

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

LEÔNCIO CAMPOS GOUVEIA

**ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA NA DEFINIÇÃO
DE ZONAS HOMOGÊNEAS EM ÁREA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS**

Uberlândia – MG

2022

LEÔNCIO CAMPOS GOUVEIA

**ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA NA DEFINIÇÃO
DE ZONAS HOMOGÊNEAS EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Agronomia, da Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Área de concentração: Agricultura de Precisão.

Orientador: Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado

Uberlândia – MG

2022

LEÔNCIO CAMPOS GOUVEIA

**ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA NA DEFINIÇÃO
DE ZONAS HOMOGÊNEAS EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de Agronomia, da
Universidade Federal de Uberlândia,
para obtenção do grau de Engenheiro
Agrônomo.

Aprovado pela Banca Examinadora em 20 de dezembro de 2021

Prof. Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado
Orientador

Profa. Dra. Araújo Hulmann Batista
Membro da banca

Dr. Gabriel Camargo de Jesus
Membro da banca

RESUMO

A variabilidade espacial da lavoura pode ser gerenciada ao definir zonas homogêneas (ZH), que correspondem a porções dos talhões com mínima variação entre os atributos que as compõem. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi a definição de zonas homogêneas a partir de índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) de 2 safras, e a sua validação em relação aos atributos físico-químicos do solo e produtividade de soja e sorgo. O NDVI visou testar o grau de correlação entre os índices de vegetação e as respostas em produtividade para a mesma safra. Para tanto foi delimitada uma malha regular sistematicamente aleatorizada com 50 pontos, com uso do *software* Qgis, em área de estudo de 25 ha, localizada na fazenda Capim Branco (UFU). Os pontos foram localizados com auxílio de GNSS de navegação e neles coletadas amostras para avaliação dos atributos do solo e produtividade. Os dados foram avaliados de forma descritiva com obtenção da média, mediana, mínimo, máximo e coeficiente de variação (CV). A análise espacial e elaboração de mapas temáticos de ZH foi realizada no ambiente Qgis, com o auxílio do complemento Smart Map (SMP). Para validação das ZH, os valores NDVI de cada zona foram contrastados com os dados dos atributos de solo e produtividade das mesmas zonas, e comparados pelo teste T, a 5% de significância. Através da análise de dados foi possível observar correlação inversa entre o atributo areia e produtividade de soja ($r=-0,48$) e sorgo ($r=-0,53$). Entretanto, as produtividades de soja e sorgo se correlacionaram de maneira positiva com a MOS e CTC. Portanto, o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é uma ferramenta que auxilia na identificação de zonas homogêneas. Porém, torna-se necessário sua obtenção considerando mais de uma safra por cultura avaliada. A definição de zonas com diferente potencial, a partir do NDVI, fica em maior evidência para a cultura do sorgo. A presença de variação textural nos talhões, especificamente de areia, contribui para a diferenciação de zonas homogêneas.

Palavras-chave: Agricultura de precisão, soja, sorgo.

ABSTRACT

The spatial variability of the crop can be managed by defining homogeneous zones (ZH), which correspond to portions of the plots with minimal variation between the attributes that compose them. In this sense, the objective of this work was to define homogeneous zones from the normalized difference vegetation indices (NDVI) of 2 seasons, and their validation in relation to the physical-chemical attributes of the soil and productivity of soybean and sorghum. The NDVI was used to test the hypothesis of the degree of correlation between the vegetation indexes and yield responses for the same season. For this purpose, a regular grid systematically randomized was delimited, with 50 points, using the Qgis software, in a study area of 25 ha, located in the Capim Branco farm (UFU). With the aid of GNSS navigation, the points were identified and samples were collected to evaluate the attributes of the soil and productivity. Data were descriptively evaluated to obtain mean, median, minimum, maximum and coefficient of variation (CV) values. The spatial analysis and elaboration of thematic maps of ZH were carried out in the Qgis environment, with the aid of the Smart Map (SMP) complement. To validate the ZH, the NDVI values for each zone were contrasted with the data on soil attributes and productivity from the same zones, and compared by the T test, at 5% significance. Through data analysis, it was possible to observe a negative correlation between the sand attribute and soybean yield ($r=-0.48$) and sorghum ($r=-0.53$). However, yields were positively correlated with MOS and CTC. Therefore, the normalized difference vegetation index (NDVI) is a tool that helps in the identification of homogeneous zones. However, it is necessary to obtain it considering more than one crop per crop evaluated. The definition of areas with different potential, based on the NDVI, is more evident for the sorghum crop. The presence of textural variation in the stands, specifically of sand, contributes to the differentiation of homogeneous zones.

KEYWORDS: Precision agriculture, soybean, sorghum.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1. Local experimental	9
2.2. Cultura instalada	10
2.3. Avaliação dos atributos do solo e produtividade	11
2.4. Aquisição das imagens multiespectrais	12
2.5. Definição e validação das zonas homogêneas	12
2.6. Análise estatísticas	13
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
3.1. Análise descritiva dos dados	13
3.2. Definição e validação de zonas homogêneas	17
4. CONCLUSÃO	19
REFERÊNCIAS	20

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma *comoditie* de fundamental importância para o agronegócio brasileiro, desempenhando o papel de carro chefe na produção de grãos no país. Segundo o último levantamento do Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB, 2021), a produção nacional estimada é de 135,5 milhões de toneladas, com crescimento de 8,6% em relação à safra anterior (2019/20), fazendo do Brasil o maior produtor mundial da leguminosa.

A expansão do cultivo de grãos para região do Centro Oeste proporciona um sistema de cultivo diferenciado devido as condições edafoclimáticas favoráveis. Por ser uma planta de dias curtos e fotossensível, a soja se tornou a principal cultura de verão, sendo o sorgo uma opção para a segunda safra (ROSCOE & MIRANDA, 2019).

