



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE AGRONOMIA**

**GERMANA PESSOA DE PONTES**

**ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO E USO DE ÁGUA DA CANA-DE-AÇÚCAR  
POR MEIO DE SENSOLIAMENTO REMOTO SUBORBITAL**

**AREIA  
2024**

**GERMANA PESSOA DE PONTES**

**ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO E USO DE ÁGUA DA CANA-DE-AÇÚCAR  
POR MEIO DE SENSOLIAMENTO REMOTO SUBORBITAL**

Trabalho de graduação apresentado à Coordenação do Curso de Agronomia, do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Valéria Peixoto Borges

**Coorientador:** Me. Allef de Souza Silva

**AREIA  
2024**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

P814a Pontes, Germana Pessoa de.

Análise do desenvolvimento e uso de água da  
cana-de-açúcar por meio de sensoliamento remoto  
suborbital / Germana Pessoa de Pontes. - Areia, 2024.  
55 f. : il.

Orientação: Valéria Peixoto Borges.

Coorientação: Allef de Souza Silva.

TCC (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Agronomia. 2. Índice de vegetação. 3.  
Evapotranspiração. 4. ARP. I. Borges, Valéria Peixoto.  
II. Silva, Allef de Souza. III. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635 (02)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
COORDENAÇÃO DE AGRONOMIA  
CAMPUS II – AREIA - PB**


**DEFESA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

Aprovada em 25/10/2024.


**“ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO E USO DE ÁGUA DA CANA-  
DE-AÇÚCAR POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO  
SUBORBITAL”**

Autor: Germana Pessoa de Pontes

Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente  
VALERIA PEIXOTO BORGES  
Data: 28/10/2024 11:26:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Valéria Peixoto Borges  
Orientadora – UFPB

 Documento assinado digitalmente  
ALLEF DE SOUZA SILVA  
Data: 28/10/2024 13:17:58-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Allef de Souza Silva  
Examinador – UFPB

 Documento assinado digitalmente  
DAVI DE CARVALHO DINIZ MELO  
Data: 28/10/2024 11:46:30-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo  
Examinador – UFPB

 Documento assinado digitalmente  
ROBSON DE SOUSA NASCIMENTO  
Data: 30/10/2024 17:26:11-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Robson de Sousa Nascimento  
Examinador – UFPB

Aos meus pais, que, com muito esforço, se dedicaram a proporcionar a seus filhos aquilo que não tiveram: a oportunidade de estudar, DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha saúde, pelo dom da vida, pelas bênçãos alcançadas e por me conceder sabedoria e discernimento nas minhas escolhas.

À minha família. Minha amada e adorável Mãe, Ana Lucia Pessoa de Pontes, minha melhor amiga e minha pessoa favorita neste mundo, és meu maior exemplo de vida, você me inspira a ser uma pessoa melhor a cada dia, jamais teria conseguido sem o seu apoio e incentivo. Meu Pai, Odivio Francelino de Pontes amado e querido que dedicou tudo em vida para nós, é meu exemplo de comprometimento e responsabilidade, o senhor me deu todo suporte e apoio necessário nesta etapa, serei eternamente grata. Meu amado Irmão, Gustavo Pessoa de Pontes por ser meu companheiro nesta vida e quem sempre está disposto a me ajudar principalmente nas disciplinas de exatas, se não fosse você tudo seria mais difícil. Meu Avô, Odilon Francelino de Pontes (*in memoriam*), que, mesmo ausente, permanece vivo em meus pensamentos. Seus ensinamentos me ajudaram a construir quem sou hoje, e levarei sua sabedoria comigo para sempre. Está conquista é nossa!

À cidade de Areia-PB e o Campus II da Universidade Federal da Paraíba, lugares que me proporcionaram uma experiência de vida, que ao mesmo tempo desafiadora, mas magnífica. Não há palavras suficientes para descrever as vivências, dificuldades, conquistas, tristezas e inúmeras alegrias que vivi. Sair do conforto de casa me impulsionou a crescer como pessoa e a adquirir valores que apenas a vida, com todas as suas lições, é capaz de ensinar. Onde proporcionou-me encontros, com pessoas boas e ruins, e aprendi a tirar o melhor delas, considerando como aprendizado cada experiência vivida. Graça às pessoas maravilhosas que Deus colocou em meu caminho, tornou-se minha segunda casa.

Dentre esses encontros, o mais especial, com o meu amado namorado Túlio Cavalcanti, que tornou essa etapa mais leve e fácil, sempre me acolhendo com muito carinho e paciência em momentos difíceis. Sua companhia, nossa parceria e os momentos maravilhosos que compartilhamos fizeram toda diferença.

Lugar este, que me capacitou para a profissão dos meus sonhos e deu o tão almejado Título de ENGENHEIRA AGRÔNOMA!

À minha professora orientadora Valéria Peixoto Borges que sempre me acolheu e me orientou, não somente na área acadêmica, mas para o que eu precisasse, foi um privilégio trabalhar a maior parte da graduação tendo seu apoio. À senhora dedico meu mais sincero sentimento de gratidão.

Ao Professor Davi de Carvalho Diniz Melo pela coordenação do projeto “Imageamento suborbital de altíssima resolução como ferramenta para o planejamento hidroagrícola”, no qual possibilitou o contato com tecnologias e gerou oportunidades de publicações de artigos científicos e participação em congressos.

Também me fez conhecer meus queridos amigos Allef Souza e Alexandre Nascimento, que não mediam esforços para me ajudar quando eu precisasse, e por sempre deixar todas as situações possíveis muito engraçadas. Sem a contribuição de vocês seria impossível aguentar a fome e as dificuldades no canavial. Agradeço pela contribuição de outros pesquisadores neste projeto em especial a Ericka Aguiar, Carlos Wanderson, Marcos Junior e ao Prof. Guillaume Bertrand.

Ao Professor Robson de Sousa Nascimento, pela orientação, disponibilidade e gentileza durante minha graduação.

Às minhas queridas amigas que sempre me escutam e tornam meu dia melhor: Anna Carolina da Nóbrega, Erica Karine, Háimy Nóbrega e Maria das Graças Lacerda. Obrigada por estarem sempre presentes em minha vida.

À minha turma 2018.2 pela parceria e vivências durante a graduação, todos tem meu carinho, amizade e admiração. Gostaria de destacar amizades que contribuíram muito com minha formação e que terei o privilegio que contar pro resto da vida mesmo que o destino nos distancie. São eles: Carlos Wanderson, Diogo Venâncio, Edivaldo Barbosa, Jessica Agra, João Antônio, Kelson Carvalho, Lívia Ferreira, Maria Clara Macena, Rhadija Sousa, Valter Junior e Wellington Junior.

Agradeço profundamente aos professores da graduação, que, além do conhecimento técnico, transmitiram valores fundamentais. A dedicação e o compromisso de cada um foi inspiração para meu crescimento pessoal e profissional. Aprendi com vocês sobre ética, responsabilidade e a importância de contribuir para uma sociedade melhor.

Agradeço a PRAPE (Pró-Reitoria de Assistência e Promoção ao Estudante), no qual fui contemplada com o auxílio do Restaurante Universitário, onde pude me alimentar durante grande parte da graduação. Contribuindo muito para meu bem-estar e com meu desempenho acadêmico. Agradeço também à Seu Assis e todos os funcionários que sempre me trataram com muita gentileza!

Ao CNPQ-UFPB pela oportunidade de pesquisar e pela bolsa.

