os valores encontrados foram: médio (4,5 a 4,8), adequado (4,9 a 5,5), alto (5,6 a 5,8) e muito alto ( $\geq 5,9$ ). Em relação a saturação por alumínio, os valores são considerados baixos, pois, permaneceram entre 1 e 2% Souza e Lobato (2004).

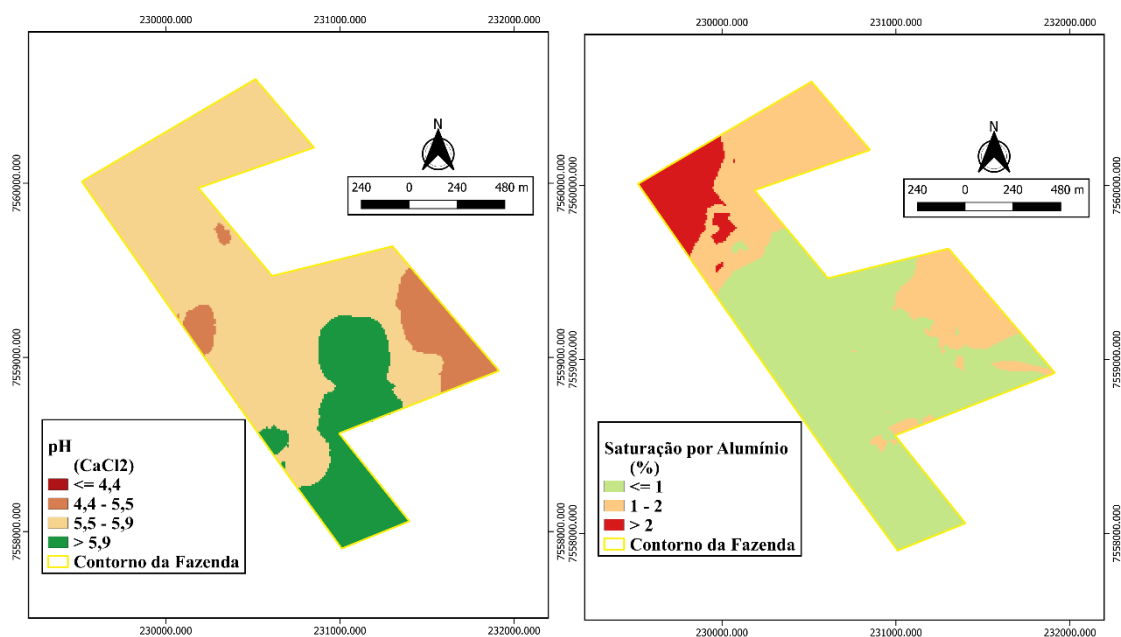


Figura 11. Mapas de distribuição espacial do potencial hidrogeniônico e saturação por alumínio.

A baixa saturação por alumínio, os valores adequados a alto de pH, cálcio e magnésio médio a adequado, indicam que a necessidade de calcário da área será baixa, visto que a calagem é realizada para neutralizar os efeitos fito tóxicos do alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ) e do hidrogênio ( $\text{H}^+$ ), além de disponibilizar cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Assim, a recomendação de calcário da área (Figura 12), calculada para elevar a saturação por bases aos 80%, resultou nos valores entre 1,0 a 2,0  $\text{Mg há}^{-1}$ .

Isso também foi confirmado por Vargas e Marques (2017) que notaram redução da saturação por alumínio em todos os tratamentos que usaram calcário, com ênfase para saturação por bases igual a 60%.

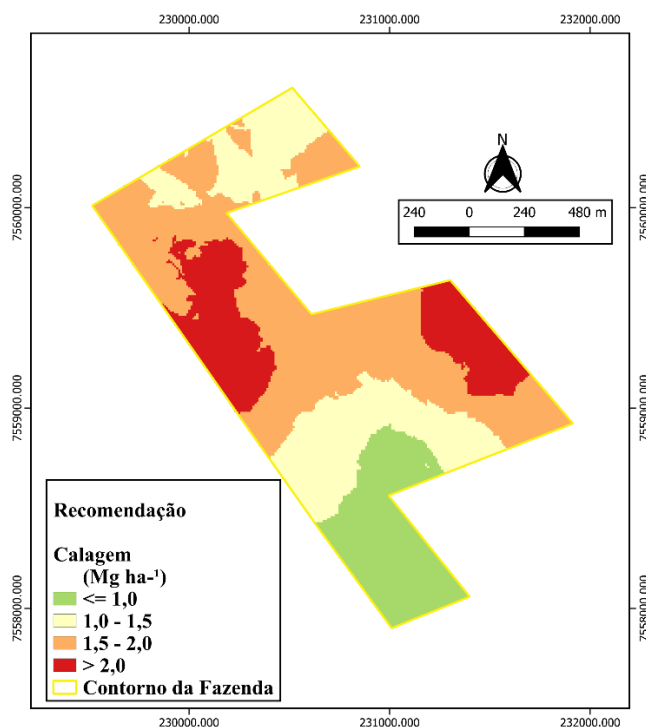


Figura 12. Mapa de recomendação de calagem.