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é uma gramínea da família *Poaceae*. A planta é extremamente adaptável as mais diferentes condições edafoclimáticas, podendo ser cultivada em regiões que apresentam condições extremas, como salinidade e acidez do solo. Por ser uma planta C4, apresenta elevada produção de matéria seca, cerca de 39,5 Mg ha⁻¹, alcançando produtividades médias de 5.663 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021).

As novas tecnologias aplicadas à agricultura foram decisivas para os incrementos produtivos das últimas décadas, devido ao apelo ambiental pela diminuição de abertura de novas áreas, na busca do melhor uso de recursos naturais. Neste quesito, surge a agricultura de precisão (AP), definida como forma de gestão de tecnologias e ferramentas aplicadas à agricultura para aprimoramento do sistema produtivo, considerando a variabilidade espacial em áreas agricultáveis e a redução dos impactos ambientais (BRASIL, 2012).

Diversas aplicações da AP foram possíveis devido as campanhas espaciais para monitoramento do globo terrestre. Entre elas, o Sistema Global de Sistemas de Observação da Terra (GEOSS – *Global Earth Observation System of Systems*) que, aliado às missões dos satélites *Sentinel*, *Landsat*, *SPOT*, *CBERS* e *MODIS*, desempenham a importante função de observação contínua da superfície terrestre (PADRÓ, 2018).

O sensoriamento remoto da vegetação tem evoluído constantemente, através do desenvolvimento de sensores ópticos e veículos aéreos não tripulados (VANT). Somam-se ainda, o suporte proporcionado pelos sistemas globais de posicionamento por satélite (GNSS) e o sistema de informações geográfico (GIS). Compondo um sistema robusto e integrado que permite a geração de informações para a produção agrícola e evolução dos cultivos (LIAGHAT & BALASUNDRAM, 2010).

O sensoriamento remoto possibilita, assim, monitorar e identificar características específicas dos cultivos agrícolas. Segundo Molin, Amaral e Colaço (2015), a radiação eletromagnética (REM) oriunda do sol, ao atingir a vegetação, fraciona a energia em três partes. A energia pode ser absorvida, refletida ou transmitida, onde a intensidade depende do comprimento de onda e das características físico-químicas do alvo. Assim, ante estresses bióticos e abióticos, pode se diferenciar nas plantas folhas novas das senescentes, teor de água e até alterações nas estruturas internas das células. Essas variações podem ser detectadas pela energia refletida na faixa do visível (400 a 740 nm) e do infravermelho próximo - IVP (741 a 1.341 nm) (FORMAGGIO & SANCHES, 2017; HILLNHÜTTER et al., 2011; MIRIK et al., 2011).

A partir da reflectância dos alvos podem ser construídos índices de vegetação, que são modulações matemáticas que relacionam a REM com a estrutura dos tecidos fotossintéticos da cobertura vegetal. Os índices de vegetação são utilizados, nesse sentido, para fornecer informações sobre a variabilidade espacial das lavouras e estabelecer relações com os atributos do solo, sua capacidade de retenção de água, capacidade de troca catiônica (CTC), propensão a erosão, permeabilidade, retenção de fosfatos, lixiviação de nitratos, selamento da camada superficial do solo, coesão e adesão (FORMAGGIO & SANCHES, 2017; RODRIGUES, 2010; BOTTEGA et al., 2013).

O índice por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1974), é atualmente um dos mais difundidos na agricultura. É calculado com uso da reflectância dos alvos nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo. O NDVI é capaz tanto de discriminar áreas com ou sem cobertura vegetal, quanto indicar o estado de vigor vegetativo de determinadas culturas de acordo ao estágio de desenvolvimento (LIMA et al., 2013).

A variabilidade espacial da lavoura existe por natureza, uma vez que, os cultivos são conduzidos em largas extensões territoriais. O gerenciamento da variabilidade espacial da lavoura pode ser realizado através do planejamento da gestão das zonas homogêneas. A sua definição pode influenciar táticas de manejo agrícola, ao permitir traçar estratégias específicas, solucionar adversidades e promover um ambiente mais propício para elevadas produtividades (BAZZI et al., 2015; GAVIOLI et al., 2016). Diminuem, assim, os custos operacionais com ganho em sustentabilidade (BOTTEGA et al., 2014).

As zonas homogêneas (ZH) dizem respeito ao tempo de coleta de dados, podendo considerar como ZH, a definição de zonas com dados de uma única safra. No entanto, as ZH podem apresentar diferenças em função da textura do solo, condutividade elétrica, teor de

matéria orgânica, CTC e fertilidade (DELALIBERA; WEIRICH NETO; NAGATA, 2012). Em contrapartida, as unidades de gestão diferenciada (UGD) são porções onde existe a coleta de informação em referente a várias safras. De acordo com Mann et al. (2010), as UGD e as zonas de manejo (ZM) podem ser interpretadas como regiões dentro do campo de produção com mínima variabilidade espacial e permanente ao longo do tempo. Elas são demarcadas, normalmente, a partir de mapas de fatores não antrópicos e permanentes da área, como parâmetros de solo (textura, relevo) e condutividade elétrica, entre outros. Para Molin (2002), os mapas de produtividade são informação importante ao expressar a variabilidade espacial intrínseca da área e, portanto, podem ser utilizados na delimitação das UGD. Na definição das ZM, os dados amostrados a partir do uso de malhas, podem ser melhor aproveitados quando realizada a interpolação por krigagem, ao estimar valores em locais não amostrados sem tendência e com mínima variação (SOUZA et al., 2010).

Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi a definição de zonas homogêneas a partir de índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) de 2 safras, e a sua validação em relação aos atributos físico-químicos do solo e produtividade de soja e sorgo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local experimental

O presente trabalho foi conduzido em área experimental da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Uberlândia, nas coordenadas geográficas 18°53'11'' S e 48°20'19'' W, a uma altitude média de 825m. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima é tropical com estação seca de inverno (Aw). A área de estudo apresenta 25 ha e corresponde ao cultivo de soja em sistema plantio direto desde 2012, seguido com a sucessão de milho ou sorgo em segunda safra. Foi delimitada uma malha regular sistematicamente aleatorizada com 50 pontos, a partir do *software* Qgis (Qgis Development Team, 2020). Com auxílio de GPS de navegação Garmin e-Trex Vista foram identificados os pontos criados e coletadas amostras de solo e de produtividade das culturas de soja e sorgo (Figura 1).

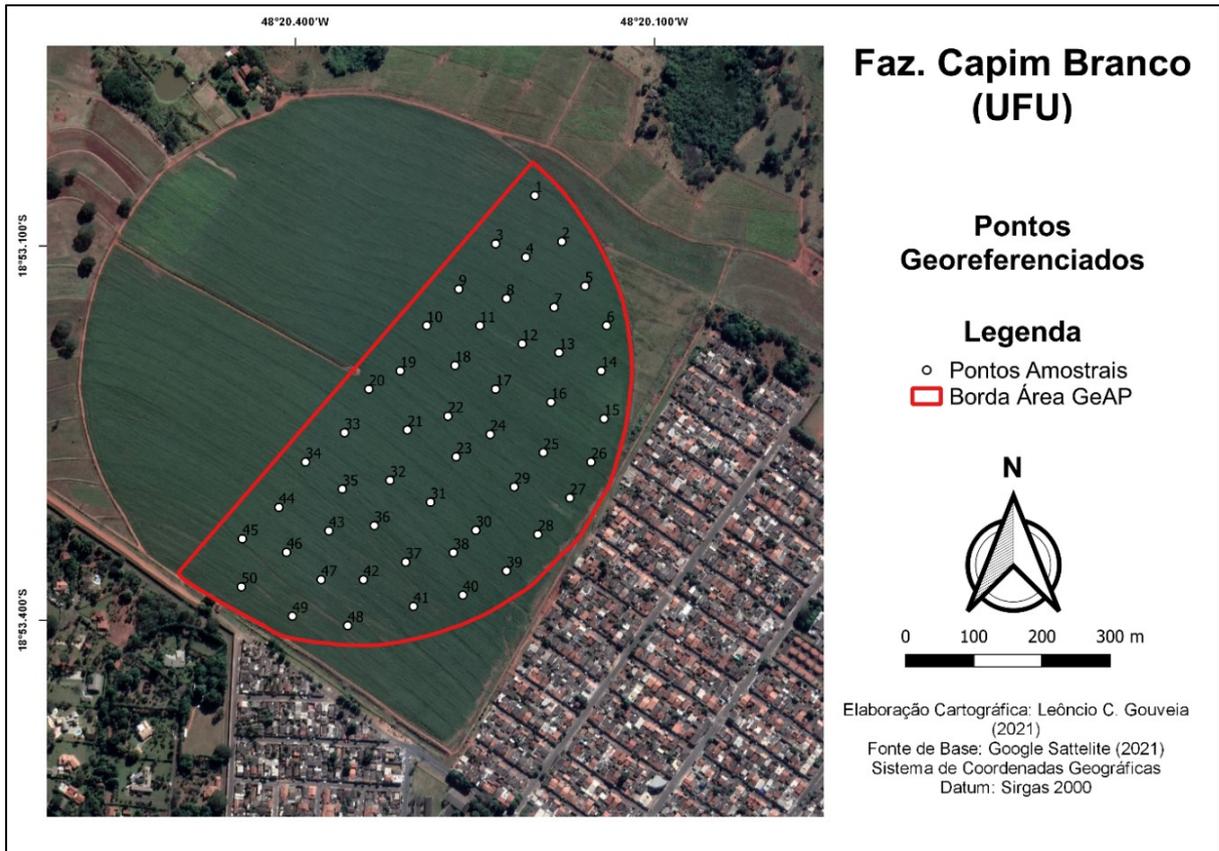


Figura 1. Área de estudo e localização dos pontos amostrais georreferenciados. Fonte: O autor.

2.2. Cultura instalada

A cultivar de soja utilizada foi a 6906 IPRO, de ciclo médio e semeadura realizada em outubro de 2017. A adubação de base foi de 350 kg ha^{-1} do formulado 02-20-20 (7N - $70\text{P}_2\text{O}_5$ - $70\text{K}_2\text{O}$). As sementes foram tratadas com fungicida e inseticida Standak Top na dose de 100 mL ha^{-1} (2,5 g de i.a. de Piraclostrobina, 22,5 g de i.a. de Tiofanato Metílico, 25 g de i.a. de Fipronil), a fim de protegê-las contra o ataque de fungos nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura (mancha púrpura da semente, antracnose, podridão de fusarium).

Na pós emergência foram realizadas quatro aplicações de fungicidas, sendo o Orkestra, na dose de 350 mL ha^{-1} (167 g L^{-1} de i.a. de Fluxapirosade + 333 g L^{-1} de i.a. de Piraclostrobina), contra as doenças ferrugem-asiática, mancha-parda e oídio; Opera, na dose de 500 mL ha^{-1} (133 g L^{-1} de i.a. de Piraclostrobina + 50 g L^{-1} de i.a. de Epiconazol), contra a ferrugem da soja, mela e mancha alvo; Varssarya, na dose de 600 mL ha^{-1} (100 g L^{-1} de i.a. de Picoxistrobina + 50 g L^{-1} de i.a. de Benzovindiflupir), contra a mancha parda, crestamento foliar e oídio, e Approach, na dose de 300 mL ha^{-1} (200 g L^{-1} de Picoxistrobina + 80 g L^{-1} de Ciproconazol), contra a ferrugem asiática, crestamento foliar, mancha parda e oídio.