Agradeço à Universidade Federal da Paraíba (UFPB) pela oportunidade de crescimento acadêmico e pessoal ao longo da minha graduação. Foi um privilégio fazer parte desta instituição, que oferece ensino de qualidade e promove o desenvolvimento crítico e humano de

seus alunos. Sou grata por todos os recursos, experiências e pelo apoio que recebi, que foram fundamentais para minha formação e construção do meu caminho profissional.

Por fim, a mim mesma por sempre buscar evoluir em todos os aspectos e por toda minha determinação!

“Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês”, diz o Senhor, “planos de fazê-los prosperar e não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro.”

Jeremias 29:11

## RESUMO

O presente trabalho explora o cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) no Brasil, o maior produtor mundial, no entanto, o rendimento médio (73,7 ton/ha) está abaixo de outros países, e o estado da Paraíba apresenta produtividade ainda menor (53,5 ton/ha em 2021). Fatores como distribuição irregular de adubação e irrigação, contribuem para a variabilidade da produção. Dada a realidade levando em consideração a importância desse setor, produtores estão cada vez mais focados em tecnologias que otimizem a produção e minimizem os custos, como o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), ou drones, para sensoriamento remoto na agricultura de precisão. O monitoramento via sensoriamento remoto é crucial para prever safras e planejar a cadeia produtiva de forma eficiente. Este trabalho tem por objetivo analisar por meio dos índices NDVI e NDRE, o desenvolvimento, produtividade e uso de água da cana-de-açúcar em três diferentes regimes de irrigação. A metodologia envolveu monitorar o desenvolvimento da cultura, relacionar os índices de vegetação (IVs) com variáveis ambientais com a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e evapotranspiração, e determinar coeficientes de cultivo específicos para cada estágio fenológico da planta. A área de estudo foi uma propriedade da Usina Japungu, localizada em Rio Tinto, Paraíba, durante um ciclo produtivo da cana, a qual possui uma irrigação suplementar por gotejamento. A evapotranspiração e os valores de Kc foram determinados com dados micrometeorológicos. Os IVs foram gerados a partir de imagens oriundas de um Phantom 4 Pro Multiespectral. Foi observado que o NDVI e o NDRE podem ser utilizados para estimar o coeficiente de cultura (Kc) da cana-de-açúcar, com um bom ajuste dos dados ( $R^2 = 0,62$ ), mostrando-se uma ferramenta eficaz para otimizar a irrigação e a gestão de recursos no campo. Os índices de vegetação foram eficazes para avaliar o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Uma das lâminas utilizadas (de 80 mm) foi superior em produtividade (ton cana/ha) porém, não houve diferença estatística entre as parcelas de irrigação. O uso de dados meteorológicos e índices vegetativos é essencial para o manejo eficiente da cultura.

**Palavras-Chave:** índice de vegetação; evapotranspiração; ARP.

## ABSTRACT

This paper explores the cultivation of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Brazil, the world's largest producer. However, the average yield (73.7 tons/ha) is below that of other countries, and the state of Paraíba has an even lower productivity (53.5 tons/ha in 2021). Factors such as irregular distribution of fertilizer and irrigation contribute to production variability. Given the reality and the importance of this sector, producers are increasingly focused on technologies that optimize production and minimize costs, such as the use of Remotely Piloted Aircraft (RPAs), or drones, for remote sensing in precision agriculture. Monitoring via remote sensing is crucial for predicting harvests and planning the production chain efficiently. This paper aims to analyze, through the NDVI and NDRE indices, the development, productivity, and water use of sugarcane in three different irrigation regimes. The methodology involved monitoring crop development, relating vegetation indices (VIs) to environmental variables such as photosynthetically active radiation (PAR) and evapotranspiration, and determining specific crop coefficients for each phenological stage of the plant. The study area was a property of the Japungu Plant, located in Rio Tinto, Paraíba, during a sugarcane production cycle, which has supplementary drip irrigation. Evapotranspiration and Kc values were determined with micrometeorological data. IVs were generated from images from a Phantom 4 Pro Multispectral. It was observed that NDVI and NDRE can be used to estimate the crop coefficient (Kc) of sugarcane, with a good fit of the data ( $R^2 = 0.62$ ), proving to be an effective tool to optimize irrigation and resource management in the field. Vegetation indices were effective to evaluate sugarcane development. One of the blades used (80 mm) was superior in productivity (tons of sugarcane/ha), however, there was no statistical difference between the irrigation plots. The use of meteorological data and vegetative indexes is essential for efficient crop management.

**Keywords:** vegetation index; evapotranspiration; RPA.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração representativa dos estádios fenológicas da cana-de-açúcar.....	20
Figura 2 - Representação do espectro eletromagnético. Fonte: infoescola.....	23
Figura 3 - Área de estudo e delimitação das lâminas de irrigação.....	26
Figura 4 - Pontos georeferenciados para coleta de dados.....	27
Figura 5 - MQ-301X: Linha Quantum e Medidor Portátil.....	28
Figura 6 - Torre micrometeorológica com sensores para medida da evapotranspiração .....	30
Figura 7 - ARP Phantom 4 Pro Multiespectral em operação na área de estudo .....	32
Figura 8 - Dados de Radiação Global durante o período de estudos. ....	34
Figura 9 - Dados de Temperatura do Ar obtidos através da Sonda Vaisalla ao decorrer do período de estudo .....	35
Figura 10 - Dados de Umidade Relativa ao decorrer do período de estudo .....	35
Figura 11 - Dados de Precipitação Total ao decorrer do período de estudo .....	36
Figura 12 - Dados de ET <sub>0</sub> (evapotranspiração referência) e ET <sub>c</sub> (evapotranspiração da cultura).....	37
Figura 13 - Médias das medidas de altura das plantas em cada lâmina de irrigação.....	38
Figura 14 - Médias das medidas de diâmetro de colmos em cada lâmina de irrigação.....	38
Figura 15 - Parâmetros de índice de maturação.....	40
Figura 16 - Mapa com ortomosaicos em NDVI correspondentes a cada estágio fenológico da cultura da cana-de-açúcar. ....	42
Figura 17 - Mapa com ortomosaicos em NDRE correspondentes a cada estágio fenológico da cultura da cana-de-açúcar. ....	43
Figura 18 - Evolução do K <sub>c</sub> e NDVI e NDRE durante o ciclo da cana.....	46
Figura 19 - Regressão linear obtida com os dados de NDVI e K <sub>c</sub> .....	48
Figura 20 - Regressão linear obtida com os dados de NDRE e K <sub>c</sub> .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Data de coletas de dados e correspondente estágio fenológico. ....	32
Tabela 2 - Teste de Tukey para as medidas do dia 12/05/2023. ....	39
Tabela 3 - Dados de tonelada de cana por hectare (THC) em cada parcela .....	40
Tabela 4 - Valores dos índices de maturação das amostras. ....	40
Tabela 5 - Estatística descritiva do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) para as lâminas de irrigação (40, 60 e 80 mm). ....	45
Tabela 6 - Estatística descritiva do índice de vegetação da diferença normalizada na borda do vermelho (NDRE) para as lâminas de irrigação (40, 60 e 80 mm).....	45
Tabela 7 - Média mensal dos valores de Kc registrada pela torre micrometeorológica.....	47
Tabela 8 - Valores do coeficiente de cultura (Kc) para cana-de-açúcar, segundo a FAO (1977; 1979).....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARP	Aeronaves Remotamente Pilotadas
ET	Evapotranspiração
FAPAR	Frações de Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida
GPS	Sistema de Posicionamento Global
h	Horas
IAA	Instituto do Açúcar e do Alcool
IM	Índice de Maturação
IV	Infravermelho
KC	Coefficiente de cultivo
m	Metros
mm	Milímetros de chuva ou irrigação
NDRE	Índice de Borda Vermelha por Diferença Normalizada
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NIR	Reflectância da Radiação no Infravermelho Próximo
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa
PB	Estado da Paraíba
ProAlcool	Programa Nacional do Alcool
REDEGE	Reflectância da Radiação no Vermelho Próximo
TCH	Tonelada de cana por hectare
UV	Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	16
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	16
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	16
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	17
<b>3.1 Histórico do cultivo da cana-de-açúcar</b> .....	17
<b>3.2 Agronegócio da cana-de-açúcar no Brasil e Nordeste</b> .....	18
<b>3.3 Fenologia, desenvolvimento e exigências hídricas da cana-de-açúcar</b> .....	20
<b>3.4 Índices espectrais de vegetação no monitoramento dos cultivos e Radiação fotossinteticamente ativa</b> .....	23
<b>3.5 Índices espectrais no monitoramento da cana: desenvolvimento, fenologia e uso da água</b> .....	25
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	26
<b>4.1 Área de estudo</b> .....	26
<b>4.2 Dados coletados em campo</b> .....	27
4.2.1 Dados morfológicos e radiação fotossinteticamente ativa absorvida .....	27
4.2.2 Produtividade e índice de maturação .....	28
<b>4.3 Dados meteorológicos e medida da evapotranspiração</b> .....	29
<b>4.4 Mapeamento dos índices de vegetação com ARP</b> .....	31
<b>4.5 Estatística dos dados</b> .....	33
<b>5 RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	34
<b>5.1 Condições meteorológicas e Evapotranspiração</b> .....	34
5.1.1 Evapotranspiração .....	36
<b>5.2 Análise do desenvolvimento, uso de luz e produção da cana nas três lâminas de irrigação</b> .....	37
<b>5.3 Mapeamento e análise dos índices espectrais de vegetação</b> .....	40
<b>5.4 Estimativa de Kc através do NDVI e NDRE</b> .....	46
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	49
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma das culturas mais importantes do mundo e, particularmente, do Brasil, que é o maior produtor global. A produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2023/2024 foi 713,2 milhões de toneladas, estabelecendo um novo recorde na série histórica acompanhada pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024). Tendo em vista a enorme dimensão desse mercado, a busca por novas tecnologias que otimizem e maximizem a produção é um anseio constante dos produtores.

