UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

DINÂMICA ESPAÇO TEMPORAL DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI e EVI COMO FERRAMENTA PARA O MANEJO DA CANA-DE-AÇÚCAR

ALINE TRAVASSOS CARDOSO

Orientadora: Profa. Dra. Teresa C.T. Pissarra
Coorientadora: Gislaine Costa de Mendonça

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA AGRONÔMICA.

Jaboticabal - SP
2º Semestre/2023

C268

Cardoso, Aline Travassos

Dinâmica espaço temporal do índice de vegetação NDVI e EVI como ferramenta para o manejo da cana-de-açúcar / Aline Travassos Cardoso. --Jaboticabal, 2023

54 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agronômica) -Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Teresa Cristina Tarlé Pissarra

Coorientadora: Gislaine Costa de Mendonça

1. índice de vegetação. 2. Sensoriamento remoto. 3. cana-de-açúcar. I.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL

DEPARTAMENTO: **Engenharia e Ciências Exatas**

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO : **DINÂMICA ESPAÇO TEMPORAL DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI e EVI COMO FERRAMENTA PARA O MANEJO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

ACADÊMICO: **Aline Travassos Cardoso**

CURSO: **Engenharia Agronômica**

ORIENTADOR (ES): Orientadora: Profa. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra
Co-orientadora: Gislaine Costa de Mendonça

Aprovado e corrigido de acordo com as sugestões da Banca Examinadora

BANCA EXAMINADORA:

	(Nomes)	(Assinaturas)
Presidente	Profa. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra	
Membro	Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva	
Membro	Me. Jean Lucas Pereira Oliveira	

Jaboticabal 31 / 08 / 2023

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 3 / 10 / 2023, por ato "ad referendum".

Chefe do Departamento
Prof. Dr. Danisio Prado Munari
Chefe do Depto. de Engenharia
e Ciências Exatas

FERECIMENTOS

Dedico a todos que me acompanharam, me apoiaram, torceram e me ajudaram, antes e durante a faculdade. Que me viram chorar e sorrir, sorrir e agradecer. Enfim, aos que tornaram este sonho possível.

Dedico principalmente ao meu pai, meu melhor amigo, Adalberto Gonçalves Cardoso, que desde o meu nascimento me apoiou e ajudou em todas as minhas escolhas, que me ensinou a dar valor à vida, e vivê-la com olhos de carinho, que foi eterno investidor de confiança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Ao meu pai Adalberto e aos meus irmãos Renan e Vitória, que sempre me incentivaram e me ajudaram nessa jornada.

As minhas queridas amigas que me apoiaram e me incentivaram a chegar aonde estou, Layla e Isabelle.

Aos meus amigos desde o primeiro ano de graduação, que sempre me deram suporte nessa etapa tão significativa para mim.

A minha família de Jaboticabal, minha república Dama de Copos, que sempre estiveram presente e foram essencial para que eu pudesse suportar esses cincos anos.

E a todos do Laboratório de Geomática (LabGeo), em especial, Marcia Masson, que iniciou este trabalho com ensinamentos, minha querida orientadora que sempre foi presente e contribuiu com a evolução do meu conhecimento, Professora Drª Teresa Cristina Tarlé Pissarra e a minha coorientadora Ma.Gislaine Costa de Mendonça que mesmo longe me ajudou a todo momento a desenvolver esse projeto, sempre muito paciente e solicita.

E a todas as pessoas que contribuíram nesta jornada,

o meu muito obrigado!

INDICE

OFERECIMENTOS ..... **Erro! Indicador não definido.**
AGRADECIMENTOS v
1. RESUMO 1
2. SUMMARY 2
3. INTRODUÇÃO 1
4. REVISÃO DE LITERATURA 5
4.1 Cana de açúcar 5
4.2 Geomática e sensoriamento remoto no monitoramento da cana de açúcar 8
4.3 Indice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no manejo da cana de açúcar 9
4.4 Relação NDVI, EVI e fertilidade do solo 11
5. MATERIAL E MÉTODOS 14
5.1. Área de estudo 14
5.2. Análise de fertilidade do solo 15
5.3. Dinâmica do índice de vegetação 17
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO 20
6.1. Fertilidade do solo 20
6.2. Dinâmica do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) 29
6.3 Dinâmica do índice de vegetação aprimorado (EVI) 35
6.4. Indice de vegetação e a fertilidade do solo 38
7. CONCLUSÕES 42
8. LITERATURA CITADA 43

1. RESUMO

O uso de tecnologias de sensoriamento remoto para auxiliar na condução do sistema de produção da cultura de cana-de-açúcar é importante para monitoramento e possíveis manejos. Objetivou-se, neste estudo, analisar a variabilidade espacial e temporal de índices de vegetação e correlacionar com a fertilidade do solo na cultura da cana de açúcar. Os dados de índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de vegetação realçado (EVI) do sensor MODIS foram coletados na plataforma SatVeg da Embrapa. Os mapas de variabilidade espacial foram elaborados no sistema de informação geográfica (SIG). O estudo foi conduzido no município de Itumbiara, Goiás. Os dados de padrões de fertilidade de amostras de solo coletadas durante os anos de 2009 a 2017 foram analisados estatisticamente. Os dados de NDVI e de EVI obtidos de 2000 a 2021 foram processados em mapas e foram classificadas pelo método de ponderação pelo inverso da distância. A análise dos dados mostrou que a correlação entre a reflectância espectral da superfície da cultura de cana-de-açúcar e os indicadores de vegetação NDVI e EVI aumentam conforme o desenvolvimento da cultura e são estatisticamente diferentes ao longo do tempo, Ao analisar os dados de fertilidade do solo com o NDVI e EVI, os coeficientes de correlação revelaram-se mais baixos. Os índices de vegetação podem ser utilizados para auxiliar no manejo da cultura, indicando regiões de menor desenvolvimento da cultura. Na área, o padrão de fertilidade do solo e a reflectância da cultura não foram correlacionados.

2. SUMMARY

TIME SPACE DYNAMICS OF THE NDVI and EVI VEGETATION INDEX AS A TOOL FOR SUGARCANE MANAGEMENT

The use of remote sensing technologies to help manage the sugarcane production system is important for monitoring and possible management. The aim of this study was to analyze the spatial and temporal variability of vegetation indices and correlate them with soil fertility in sugarcane cultivation. Vegetation index data by normalized difference (NDVI) and enhanced vegetation index (EVI) from the MODIS sensor were collected on Embrapa's SatVeg platform. The maps of spatial variability were prepared using the geographic information system (GIS). The study was conducted in the municipality of Itumbiara, Goiás. Data on fertility patterns of soil samples collected during the years 2009 to 2017 were statistically analyzed. The NDVI and EVI data obtained from 2000 to 2021 were processed into maps and classified by the inverse distance weighting method. Data analysis showed that the correlation between the spectral reflectance of the surface of the sugarcane crop and the NDVI and EVI vegetation indicators increase with crop development and are statistically different over time. soil fertility with the NDVI and EVI, the correlation coefficients were lower. Vegetation indices can be used to assist in crop management, indicating regions with less crop development. In the area, soil fertility pattern and crop reflectance were not correlated.

3. INTRODUÇÃO

A cultura da cana de açúcar (*Saccharum officinarum L.)* é uma das mais importantes no mundo, por conta de seus produtos, como açúcar e álcool, além da produção de derivados artesanais e geração de energia por bagaço. Valorizando os pequenos produtores, serve como fonte de renda na produção de derivados artesanais, como cachaça, rapadura, açúcar mascavo, caldo de cana e melado. Um setor que vem crescendo muito é o sucroalcooleiro brasileiro, principalmente por conta do mercado internacional de etanol, que expandiu muito a partir da crescente escassez do petróleo. Outro produto que vem crescendo muito é a biomassa gerada por bagaço de cana de açúcar, o que possibilita a cogeração de energia elétrica em indústrias. Setor que traz benefícios para um desenvolvimento sustentável (EMBRAPA, 2019).

Na área de geomática ocorre a integração dos meios utilizados para a aquisição e gestão de dados espaciais no uso de serviços de tecnologia e informação. Aliado a essa ciência, a agricultura de precisão faz uso de práticas agrícolas com base nestas tecnologias para o tratamento da variabilidade espacial (HELFER et al., 2019). Inicia-se na coleta dos dados, análises e interpretação dessas informações, geração das recomendações, aplicação no campo e avaliação dos resultados (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010), para a melhor tomada de decisão no manejo agrícola.

Para auxiliar no processo de compreensão do manejo da cultura de cana-de-açúcar, à medida que os sensores avançam, os satélites de observação da Terra fornecem novos dados aos especialistas em

sensoriamento remoto para detectar falhas no manejo e aprimorar as formas de conduzir o desenvolvimento da cultura mais eficientes.

Os índices de vegetação são um parâmetro importante de análise de desenvolvimento de culturas. Com imagens de satélite e programas informatizados de análise de dados espaciais pode-se aprimorar o manejo significativamente, bem como economizar tempo e recursos. Assim, os índices de vegetação em sensoriamento remoto são úteis na análise de alto nível do estado da lavoura e auxiliam em verificar as áreas que ocorrem algum problema de desenvolvimento da cultura.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, termo em inglês, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e o Índice de Vegetação Aprimorado, termo em inglês, Enhanced Vegetation Index (EVI) têm sido muito utilizadas (YI et al., 2007; ZANZARINI et al., 2013).

Estes índices podem ser analisados por meio da interpretação de imagens de sensores remotos e, em particular, por valores obtidos em séries temporais, que permitem avaliar a variação da área verde em certo período (JENSEN, 2009; RONQUIM, 2010; MAIA, 2019; VALLE JUNIOR et al., 2019). Muitos estudos estão sendo realizados e ainda é incipiente as análises com a fertilidade do solo para aprimorar as técnicas de agricultura de precisão (AP) com o auxílio do sensoriamento remoto (ARANTES et al., 2019).

A correlação da fertilidade com o NDVI e EVI pode ser uma ferramenta vantajosa para analisar a variabilidade de rendimento verificada e aperfeiçoar o manejo em áreas agrícolas por meio de um gerenciamento agrícola que leve

em consideração informações específicas e precisas de solo e de culturas (FERRONATO et al., 2019)

Estudos na área de sensoriamento remoto com o uso de imagens multiespectrais e termográficas para monitoramento das condições hídricas da cana-de-açúcar foram desenvolvidos por Silveira (2020), com o objetivo de avaliar alternativas para o monitoramento do estado hídrico da cana-de-açúcar. Essas avaliações permitiram registrar as diferenças entre os tratamentos irrigados quando comparados aos tratamentos sem irrigação nas duas câmeras utilizadas. As imagens termográficas têm potencial para avaliação do estado hídrico de plantas de cana-de-açúcar de modo rápido, não destrutivo e eficiente (SILVEIRA, 2020).

A técnica de sensoriamento remoto com o uso de índice espectral de vegetação é eficiente em analisar temporalmente os atributos dos solos com relação ao desenvolvimento e reflectância da cultura da cana de açúcar. Esta técnica de sensoriamento com o índice espectral de vegetação mostrou aplicabilidade em analisar temporalmente os atributos correlacionados ao corte e reflectância da cultura, mostrando ser uma ferramenta para determinação das zonas de diferentes potenciais produtivos e para delimitação de áreas de manejo (OLIVEIRA, 2019).

Para este projeto tem-se como hipótese: Os Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e de Vegetação Aprimorado (EVI) são eficientes para o monitoramento e manejo da fertilidade do solo em sistema de produção da cana-de-açúcar. Os principais objetivos foram investigar o comportamento espectral da cana-de-açúcar a partir do NDVI e EVI e a relação com a

fertilidade do solo; analisar a dinâmica espaço temporal da reflectância do NDVI e EVI) na cultura da cana-de-açúcar; e investigar a relação entre a fertilidade do solo e as taxas de NDVI e EVI na cultura da cana-de-açúcar;

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Cana de açúcar

A cana de açúcar *Saccharum* sp. (LINNEU,1753; SZMRECSÁNYI, 1979, p.110) é uma gramínea perene, alta e pertencente à família *Poaceae,* de grande interesse econômico para produção de açúcar e etanol em função do alto teor de sacarose. É um gênero originário das regiões tropicais do sul da Ásia, se desenvolvendo especialmente entre as latitudes 35º Norte e 35º Sul. A cana de açúcar é amplamente distribuída no Brasil - seu maior produtor, seguido da Índia e China, respectivamente (FAO, 2022). Por ter um maior desenvolvimento em zonas tropicais, em zonas temperadas é mais comum um crescimento menos vigoroso (BRADSHAW, 2016; OLIVEIRA, 2019), o que contribui para o sucesso do setor no Brasil e o destaque no cenário mundial para obtenção de energia renovável.