Para o sorgo foi utilizado o híbrido granífero Nugrain 410, considerando 220 mil plantas ha⁻¹, com semeadura em março de 2018 e colheita em julho de 2018. A adubação de plantio seguiu a recomendação de 212 kg de 4-23-18 + 46 kg de 8-28-16 por hectare. Para ambas culturas, as operações de manejo foram realizadas de acordo com o gerenciamento da equipe operacional da Fazenda.

2.3.Avaliação dos atributos do solo e produtividade

Os atributos de solo avaliados foram textura, matéria orgânica (MOS), capacidade de troca catiônica (CTC), condutividade elétrica (CE) e resistência à penetração (RP). A coleta de solo consistiu na retirada de 10 subamostras para compor amostras compostas, na profundidade de 0-0,2m. Após coleta, as amostras foram secas ao ar e passadas em peneiras de 2 mm para determinação da textura, MOS, CTC (SILVA, 1999) e CE (CARMO E SILVA, 2016).

A determinação da RP no solo foi realizada em abril de 2018, após a colheita da soja, com auxílio do penetrômetro de impacto (Stolf, 1991). Foram realizadas 3 leituras para cada ponto da grade amostral, obtidas as médias e realizados os cálculos para determinação da RP em cada um dos 50 pontos. A transformação da força de penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto), em resistência à penetração, foi obtida a partir de Stolf (1991).

$$RP = \left(\frac{X \cdot \frac{M}{(M+m)} \cdot g \cdot h}{(a \cdot \Delta x) \cdot \frac{M}{(M+m)} + \left(\frac{M+m}{a} \right) \cdot g} \right) \div 1000000 \quad (1)$$

Onde:

RP = resistência à penetração (MPa)

M = massa do êmbolo (3,880 kg)

M = massa do aparelho sem êmbolo (3,441 kg)

h = altura de queda do êmbolo (0,4 m)

X = médias da quantidade de impactos

A = área do cone (0,0001131 m²)

g = aceleração da gravidade (9,81 m s⁻²)

Δx = agrupamento (0,1 m)

A avaliação da produtividade foi realizada em área de 10m², considerando 5m lineares e 4 linhas espaçadas de 0,5m. As amostras foram trilhadas e encaminhadas ao laboratório de análise de sementes (LASEM-UFU), para obtenção do peso e umidade. Os valores de umidade foram corrigidos para 13% e calculada a produtividade final, em kg ha⁻¹, pela fórmula:

$$PF = \frac{PI(100 - UI)}{100 - UD} \quad (2)$$

Onde:

PF = Peso final corrigido a 13% de umidade;

PI = Peso inicial na umidade real;

UI = Umidade inicial (real do grão);

UD = Umidade desejada (13%).

2.4. Aquisição das imagens multiespectrais

As imagens multiespectrais foram coletadas em datas próximo ao florescimento das culturas: aos 63 dias após plantio (dap), para a soja (24/01/2018) e aos 51 dap, para o sorgo (10/05/2018). Foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), resolução espacial de 10 m e CBERS-4 (<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>), resolução espacial de 20 m, para a soja e sorgo, respectivamente. As bandas espectrais extraídas do satélite Sentinel-2 foram a 4 (vermelho) e a 8 (infravermelho próximo), enquanto que para o CBERS-4, sensor MUX, foram a 7 (vermelho) e a 8 (infravermelho próximo).

De posse das imagens foi definido um quadrante na área (pivô central) e aplicada a fórmula matemática do NDVI:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (3)$$

Onde:

NDVI = Índice de vegetação da diferença normalizada;

NIR = Infravermelho próximo;

R = Vermelho.

2.5. Definição e validação das zonas homogêneas

A elaboração do mapa temático de zonas homogêneas foi realizada a partir das imagens NDVI. Para isto, os valores de pixel das imagens foram transformados em informação vetorial e processados no complemento Smart Map Plugin (SMP), seguindo a ordem: seleção dos valores de NDVI da soja e do sorgo, interpolação de dados, definição do número ideal de classes a partir do algoritmo Fuzzy K-means e mapeamento final para obtenção das zonas.

As ZH foram validadas a partir dos dados interpolados dos atributos de solo e produtividade da soja e sorgo, estes últimos correspondentes as mesmas safras de obtenção dos índices NDVI. A interpolação foi realizada pela análise geoestatística, com auxílio do plugin SMP, permitindo o ajuste de modelos à semivariogramas experimentais, interpolação por krigagem (VIEIRA, 2000) e obtenção de mapas de distribuição espacial para os atributos. Finalmente, foi realizada a correlação entre ZH e respectivos valores dos atributos de solo e produtividade para cada ZH.

2.6. Análise estatísticas

Os dados foram avaliados de forma descritiva, com obtenção dos valores de média, mediana, mínimo, máximo e coeficiente de variação (CV), com auxílio do *software* Excel. Para validação das ZH, os valores NDVI de cada zona foram contrastados com os dados dos atributos de solo e produtividade das mesmas zonas, e comparados pelo teste T, a 5% de significância, com uso do programa Action no ambiente Excel.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise descritiva dos dados

É possível evidenciar valores de média e mediana próximos para todos os atributos avaliados (Tabela 1). A variação entre valores mínimos e máximos indicam a presença de variabilidade dos dados, com maior impacto para o atributo RP, como evidenciado a partir dos CV (%), com valores altos ($20 < CV\% < 30$) de acordo com Dalchiavon et al. (2012). CV% baixos ($CV < 10\%$) foram observados para o NDVI da soja e do sorgo.

Tabela 1. Análise descritiva dos valores de NDVI e produtividade de soja e sorgo e atributos físico-químicos do solo obtidos na profundidade de 0-0,2m. Uberlândia, 2021.