Diversos fatores influenciam a resposta produtiva, especialmente em cultivos extensivos, onde a variação na produção pode ser atribuída a fertilizações e irrigações irregulares, além da incidência de doenças e pragas em certas áreas produtivas (Suzin, 2022). Nesse contexto, o monitoramento por meio de sensoriamento remoto das lavouras, em diferentes escalas espaciais e temporais, é essencial para a previsão das safras e o planejamento de toda a cadeia produtiva (Silveira, 2020).

Em áreas produtivas, o monitoramento das culturas agrícolas envolve custos elevados de mão de obra, tornando-se fundamental a adoção de tecnologias que possam otimizar esse processo. Nos últimos anos, o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), também conhecidas como drones, têm se mostrado uma ferramenta eficaz para o sensoriamento remoto na agricultura de precisão. Essas aeronaves permitem a obtenção de imagens de alta resolução espacial e temporal, que são essenciais para práticas como a detecção de ervas daninhas, monitoramento de pragas e doenças, e gestão da irrigação e da aplicação de pesticidas. Tais práticas não só aumentam a eficiência do uso de recursos como água e energia, mas também ajudam a reduzir custos e impactos ambientais, proporcionando informações detalhadas e em tempo real para otimizar as práticas agrícolas (Liu *et al.*, 2021; Hunther *et al.*, 2020)

No sensoriamento remoto são empregadas diversas técnicas de monitoramento, como índices de vegetação, a exemplo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) que é um dos mais utilizados devido à sua sensibilidade à presença de pigmentos envolvidos nos processos fotossintéticos (Formaggio; Sanches, 2017), bem como à sua fácil aplicação que permite a detecção rápida e eficiente de variações na vegetação (Bernardi *et al.*, 2014). Isso ocorre porque a assinatura espectral da vegetação verde e saudável mostra um contraste evidente entre as regiões do visível e do infravermelho próximo, que são usadas no cálculo do NDVI (Shimabukuro *et al.*, 1998). O Índice de Borda Vermelha por Diferença Normalizada (NDRE) é outro exemplo de monitoramento de culturas, calculado pela reflectância de superfície da banda borda vermelha e da banda vermelha. Uma vez que a banda de borda

vermelha é a banda espectral característica sensível da vegetação, o índice de borda vermelha tem uma influência importante na classificação de culturas e outras vegetações (Zhang *et al.*, 2019).

Também se faz necessário que ocorra um planejamento e manejo eficaz de áreas irrigadas, o que torna essencial o monitoramento de evapotranspiração. A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do processo de troca de energia entre a superfície e a atmosfera, tendo sido amplamente pesquisada devido à sua influência no ciclo da água e dos nutrientes dos ecossistemas agrícolas e na produtividade primária das culturas (Surkey; Verma, 2008). A magnitude de seus valores varia com o crescimento das plantas e as condições ambientais prevalentes no local de cultivo (Steduto; Hsiao, 1998).

O manejo de água do sistema de produção, os dados de evapotranspiração (ET) possibilitam entender a demanda hídrica das culturas, permitindo aumentar a eficiência no uso da água pela seleção de cultivares mais adaptadas a um sistema agrícola específico (Inman-Bamber; McGlinchey, 2003; Inman-Bamber; Smith, 2005).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a resposta espectral e parâmetros de crescimento e produção da cana-de-açúcar em três regimes de irrigação diferentes, nas condições edafoclimáticas da Zona da Mata Paraibana.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- a) Determinar a influência de três lâminas de irrigação (40 mm, 60 mm e 80 mm mensais) sobre os índices de vegetação (NDVI e NDRE) na cultura da cana-de-açúcar;
- b) Avaliar o impacto das lâminas de irrigação em relação à produtividade e ao índice de maturação da cana;
- c) Analisar a relação entre o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) e os índices NDVI e NDRE.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Histórico do cultivo da cana-de-açúcar

Em breve relato histórico, verifica-se que, nas Índias, a cana-de-açúcar já era utilizada desde 1500 a.C. (Aranha; Yan, 1987). Outro relato relevante constatou que a Nova Guiné é considerada o centro de origem dessa cultura, uma vez que foram encontrados registros com mais de 8000 anos. Há também evidências de que, neste período, a cana-de-açúcar era utilizada na China (JAMES, 2004). Duas espécies de cana-de-açúcar foram descritas em 1753 por Lineu: *Saccharum officinarum* e *Sacharum spicatum*, que, atualmente, são classificadas como *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinensis*, *S. barberi* e *S. robustum*, pertencentes à família Poaceae. Desde então, a cana-de-açúcar é uma das culturas de metabolismo C4 mais relevantes do mundo para a produção de alimentos, fornecendo cerca de 75% da colheita mundial de açúcar para o consumo humano (Souza *et al.*, 2008).

No Brasil, a cana-de-açúcar logo foi introduzida no país após a chegada dos Portugueses, com o objetivo de romper o monopólio francês no fornecimento global de açúcar, proveniente das colônias caribenhas (Canabrava, 2005). A cultura desempenhou uma importância econômica mais significativa a partir da segunda metade do século XVI, quando os engenhos no nordeste brasileiro começaram a operar intensamente em Pernambuco, Bahia, Alagoas, Sergipe e Paraíba. No século XVII, a produção de cana-de-açúcar expandiu-se para as regiões do Pará e Amazonas, onde os engenhos foram direcionados para a produção de cachaça, uma aguardente popular.