Na Figura 13, têm-se os mapas de recomendação para aplicação em taxa variada de fósforo e potássio seguindo as tabelas de Souza e Lobato (2004). Considerando que os valores de fósforo no solo estavam muito baixo ( $<5 \text{ mg dm}^{-3}$ ), baixo ( $5-10 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e médio ( $10-15 \text{ mg dm}^{-3}$ ), a adubação corretiva resultou em 100, 50 e 25  $\text{kg ha}^{-1}$  respectivamente, de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Para potássio não foi necessário realizar adubação corretiva do solo, pois os valores encontravam-se entre adequado ( $0,12-0,20 \text{ cmmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e alto ( $>20 \text{ cmmol}_c$



dm<sup>-3</sup>). Então, a recomendação para a cultura da soja com expectativa de rendimento de 3 ton ha<sup>-1</sup> foi de 40 a 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, convertidos para a principal fonte disponível de potássio, foram 69 a 103 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio.

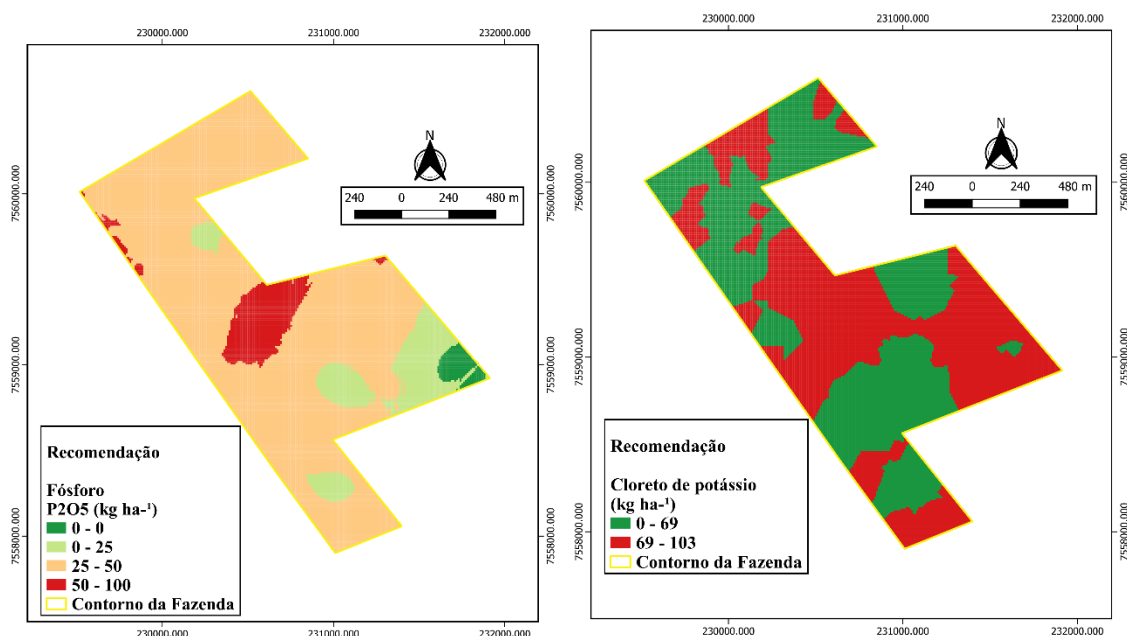


Figura 13. Mapas de recomendação de adubação com fósforo (P) e potássio(K).

## 4.2 Índices de Vegetação

A estatística descritiva para NDVI e NDRE é apresentada no Quadro 3. Em ambas, pode-se observar que a variância foi baixa assim como o erro padrão, devido as datas de monitoramento serem próximas. Também, infere-se que a média dos índices ficaram entre 0,12 a 0,52, ou seja, dentro do intervalo considerado como plantas saudáveis.

QUADRO 3 - Estatística descritiva para NDVI e NDRE.