Atributo	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	¹ CV (%)
	0 – 0,2m				
NDVI Soja	0,70	0,78	0,75	0,76	3,00
NDVI Sorgo	0,65	0,81	0,77	0,78	4,00
Prod. Soja (kg ha ⁻¹)	2892,31	5709,63	4506,06	4439,31	10,00
Prod. Sorgo (kg ha ⁻¹)	2432,88	6700,32	5064,18	5136,46	19,00
Areia (g kg ⁻¹)	374,00	710,00	531,92	510,00	18,00

Argila (g kg ⁻¹)	209,00	413,00	312,44	311,00	15,00
² MOS (%)	1,70	2,80	2,34	2,40	11,00
³ CTC (cmol _c dm ⁻³)	5,84	10,40	8,47	8,59	12,00
⁴ CE (μS cm ⁻²)	138,50	293,50	199,47	200,75	14,00
⁵ RP (MPa)	0,67	1,87	1,27	1,31	24,00

¹CV (%): coeficiente de variação; ²MOS: matéria orgânica do solo; ³CTC: capacidade de troca catiônica. ⁴CE: condutividade elétrica. ⁵RP: resistência a penetração.

Para o autor, a variabilidade dos atributos do solo é consequência de interações complexas dos processos de formação e práticas de manejo do solo e da cultura, sobretudo em camadas superficiais do solo. No presente estudo, o alto CV% pode estar associado à excessiva entrada com maquinário na área, ocasionando uma compactação excessiva nesta região. Resultados semelhantes foram encontrados nos trabalhos de Pedrosa (2021) e Souza (2020), apresentando CV > 20%.

Correlação negativa foi observada entre o atributo areia e produtividade de soja ($r=-0,48$) e sorgo ($r=-0,53$). Entretanto, as produtividades se correlacionaram de maneira positiva com a MOS e CTC, com $r=0,50$ e $r=0,40$ para a soja e $r=0,60$ e $r=0,62$, para o sorgo, respectivamente. Para Iwata et al. (2010), o teor de MOS é determinante na melhoria da qualidade do solo em função da melhor estruturação, aumento da capacidade de troca catiônica e atividade microbiológica. Além disso, auxilia na manutenção e nos incrementos produtivos, como na conservação dos solos (DEMATTE et al., 2011).

As imagens NDVI permitem observar valores do índice entre 0,55 a 0,80 (Figura 2). De maneira geral, os menores NDVI foram registrados na região inferior do talhão (Figuras 2A e 2B), com maior predominância em área para o sorgo (Figura 2B). Já, os maiores valores foram encontrados na parte central e superior do talhão.

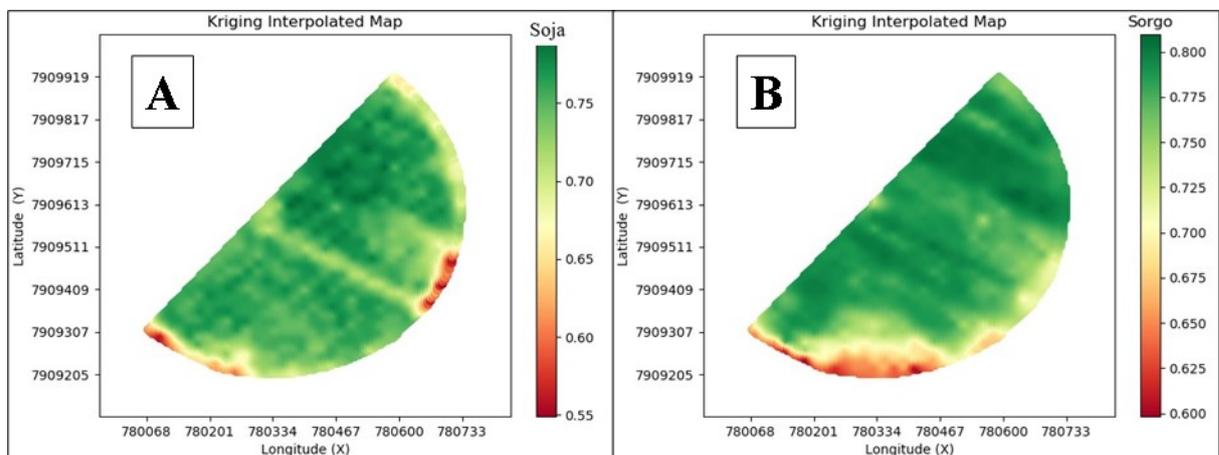


Figura 2. Mapas em NDVI para as culturas da soja (A) e sorgo (B). Fonte: O autor.

Para a produtividade, os mapas interpolados permitiram observar uma mesma tendência entre ambas culturas ($r= 0,36$), com menores valores na parte inferior do talhão e os maiores na parte central e superior (Figura 3).

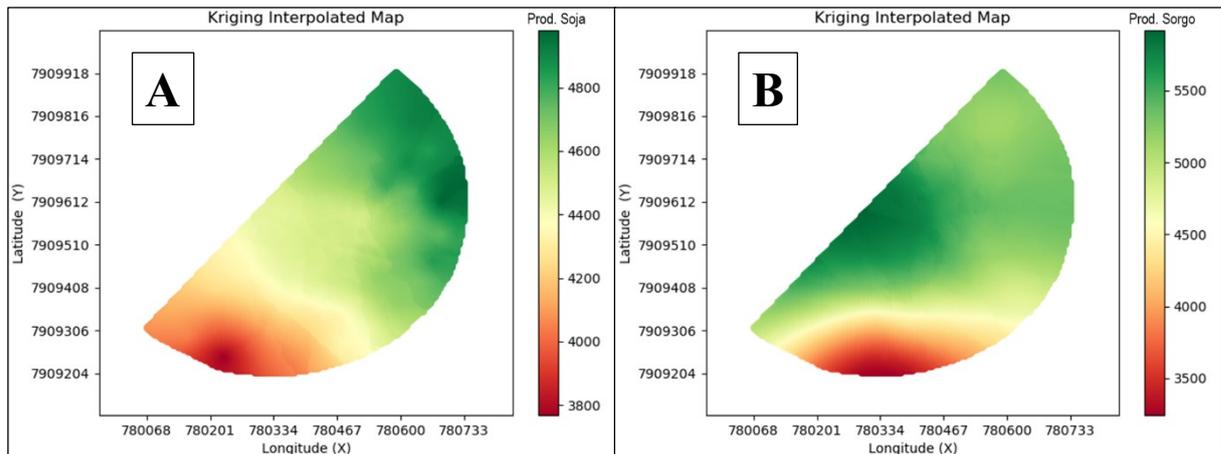


Figura 3. Mapa interpolado por krigagem para a produtividade de soja (A) e sorgo (B).
Fonte: O autor.