Posteriormente, a cultura se estendeu para o Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. Durante este período, o cultivo da cana-de-açúcar alinhava-se perfeitamente com a estratégia colonial de Portugal, que visava à ocupação intensiva da colônia e à produção de um produto altamente lucrativo para a metrópole europeia. Este desenvolvimento não apenas sustentou a economia colonial, mas também impulsionou a formação de uma complexa rede de comércio internacional e a exploração da mão-de-obra escrava africana, que se tornou um componente essencial na manutenção dos engenhos (Canabrava, 2005).

Em 1933, foram criadas instituições e políticas públicas, como o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), com o propósito de regular a produção interna e fomentar pesquisas sobre a cultura canavieira. Em 1973, o Brasil deu início ao Programa Nacional do Alcool (ProAlcool) em resposta à primeira crise do petróleo, com o intuito de integrar o etanol na matriz energética brasileira. Em 1979, teve início a fabricação de veículos movidos a etanol no país. O preço

acessível do etanol atraiu a classe média, e em 1985, 96% dos veículos produzidos no Brasil eram movidos a etanol.

No entanto, na segunda metade da década de 1980, houve uma redução na disponibilidade de crédito para os produtores de cana-de-açúcar, uma queda nos preços pagos ao produtor de álcool, e a atratividade dos preços do açúcar no mercado internacional levou à escassez de etanol no mercado interno, comprometendo a substituição do setor perante o consumidor final (Nitsch, 1991). Este cenário destacou a necessidade de políticas mais robustas e voltadas para sustentar a produção de etanol, bem como o desenvolvimento de tecnologias para aumentar a eficiência e a produtividade do setor.

### **3.2 Agronegócio da cana-de-açúcar no Brasil e Nordeste**

A safra 2023/2024 manteve o Brasil como maior produtor mundial de cana-de-açúcar (CONAB, 2024). O país responde por cerca de 40% da produção mundial de açúcar e 30% da produção global de etanol, destacando sua importância estratégica para o abastecimento global (Única, 2024). Esta posição foi impulsionada por condições climáticas específicas e melhorias nas práticas agrícolas. A área plantada também apresentou expansão, com mais de 8,8 milhões de hectares destinados ao cultivo de cana (MAPA, 2024). A produtividade média por hectare atingiu 83,1 toneladas, refletindo um aumento na eficiência das atividades (IEA, 2024). O estado de São Paulo lidera a produção nacional, responsável por aproximadamente 60% do total coletado (FAO, 2024).

O Nordeste brasileiro também desempenha um papel crucial na produção de cana-de-açúcar. Esta região tem uma longa tradição na cultura canavieira, sendo um dos berços da produção de açúcar no país desde o período colonial. A produção nordestina é descrita por uma combinação de métodos tradicionais e modernos, com muitos produtores adotando inovações tecnológicas para superar os desafios climáticos e aumentar a eficiência. O uso de variedades de cana adaptadas às condições locais, juntamente com sistemas de supervisão avançados, tem sido fundamental para melhorar o rendimento em áreas com menor disponibilidade hídrica (EMBRAPA, 2024). Além disso, a região tem investido na diversificação de produtos derivados da cana, como o etanol, a cachaça e o açúcar mascavo, promovendo o desenvolvimento sustentável e a geração de empregos (Brasil Energia, 2024).

A Paraíba, o Rio Grande do Norte e a Bahia também desempenham papéis importantes, com produções de 12, 10 e 8 milhões de toneladas, respectivamente (SINDACÚCAR-AL, 2024; AFCP, 2024; ASPLAN-PB, 2024; ASSUCARNORTE, 2024; SINDACARROBA, 2024).

O estado da Paraíba teve para a safra 2023/24 uma produtividade média de 62 ton/ha com uma área destinada a produção de 117,6 mil hectares, estando abaixo da produtividade média nacional que foi estimada em torno de 80 a 85 toneladas por hectare (CONAB, 2023). A região enfrenta desafios como a deficiência hídrica e a necessidade de modernização das usinas, mas tem investido em tecnologias inovadoras, como variedades de cana adaptadas e sistemas de proteção eficientes, que melhoraram a produtividade e contribuíram para o desenvolvimento sustentável (EMBRAPA, 2024; MAPA, 2024). A cana-de-açúcar é uma fonte vital de emprego e receita para a região, destacando-se na produção de açúcar, etanol e outros resultados, e a expectativa é de crescimento contínuo no setor (CONAB, 2024).

Existem particularidades no Nordeste brasileiro, especialmente por serem regiões conservadoras produtoras de cana-de-açúcar, como os Tabuleiros Costeiros e a Zona da Mata, atualmente utilizando em totalidade a área agricultável. Diante disso, o manejo eficiente dessa cultura torna-se essencial à ascensão da produtividade. Isso requer um conhecimento detalhado dos padrões de crescimento de cada variedade de cana, para que as fases máximas de desenvolvimento coincidam com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, estimulando a planta expressar todo o seu potencial genético (Da Silva; Borges; De Albuquerque, 2014).

### **3.3 Fenologia, desenvolvimento e exigências hídricas da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar apresenta características morfológicas distintas, incluindo um sistema radicular altamente ramificado do tipo fasciculado, com uma grande concentração de raízes nas camadas superficiais do solo. Estima-se que cerca de 85% da massa total de raízes esteja localizada nos primeiros 50 cm de profundidade, e aproximadamente 60% nos primeiros 30 cm (Marin *et al.*, 2009). O crescimento da cana-de-açúcar ocorre em forma de touceiras, nas quais a parte aérea é composta por colmos, folhas, inflorescências e sementes, enquanto a parte subterrânea consiste em raízes e rizomas (Mozambani *et al.*, 2006).