DATAS								
Parâmetros	06/12/2021		11/12/2021		21/12/2021		26/12/2021	
	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE
Mínimo	0,12	0,02	0,16	0,02	0,17	0,01	0,16	0,01
Máximo	0,83	0,55	0,82	0,51	0,89	0,62	0,86	0,57
Média	0,31	0,13	0,33	0,12	0,52	0,21	0,47	0,19
DP <sup>1</sup>	0,06	0,02	0,05	0,02	0,10	0,05	0,09	0,04
CV (%) <sup>2</sup>	18,57	18,79	15,42	18,34	20,23	25,98	19,78	23,34
Assimetria	0,79	2,01	0,57	1,96	-0,22	0,15	-0,28	0,05
Curtose	7,31	23,14	7,48	24,57	3,25	4,33	3,22	4,63

(<sup>1</sup>) DP: desvio padrão; (<sup>2</sup>) CV (%): coeficiente de variação.

Nas Figuras 14, 15, 16 e 17 são apresentados os mapas de distribuição espacial dos índices de vegetação referentes ao mês de dezembro, período em que a cultura da soja estava em sua fase vegetativa. Ao observar os mapas é possível notar a diferença entre os índices, sendo que no NDVI a saturação ocorre primeiro.

Ou seja, se comparados os mapas, pode-se ver que, na Figura 14 enquanto o NDVI está com valores entre 0,20 a 0,60 o NDRE está em 0,20. Isso ocorreu para todas as datas monitoradas e permite que mesmo após a saturação do NDVI, o monitoramento continue por mais tempo utilizando o NDRE.

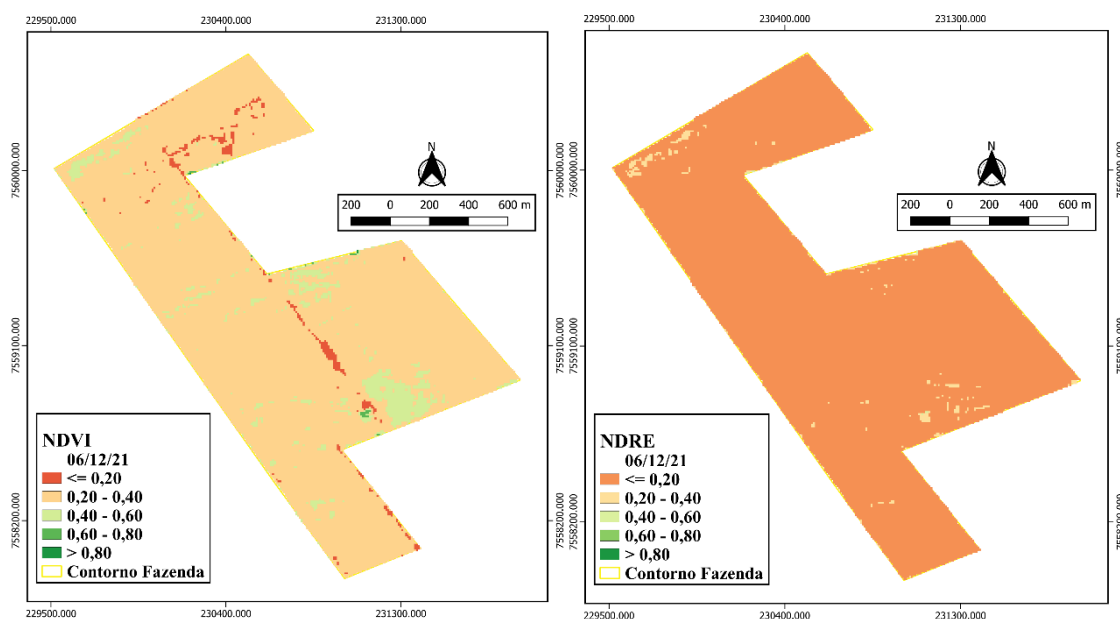


Figura 14. Mapas de distribuição espacial de NDVI e NDRE para o dia 06/12/2021.

Houve pouca diferença nos índices entre os dias 06 e 11, devido à proximidade das datas, pois é possível calcular os índices a cada cinco dias a partir das imagens fornecidas pelo satélite Sentinel Hub. Assim, a próxima data seria dia 16, porém, havia nuvens sobre a área e não foi viável a realização do cálculo. Na data seguinte, dia 21 (Figura 16) foi possível calcular os índices e observar mudanças na vegetação.