Metabolicamente, a planta possui fotossíntese do tipo C4, caracterizado por forte acumulação de biomassa, proporcionando uma taxa de crescimento e eficiência fotossintética, tendo um maior consumo de água e nitrogênio, ou seja, maior potencial produtivo. O metabolismo C4 tem a capacidade de concentrar CO2 ao redor do sítio de carboxilação da Rubisco por conta de suas adaptações anatômicas e bioquímicas (VON CAEMMERER & FURBANK, 2003; SAGE, 2004). A insolação solar tem influência direta na produção de perfilhos, variando de acordo com a quantidade de luz recebida durante um certo período (ARAÚJO, 2018). Em temperaturas até 30ºC a fotossíntese da

cana aumenta, já em temperaturas mais baixas a taxa de fotossíntese diminui e o crescimento vegetativo também.

A cana de açúcar possui um sistema radicular diferenciado em relação às demais culturas, principalmente as culturas anuais. Por se desenvolver em maior profundidade, obtém-se uma relação estreita com o pH, saturação por bases, teores de cálcio, porcentagem de alumínio nas camadas mais profundas do solo, fatores estes que por sua vez estão relacionados com a produtividade alcançada em solos com menor capacidade de retenção de umidade e baixa fertilidade. A cana de açúcar é bastante tolerável a acidez e alcalinidade, podendo se desenvolver em solos com pH entre 4 e 8,5, porém o ideal é em torno de 6,5 (SAMPAIO, 2021).

Seu desenvolvimento também depende das características físicas do solo, como a capacidade de retenção de água. Sendo assim, solos com deficiências hídricas podem gerar perda de produtividade, principalmente porque no quinto ou sexto mês de desenvolvimento a planta demanda de maior quantidade de água. Características desfavoráveis são encontradas em solos arenosos, pois não apresentam boa capacidade e armazenamento de água, aumentando a população de nematoides e favorecendo a perda de nutrientes por lixiviação, sendo assim não recomendado para cultivo da cana de açúcar (LEDA, 2019)

No Brasil, prevalece o plantio intensivo de cultivares de origem genética híbrida, adaptadas às condições de clima, solo e controle de pragas e vetores ao longo dos anos, como *S. officinarum, S. spontaneum, S. sinense, S. barberi, S. robustum e S. edule*. O melhoramento genético da cana de açúcar vem se

tornando o principal instrumento na melhoria da quantidade e qualidade da cana de açúcar produzida nos solos brasileiros, gerando aumento na rentabilidade das agroindústrias do álcool e açúcar (OLIVEIRA, 2008)

Adicionalmente, a expansão da cultura ocorreu majoritariamente no Cerrado brasileiro, onde os solos apresentam baixa fertilidade natural, intensificado pelo uso de fogo para a colheita. Tradicionalmente, o sistema de produção da cana consiste num cultivo intensivo por talhões ao longo dos ciclos de cortes, intenso revolvimento para preparo do solo, renovação do canavial e na maior parte sem irrigação. Novos sistemas de cultivo como o plantio direto e a condução do canavial sob irrigação plena ou deficitária vem avançando.

Apesar da cana-de-açúcar ser considerada uma cultura bastante resistente a condições climáticas desfavoráveis a solos pobres e ataques de patógenos. O manejo do solo é um fator crucial para o sucesso do cultivo e reduz os impactos das limitações que restringem o desenvolvimento da planta. Para alcançar a maior produtividade e plantas com alto teor de sacarose, que é o parâmetro utilizado na remuneração dos produtores, monitorar e compreender a distribuição da fertilidade do solo é a base para ações assertivas de manejo, e são indispensáveis para atingir a maior rentabilidade com a cultura.

4.2 Geomática e sensoriamento remoto no monitoramento da cana de açúcar

A geomática visa à aquisição a análise, armazenamento, gerenciamento e disseminação de dados espaciais, sendo a junção de todos os meios necessários para operações científicas, administrativas, legais e técnicas no processo de desenvolvimento de informação espacial.

A definição de sensoriamento remoto tecnicamente é relacionada a um conjunto de técnicas destinadas à obtenção de diversas informações sobre objetos, não sendo necessário um contato físico direto com ele. Esse termo, sensoriamento remoto, é utilizado para descrever métodos que utilizam a energia eletromagnética na detecção e medida das características de objetos, incluindo as energias relativas à luz, onda e calor (GARCIA, 1982).

O sensoriamento remoto vem se mostrando um instrumento de elevado potencial na coleta e no processamento de dados de áreas agrícolas (MOTOMIYA et al., 2012), principalmente na cultura de cana de açúcar. Em áreas maiores vem se destacando como ferramenta eficiente no manejo de grandes culturas, como soja, milho e cana, com imagens de satélites com diferentes níveis de resolução espacial e temporal. Dados esses que permitem adquirir informações relacionadas a estádio fenológico, uso e ocupação do solo, estresse hídrico e nutricional na cultura da cana de açúcar (RUDORFF et al., MOREIRA, 2002).

O mapeamento agrícola é um método de estimativa essencial, na cultura de cana de açúcar, pois a vegetação possui comportamento espectral que permite detectar variações por meio das imagens do satélite. Esse

mapeamento pode ser feito com o uso de índices espectrais ou índices de vegetação, tais índices são arranjos de dados espectrais de diversas bandas, que tem como objetivo condensar e refinar a relação desses dados com os parâmetros biofísicos de produtividade e produção.

Dentre os índices de vegetação encontrados na literatura, os mais utilizados em pesquisas e monitoramento agrícola, são: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, termo em inglês, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e o Índice de Vegetação Aprimorado, termo em inglês, Enhanced Vegetation Index (EVI).

Os índices de vegetação conseguem fazer uma avaliação das transformações que ocorrem com o decorrer do tempo, possibilitando um monitoramento ou detecção qualitativa da vegetação verde, com o uso de sensoriamento remoto. (LIRA et al., 2009; GALVANIN et al., 2014).

4.3 Indice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) no manejo da cana de açúcar

O NDVI, que vem do inglês *Normalized Difference Vegatation Index*, traduzindo para o português significa Índice de vegetação por diferença normalizada, é um índice usado para avaliar os aspectos fisiológicos e nutricionais da vegetação. É a análise da reflectância nas bandas do infravermelho próximo - NIR (700 nm a 1.300 nm) e da banda vermelha - RED (600 nm a 700 nm), sendo assim, matematicamente é comparado a quantidade de luz vermelha visível absorvida com o infravermelho próximo refletido pela

planta (COSTA FILHO et al., 2007; OLIVEIRA, 2019). Este índice é usado em diferentes culturas agrícolas (RODRIGUES et al., 2013; KLERING et al., 2016; ALFACE et al., 2019)

O NDVI é calculado a partir das bandas NIR e RED, sendo expresso matematicamente da seguinte maneira:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

em que:

NIR - valor de reflectância na região do infravermelho próximo;

RED - valor de reflectância na região do visível vermelho.

Os valores variam de -1,0 a 1,0. Onde os valores negativos comumente mostram vegetação sem atividade e alvos não vegetais, 0-0,3 vegetação com algum tipo de deficiência, sem folhas, em adaptação ao clima durante os períodos de inverno, esses valores ocorrem por conta de uma baixa taxa fotossintética. 0,33-0,66 vegetação moderadamente sadia e mais próximo de 1 vegetação muito sadia (JUNGES et al., 2007).

A aplicação do NDVI na agricultura de precisão tem se mostrado eficaz e usual em diversos estudos, desde fenologia de vegetação, classificação espectrais e avaliação primária de produtividade. Tucker (1979) afirma que o NDVI é capaz de caracterizar e quantificar determinado parâmetro biofísico das culturas agrícolas, pois reduz as dimensões das informações multiespectrais através de um simples número, e fornece um dado altamente correlacionado com os parâmetros agronômicos.

Romani et al (2011) realizaram um acompanhamento da safra de cana de açúcar no estado de São Paulo por meio de séries temporais de NDVI, e concluiram ser possível acompanhar a evolução da cultura ao longo do tempo, sendo possível indicar quais períodos a cultura atingia os seus valores máximos e mínimos. Machado (2003) conseguiu determinar a biomassa da cana de açúcar nos estágios iniciais com dados espectrais do satélite Landsat e Green NDVI.

4.4 Relação NDVI, EVI e fertilidade do solo

Na planta saudável, a clorofila absorve a maior parte da luz vermelha visível e reflete a maior parte do vermelho próximo, sua alta atividade fotossintética terá uma reflectância na banda vermelha e maior reflectância na banda do infravermelho próximo.

Os principais aspectos do comportamento espectral da folha são: Na região do visível, os pigmentos de clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%) dominam a reflectância espectral, onde a energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e espalhamento. Já a região do infravermelho próximo a reflectância espectral predomina na região da folha devido a interação da energia incidente do mesofilo. Sua absorção é pequena, ocorrendo espalhamento interno na folha e a absorção da água é geralmente baixa. (POZONI, 2002)

Os nutrientes representam cerca de 8,6% da matéria seca das plantas e qualquer alteração nesse porcentual acarretará maiores benefícios ou prejuízos

para a planta. Para que o potencial de crescimento e desenvolvimento das plantas aumente é necessário que todos os nutrientes estejam disponíveis em teores adequados para as plantas (TANAKA; MASCARENHAS, 2006; NAKA, 2019).

O solo é capaz de transportar os elementos para as plantas por processo de absorção radicular conforme a exigência de cada espécie vegetal. Alguns elementos são exigidos em quantidades superiores aos demais, sendo os macronutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S). Já os exigidos em menores quantidades são os micronutrientes: ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B) molibdênio (Mo) e cloro (Cl). São extremamente importantes para o desenvolvimento da planta (PRADO et al., 2021)

A matéria orgânica (MO) é formada de organismos, resíduos vegetais e resíduos animais que estão em decomposição sendo possível a alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, interferindo no crescimento e desenvolvimento das plantas. O pH se refere à atividade do íon hidrogênio nos solos, que apresenta a característica de fazer ligações covalentes de alta energia que provocam reações que dirigem a maioria das demais reações que ocorrem no solo.

A soma de bases trocáveis (SB) representa a soma dos teores de cátions permutáveis no solo. A saturação por bases é um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo. A capacidade de troca de cátions (CTC) corresponde à capacidade que o solo possui em reter os cátions trocáveis. Quanto maior for à quantidade de cargas negativas existentes na

superfície das partículas sólidas do solo, maior será a CTC. Se a saturação por bases do solo (V%) é alta, ou seja, maior ou igual a 50%, o solo é eutrófico (rico em nutrientes, especialmente em cálcio). Isso ocorre porque mais da metade do reservatório-solo (CTC) armazena esses nutrientes representados pela soma de bases (SB).

O cálcio tem relação com o crescimento das plantas e sua deficiência temporária pode acarretar colapso no caule, ocorrer uma germinação deficiente do pólen e abscisão prematura das flores.

O Magnésio compõe a molécula da clorofila, que auxilia na ativação das enzimas relacionadas à síntese de proteínas e na absorção de P. Sua deficiência em folhas mais velhas pode causar clorose internerval. O Fósforo está relacionado aos processos de fotossíntese, respiração, armazenagem e de transferência de energia e divisão celular (TANAKA; MASCARENHAS, 2006; NAKA, 2019).

O ferro é importante na classificação dos solos e nas suas propriedades químicas, como por exemplo a adsorção específica. Ele apresentar diferentes formas da quais podem interferir na quantidade de energia eletromagnética refletida (DEMATTÊ et al GARCIA, 1999; NAKA, 2019)

O valor do NDVI varia de acordo com a quantidade de acúmulo de biomassa que ocorre por conta de uma maior disponibilidade de nitrogênio resultando em grandes teores de clorofila nas folhas. Incrementos na concentração de nitrogênio promovem alterações nos espectros de reflectância.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma unidade experimental localizada na zona rural de Itumbiara, região Sul do estado de Goiás (Figura 1). O Município possui extensão de 2462,9km², a 443 metros de altitude do nível médio dos mares (IBGE, Itumbiara, 2019).