Para os atributos de solo, a presença de variabilidade espacial pode ser vista nos mapas interpolados para areia, argila, MOS, CE, CTC e RP (Figura 4). Neles há relação inversa para os dados de argila e areia. Quando comparados os mapas de areia aos de NDVI não houve correlação significativa (Figura 2). Porém, ao comparar o mapa de areia com os de produtividade houve relação inversa e significativa para a soja ($r= -0,48$) e o sorgo ($r= -0,53$) (Figura 3).

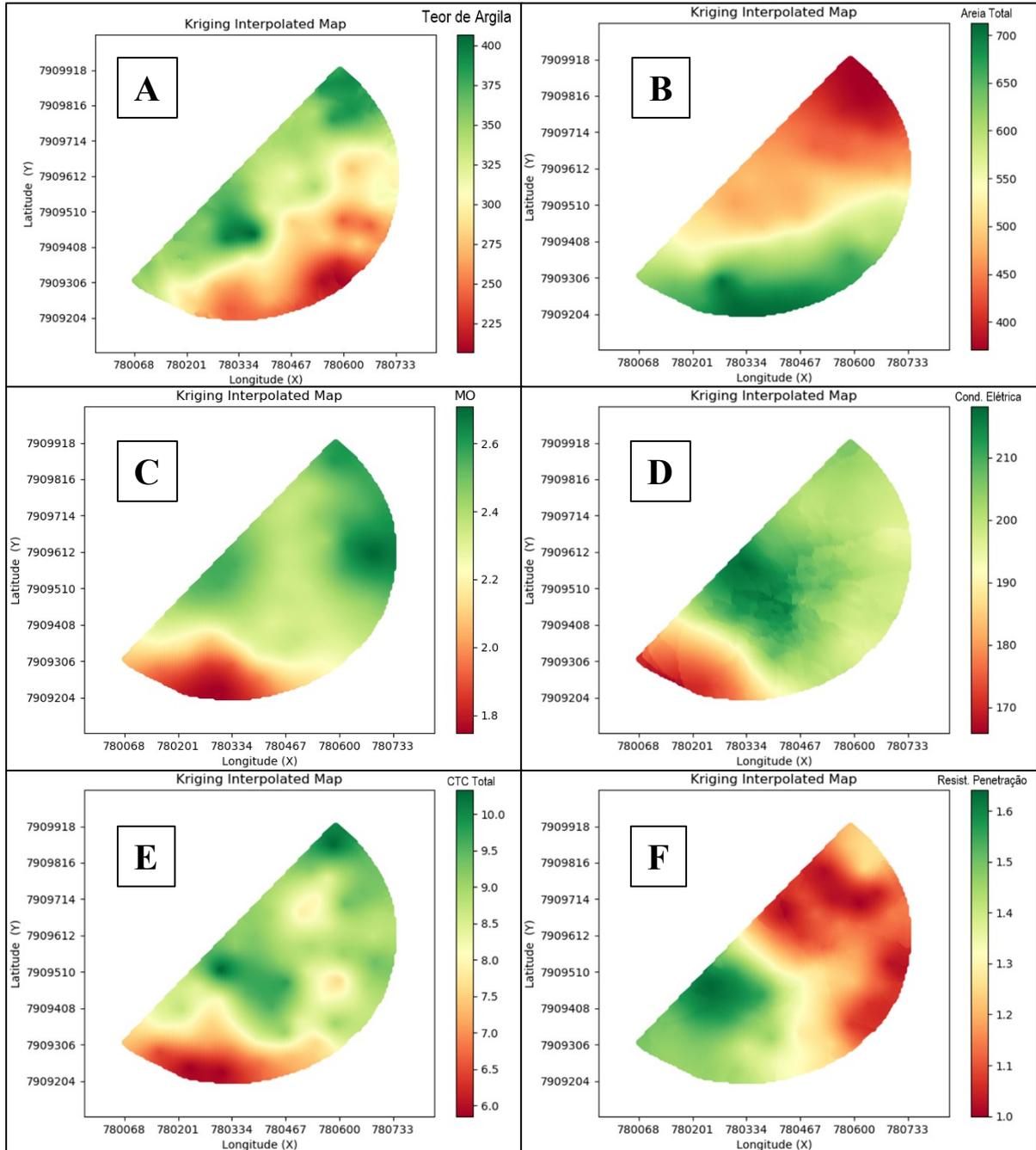


Figura 4. Mapas interpolados por krigagem para os atributos: argila (A), areia total (B), matéria orgânica do solo (C), condutividade elétrica (D), capacidade de troca de cátions (E) e resistência a penetração (F). Fonte: O autor.

A tendência observada para os dados de textura não foi verificada para os mapas dos atributos de solo (Figura 4). Para estes atributos nota-se uma relação direta entre MOS, CE e CTC, com os menores valores na parte sul do talhão e inversa com à RP. De acordo com Reis (2019), Souza (2020) e Pedrosa (2021), isso é indicativo da presença de compactação na área. Nesse sentido, é possível observar relação direta entre os mapas de MOS, CTC e CE com os da produtividade de soja ($r=0,50$; $r=0,44$ e $r=0,11$) e sorgo ($r=0,60$; $r=0,62$; $r=0,30$),

respectivamente. O que explica a menor produção na região inferior do talhão (Figura 3). Similar tendência é verificada para os mapas de NDVI, porém, com ausência de correlação espacial entre os dados (Figura 2).