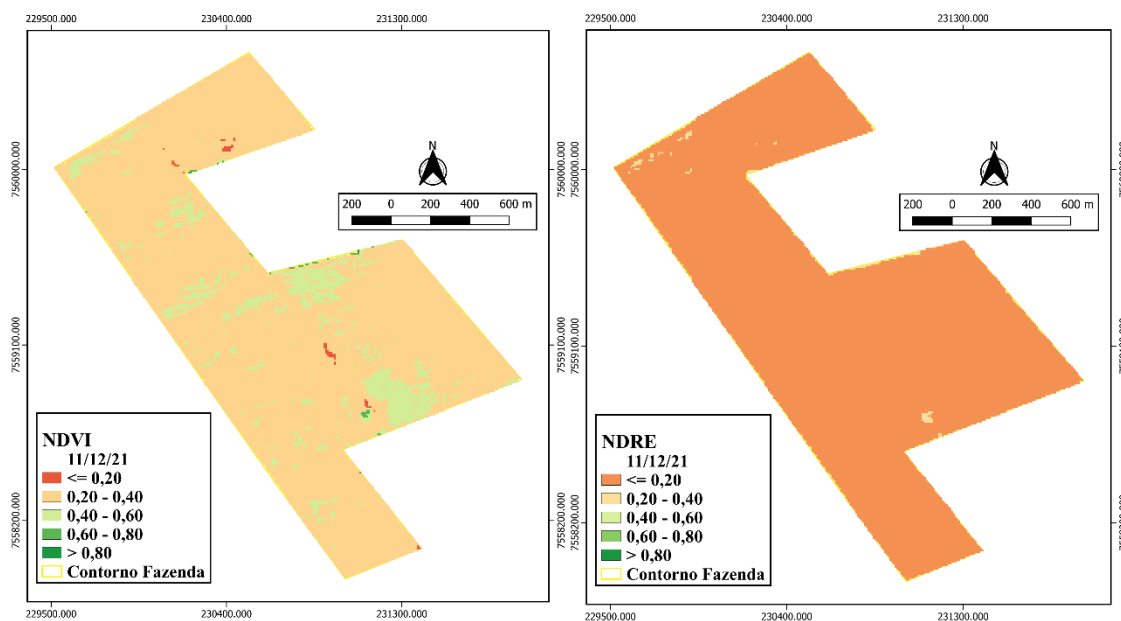


Figura 15. Mapas de distribuição espacial de NDVI e NDRE para o dia 11/12/2021.

Assim, na Figura 16, pode-se visualizar a heterogeneidade da vegetação, com o NDVI apresentando valores de 0,20 a 0,40 na parte inicial da área, enquanto que, a maior fração da propriedade teve 0,60 a 0,80. O mesmo aconteceu com o NDRE. Logo, para o dia 26 (Figura 17), os resultados se repetiram, demonstrando que a parte inicial da fazenda obteve menor índice, ou seja, menos vegetação, menor número de plantas por metro, o que afeta negativamente a produtividade dessa porção da lavoura.

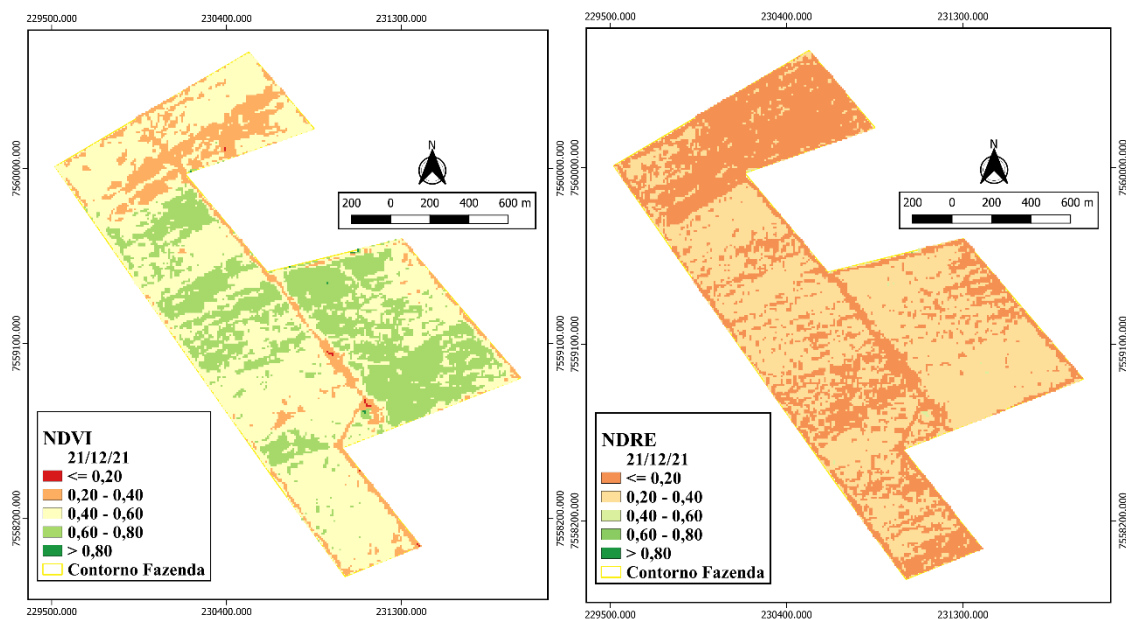


Figura 16. Mapas de distribuição espacial de NDVI e NDRE para o dia 21/12/2021.