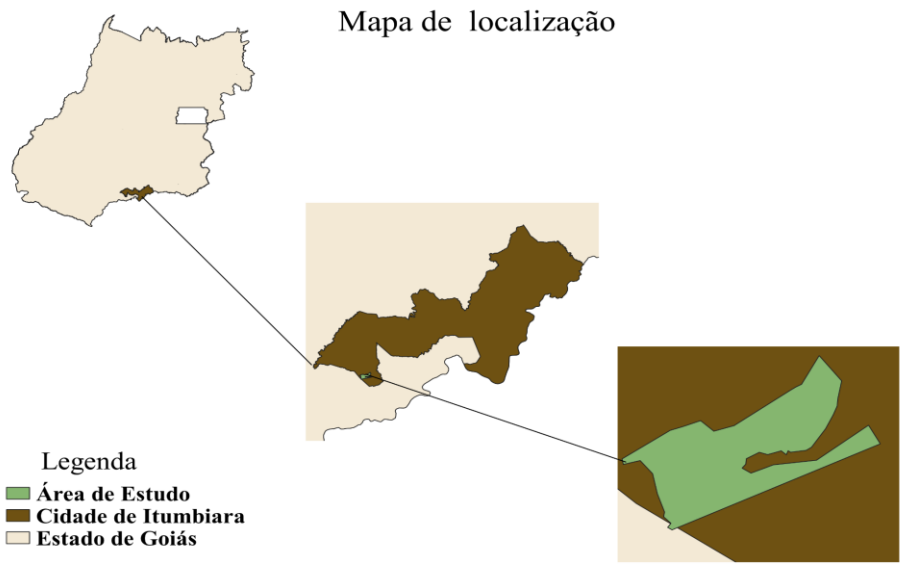


Figura 1. Localização da área de estudo: Itumbiara-GO

O clima da região de Itumbiara é caracterizado por duas estações bem definidas sendo uma estação seca que varia entre os meses de abril-setembro, e outra chuvosa, outubro-março (ALCÂNTRA; STCH, 2011). A concentração de chuvas ocorre durante os meses mais quentes, seguido de em média 5 meses secos, ocorrendo o déficit hídrico acentuado (MARCHIORI et al. 2003). O domínio morfoclimático e a caracterização da vegetação nativa remanescente do Cerrado destacam uma região de campo, com o predomínio de solos ácidos e altamente intemperizados (latossolos vermelhos distróficos, distroférricos;

argilosos vermelhos e cambissolos háplicos), com diminuição de sua fertilidade ao longo do tempo (IBGE, 2021).

A área experimental compreende 630 hectares (Figura 1), distribuída em quatro glebas: gleba I (190,02 ha); gleba II (182,39 ha); gleba III (68,71 ha) e gleba IV (188,93 ha). Nas glebas predominam a classe de solo Argissolo Vermelho, com cultivo de cana de açúcar (cultivar: SP81-3250).

O histórico do manejo da fertilidade do solo foi realizado durante as operações de plantio, onde foram aplicadas formulações com ureia ($(NH_2)_2CO$), fosfato monoamônico (MAP) e cloreto de potássio (KCl), obedecendo a recomendação de adubação obtida por meio das análises de fertilidade do solo. Aplicou-se anualmente nas soqueiras, por meio de adubação de cobertura, formulações a base de nitrato de amônio (NH_4NO_3) e cloreto de potássio (KCl).

5.2. Análise de fertilidade do solo

A coleta de dados para análise do solo foi realizada durante 4 anos de experimentação, de 2009 a 2017. Os pontos de amostragem foram compostos por 31 pontos na gleba I; 32 na gleba II, 13 na gleba III e 34 na gleba IV, totalizando 110 pontos em cerca de 630 hectares, conforme Figura 2.

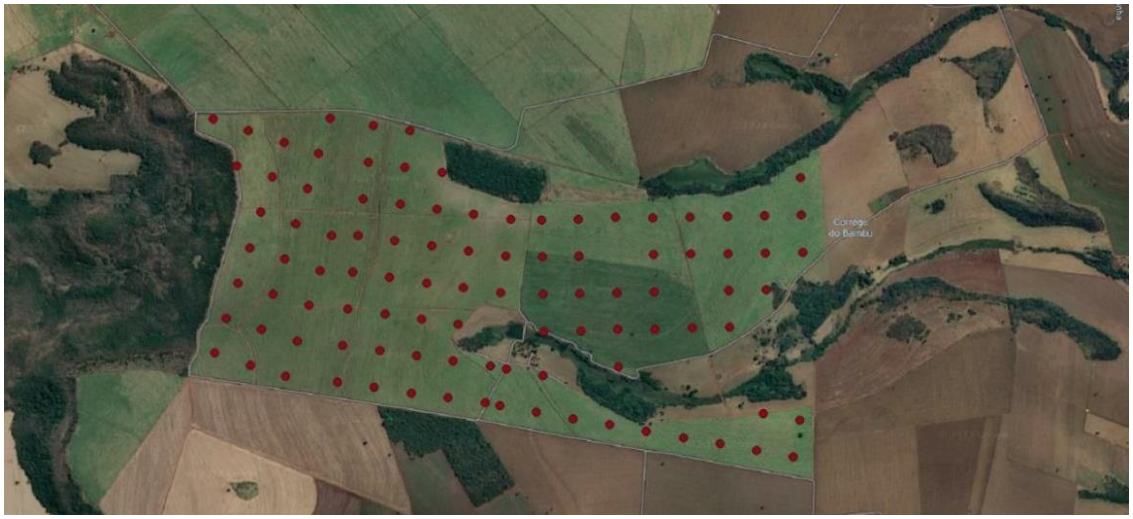


Figura 2. Pontos de amostragem análise do solo.

A caracterização química do solo foi realizada em cada ponto, em cada parcela, de acordo com a metodologia descrita pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997;1999). Os parâmetros químicos analisados foram os seguintes: potencial hidrogeniônico (pH), macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), os nutrientes principais cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), os micronutrientes boro (B), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo), cloro (Cl) e manganês, saturação de bases (V%) e capacidade de troca catiônica (CTC). Estes nutrientes são absorvidos pela planta e estimulam o crescimento e são constituintes dos minerais e da matéria orgânica do substrato solo onde a planta cresce e também são encontrados dissolvidos no solo.

5.3. Dinâmica do índice de vegetação

Para analisar a dinâmica espectral da cana foram obtidos os dados de NDVI e EVI disponíveis na Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg), ferramenta web, de uso disponibilizado sem custo pela EMBRAPA (https://www.satveg.cnptia.embrapa.br), destinada à observação e análise de perfis temporais de índices vegetativos por diferença normalizada e de realce da vegetação (NDVI e EVI). Os dados são derivados de imagens de satélite geradas no SATVeg na plataforma com finalidade de visualização de perfis temporais dos índices vegetativos NDVI e EVI que processa imagens derivadas do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), instrumento a bordo dos satélites Terra e Água, adquiridas do *Land Processses Distributed Active Center (LP-DAAC).* Cada pixel tem um tamanho de 250x250 metros, disponibilizadas publicamente pela Nasa a partir do ano 2000.

O MODIS do TERRA e o MODIS do ACQUA lançados em dezembro de 1999 e maio de 2002 respectivamente, visualizam a superfície completa da Terra de 1 a 2 dias. O MODIS do TERRA é um radiômetro-imageador com resolução espacial de 250 (bandas 1 e 2), 500 (bandas 3 a 7) e 1000 metros (bandas 8 a 36), totalizando 36 bandas espectrais que se estendem do visível ao infravermelho termal (0,4 a 14,4µm), com resolução radiométrica de 12 bits (http://modis.gsfc.nasa.gov/about).

A tecnologia SatVeg disponibiliza ao usuário uma interface amigável, que conta com um mapa de referência com imagens GoogleMaps para auxiliar na seleção das áreas de interesse, além de ferramentas para filtragem das

séries temporais, módulos para carregamento de arquivos vetoriais e cálculo de perfis médios, entre outros.

Os dados de NDVI e EVI foram coletados para o período dos anos de 2000 até 2021. A coleta de dados seguiu a malha de amostragem da análise de fertilidade do solo, cada ponto foi georreferenciado no programa *Google Earth Pro* e inserido na plataforma digital do SatVeg para a coleta de dados das séries temporais.

Esses índices expressam as variações da biomassa verde e permitem observar o comportamento da vegetação na superfície terrestre ao longo do tempo, oferecendo apoio a atividades de monitoramento agrícola e ambiental.

Os dados de fertilidade, NDVI e EVI foram analisados estatisticamente no programa R. Foram obtidos dados de análises descritivas como a média, mediana, mínima, máxima, desvio padrão, coeficiente de variação. A variabilidade espacial dos atributos de fertilidade, NDVI e EVI foi extrapolada a partir da interpolação dos dados de NDVI pelo método IDW no SIG-ArcGis.

Os valores dos resultados obtidos foram interpolados no espaço para mapear a fertilidade do solo, o NDVI e o EVI. Tendo em vista que os dados são anômalos, com uma resolução amostral esparsa, o método da ponderação pelo inverso da distância (*Inverse Distance Weighting – IDW*) foi selecionado, tendo em vista que esse método interpola os valores no espaço fazendo a média ponderada dentro de um raio de busca R. Os pontos amostrais existentes fora do raio de busca não são contabilizados na média, para que qualquer ponto Xi e Yi dessa região fique o mais próximo dos pontos amostrais.

Para a correlação entre os indices NDVI e EVI, foi selecionado o estatísticamente o coeficiente de correlação de postos de Spearman, por ser uma medida não paramétrica de correlação de postos (dependência estatística entre a classificação de duas variáveis). O coeficiente avalia com que intensidade a relação entre duas variáveis pode ser descrita pelo uso de uma função monótona. A correlação de Spearman entre duas variáveis é igual à correlação de Pearson entre os valores de postos daquelas duas variáveis. Enquanto a correlação de Pearson avalia relações lineares, a correlação de Spearman avalia relações monótonas, sejam elas lineares ou não. Se não houver valores de dados repetidos, uma correlação de Spearman perfeita de +1 ou -1 ocorre quando cada uma das variáveis é uma função monótona perfeita da outra (SPEARMAN, 1987).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A agricultura em larga escala encontra na detecção remota informações e dados espectrais precisos para o monitoramento e manejo da produtividade nos canaviais. Os índices de vegetação que refletem a atividade de crescimento e o desenvolvimento da vegetação é uma ferramenta importante da agricultura de precisão e, portanto, compreender o comportamento espectral da cultura é fundamental para estabelecer relações entre os sistemas de produção e o manejo de atributos do solo e condução da cultura no campo.

A promoção da segurança alimentar e da sustentabilidade ambiental nos sistemas agrícolas requer uma abordagem integrada de gestão agrícola que maximize a produção e minimize a exploração das reservas de nutrientes do solo e a degradação das propriedades físicas e químicas do solo que podem levar à degradação da terra, incluindo a erosão do solo.

6.1. Fertilidade do solo

A fertilidade do solo foi analisada no intuito de verificar a capacidade do solo de sustentar o crescimento da cultura de cana-de-açúcar e otimizar o rendimento para o período [ano 2009 a 2017], na área total os teores médios dos nutrientes indicam solos ácidos (Tabela 1).

Tabela 1. Análise descritiva das variáveis de fertilidade no ano de 2009 à 2017.