3.2. Definição e validação de zonas homogêneas

A partir de ambas imagens NDVI (Figura 2) foram definidas zonas homogêneas (ZH) no talhão, diferenciando-o em duas zonas (Figura 5). Levando em consideração os valores NDVI e os maiores teores de MOS, CTC, CE e menores de RP (Figura 4), as ZH corresponderiam a regiões de alto (parte superior) e baixo potencial produtivo (parte inferior). Para cada ZH é esperado uma menor variabilidade nos teores dos atributos, assim como, uma maior variabilidade quando comparados os teores médios de ambas zonas.



Figura 5. Mapa de zonas homogêneas para o talhão com destaque para as zonas de alto potencial (vermelho) e baixo potencial produtivo (verde). Fonte: O autor.

A validação foi realizada a partir dos dados de produtividade e atributos de solo. Ao analisar as zonas observa-se que a ZH de alto potencial (Figura 5) a região em vermelho, está relacionada aos maiores valores de sorgo, argila, MOS, CE e CTC. Ou seja, solos que apresentam uma melhor estruturação química e física podem potencializar os incrementos produtivos. O impacto na produção é devido à heterogeneidade dos atributos do solo, o que influencia à condução dos sistemas de manejo (KERRY & OLIVER, 2007; 2008), e justifica, por sua vez, a análise da variabilidade espacial (FERRAZ et al., 2012). De acordo com Machado et al. (2015) e Reza et al. (2016), a análise espacial contribui na definição de zonas homogêneas.

A zona de baixo potencial (Figura 5) a região em verde, pode ser definida pelos maiores teores de areia (Figura 4B) e RP (Figura 4F), como pelos menores teores de argila, MOS, CE e CTC (Fig. 4A, C, D e E). Para Donagemma et al. (2016), o maior teor de areia pode limitar o manejo e a capacidade produtiva dos solos em razão da maior propensão à erosão, menor fertilidade natural e retenção hídrica, quando comparados a solos argilosos em condições semelhantes. Valicheski et al. (2012), ao avaliar o efeito da compactação verificaram que, intensidades de tráfego superiores a duas passadas de trator interferem na densidade, porosidade total e resistência à penetração dos solos, na camada de 0-0,1 m, com redução linear da altura e produção de matéria seca da parte aérea em plantas de cobertura.

Ao analisar as médias dos atributos de solo e produtividade para ambas ZH, observa-se que o atributo areia estaria diferenciando ambas as zonas de manejo. O atributo foi estatisticamente diferente na região de baixo potencial produtivo (Tabela 2). Os dados mostram que a diferenciação do talhão em ZH a partir de imagens NDVI é válida, e possibilitaria explicar a variação em produtividades para a soja e o sorgo.

Tabela 2. Teste de T para os valores médios dos teores produtividade e atributos físico-químicos do solo (0-0,2m) para as culturas da soja e do sorgo. Uberlândia, 2021.

Atributos	Alto Potencial	Baixo potencial
Produtividade Soja (kg ha ⁻¹)	4559,58 a	4113,54 b
Produtividade Sorgo (kg ha ⁻¹)	5239,01 a	3782,06 b
Areia total (g kg ⁻¹)	515,59 b	651,67 a
Argila (g kg ⁻¹)	318,30 a	269,50 b
¹ MOS (%)	2,38 a	2,03 b
² CTC (cmol _c dm ⁻³)	8,63 a	7,30 b
³ RP (MPa)	1,27 a	1,28 a
⁴ CE (μS cm ⁻²)	202,61 a	176,40 b

¹MOS: matéria orgânica do solo; ²CTC: capacidade de troca catiônica (cmol dm⁻³); ³RP: Resistência a penetração; ⁴CE: condutividade elétrica. Médias seguidas pela mesma letra na horizontal não diferem significativamente entre si pelo teste de T ao nível de 5% de significância.

O comportamento observado na ZH de baixo potencial pode refletir menor desenvolvimento de plantas e interferir negativamente na cultura subsequente, devido ao menor aporte de MOS e ciclagem de nutrientes. Lima et al. (2010), ao avaliar a relação entre o desenvolvimento vegetativo da soja e feijão e a RP em um Argissolo, sob semeadura direta e convencional, concluíram que 55% da variação da altura da soja pode ser explicada pela RP, apontando o valor crítico de 1,9 Mpa para o normal crescimento da cultura. Porém no presente estudo, a RP não diferenciou estatisticamente entre as ZH.

Em relação a produtividade da soja (Figura 3A), observa-se que ZH de alto potencial foi superior em 9,8% (7 sacas ha⁻¹) quando comparada à ZH de baixo potencial (Figura 3A). Para o sorgo (Figura 3B), a região de alto potencial foi superior em 27,8%, em relação à zona de baixo potencial produtivo (Figura 3B).

O índice de vegetação por diferença normalizada por si só, não é suficiente para determinação de zonas homogêneas. Portanto, ele serve como uma ferramenta que, aliada aos demais atributos, como textura, MOS e mapas de produtividade, auxiliam na maior riqueza de dados de uma determinada área. Neste sentido, os resultados do presente trabalho servem de auxílio para direcionar estratégias que visem aprimorar o manejo das lavouras.

4. CONCLUSÃO

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é uma ferramenta que auxilia na identificação de zonas homogêneas. Porém, torna-se necessário sua obtenção considerando mais de uma safra por cultura avaliada.

A definição de zonas com diferente potencial, a partir do NDVI, fica em maior evidência para a cultura do sorgo.

A presença de variação textural nos talhões, especificamente de areia, contribui para a diferenciação de zonas homogêneas.