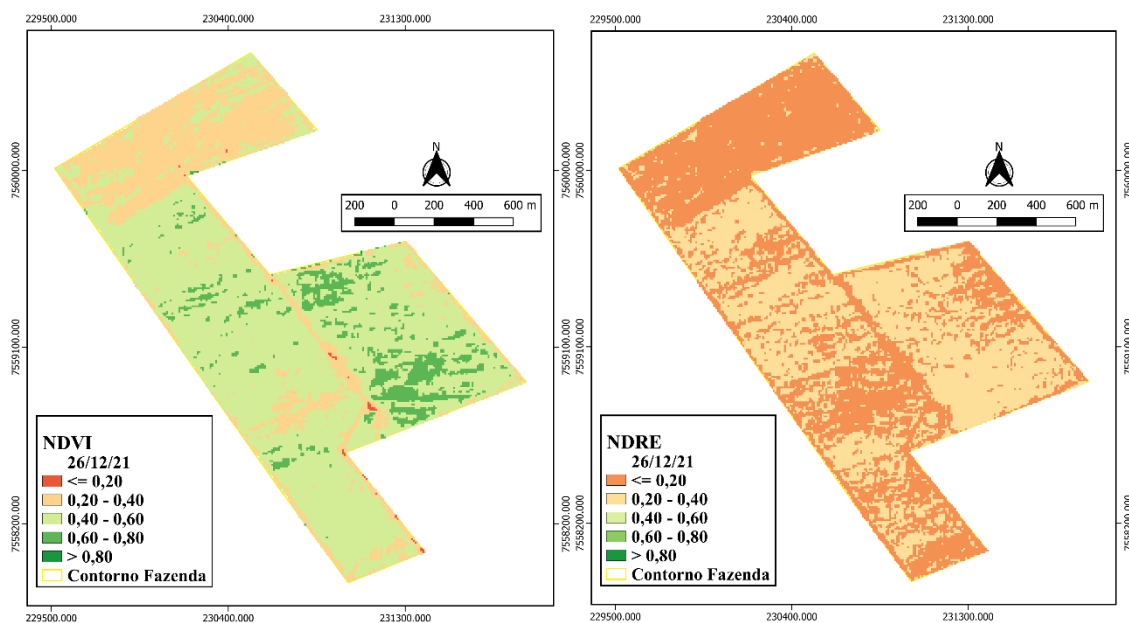


Figura 17. Mapas de distribuição espacial de NDVI e NDRE para o dia 26/12/2021.

### 4.3 Produtividade de Grãos

No Quadro 4, estão os valores da estatística descritiva para produtividade de grãos. Pode-se observar que a média da produtividade foi de  $1.079 \text{ kg ha}^{-1}$ , ou seja, 17 sacos de soja por hectare, sendo considerada muito baixo comparada à média do Estado

do Mato Grosso do Sul que foi de 55,7 e 62,84 sacos por hectare nas safras 2019/2020 e 2020/2021, respectivamente (APROSOJA, 2022).

QUADRO 4 - Estatística descritiva.

<b>Produtividade</b>	
<b>Parâmetros</b>	<b>kg ha<sup>-1</sup></b>
Mínimo	662,93
Máximo	2.041,40
Média	1.079,23
DP <sup>1</sup>	225,03
CV (%) <sup>2</sup>	20,85
Assimetria	0,34
Curtose	0,09

(<sup>1</sup>) DP: desvio padrão; (<sup>2</sup>) CV (%): coeficiente de variação;

Analisando-se os dados meteorológicos do município de Nova Andradina (Figura 3), constata-se um volume de chuva de 80 mm para o mês todo de novembro, sendo que foram chuvas irregulares, exatamente no mês da semeadura, o que dificultou a germinação e o estabelecimento das plantas, principalmente na parte inicial da fazenda, onde houve problemas de selamento do solo.

Logo, na Figura 18 tem-se o mapa da distribuição espacial da produtividade de grãos, demonstrando os locais mais críticos (<800 kg ha<sup>-1</sup>), onde a produtividade mínima foi de 662,93 kg ha<sup>-1</sup>. Ao observar os mapas dos índices de vegetação NDVI e NDRE, esses locais coincidem com os menores índices encontrados, sendo na parte inicial da área.

Da mesma forma, as maiores produtividades (>1800 kg ha<sup>-1</sup>) ocorreram nos pontos de maior saturação por bases (Figura 7), bem como nos locais de maior concentração de areia (Figura 6), demonstrando que o solo respondeu positivamente aos corretivos e adubações.