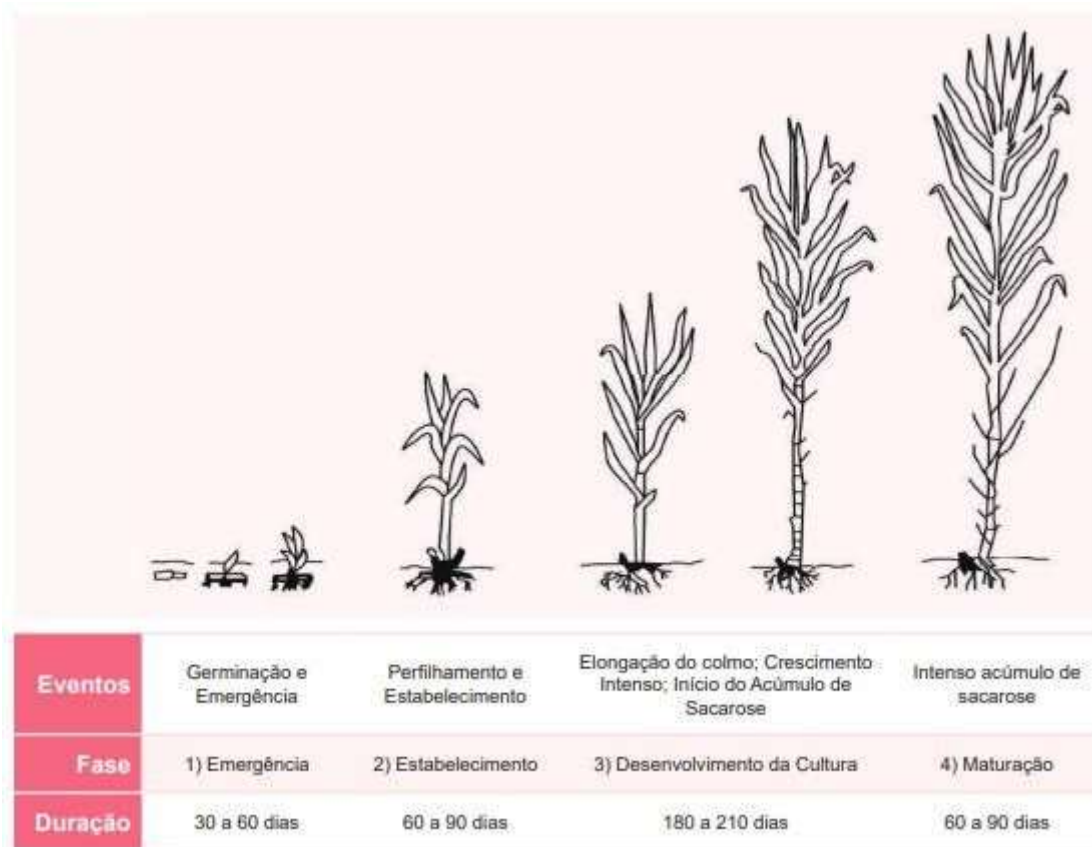


Figura 1 - Ilustração Representativa dos estádios fenológicas da cana-de-açúcar.  
Fonte: Marin (2009).

Segundo Câmara (1993), o ciclo da cana-de-açúcar pode ser dividido em quatro fases características: brotação e emergência, estabelecimento e perfilhamento, crescimento vigoroso e maturação. De acordo com o padrão de acúmulo de matéria seca ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, Machado (1987) definiu que o ciclo da cultura pode ser dividido em três fases distintas: 1) fase inicial, onde o crescimento é lento; 2) fase de crescimento acelerado, durante a qual até 80% de toda a matéria seca é acumulada; e 3) fase final, em que o crescimento desacelera novamente e entra em estágio vegetativo. Como também confirmado por Marin (2009) pela figura 1.

Como qualquer outra cultura, a cana-de-açúcar necessita de três elementos essenciais para o seu desenvolvimento: radiação solar, temperatura e água. A radiação solar está diretamente ligada ao processo de fotossíntese, ao acúmulo de açúcares e também exerce influência no perfilhamento. A temperatura, por sua vez, impacta o crescimento da planta, o desenvolvimento do sistema radicular e a emissão de folhas. Finalmente, a disponibilidade de água é determinante para o crescimento e o desenvolvimento da cultura (Canal Bioenergia, 2015).

Para maximizar a produtividade do cultivo, é crucial realizar um manejo hídrico que atenda às necessidades específicas de cada fase do ciclo produtivo. Isso envolve monitorar o estresse hídrico do solo e ajustar a irrigação de acordo com os requisitos de cada etapa do desenvolvimento da planta, possibilitando a produção ao longo de todo o ano.

Conforme informações do portal online da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2018), a cana-de-açúcar possui uma demanda hídrica que varia de 1.500 a 2.500 mm por ciclo vegetativo, que devem ser distribuídos uniformemente ao decorrer de todas as fases vegetativas. Ferreira Filho (2019) destaca que as necessidades hídricas da cana-de-açúcar variam ao longo dos diferentes estágios de desenvolvimento da planta. A cultura da cana-de-açúcar requer cerca de 10 mm de água para cada tonelada produzida. Durante o período de maior crescimento do dossel, quando a transpiração é mais intensa, a necessidade diária de água pode variar entre 5 e 6 mm.

Segundo Andrade (2001), as fases de brotação, perfilhamento e crescimento vegetativo são as mais exigentes em termos de água, ocorrendo principalmente durante o período de chuvas, com precipitação anual variando entre 1.000 e 3.000 mm. Por outro lado, algumas pesquisas indicam que a quantidade de água necessária para que a cultura alcance seu máximo potencial gira em torno de 1.200 a 1.300 mm (Inman-Bamber *et al.*, 2008).

Thomé, Vaz e Groff (2018) ressaltam que tanto o excesso quanto a deficiência de água afetam diretamente o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Para um crescimento ideal, a umidade do solo deve estar entre 80% e 85% durante a fase de rápido alongamento da planta, e entre 45% e 65% durante o período de acúmulo de açúcar. Além disso, é crucial destacar que a maior demanda hídrica ocorre nas fases de emergência, estabelecimento e no momento de maior crescimento vegetativo da cultura, quando a planta necessita de condições adequadas para maximizar seu potencial produtivo.

O índice de maturação da cana-de-açúcar é uma métrica crucial para determinar o momento ideal da colheita, visando maximizar a concentração de sacarose. Estudos recentes mostram que a curva de maturação varia significativamente entre diferentes cultivares, sendo um aspecto importante para otimizar a eficiência do cultivo e a qualidade final do açúcar (Silva *et al.*, 2024).

Durante o estágio de maturação, a deficiência hídrica pode aumentar a concentração de sacarose, desde que controlada. Em um estudo, observou-se que a cana de soca apresentou déficit hídrico durante a fase final de maturação, o que favoreceu a acumulação de açúcar nos colmos (Silva *et al.*, 2024). Isso ocorre porque a restrição hídrica, nesse momento, limita o crescimento vegetativo e redireciona os fotoassimilados para o acúmulo de sacarose (Blair *et*

*al.*, 2023). A gestão eficiente da irrigação e o monitoramento do índice de maturação são, portanto, essenciais para obter melhores níveis de sacarose, potencializando a produtividade e a qualidade do açúcar produzido.

O Norte-Nordeste apresentam temperaturas e precipitações médias anuais de 26 °C e entre 750 e 1.250 mm (Crispim, 2006; Marin *et al.*, 2012; Groff, 2010). O Nordeste brasileiro apresenta uma estação seca bem definida, que é extremamente favorável ao período de maturação dos colmos. Essa condição reduz o crescimento da planta e aumenta a concentração de açúcares nos colmos (Araújo *et al.*, 2019). Os períodos de déficit hídrico podem ocorrer ao longo de todo o ciclo da cultura, mas seu impacto na produtividade da cana-de-açúcar varia significativamente em função da interação entre a época do ano em que se manifestam e a fase do ciclo fenológico da planta (Inman-Bamber *et al.*, 2008; Machado *et al.*, 2009).

#### **3.4. Índices espectrais de vegetação no monitoramento dos cultivos e Radiação fotossinteticamente ativa**

O sensoriamento remoto tem possibilitado quantificar eventuais problemas da lavoura de forma pontual e precisa, fazendo com que o manejo seja mais direcionado e específico, deste modo o reflexo é a diminuição expressiva dos custos e aumento da produtividade (Nasi *et al.*, 2015). Dentre os produtos do sensoriamento remoto com ARPs, os índices de vegetação são aplicados para avaliar os cultivos, pois a resposta espectral está diretamente relacionada com o desenvolvimento e saúde das plantas. Desta forma, possibilitam que o produtor possua maior segurança na tomada de ações com o objetivo de aumentar lucros e melhorar a qualidade dos produtos. A figura 2 representa o espectro eletromagnético que inclui a luz visível (380 a 750 nm), que vai do violeta ao vermelho, e as partes não visíveis: ultravioleta (UV), abaixo de 380 nm, e infravermelho (IV), acima de 750 nm. Enquanto a luz visível é percebida pelo olho humano, o UV e o IV são usados em diversas tecnologias, como o sensoriamento remoto da vegetação.