REFERÊNCIAS

- BAZZI, C. L.; SOUZA, E. G.; KONOPATZKI, M. R.; NÓBREGA, L. H. P.; URIBE-OPAZO, M. A. Management zones Applied to pear orchard. **Journal of Food, Agriculture & environment**, v. 13, n. 1, p. 86-92, 2015. Disponível em: <http://ppat.md.utfpr.edu.br/resources/14639640321231.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.
- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 1–9, 2013. Disponível em: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- BOTTEGA, E. L. **Utilization of management zones in soy production in the Brazilian savanna**. 2014. 78 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/780>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 852 - Art. 1º Criar a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão – CBAP. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 21 set. 2012. Seção 1, n. 184.
- 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**. Brasília, v.51, p.1762-1772, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016001000008>.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, sétimo levantamento, abril 2021. Brasília: CONAB, 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 27 abr. 2021.
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 453-461, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902012000300006>.
- DELALIBERA, H. C.; WEIRICH NETO, P. H.; NAGATA, N. Management zones in agriculture according to the soil and landscape variables. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 6, p. 1197–1204, dez. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000600021>.
- DEMATTE, J. A. M.; BORTOLETTO, M. A. M.; VASQUES, G. M.; RIZZO, R. Quantificação de matéria orgânica do solo através de modelos matemáticos utilizando colorimetria no sistema Munsell de cores. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 590-597, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011005000006>.
- DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTONA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO-FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M. TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Characterization, agricultural potential, and perspectives

for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p.1003-1020, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900001>.

FERRAZ, G.A.S. et al. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. **Coffee Science**, v.7, p.59-67, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170009>.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 288 p.

GAVIOLI, A. et al. Optimization of management zone delineation by using spatial principal components. **Computers and Electronics in Agriculture**, n. 127, p. 302–310, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.06.029>.

HILLNHÜTTER, C.; MAHLEIN, A. K.; SIKORA, R. A.; OERKE, E. C. Remote sensing to detect plant stress induced by *Heterodera schachtii* and *Rhizoctonia solani* in sugar beet fields. **Field Crops Research**, 122:70-77, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.02.007>.

IWATA, B. de F.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F.; BRASIL, E. L.; COSTA, C. do N.; CAMPOS, L. P.; SANTOS, F. S. R. dos. Carbono total e carbono microbiano de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no cerrado piauiense. *In*: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, **Anais[...]** EMBRAPA Meio-Norte, 2010.

KERRY, R.; OLIVER, M.A. Comparing sampling needs for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood. **Geoderma**, v.140, p.383-396, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.04.019>.

KERRY, R.; OLIVER, M.A. Determining nugget: sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to kriging sparse soil data. **Precision Agriculture**, v.9, p.33-56, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9058-0>.

LIAGHAT, S. e BALASUNDRAM, S. K. A review: The role of remote sensing in precision agriculture. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v. 5, n. 1, p. 50-55, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.50.55>.

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, n. 1, p. 89-98, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000100012>.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. H.; AVANZI, J. C.; UMMUS, M. E. Avaliação da cobertura vegetal pelo índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 2, p. 204-214, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.959>.

MACHADO, F. C.; MONTANARI, R.; SHIRATSUCHI, L. S.; LOVERA, L. H.; LIMA, E. S. Spatial dependence of electrical conductivity and chemical properties of the soil by electromagnetic induction. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 39, n. 4, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcscs20140794>.

MANN, K. K.; SCHUMANN, A. W.; OBREZA, T. A. Delineating productivity zones in a citrus grove using citrus production, tree growth and temporally stable soil data. **Precision Agriculture**, Secaucus, v. 12, 4, p. 457-472, 2010.

MIRIK, M.; JONES, D. C.; PRICE, J. A.; WORKNEH, F.; ANSLEY, R. J. Satellite remote sensing of wheat infected by wheat streak mosaic virus. **Plant Disease**, 95:04-12, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-10-0256>.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de Precisão**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, p. 119 – 131, 2015.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n.1, p. 83-92, 2002.

PADRÓ, J.; MUÑOZ, F.; AVILA, L.; PESQUER, L.; PONS, X. Radiometric correction of Landsat-8 and Sentinel-2A scenes using drone imagery with field spectroradiometry. **Remote Sensing**, n. 10, p. 1687, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10111687>.

PEDROSA, G. M. **Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e sua relação com a produtividade do sorgo**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/31874>. Acesso em: 20 Ago. 2021.

REIS, N. C. **Resistência do solo à penetração na análise espacializada da produtividade de soja**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/28266>. Acesso em: 20 Ago. 2021.

REZA, S. K.; BURUAH, U. SPARKAR, D. SINGH, S. K. Spatial variability of soil properties using geostatistical method: a case study of lower Brahmaputra plains, India. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 9, n. 446, p. 1-8, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2474-y>.

RODRIGUES, M. S. Variabilidade espacial de atributos do solo e da produtividade de milho. **Dissertação de Mestrado**: Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal – SP. 114 p, 2010.

ROSCOE, R.; MIRANDA, R. A. S. **Manejo da adubação do milho safrinha**. 2019. Disponível em: <https://www.fundacaoms.org.br/base/www/fundacaoms.org.br/media/attachments/184/184/newarchive-184.pdf>. Acesso em 27 abr. 2021.

ROUSE, J. W., HASS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, DC. Proceedings. Washington, NASA SP-351, 1974, v. 1, p. 309-317. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>. Acesso em: 27 abr. 2021.

SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, planas e fertilizantes. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Informática Agropecuária, 1999. v. 1. n. 2. Disponível em: <http://www.sidalc.net/cgi->

<bin/wxis.exe/?IsisScript=AGB.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=247764>. Acesso em: 24 mai. 2021.

SOUZA, G.S. et al. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, v.11, p.73-81, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v11i1.15939>.

SOUZA, L. M. **Compactação do solo e o impacto na variação espacial de atributos físico-hídricos e produtividade da soja**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/30719>. Acesso em: 20 Ago. 2021.

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STURMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000900007>.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. de.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. ed. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, SBCS, 2000. p.1-54.