	Parâmetros descritivo				
	Gleba	1	2	3	4
PH	média	5,3	5,0	5,2	5,1
	desvio padrão	0,2	0,3	0,2	0,3
	min	4,9	4,5	4,8	4,5
	max	6,8	6,5	6	6
MO (g/dm³)	média	31,2	28,4	31,1	35,1
	desvio padrão	4,1	3,4	3,3	4,1
	min	25	21	25	27
	max	42	36	43	45
P (mg/dm³)	média	31,7	12,5	25,3	15,9
	desvio padrão	31,2	7,2	12,9	8,6
	min	8	2	10	4
	max	311	53	112	77
K (mmolc/dm³)	média	1,2	1,0	0,9	0,9
	desvio padrão	0,6	0,5	0,3	0,4
	min	0,4	0,2	0,3	0,3
	max	7,4	2,5	1,7	3,1
Ca (mmolc/dm³)	média	31,1	22,3	28,4	24,4
	desvio padrão	12,9	11,5	10,4	16,4
	min	12	7	9	5
	max	120	74	58	206
Mg (mmolc/dm³)	média	10,1	8,4	10,4	7,0
	desvio padrão	3,4	3,9	3,1	3,4
	min	4	3	4	2
	max	21	25	25	16
Ca	média	77,7	71,3	77,2	77,0
	desvio padrão	13,1	16,5	12,6	15,8
	min	52	5,3	56	57
	max	148	126	103	257

Tabela 1. Continuação…

	Parâmetros descritivo				
	Gleba	1	2	3	4
CTC (mmolc/dm³)	média	52,9	42,5	49,7	39,8
	desvio padrão	11,1	12,9	10,3	14,0
	min	29,4	18,3	24,6	11,4
	max	89,5	84	75	83,1
V%	média	38,3	34,5	37,3	43,2
	desvio padrão	26,6	25,8	21,1	26,8
	min	5	6	4	3
	max	142	125	117	119
S (mg/dm³)	média	0,2	0,2	0,2	0,2
	desvio padrão	0,0	0,1	0,1	0,1
	min	0,08	0,12	0,07	0,08
	max	0,29	0,7	0,37	0,38
B (mg/dm³)	média	3,5	2,8	2,9	3,1
	desvio padrão	1,0	2,4	0,9	0,7
	min	2	1,2	1,7	1,9
	max	7,7	36	6,3	5
Cu (mg/dm³)	média	19,9	16,3	13,6	16,2
	desvio padrão	6,3	6,5	5,2	4,8
	min	12	7	6	10
	max	62	41	31	34
Fe (mg/dm³)	média	10,8	11,6	7,1	6,0
	desvio padrão	7,2	8,5	3,8	2,5
	min	3,2	3,7	2	1,5
	max	65,5	46,9	21,6	14,8
Mn (mg/dm³)	média	0,7	0,4	0,6	0,6
	desvio padrão	0,4	0,3	0,4	1,5
	min	0,2	0,1	0,2	0,1
	max	3,9	2,7	2,7	20,5

Em termos de variabilidade interanual, a mudança nas concentrações de cada nutriente no solo é baixa. Entretanto observa-se um crescimento da concentração dos elementos, fatores esse que seguem um padrão de adubação anual, com tendência de se manter um equilíbrio nutricional para a cultura.

A acidez do solo ou pH do solo, é a concentração de íons H^+ presente na solução do solo e um dos indicadores de sua fertilidade. A faixa de pH ideal dos solos para a agricultura é entre 5,5 e 6,5. Isto porque é nesta faixa que os nutrientes ficam mais disponíveis às plantas, ou seja, na solução do solo.

Na análise de pH os valores variaram em torno de 4.5 a 6.8 entre as glebas, conforme Figura 3, considerando solo ácido em toda sua área.

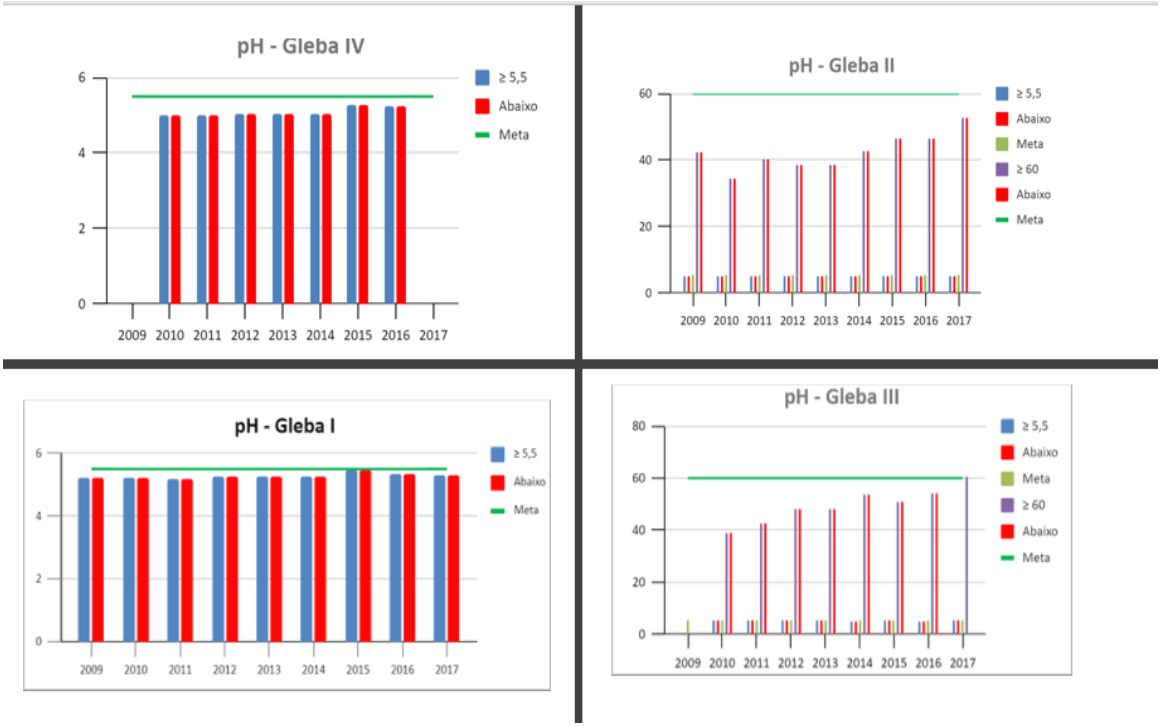


Figura 3. Variação anual de pH

A gleba 2 possui os menores índice de pH, cerca de 4.5, no entanto a gleba 1 possui valores maiores cerca de 6.8, valores esses que se dão por

conta de uma adubação em camada 20-40 cm com calcário que tem como finalidade controlar o pH do solo. A correlação foi baixa, 0,12, não apresentando uma correlação significativa.

No teor de matéria orgânica observa-se que ocorre uma variação dos valores em todos os anos analisados (Figura 4), oscilando entre 21 a 45 g/dm³ caracterizando uma superfície de solo com textura argilosa.

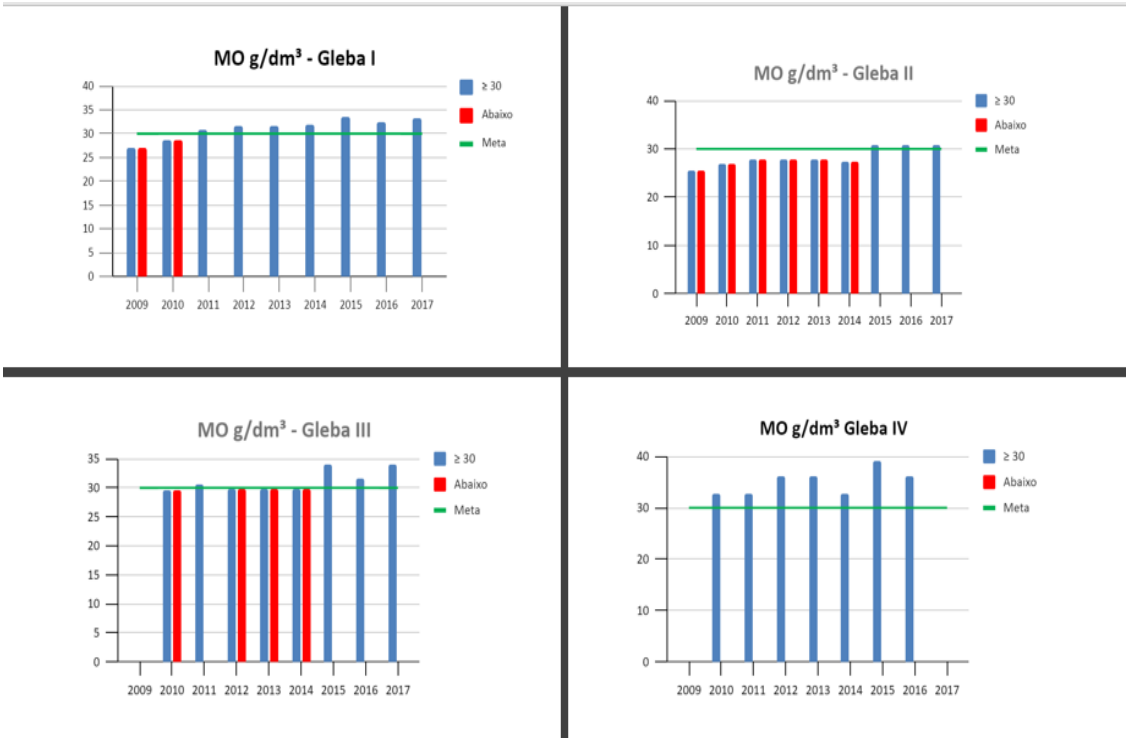


Figura 4. Variação de MO

O fósforo (P2O5) variou de 2 a 77 mg/dm³ entre todas as glebas, porém teve seus maiores valores na Gleba 1 (8 – 76 mg/dm³) e Gleba 3 (10 - 61 mg/dm³) e diminuição dos valores nos restantes das glebas 2 e 4 (2 – 53 mg/dm³), não atingindo a meta de 16 mg/dm³ na maioria dos anos (Figura 5). Este elemento apresenta função importante na fotossíntese, respiração, crescimento celular e outros processos na cana de açúcar. O perfilhamento e

altura da planta são fortemente influenciados pela adubação fosfatada, sendo adequado e positivo o uso de doses de P2O5 na produção de colmos.

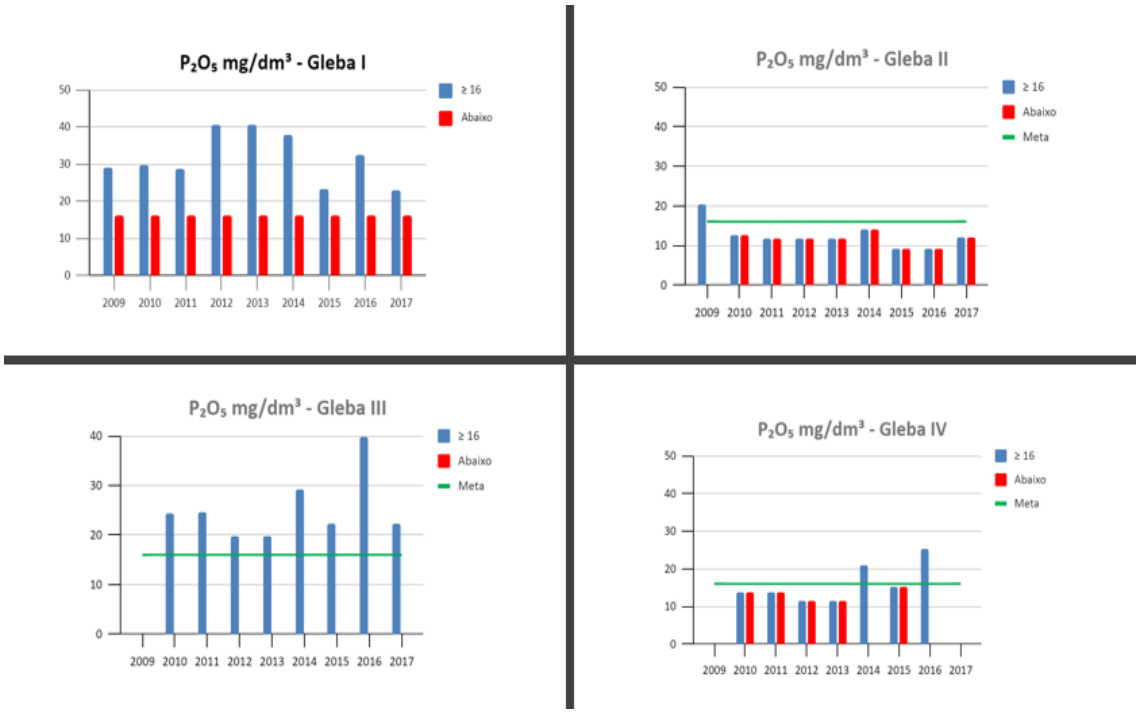


Figura 5. Variação de fósforo

O Potássio variou entre 0,2 a 7,4 mmolc/dm³ (Figura 6), com teores muito baixos, podendo ter resultados melhores se houvesse aplicação de vinhaça.