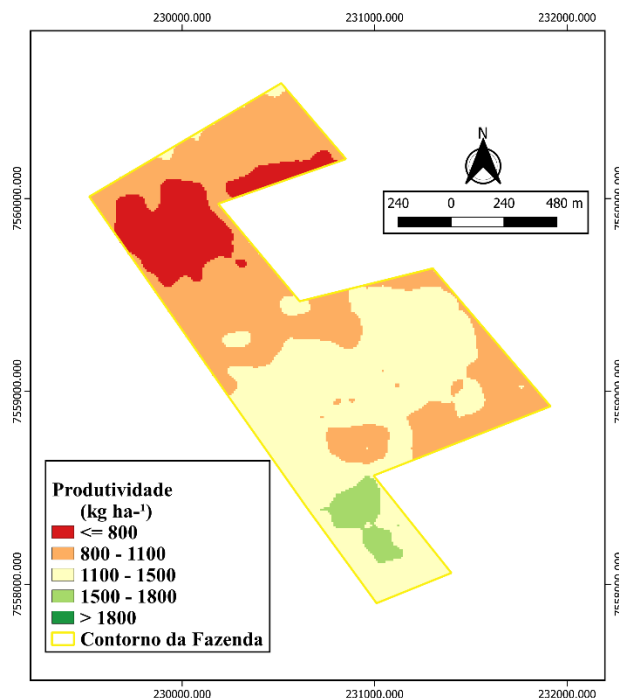


Figura 18. Mapa de produtividade de grãos.

#### 4.4 Matriz de Correlação

Ao efetuar a correlação dos atributos de textura, fertilidade e índices de vegetação com a produtividade, pode-se observar no Quadro 5, que todos os coeficientes encontrados indicam que as correlações são muito fracas, pois estão entre 0,01 a 0,19.

A correlação mesmo que muito fraca, foi positiva para areia x produtividade e silte x produtividade, indicando que conforme esses atributos aumentaram, a produtividade também aumentou. Isso ficou evidente no mapa de produtividade de grãos (Figura 18). Por outro lado, foi negativa para argila x produtividade, ou seja, onde havia mais argila, obteve-se menor produtividade.

Correlacionando a fertilidade do solo com a produtividade da cultura da soja, vê-se que não existiu correlação com a capacidade de troca de cátions (CTC), potencial hidrogeniônico (pH), fósforo (P) e magnésio (Mg). Lacerda et al. (2014) pesquisando a correlação da adubação com a produtividade da soja, concluíram que em solos com os níveis satisfatórios dos nutrientes não houve correlação significativa.

QUADRO 5. Análise de correlação entre textura, fertilidade e índices de vegetação com a produtividade.

	<b>Produtividade</b>
<b>Areia</b>	0,01**
<b>Silte</b>	0,03**
<b>Argila</b>	-0,02**
<b>V%</b>	-0,04**
<b>CTC</b>	0,00 <sup>NS</sup>
<b>M%</b>	-0,05**
<b>MO</b>	-0,04**
<b>CO</b>	-0,04**
<b>pH</b>	0,00 <sup>NS</sup>
<b>P</b>	-0,00 <sup>NS</sup>
<b>K</b>	-0,02**
<b>Ca</b>	0,02**
<b>Mg</b>	0,01 <sup>NS</sup>
<b>NDVI 06/12/21</b>	-0,00 <sup>NS</sup>
<b>NDVI 11/12/21</b>	0,00 <sup>NS</sup>
<b>NDVI 21/12/21</b>	-0,02**
<b>NDVI 26/12/21</b>	0,00 <sup>NS</sup>
<b>NDRE 06/12/21</b>	0,00 <sup>NS</sup>
<b>NDRE 11/12/21</b>	0,00 <sup>NS</sup>
<b>NDRE 21/12/21</b>	-0,02**
<b>NDRE 26/12/21</b>	0,00 <sup>NS</sup>

(\*\*) Correlação linear de Pearson significativa ( $p < 0,01$ ); (\*) Correlação linear de Pearson significativa ( $p < 0,05$ ); (NS) Ausência de correlação.

Para saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), matéria orgânica (MO), carbono orgânico (CO) e potássio (K) a correlação com a produtividade foi negativa. Já para Cálcio (Ca), a correlação foi positiva. Londero et al. (2020) estudando a correlação da produtividade da soja com a fertilidade do solo obteve correlação negativa para CTC x produtividade e positiva para fósforo x produtividade.

Na interação entre os índices de vegetação com a produtividade, só incidiu correlação para a data do dia 21/12/21, tanto para NDVI, quanto para NDRE. Isso demonstra que a data 47 dias após a semeadura da soja, representou melhor a cultura. Guan et al. (2019) observaram que há diversos fatores como a espécie estudada e/ou o estágio fenológico da cultura que influenciam na leitura dos índices de vegetação no momento da aquisição dos dados, pois definem se as correlações serão positivas ou negativas.