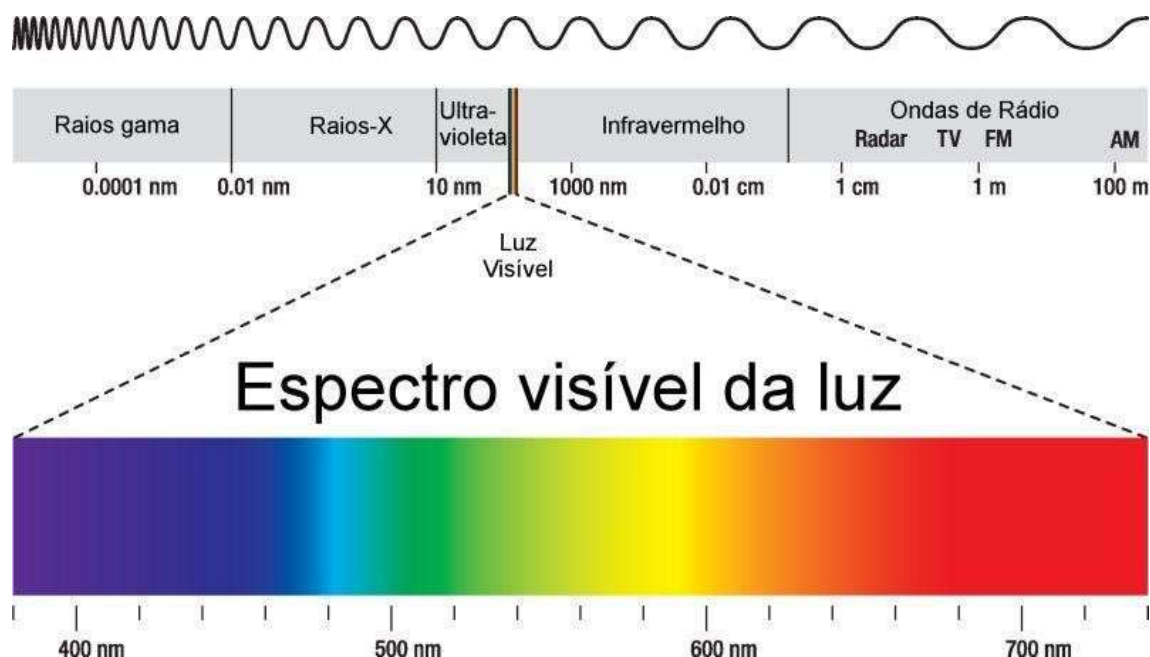


Figura 2 - Representação do espectro eletromagnético.

Fonte: <https://petcomputacaoufcg.blogspot.com/2016/09/introducao-ao-processamento-digital-de.html>.

Um dos índices utilizados para o monitoramento dos cultivos é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), no qual utiliza as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, realizando a mensuração da quantidade de clorofila e da absorção de energia (Myneni *et al.*, 1997), que é obtido de acordo com a equação 1.

$$NDVI = \frac{NIR - Vermelho}{NIR + Vermelho} \quad (1)$$

Outro índice de vegetação espectral é o Índice de Borda Vermelha por Diferença Normalizada (NDRE) que mede a atividade da clorofila presente nas folhas, a partir do processamento de imagens por sensoriamento remoto. Ele é calculado a partir da diferença entre a reflectância da radiação no infravermelho próximo (NIR) e a reflectância da radiação no vermelho próximo (REDEGE), de acordo com a equação 2. O NDRE é um índice mais sensível ao teor de clorofila do que o NDVI. Isso ocorre porque o NDRE é menos afetado pela presença de outros pigmentos, como os carotenoides, que também absorvem a luz vermelha (Dias *et al.*, 2019, Thompson *et al.*, 2019).

$$NDRE = \frac{NIR - REDEGE}{NIR + REDEGE} \quad (2)$$

Um dos índices utilizados para o monitoramento de culturas é o NDVI sendo amplamente aplicado na determinação da FAPAR (Frações de Radiação Fotossinteticamente

Ativa Absorvida), já que está intimamente ligado com a área foliar da cultura e, portanto, o uso da luz (De La Casa *et al.*, 2018; Ji *et al.*, 2022).

O NDVI e NDRE apresentam valores que variam de -1 a 1. Quanto mais próximo de 1, maior é a atividade vegetativa na região representada por pixel. Valores negativos ou próximos de 0 indicam a presença de corpos d'água, construções, solo descoberto ou outras superfícies com pouca ou nenhuma atividade fotossintética (Engesat, 2022).

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR, na sigla em inglês) refere-se ao espectro de luz solar compreendido entre 400 e 700 nm, que é essencial para a fotossíntese em plantas. Estudos recentes sobre a PAR têm abordado tanto a sua medição e estimativa quanto seu impacto em ecossistemas e práticas agrícolas. Uma área de destaque é o desenvolvimento de métodos para estimar a PAR, especialmente em locais onde não há medições diretas. Métodos empíricos, como aqueles que utilizam ângulos zenitais solares e índices de claridade, têm sido amplamente utilizados, assim como métodos baseados em sensores. Esses métodos são cruciais para entender a dinâmica da radiação em diferentes ecossistemas e para aplicações em mudanças climáticas e agricultura. Além disso, a influência de fatores atmosféricos, como aerossóis e poluição, na quantidade de PAR que atinge a superfície terrestre também tem sido investigada. Esses fatores podem reduzir a quantidade de luz disponível para a fotossíntese, impactando o crescimento e a produtividade das plantas em regiões urbanas e agrícolas (Huang *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023).

A FAPAR representa a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa foi absorvida pelas plantas. Ela foi classificada como uma variável climática essencial pelo Sistema Global de Observação do Clima (GCOS, 2019), pois desempenha um papel fundamental em diversas aplicações, como modelagem climática, previsão numérica do tempo, análise das interações entre a biosfera e a atmosfera, além do monitoramento agrícola e florestal (Ogutu *et al.*, 2013; Richardson *et al.*, 2013; Sellers *et al.*, 1997). O modelo teórico que explica a conversão da radiação fotossinteticamente ativa em compostos energéticos é sustentado, inicialmente, pela presença de pigmentos excitáveis nos chamados centros coletores de luz ou complexos antena, localizados nas membranas dos tilacoides dos cloroplastos. Os pigmentos, como clorofilas, carotenoides e xantofilas, capturam a energia luminosa, em sua dualidade de onda e partícula, e transferem elétrons para os centros de reação I e II, que, por sua vez, realizam a hidrólise da água e reduzem o CO<sub>2</sub> a açúcares (Moura, 2016). Esses pigmentos estão presentes nas plantas durante todo o ciclo vegetativo e desempenham um papel fundamental não apenas na captação de luz, mas também na estabilização de certas proteínas (Hortensteiner, 2006), no controle do fotodinamismo (Matile; Hortensteiner; Thomas, 1999) e na coloração observada nas folhas.

Outros estudos também utilizaram o NDVI para o acompanhamento fenológico. De acordo com o estudo de Alves (2017), o objetivo foi desenvolver um banco de dados relacional e uma ferramenta computacional que permitissem a visualização do perfil temporal do NDVI, com o intuito de analisar a existência de padrões durante o desenvolvimento fenológico da cultura, com ênfase na cana-soca de maturação tardia.

### **3.5 Índices espectrais no monitoramento da cana: desenvolvimento, fenologia e uso da água**

Os índices de vegetação foram desenvolvidos com o objetivo de explorar as características espectrais da vegetação nas faixas do visível e do infravermelho próximo. Esses índices estão associados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como a biomassa e o índice de área foliar (Ponzoni; Shimabuk, 2009). Bezerra *et al.* (2010) afirmam que a reflexão espectral das culturas agrícolas pode fornecer uma sugestão indireta dos valores de Kc. Esse fato também pode ser observado pela semelhança entre as curvas de Kc e as curvas dos índices de vegetação.