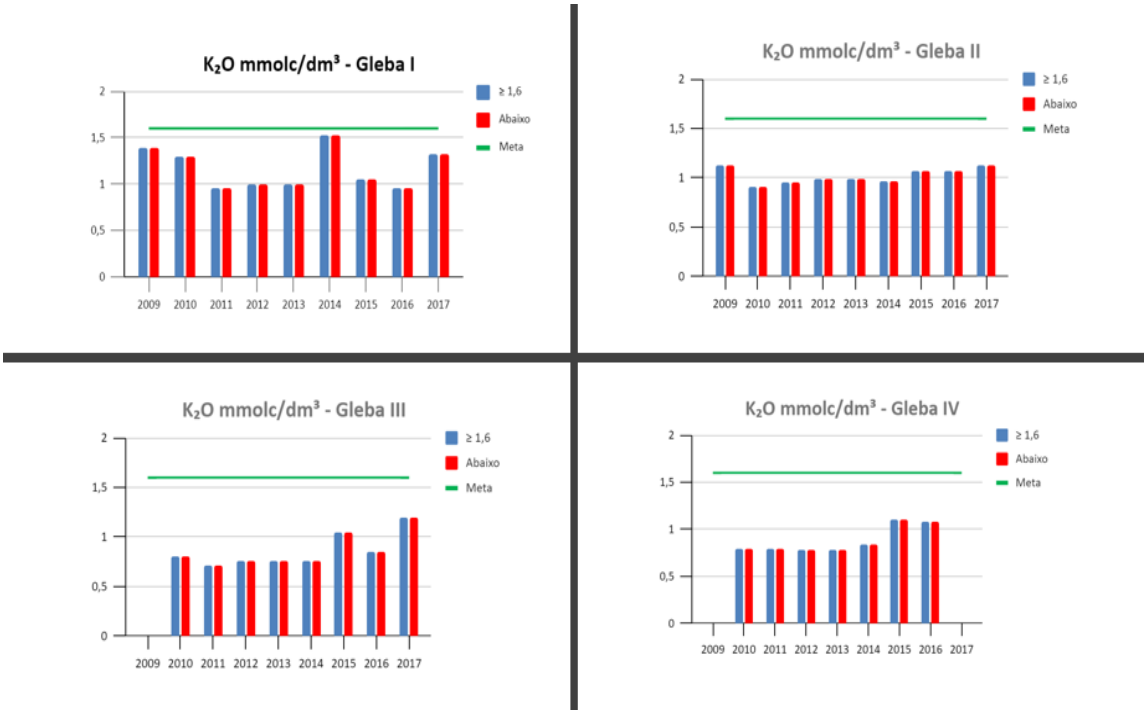


Figura 6. Variação de Potássio

O potássio trata-se de um elemento necessário para reprodução e crescimento, seu baixo valores faz com que as plantas se tornem menos resistentes a baixa temperatura, doenças e pragas, além de menor resistência das plantas a estiagens e ao excesso de água (VIEIRA, 2010).

A capacidade de troca catiônica (CTC) é a soma total dos cátions que o solo consegue reter na superfície coloidal. O solo apresentou CTC acima da média esperada, variando de 24 a 257 (Figura 7) mmolc/dm³. A CTC representa a graduação de capacidade de liberação de vários nutrientes, favorecendo a manutenção da fertilidade por um longo período e reduzindo ou evitando a ocorrência de efeitos tóxicos da aplicação de fertilizantes.

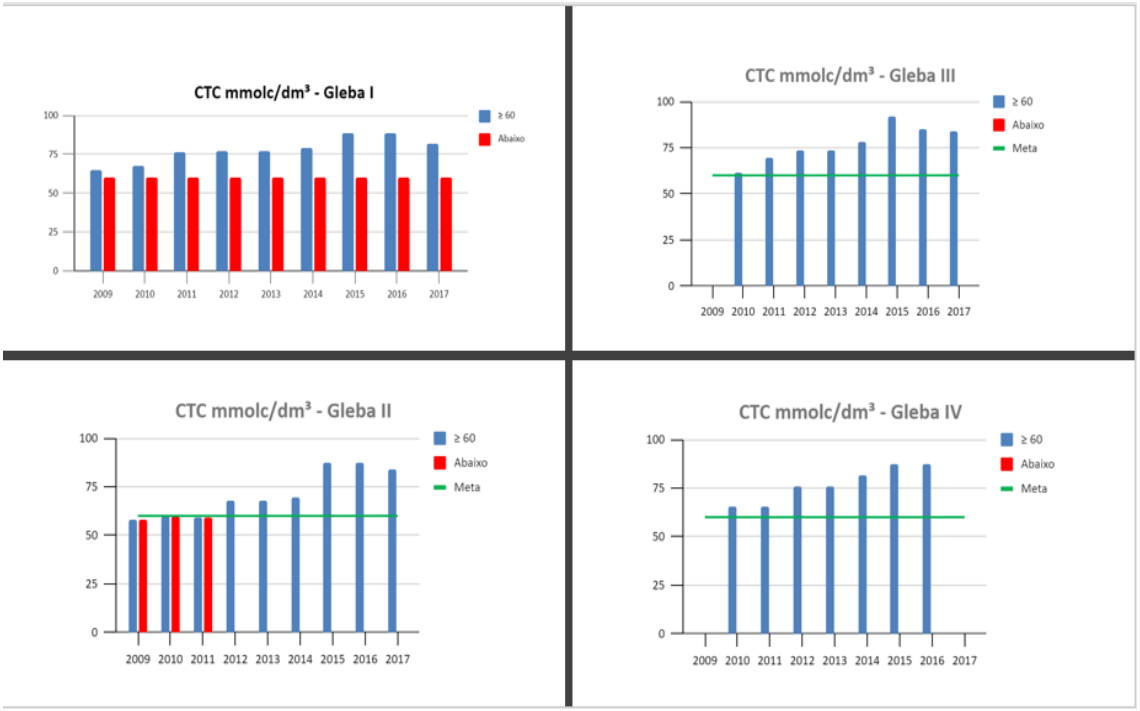


Figura 7. Variação de CTC

A saturação por base é um ótimo indicador de condições gerais de fertilidade, neste trabalho apresentou valores abaixo da média (V% < 60) sendo considerados solos de menor fertilidade, solos distróficos (Figura 8). A cultura de cana de açúcar necessita de um V% entre 60% e 80% e um pH entre 5,7 e 6,5 para uma boa produtividade.

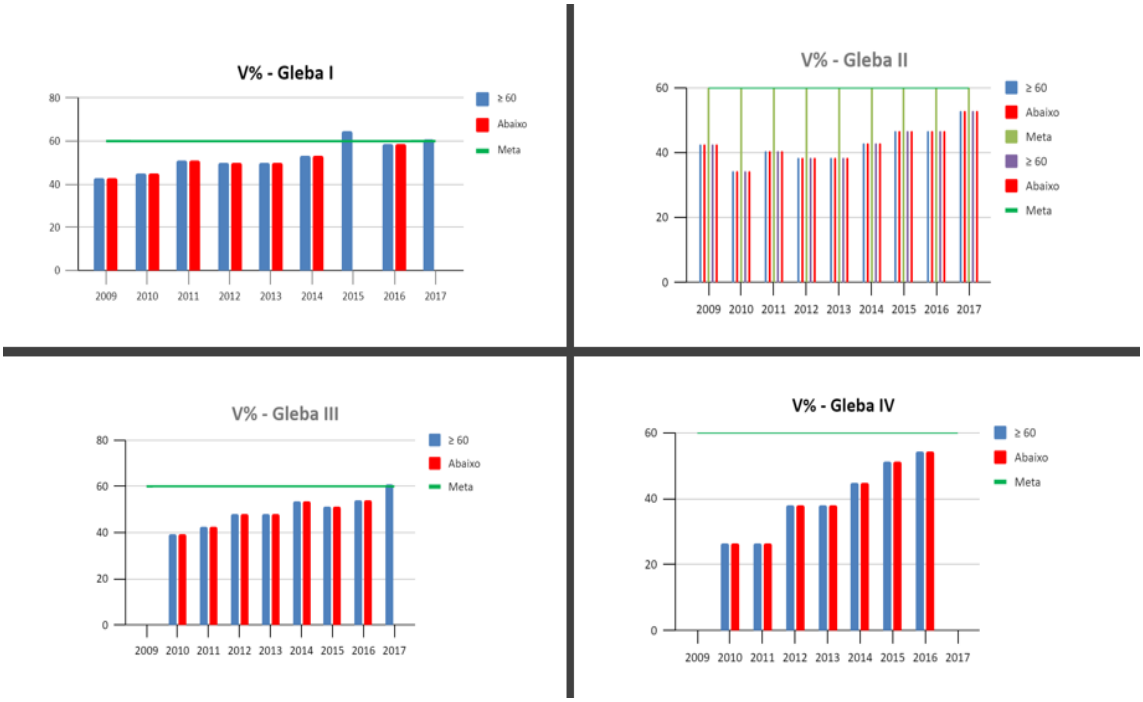


Figura 8. Variação de Saturação por bases (V%)

A gestão integrada da fertilidade do solo com a condução da cultura visa maximizar a eficiência da utilização dos nutrientes e melhorar a produtividade e este propósito pode ser conseguido com a aplicação de fertilizantes químicos. Entretanto, a base para sistemas agrícolas sustentáveis que incorporam a gestão integrada de nutrientes requer a compreensão da dinâmica e as interações entre variáveis que podem ser indicadores para a melhor condução das práticas de manejo em sistemas agrícolas, incluindo técnicas de sensoriamento remoto e agricultura de precisão.

6.2. Dinâmica do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

As práticas de gestão do desenvolvimento da cultura tendem a ser onerosas e as técnicas de sensoriamento remoto realizadas pelo sistema de agricultura de precisão combinados com o conhecimento de índices de vegetação são essenciais. As análises podem apresentar indicadores da disponibilidade de nutrientes que auxiliam na avaliação da fertilidade, do estresse ou outros problemas que impeçam o desenvolvimento da cana de açúcar e o desenvolvimento da cultura no campo.

A amplitude da vegetação para os meses de janeiro a março varia de 0,77 a 0,65; enquanto as mínimas observadas entre julho e setembro variam de 0,2 a 0,4 (Figura 9).

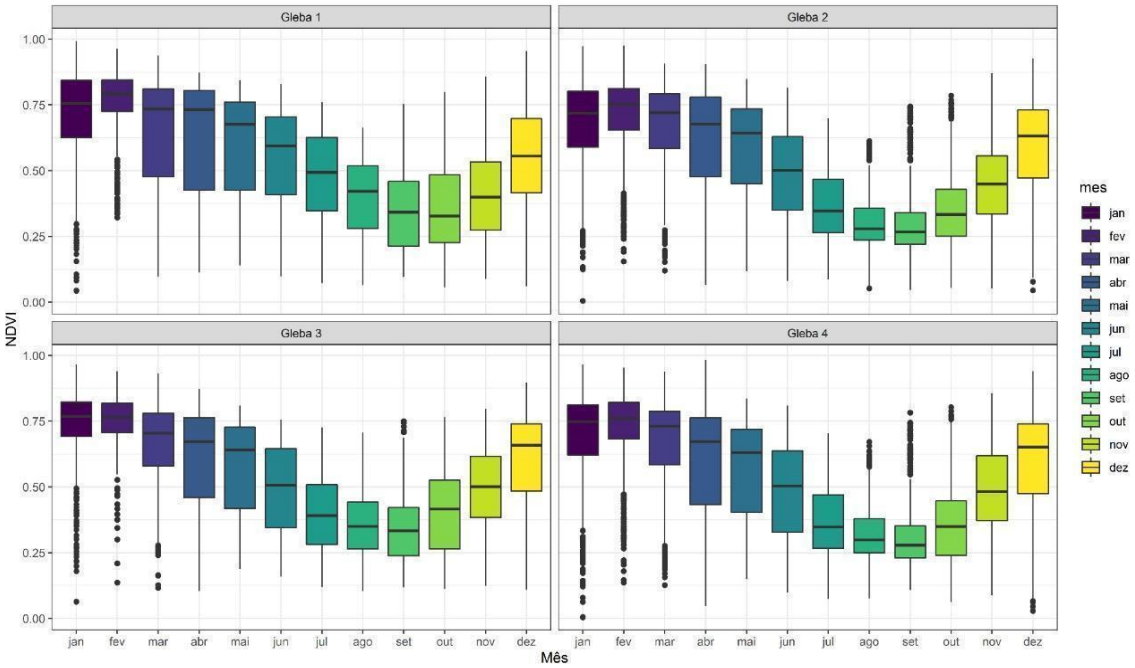


Figura 9. Variabilidade temporal do índice de vegetação por diferença normalizada no período de 2000 a 2021.