## 5 CONCLUSÕES

A textura e os atributos químicos estão presentes de forma heterogênea no solo.

Mapas de recomendação de calagem e adubação em taxa variada permitem aplicar os insumos de maneira mais eficaz.

Os índices de vegetação NDVI e NDRE demonstram os locais de possíveis perdas de produtividade.

Correlação positiva entre areia e produtividade demonstra que solos com maiores concentrações de areia podem atingir boas produtividades.

## 6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia. 2015. Disponível em:

<<https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/solos/livros/CARACTERIZACAO%20FISICA%20E%20CLASSIFICACAO%20DOS%20SOLOS.pdf>> Acessado em 20 de julho de 2021.

CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. XXXV, 2015, Natal. O solo e suas múltiplas funções. **Anais eletrônicos**. 2015. Disponível em: <<http://eventosolos.org.br/cbcs2015/arearestrita/arquivos/1929.pdf>> Acesso em 01 de agosto de 2022.

ANDRADE, O. C. S. **Benefícios e aplicações práticas da análise física (textural) do solo**. Publicada em 15 de junho de 2020. Disponível em:<<https://www.3rlab.com.br/2020/06/15/beneficios-e-aplicacoes-praticas-da-analise-fisica-textural-do-solo>> Acesso em 26 de julho de 2021.

APROSOJA. **Sistema Famasul**. Mato Grosso do Sul. Disponível em: <<https://aprosojams.org.br/blog/estimacao-safra-de-soja-em-ms>> Acessado em 04 de agosto de 2022.

ARNON, D. I.; STOUT, P. R. A essencialidade de certos elementos em quantidade minuta para plantas com referência especial ao cobre. **Plant physiol**, Washington, abril. 1939. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles>> Acesso em 05 de maio de 2022.

BARBOSA, K. M. do N. **Monitoramento espacial de biomassa e carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 131 p., 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. 2ª. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.7-18.

CÂMARA, G. M. de S. **Introdução ao agronegócio soja**. USP/ESALQ – Departamento de Produção Vegetal. Piracicaba, 16 de novembro de 2015.

Camargo, O.A.; Moniz, A.C.; Jorge, J.A. & Valadares, J.M.A.S. **Métodos de análise química e física de solos**. Boletim técnico, 106. Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, 2009. 94 p.

CARVALHO, S. R. L.; VILAS BOAS, G. S.; FADIGAS, F. de S. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos originados nos sedimentos da formação barreiras. **Cadernos de Geociências**, v. 7, n. 2, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/4756>> Acesso em 18 de março de 2022.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v.8– Safra 2020/21, n.12 - Décimo segundo levantamento, Brasília, p. 1-97, setembro 2021. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/s/graos> > Acesso em 15 de março de 2022.

CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de Agricultura de Precisão na cultura da Cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 1013-1022, 2004.

DUAN, T., CHAPMAN, S. C., GUO, Y., ZHENG, B. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. **Field Crops Research**, v. 210, p. 71-80, 2017.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. **Special report**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, v.80, 1977. Disponível em: <<http://lib.dr.iastate.edu/specialreports/87>> Acesso em 25 de outubro de 2022.

FONTES, M. P. F. **Intemperismo de rochas e minerais**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 171-205.

GAZZONI, D. L.; DALL'AGNOL, A. **A saga da soja: de 1050 aC a 2050 dC**. Embrapa Soja-Livro científico (ALICE), 2018.

GUAN, S.; FUKAMI, K.; MATSUNAKA, H.; OKAMI, M.; TANAKA, R.; NAKANO, H.; SAKAI, T.; NAKANO, K.; OHDAN, H.; TAKAHASHI, K. Avaliação da correlação de NDVI de alta resolução com fertilizante nível de aplicação e rendimento das culturas de arroz e trigo usando pequenos UAVs. **Sensoriamento remoto**. v.11, 2019. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/2/112> > Acesso em 20 de novembro de 2022.

ISPA, Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão. **Conceito de agricultura de Precisão em 2019**. Disponível em: <<https://www.ispag.org/about/definition>> Acesso em 28 de agosto de 2022.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. **Produção agrícola municipal**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria> > Acesso em 20 de fevereiro de 2023.

LACERDA, J. J. J.; NETO, A. E. F.; RESENDE, A. V.; HICKMAN, C.; CONCEIÇÃO, O. P.; CARDINALI, A. F. **Correlação entre a adubação e produtividade de soja e milho em um latossolo de fertilidade construída**. FertBio, 2014. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/996468/1/Correlacaoadubacao.pdf>> Acesso em 31 de agosto de 2022.