Existem estudos que utilizaram o NDVI para o acompanhamento fenológico. O estudo de Ranne (2010) teve como objetivo desenvolver um banco de dados relacional e uma ferramenta computacional que permitissem a visualização do perfil temporal do NDVI, com o intuito de analisar a existência de padrões durante o desenvolvimento fenológico da cultura, com ênfase na cana-soca de maturação tardia.

Segundo o estudo de Fagundes (2021), um dos fatores importantes para o entendimento do uso da água está vinculado ao monitoramento espacial e temporal por meio da análise de imagens de satélite, especialmente utilizando a metodologia NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). Essa abordagem permite acompanhar o ciclo das culturas, desde o plantio até a colheita, possibilitando a identificação de cultivos tardios, o que é preocupante, pois está relacionado aos períodos críticos de disponibilidade hídrica.

Com base no estudo de Boiarskii e Hasegawa (2019), o NDRE se mostra mais adequado para os estágios intermediários e finais do desenvolvimento das culturas, quando estas acumulam maiores concentrações de clorofila nas folhas e a penetração da luz vermelha se torna menos eficiente. O estudo destaca a sensibilidade diferenciada dos índices NDVI e NDRE na detecção de variações na vegetação e no teor de clorofila, fornecendo informações precisas para a escolha e interpretação adequada desses índices em contextos específicos.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na zona rural de Rio Tinto (PB) e possuía 17 hectares de cana-de-açúcar, variedade RB92579, durante a safra 2022/23, estando na sua 3ª soca. O solo da área experimental foi classificado com elevado teor de areia e diferentes classificações texturais a depender do local, variando de areia, areia franca, franco arenosa e franco argilo-arenosa (Carneiro *et al.*, 2022). A pluviosidade anual local varia de 1200 a 1700 mm, apresentando o período úmido entre os meses de março a agosto, e com ocorrência de chuvas isoladas nos outros meses do ano (Francisco *et al.*, 2017).



Figura 3 - Área de estudo e delimitação das lâminas de irrigação  
Fonte: Silva (2023).



Figura 4 - Pontos georeferenciados para coleta de dados.

O estudo foi conduzido em três tratamentos - lâminas mensais de irrigação: 40 mm, 60 mm e 80 mm (Figura 3). O sistema de irrigação era gotejamento subsuperficial com emissores autocompensantes do tipo labirinto, de vazão  $0,6 \text{ L h}^{-1}$ , com mangueiras instaladas a uma profundidade de 0,20 m na linha de plantio (Nascimento, 2022; Silva, 2023). Mensalmente, cada parcela recebe uma quantidade de água correspondente à sua lâmina de irrigação. Os horários de irrigação variam conforme a parcela: a área com 40 mm é irrigada por 2 horas (das 08:00 às 10:00 h), a área com 60 mm é irrigada por 3 horas (das 16:00 às 19:00 h) e uma área com 80 mm é irrigada por 4 horas (das 16:00 às 20:00 h) (Silva, 2023).

## 4.2 Dados coletados em campo

### 4.2.1 Dados morfológicos e radiação fotossinteticamente ativa absorvida

Para avaliar o crescimento e uso de luz da cultura nas três lâminas de irrigação, foram marcados dezesseis pontos com GPS de alta precisão: GPS/GNSS L1/L2 RTK, seis pontos na parcela de 80 mm e cinco pontos em cada uma das demais (Figura 4). Em cada ponto, foram sinalizadas três plantas que foram acompanhadas até o final do ciclo. As medidas morfológicas foram realizadas desde a fase de perfilhamento até a maturação, aferindo-se a altura da planta,

da base até a altura da folha +1 e o diâmetro do colmo previamente marcado, com trena e paquímetro. Com as três medidas foi calculada a média aritmética representativa de cada ponto. Para medir a FAPAR cana de açúcar utilizou-se a barra de sensores quântico em linha (APG\_MQ\_301), com 50 cm de comprimento e seis sensores, que medem o fluxo de fótons fotossintéticos, que é a faixa do espectro da radiação solar entre 400 e 700 nanômetros utilizada no processo da fotossíntese (Figura 5). As medidas da FAPAR foram tomadas nos 16 pontos georreferenciados, das mesmas plantas avaliadas quanto ao crescimento. Para a coleta de dados foram realizadas quatro medidas: acima do dossel, abaixo do dossel, refletida pelo dossel e refletida pelo solo. O instrumento é posicionado acima do dossel com os sensores virados para cima, depois é feita outra medida com os sensores para baixo, que captam os fluxos de radiação incidente e refletida pelo dossel vegetativo, respectivamente. Na base da planta também são realizadas medidas com os sensores virados para cima e depois para baixo. Todos os valores são aplicados na equação 3, cujo resultado será a radiação fotossinteticamente ativa absorvida.

$$FAPAR = R_i - R_{rd} - R_{sd} + R_{rs} \quad (3)$$

Em que:  $R_i$  é a PAR incidente (medida acima do dossel vegetativo),  $R_{rd}$  é a PAR refletida pelo dossel,  $R_{sd}$  é a radiação medida sob o dossel (no nível do solo) e  $R_{rs}$  é a PAR refletida pelo solo



Figura 5. MQ-301X: Linha Quantum e Medidor Portátil.  
Fonte: Apoggeinstruments.

#### 4.2.2 Produtividade e índice de maturação

A medição da produtividade da cana-de-açúcar, representada como toneladas de cana por hectare (TCH), envolveu aferir o peso das plantas localizadas nos pontos de medida em cada uma as parcelas. A massa das plantas foi tomada em quilogramas (kg) e, em uma etapa

subsequente, inserida na Equação 4, seguindo a metodologia determinada por Mariotti e Lascano (1969) citada por Arizono *et al.* (1998).

$$TCH = MTP/AUP \times 10 \quad (4)$$

Em que: TCH é tonelada de cana por hectare; MTP é a massa total da parcela (kg); AUP é a área útil da parcela (m<sup>2</sup>). Neste trabalho, foram colhidas a cana de dois metros lineares a partir de cada ponto georreferenciado e mais duas amostras de cada lâmina de irrigação (totalizando sete repetições em cada lâmina) e pesado os colmos.

O índice de maturação (IM, Equação 5) foi calculado como a razão entre a leitura do grau Brix na parte superior do colmo (BS) e o grau Brix na parte inferior do colmo (BI), por meio de leituras com refratômetro Lorbem Profissional ATC 0-32% modelo GT427. Esse índice fornece uma medida relativa da uniformidade do amadurecimento da cana-de-açúcar, refletindo as variações no teor de açúcares ao longo do colmo (Lamb *et al.* 2014). É essencial para avaliar a distribuição dos açúcares e a eficiência da colheita, além de ajudar na determinação do momento ideal para a colheita da cana-de-açúcar.

$$IM = \frac{BS}{BI} \quad (5)$$

#### 4.3 Dados meteorológicos e medida da evapotranspiração

Uma torre micrometeorológica (6°53'06" S, 35°02'03,6" W, Figura 6) foi instalada na parcela com irrigação de 80 mm mensais para medir as variáveis ambientais com os respectivos sensores: radiação solar (piranômetro Kipp & Zonen), saldo de radiação (saldo-radiômetro NR Lite), temperatura e umidade (sonda Vaisalla HPM45), vento (anemômetro Sônico RM Young 81000), umidade do solo (TDR CS616 Campbell Sci.), temperatura do solo (sonda T-107 Campbell Sci.), fluxo de calor no solo (placas HFP01 Hukseflux) e precipitação (pluviômetro Texas Electronics TR-525). Os dados eram armazenados, com médias computadas a cada 30 minutos, por meio dos dataloggers Campbell CR1000 e Campbell CR1000X.