A reflectância da cultura da cana-de-açúcar apresentou uma sazonalidade na dinâmica espectral nas quatros glebas no período de dezembro a março. Foram observadas taxas de NDVI superiores nos meses chuvosos e mais quente do ano (dezembro - março), e inferiores nos meses de seca (maio – agosto).

Este comportamento pode decorrer em função dos estádios da cultura ao longo do tempo que acompanha o ciclo fenológico. Onde a planta se mostra em desenvolvimento entre os meses de outubro-fevereiro e em maturação durante os meses de maio-agosto. Portanto, para compreender a diferença nos gráficos do índice de vegetação normalizada - NDVI, faz-se necessário uma análise do comportamento do estádio fenológico da cana-de-açúcar e da avaliação das condições da planta saudável (Figura 10).

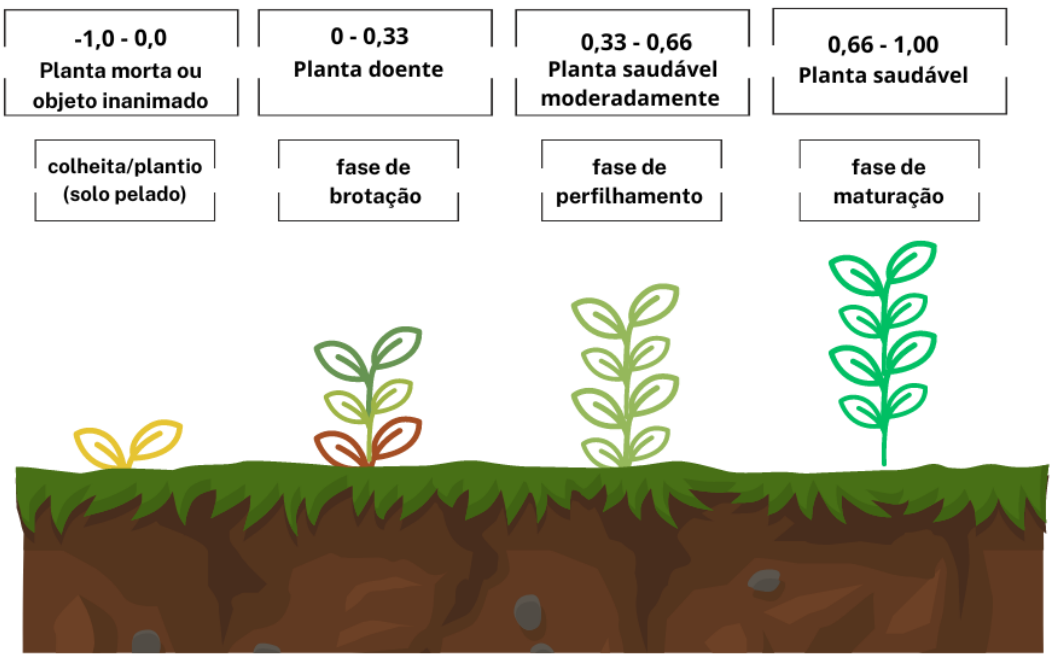


Figura 10. Escala NDVI. Fonte EOS (2019)

O manejo e o período de colheita que coincidem entre os meses de abril e novembro também alteram a reflectância nos talhões, pois a presença de palhada sobre o solo ou mesmo o solo nu apresentam maior reflectância na banda vermelha e menor reflectância na banda infravermelha próxima, ao contrário do espectro da clorofila na planta saudável, que absorve a maior parte da luz vermelha visível, ou seja, menor reflectância na banda vermelha e maior reflectância na banda infravermelha próxima.

Os valores resultantes da análise descritiva dos valores de NDVI na área cultivada com cana-de-açúcar durante o período de 2000 à 2021 podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Análise descritiva dos valores de NDVI na área cultivada com cana-de-açúcar durante o período de 2000 à 2021.

Gleba	**Parâmetro descritivo**				
	média	Desvio padrão	max	min	Coef. De variação (%)
1	0.546	0.220	0.992	0.043	40.318
2	0.517	0.214	0.976	0.005	41.453
3	0.540	0.204	0.965	0.063	37.796
4	0.522	0.215	0.983	0.004	41.220

O manejo da cultura entre as glebas também pode ter influenciado a variabilidade espacial na dinâmica do NDVI ao longo da unidade experimental (Figuras 9 e 10). Foram observados maiores valores na gleba 1, com máxima de 0,992 e de menor na gleba 2 com variação entre 0,0052 e 0,9756. Este resultado pode indicar diferenças no manejo em cada gleba, como a deficiências na fertilidade do solo na gleba 2, que influenciam no desenvolvimento e vigor vegetativo da cultura e refletem na assinatura espectral da cana. Os valores de pH mais próximo de 6 na gleba 1 é um fator

que melhora o desenvolvimento da cultura da cana aumentando a quantidade de clorofila e consequentemente influencia na resposta espectral do NDVI.

Na figura 11, observa-se as reflectâncias indicadas pelo NDVI nos talhões.

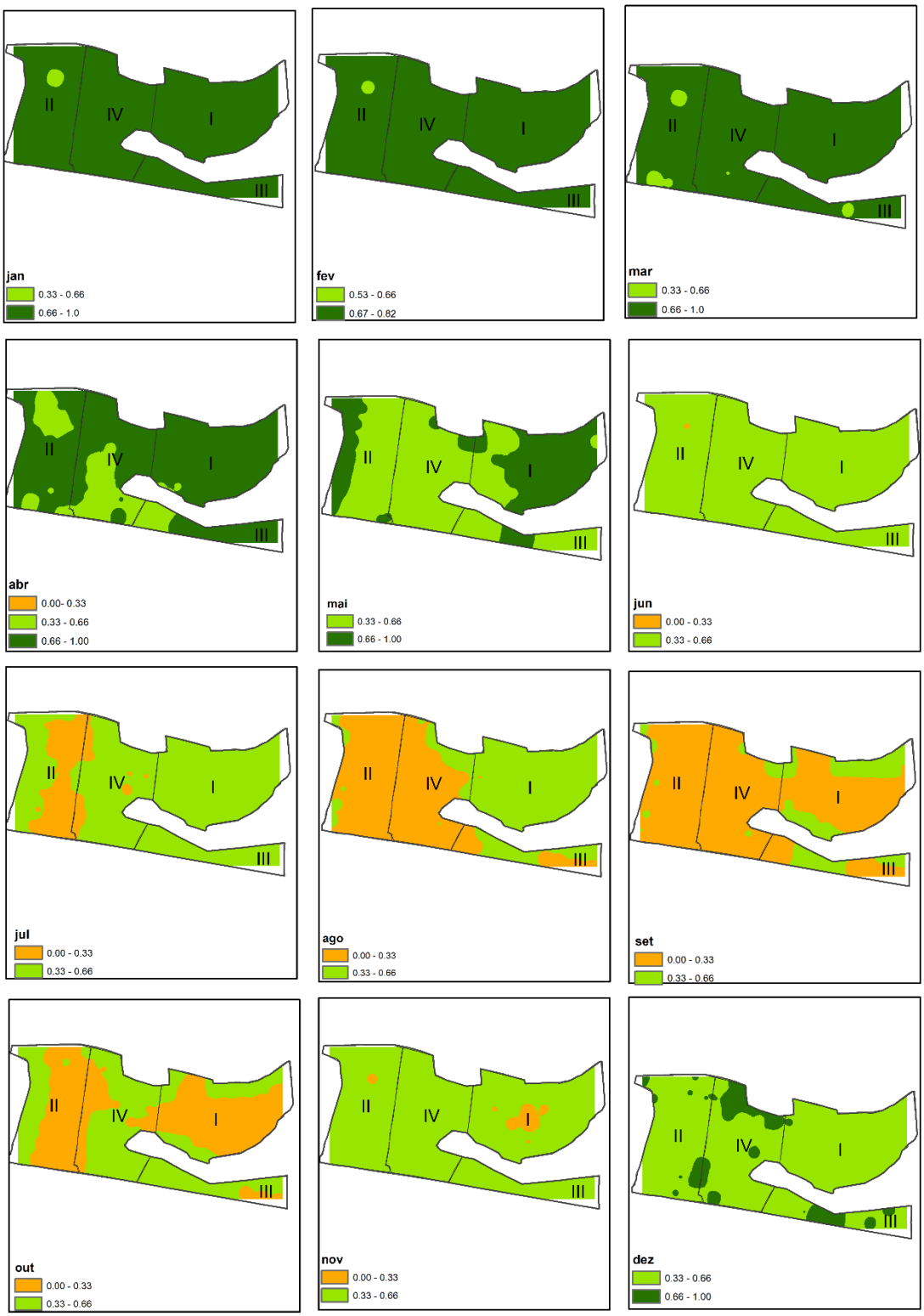


Figura 11. Variação espacial mensal do índice de vegetação por diferença normalizada na área cultivada com cana-de-açúcar durante o período de 2000 à 2021.

* Base de dados para o mapa*: média mensal da série histórica de 2000 a 202*1; *em média cada ponto teve: 42-jan, 42-fev, 44-mar, 43-abr, 44-mai, 44-jun, 43-jul, ,42-ago, 42-set, 27-out, 36-nov, 41-dez, observações para os respectivos meses.*

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos índices mais populares para avaliação de vegetação e pode ser calculado com qualquer sensor multiespectral com banda visível e infravermelha próxima. Embora estudos tenham descoberto que o NDVI é eficaz para expressar o estado da vegetação e atributos quantificados da vegetação, três aspectos: efeito atmosférico, fenômeno de saturação e fatores de sensor devem ser levados em conta (HUANG et al., 2021; MEDEIROS et al., 2022). A utilização do NDVI pode ser altamente eficaz desde que as suas limitações e capacidades sejam compreendidas.

O índice de vegetação que variou de 0 a 1,00, apresentou uma diminuição na média de 0,33 a 0,66 nos meses de junho a novembro. Os valores de NDVI foram maiores durante período de chuva e menores no período de seca. No período analisado pode-se observar que enquanto ocorre maior teor de umidade e água na superfície do terreno, maiores são os valores de NDVI. Conforme mostra a Figura 11, há um decrescimento nos valores de NDVI, que equivale ao período de menor precipitação na área e consequentemente menor teor de umidade da vegetação e de concentração de água perante o mês anterior.

As zonas de manejo específico podem ser determinadas e maximizar o manejo com o uso dos limites críticos de NDVI, no intuito de realizar práticas de manejo possivelmente mais adequadas a partir de um planejamento com o indicador NDVI, além de descobertas de possíveis pragas e doenças que prejudicam a viabilidade da planta.

6.3 Dinâmica do índice de vegetação aprimorado (EVI)

De acordo com a definição do Índice de Vegetação Aprimorado (EVI), os valores entre 1-0,8 representam uma cobertura vegetal muito densa, 0,8-0,6 representam uma cobertura densa, 0,6-0,4 representam uma cobertura média, 0,4-0,2 correspondem a uma cobertura vegetal esparsa, 0,2-0 representam uma cobertura pobre e o fundo. solo (CHAKRABORTY et al., 2016). Os dados produzidos pelo índice de vegetação não saturam com tanta facilidade quanto os de NDVI, esses reflexos prejudicam a captura e interpretação dos dados.