LACERDA FILHO, J. V.; BRITO, R. S. C.; SILVA, M. G.; OLIVEIRA, C. C.; MORETON, L. C.; MARTINS, E. G.; LOPES, R. C.; LIMA, T. M.; LARIZZATT, J.

H.; VALENTE, C. R. **Geologia e recursos minerais do estado de Mato Grosso do Sul**: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado de Mato Grosso do Sul. Campo Grande: CPRM, 2006. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil - PGB. <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/10217>.

LONDERO, R.; OLIVEIRA, R. B.; NASCIMENTO, J. M.; ARCOVERDE, S. N. S.; SECRETTI, M. L. Dependência espacial da fertilidade do solo sob plantio direto e suas relações com a produtividade da soja. **Caderno de Ciências Agrárias**, Minas Gerais, v.12, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/view/25450>> Acesso em 22 de fevereiro de 2023.

LUCIANO, A. C. S. et al. Remote Sensing of Environment Generalized space-time classifiers for monitoring sugarcane areas in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 215, p. 438–451, 2018.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. 1ª. ed. Editora Agronômica Ceres, São Paulo, 2006. 631 p.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 40 p.

NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N. **Características da soja**. Agência Embrapa de informação tecnológica. Embrapa soja. 2008. Disponível em:<[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soja/arvore/CONTAG01\\_24\\_271020069131.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soja/arvore/CONTAG01_24_271020069131.html)> Acesso em 25 de julho de 2021.

PEREIRA, G. W.; VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.D.; COELHO, A.L.D.F.; COSTA, M.M.; GRIFT, T. Smart-Map: um plug-in QGIS de código aberto para mapeamento digital usando técnicas de aprendizado de máquina e krigagem comum. **Agronomy**, v.6, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy12061350>> Acesso em 02 de março de 2023.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. 1ª. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2010. 128 p.

PUSCH, M.; MACHADO, T.P.; AMARAL, L.R. **Introdução a Agricultura de Precisão**, 03/2019. Disponível em:< <https://www.feagri.unicamp.br>> Acesso em: 15 de julho de 2021.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e seu uso eficiente**. São Paulo. ANDA (Associação Nacional para Difusão de Adubos), 2017. 178 p.

RITCHEY, K.D. **O potássio nos oxissolos e ultissolos dos trópicos úmidos**. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1982. 69p.

RISSINI, A. L., KAWAKAMI, J., GENÚ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de Nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1703-1713, 2015.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2ª. ed. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. 34 p.

SANTOS, D. B. M; SOUSA, D. M. G; GOEDERT, W. J. **Balanco do potássio em solo do cerrado no sistema plantio direto**. Brasília, DF. 2008. Disponível em:< [http://simposio.cpac.embrapa.br/simposio/trabalhos\\_pdf/00409\\_trab1\\_ap.pdf](http://simposio.cpac.embrapa.br/simposio/trabalhos_pdf/00409_trab1_ap.pdf)> Acesso em 30 de agosto de 2022.

SANTOS, H. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª. Ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SILVA, F. M.; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C. A. P.; MARQUES JÚNIOR, J.; MACHADO, R. V. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, v. 37, p. 401-407, 2007.

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

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 367-372, 1997.

TAGLIAPIETRA, E. L.; ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; BALEST, D. S.; ROSA S. L.; BEXAIRA, K. P.; RICHTER, G. L.; RIBAS, G. G.; SILVA, M. R. Biophysical and management factors causing yield gap in soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, Santa Maria, março.2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/agj2.20586>> Acesso em 17 de outubro de 2022.

TAGLIAPIETRA, E. L. **Ecofisiologia da soja: visando altas produtividades**. 2ª Ed. Santa Maria: [s.n], 2022. 432 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed, 918p, 2013.

TEIXEIRA, P. C.; CAMPOS, D. V. B.; SALDANHA, M. F. C.; PÉREZ, D. V. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

VARGAS, G.; MARQUES, R. Crescimento e nutrição de angico e canafístula sob calagem e gessagem. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-10, 2017.

VEIGA, M.; SANTOS, O.; HAMMES, L. A.; PANDOLFO, C. Distribuição espacial dos teores de argila, silte e areia na camada superficial do solo em Santa Catarina. **Revista Agropecuária Catarinense**, Santa Catarina, v.25, 2012. Disponível em: <<https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/rac/article/view/638>> Acesso em 04 de março de 2023.

WERNER, V.; SCHLOSSER, J. F.; ROZIN, D.; PINHEIRO, E. D.; DORNELLES, M. E. C.; C DORNELLES, M. E. Aplicação de fertilizantes à taxa variada em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 658–663, 2007.