A diferença temporal entre os valores indica a variabilidade espacial dos atributos do solo e do EVI na área total (Figura 12), apresentando valores maiores nos meses de chuva e menos nos meses de seca, assim como no NDVI.

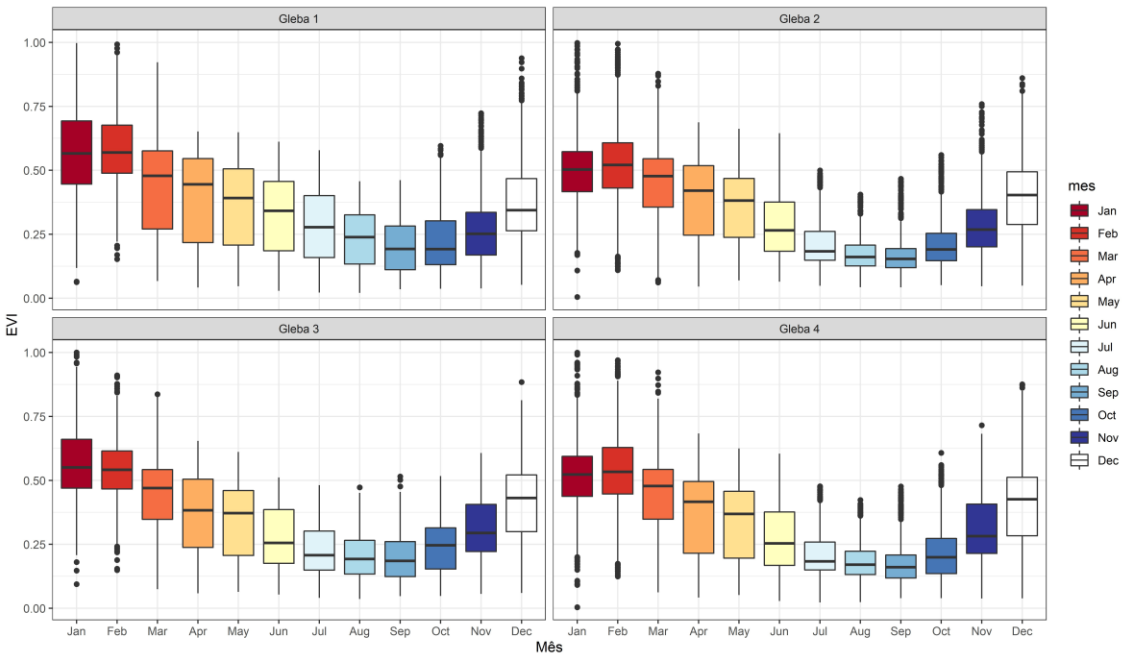


Figura 12. Variabilidade temporal do *Índice de Vegetação Aprimorado (EVI)* no período de 2000 a 2021.

Dentro da unidade experimental, a média de EVI se mostrou com menor variação na área, com valores entre 0,31 e 0,34. Foram observados valores maiores na Gleba 2, com 0,675 e menores na Gleba 1 com 0,040. Valores que podem ser conferidos na Tabela 3.

Tabela 3. Análise descritiva dos valores de Indice de Vegetação Aprimorado (EVI) na área cultivada com cana-de-açúcar durante o período de 2000 à 2021.

Tabela descritiva					
GLEBA	MÉDIA	Desvio padrão	MAX	MIN	Coef. de variação (%)
Gleba 1	0,342	0,149	0,650	0,040	46,742
Gleba 2	0,320	0,133	0,675	0,049	40,381
Gleba 3	0,327	0,132	0,609	0,057	40,959
Gleba 4	0,318	0,137	0,654	0,039	42,662

Em relação a variação espacial, os valores médios de EVI se mostraram uniforme dentro da área total de experimentação, com valores superiores nos meses de fevereiro e março, e inferiores nos meses de agosto e Setembro (Figura 13).

O EVI é semelhante ao NDVI e pode ser usado para quantificar o verde da vegetação. No entanto, o EVI corrige algumas condições atmosféricas e ruído de fundo da copa e é mais sensível em áreas com vegetação densa. Sendo assim, observa-se que o EVI apresenta semelhante comportamento temporal (Figura 12) e apresenta uma redução nos valores quando representa o espaço geográfico do desenvolvimento da cultura (Figura 13).

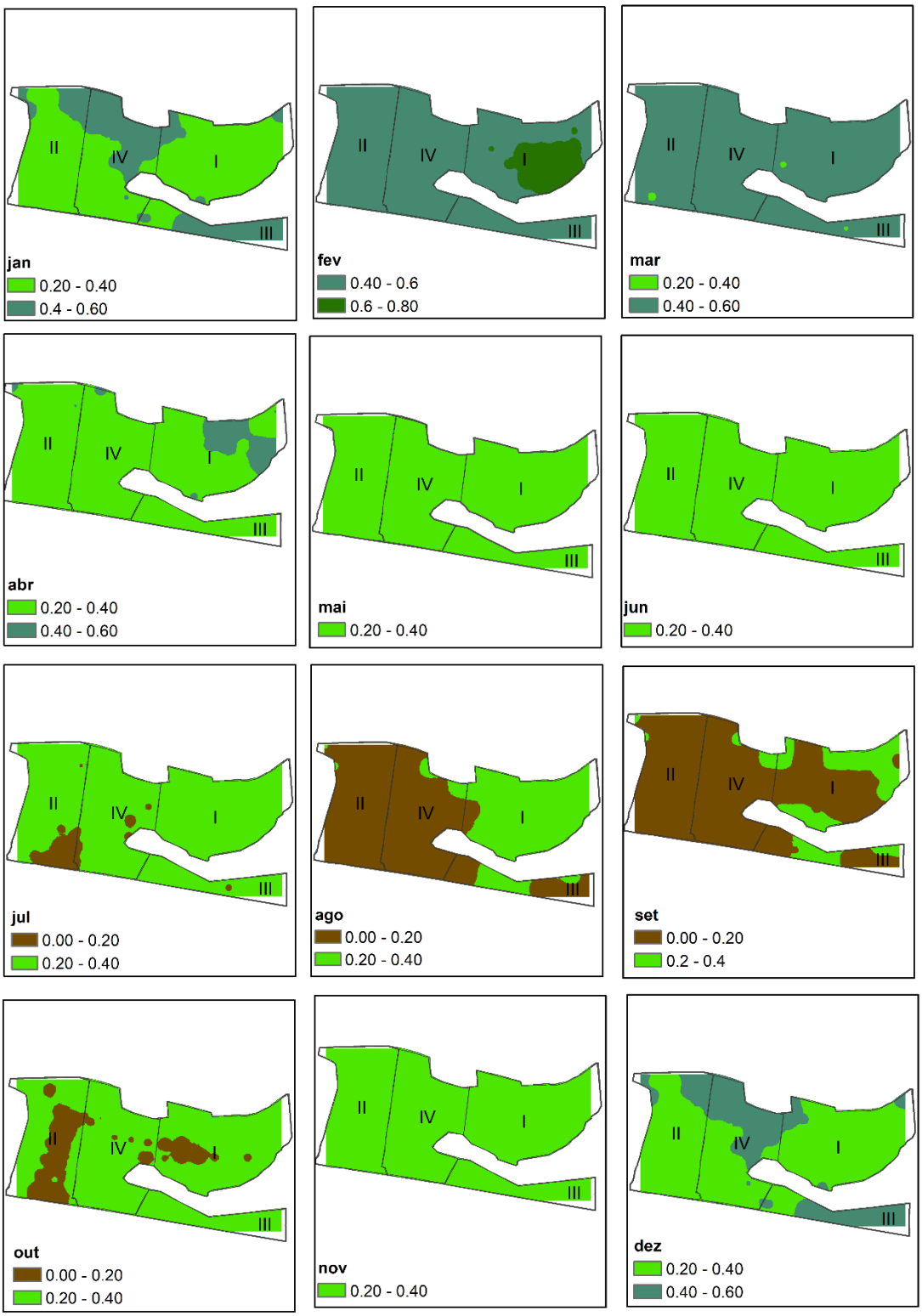


Figura 13. Variação espacial mensal do Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) na área cultivada com cana-de-açúcar durante o período de 2000 à 2021.

O EVI é destinado para regiões que concentram grandes quantidades de biomassa vegetal, por conta da época de chuva e seca os valores de biomassa tendem a diminuir ou aumentar, alterando os valores de EVI. s dados orbitais do sensor MODIS, produtos EVI, representaram as mudanças ocorridas no domínio do tempo no dossel florestal estudado.

Os valores obtidos do EVI indicam a dinâmica anual da vegetação da cana-de-açúcar diante dos efeitos do clima, demonstrando claramente a sazonalidade nos dados, com periodicidade de 200 a 2021. Entretanto, recomenda-se, realizar a análise estatística de séries temporais em relação aos dados climáticos (precipitação, temperatura etc.) durante o mesmo período analisado, com o intuito de validar o modelo encontrado e as variações obtidas na série de NDVI e EVI.

6.4. Indice de vegetação e a fertilidade do solo

Na agricultura de precisão, a adoção de zonas de manejo (ZMs) é uma das mais eficazes estratégias para aumentar a eficiência agrícola. Atualmente, as ZMs em áreas de produção de cana-de-açúcar são classificadas com base em amostragem convencional de solo, o que exige muito tempo, trabalho e recursos financeiros. O sensoriamento remoto (SR) combinado com índices de vegetação (IVs) é uma alternativa promissora para apoiar o método de classificação tradicional, especialmente porque não requer acesso físico às áreas de interesse, é custo-efetivo e menos trabalhoso e permite uma cobertura rápida e fácil de grandes áreas.

Em diversos estudos, os índices de vegetação têm sido relacionado especialmente com as condições das lavouras em função da quantidade de biomassa vegetal, e pode ser adequado para detectar as condições da fertilidade do solo ao se relacionar a reflectância do teor de clorofila nas folhas (TRINDADE et al., 2019).

Os coeficientes de correlação entre os atributos de fertilidade do solo e os índices de vegetação NDVI e EVI estão ilustrados na Figura 14.

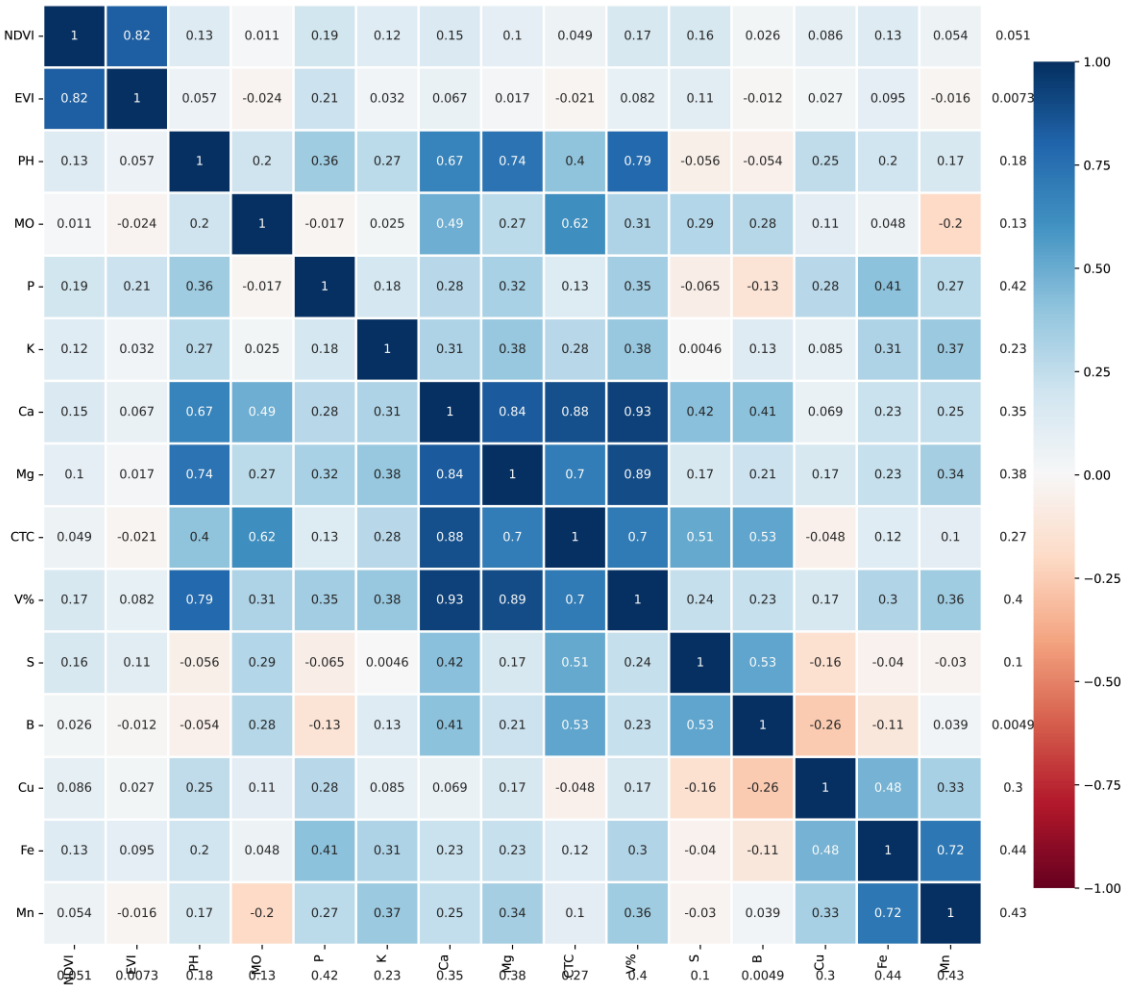


Figura 14. Coeficiente de Correlação de Spearman (ρ).

Na análise de correlação entre os atributos do solo de fertilidade e os valores de NDVI e EVI, os teores de Boro, Matéria orgânica, Saturação por

base (V%) e Ferro foram os mais expressivos. A correlação entre os atributos Fe e V% pode indicar que estes elementos são essenciais e distingue a reflectância da cultura da cana de açúcar ao longo do tempo.

Na análise de correlação, foi indicado que os elementos V% saturação por base e Ferro apresentam forte correlação com o NDVI, 0,209 e 0,170 respectivamente, a correlação da saturação por bases com o NDVI foi positiva e significativa comparada ao outros nutrientes, ou seja, locais com maior saturação por bases proporcionou um maior valor de NDVI, ou seja, maior quantidade vegetativa apresentada do local. No entanto, uma menor correlação, matéria orgânica com 0,015. E o Boro apresentou correlação inversamente com o NDVI, -0,028, ou seja, quando ocorre redução do pH o valor de NDVI aumenta.

A correlação de Sperman é determinada através da relação entre as duas variáveis quantitativas. Quando o valor é de 0 indica que não há associação entre as duas variáveis. No entanto, os valores maiores que 0 indicam uma associação positiva, isto é, as variáveis estão diretamente correlacionadas, quando o valor de uma variável é alto da outra também é alto. E valores menores que 0 indica uma associação negativa, isso é são inversamente relacionados, ou seja, quando o valor de uma variável é alto da outra é baixa.

Esses fatores indicam que estes elementos são essenciais e distinguem a reflectância da cultura da cana-de-açúcar ao longo do tempo, sugerindo que a tecnologia de sensoriamento remoto, na análise do NDVI e EVI, apresenta um alto potencial para definir políticas de manejo e do uso do solo e pode

auxiliar no aprimoramento do planejamento da condução do sistema de produção da cultura de cana-de-açúcar.

É possível determinar zonas de manejo específico e maximizar o manejo com o uso dos limites críticos de NDVI e EVI, bem como realizar práticas de manejo mais adequadas a partir de um planejamento em dose variada utilizando esses índices como ferramenta para auxílio à condução da lavoura.

7. CONCLUSÕES

Na cultura de cana de açúcar, os índices espectrais de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) apresentam comportamento diferenciado ao longo do tempo em função do ciclo de desenvolvimento.

A técnica de sensoriamento remoto apresentou aplicabilidade em analisar temporalmente e espacialmente a reflectância da cultura da cana de açúcar, mostrando ser uma ferramenta para zoneamento de áreas de manejo.

O índice indica variações espaciais e temporais na lavoura com regiões potenciais de manejo inadequado no cultivo. Portanto, é uma ferramenta eficiente para o processo de tomada de decisão na agricultura, pois fornece respostas sobre o sistema de produção e indica demandas de manejo mais eficiente.

O NDVI e o EVI não apresentaram correlação espacial com a fertilidade do solo.

8. LITERATURA CITADA

ALFACE, A.B.; PEREIRA, S.B.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F.F. Sugarcane spatial-temporal monitoring and crop coefficient estimation through NDVI. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.23, n.5, p.330-335, 2019.

ARANTES BHT, ARANTES LT, COSTA EM, VENTURA MVA. Drone aplicado na agricultura digital. **Ipê Agronomic Journal**, 3:14-18, 2019.

ARAÚJO, ARTEMISA DE OLIVEIRA; MARTINS, KÁSSIA POLICARPO. Obtenção de Compósitos Híbridos de Fibras de Vidro e Fibras Do Bagaço de Cana-de-Açúcar Com Foco Na Aplicação Em Telhas Poliméricas. 2022.

BRADSHAW, J.E. (2016). Clonal Cultivars from Multistage Multitrait Selection. In Plant Breeding: **Past, Present and Future** (pp. 343-386). Springer, Cham.

CARVALHO SILVEIRA, Jane Maria de et al. Uso De Imagens Multiespectrais E Termográficas Para Monitoramento Das Condições Hídricas Da Cana-De-Açúcar. **Irriga**, v. 25, n. 4, p. 689-696, 2020.CERVI, Realdo Felix et al. Variabilidade espacial da fertilidade do solo antes e após aplicação de calcário em taxa variável para o cultivo da soja. 2020.

CRUZ, C. V.; FERNANDES, D. M.; GROHSKOPF, M. A.; CRUZ, I. V. Corn fertilization with triple superphosphate in a Typic Hapludox soil under the residual effect of alternative phosphorus sources. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 2, p. 166-173, 2018.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro nacional de Pesquisa em Solos (1999). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação. 412 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (1997). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ. 212p.

FERRONATO MAF, SILVA SV, DA SILVA NETO AJ. Modelagem de objetos e algoritmo de distribuição de sensores para uma ferramenta computacional visando aplicações em agricultura de precisão. **Revista Cereus**, 11:210-229. 2019.

GALVANIN, Edinéia Aparecida dos Santos et al. Avaliação dos Índices de Vegetação NDVI, SR e TVI na discriminação de fitofisionomias dos ambientes do Pantanal de Cáceres/MT. **Ciência Florestal**, v. 24, p. 707-715, 2014.

GARCIA, J. C.; MENDES, M. B.; BELUCI, L.R.; AZANIA, C. A. M.; SCARPARI, M. S. Fontes de fósforo mineral e organomineral no estado nutricional e no crescimento inicial da cana-de-açúcar. **Nucleus**, v. 15, n. 1, p. 523-531,2018.

GEBBERS R, A. Precision agriculture and food security. **Science**, 5967:828-31, 2010.

HELFER G.; MARTINI B.; SANTOS R.; COSTA A.; BARBOSA J. Tellus: um modelo computacional para a predição da fertilidade do solo na agricultura de precisão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO UBÍQUA E PERVASIVA (SBCUP). Anais do XI Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação. 2010.

HUANG, S., TANG, L., HUPY, J. P., WANG, Y., & SHAO, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 1-6, 2021.

IBGE **Itumbiara.** 2019. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/itumbiara/panorama. Acesso em: 17/10/2022

LEDA, V. C., GOLÇALVES, A. K., & LIMA, N. DA S. (2019). Sensoriamento Remoto Aplicado A Modelagem De Produtividade Da Cultura Da Cana-De-Açúcar. **Energia na Agricultura**, *34*(2), 263–270. https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2019v34n2p263-270

LUZ, P.H.C.; QUINTINO, T.A.; SILVA, F.C. COLETI, J.T.; BET, J.A. **Nutrição mineral e fertilização em cana-de-açúcar**. In: SILVA, F.C.; ALVES, B.J.R.; FREITAS, P.L. (eds.) Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos. Brasília: Embrapa, 2017. p. 656-730.

MEDEIROS, R. L. B. de, de MENESES SOUSA, G., de FIGUEIREDO, C. F. V., de SOUSA FORMIGA, A. C., de OLIVEIRA, F. F. D., de OLIVEIRA, P. A. T., ... & LEITE, A. C. N. Resposta espectral do comportamento do NDVI e NDWI diante de diferentes intensidades pluviométricas na cidade de Patos–PB. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e49811326819-e49811326819, 2022.

MELLO PRADO, Renato de. **Nutrição de plantas**. Editora Unesp, 2021.

NAKA, Jessica Tiossi. Correlação do índice de vegetação por diferença normalizada com parâmetros químicos do solo para aplicações em agricultura de precisão . 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NICCHIO, Bruno et al. Avaliação da mistura de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre na produção de cana-de-açúcar. **Acta Iguazu**, v. 8, n. 3, p. 69-91.

OCDE, FAO Perspectivas agrícolas OCDE-FAO 2022-2031. 2022.

OLIVEIRA, Emídio Cantídio Almeida de et al. Dinâmica de nutrientes na cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção. 2008.

OLIVEIRA, Lorena Solar Silva. Índice espectral de vegetação e fertilidade do solo na cultura de cana-de-açúcar. 2019. Dissertação de Mestrado – UNESP – FCAV.

PASSOS, Andrea de Oliveira. Índices de reflectância, NDVI e EVI como indicadores de níveis de degradação das pastagens tropicais. 2021. Tese Doutorado – Universidade Estadual Paulista – UNESP – FCAV, Jaboticabal.

PENATTI, C.P. **Adubação da cana-de-açúcar**: 30 anos de experiência. Ottoni Editora, Itu, 2013. 347p.

PERINA, Felipe Tambellini. **Nitrogênio e potássio** para produção de mudas de cana-de-açúcar em meiosi. 2023.

PONZONI F.J.; SHIMABUKURO YE (2007). **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São Paulo: Parêntese 127p.

RIBEIRO, Hugo Sérgio et al. Avaliação da fertilidade do solo e incremento da produtividade com o uso da agricultura de precisão. 2021.

RODRIGUES, C.P.; FONTANA, D.C.; MORAES, O.L.L.; ROBERTI, D.R. NDVI e fluxo de Co2 em lavoura de soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, 95-104, 2013.

RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor; MOREIRA, Maurício Alves. Sensoriamento remoto aplicado à agricultura. 2002.

SAGE, R.F. 2004. The evolution of C4 photosynthesis. **New Phytologist**, v. 161, p.341-370.

SAMPAIO, Maicon Renato Ferreira. Prospecção química em produtos da cana-de-açúcar da Região Sul do Brasil. 2021.

SILVEIRA, J. M. de C.; CANDIDO, B. M.; SILVA, A. L. B. de O.; PAVÃO, G. C. .; XAVIER, M. A. .; PIRES, R. C. de M. Uso De Imagens Multiespectrais E Termográficas Para Monitoramento Das Condições Hídricas Da Cana-De-Açúcar. **Irriga**, *[S. l.]*, v. 25, n. 4, p. 689–696, 2020.

SPEARMAN, Charles. The proof and measurement of association between two things. **The American journal of psychology**, v. 100, n. 3/4, p. 441-471, 1987.

SZMRECSÁNYI, Tamás. O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil: 1930- 1975. São Paulo: Hucitec, 1979.

TRINDADE, F. S.; ALVES, M. C.; NOETZOLD, R. et al. Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Revista de Ciências Agrárias**,Belém, v.62. p. 1-11, mar. 2019

VALENCIA, Lady Victoria Angulo et al. Comportamento espectral das culturas de milho, arroz e soja, usando imagens dos Satélites Sentinel-2, CBERS-4 e LANDSAT-8. 2020.

VON CAEMMERER, S.; FURBANK, R.T. 2003. The C4 pathway: an efficient CO2 pump. **Photosynthesis Research**, v.77, p. 191-207.