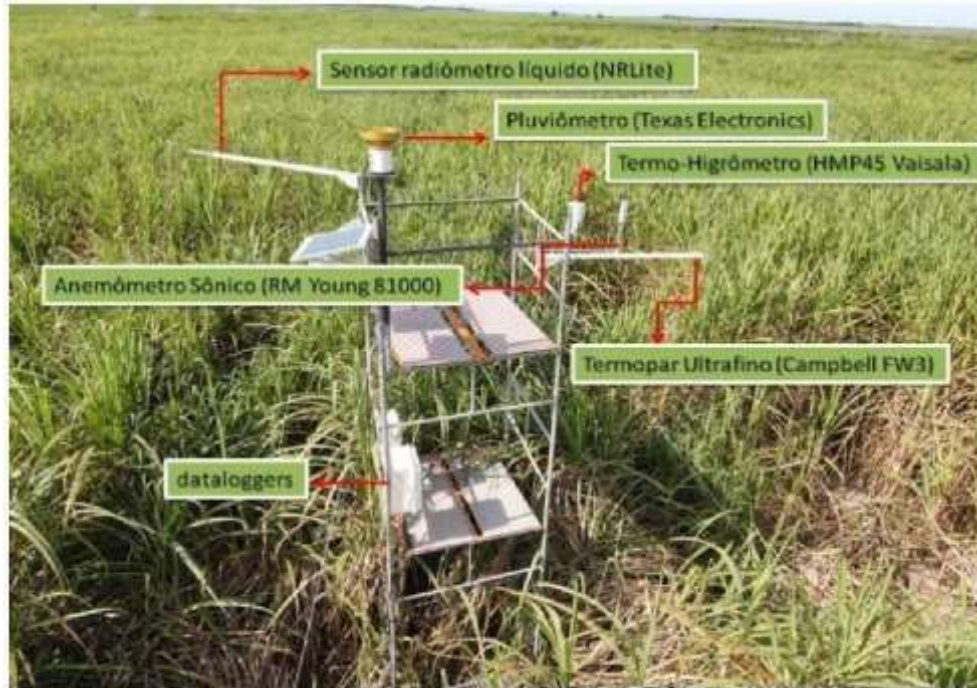


Figura 6 - Torre micrometeorológica com sensores para medida da evapotranspiração (NASCIMENTO, 2022).

Com estes dados, computou-se a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), a partir do fluxo de calor latente ( $LE$ ,  $W\ m^{-2}$ ), determinado como resíduo do balanço de energia (Equação 6).

$$LE = Rn - H - G \quad (6)$$

Em que  $Rn$  é o saldo de radiação à superfície ( $W\ m^{-2}$ ),  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $W\ m^{-2}$ ) e  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $W\ m^{-2}$ ).  $Rn$  e  $G$  foram medidos, respectivamente, com o saldo-radiômetro e as placas de fluxo de calor no solo (uma na linha de plantio, outra na entrelinha, ambas enterradas a 2 cm de profundidade). Os valores de  $G$  foram corrigidos com o armazenamento de calor acima da placa, por sua vez calculado com os dados de temperatura e umidade do solo. Já o  $H$  foi determinado pelo método da covariância de turbilhões (Silva, *et al.* 2024), que considera as flutuações de vento e temperatura em alta frequência (10 medidas por segundo) para determinar o fluxo de calor sensível no ar.

De posse dos valores de  $LE$ , obteve-se a correspondente lâmina de evapotranspiração (mm). Os valores de  $LE$ , em  $W\ m^{-2}$ , foram convertidos para  $MJ\ m^{-2}$  a cada 30 minutos e divididos pelo calor latente de evaporação ( $2,45\ MJ\ kg^{-1}$ ), conforme detalhado na Eq. 7. Por fim, os dados de  $ET$  semi-horários foram integrados para 24 h, definindo a lâmina diária.

$$ET = \frac{LE \cdot 30 \cdot 60}{2,45 \cdot 10^6} \quad (7)$$

Para determinar os coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) para a lavoura de cana-de açúcar avaliada, aplicou-se a metodologia FAO 56 (Allen *et al.*, 1998), sendo o  $K_c$  (Equação 8) a

relação entre a evapotranspiração da cultura – ETc e a evapotranspiração de referência - ET<sub>o</sub> (Equação 9).

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad (8)$$

$$ETo = \frac{0,408 \cdot (Rn - G) + \frac{900 \cdot \gamma \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{(T + 273)}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (9)$$

Em que ET<sub>o</sub>: Evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>; Δ: inclinação da curva de pressão de vapor d'água, kPa °C<sup>-1</sup>; Rn: Saldo de radiação, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>; G: fluxo de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (para 24 h, G ≈ 0); γ: fator psicrométrico, kPa °C<sup>-1</sup>; T: temperatura média diária do ar, °C; u<sub>2</sub>: velocidade do vento a 2 m, m s<sup>-1</sup>; e<sub>s</sub>: pressão de saturação e vapor d'água, kPa; e<sub>a</sub>: pressão atual de vapor d'água, kPa.

#### 4.4 Mapeamento dos índices de vegetação com ARP

Em parceria com o laboratório Open-lab Drone da UBFC (Université de Bourgogne Franche-Comté) foram realizados voos com um Phantom 4 Pro Multispectral (Figura 7) para gerar os mapas de NDVI e NDRE das parcelas avaliadas. Esta ARP dispõe de 6 câmeras, uma realiza a obtenção de imagens no espectro visível (RGB - Red, green e blue) e as outras 5 câmeras são responsáveis por capturar uma banda, são elas azul (B): 450 nm ± 16 nm, verde (G): 560 nm ± 16 nm, vermelho (R): 650 nm ± 16 nm, borda vermelha (RE): 730 nm ± 16 nm, infravermelho próximo (NIR): 840 nm ± 26 nm. O software utilizado para o processamento das imagens foi o Pix4Dmapper, o qual é programado para localizar automaticamente pontos em comum em diferentes imagens (PIX4DMAPPER, 2023).

As imagens multispectrais foram carregadas no software e, em seguida, os parâmetros da câmera e do voo foram inseridos no primeiro estágio de processamento e escolhido a forma de processamento de imagens. Após esta etapa, foram importados a localização dos pontos de controle previamente marcados e obtidos através do GPS de alta precisão (5 pontos para toda a área imageada) para edição das cenas e ortorretificação, com o objetivo de alinhar as imagens aos pontos de controle, para que haja uma maior precisão na localização. Após a calibração, segue-se à segunda etapa, na qual foram criadas uma nuvem de pontos e uma grade de 28 pontos. Na terceira e última etapa, foram obtidos um modelo digital de superfície (DSM), ortogonal, e índices de vegetação. O software é capaz de identificar as imagens de acordo com as bandas espectrais, sendo assim possível utilizar as equações 1 e 2 (Silva, 2023), gerando

assim um ortomosaico com os índices de vegetação e a tabela com as classes separadas por valores e cores.

Durante o ciclo vegetativo da cultura foram realizados dez voos, nos mesmos dias das tomadas de dados das plantas (morfológicos e FAPAR), para o monitoramento do desenvolvimento da cultura (Tabela 1).



Figura 7 - ARP Phantom 4 Pro Multispectral em operação na área de estudo.

Tabela 1 - Data de coletas de dados e correspondente estágio fenológico.

Data	Estádio fenológico	Dias após corte
07/10/2022	Brotação	31
17/10/2022	Perfilhamento	41
04/11/2022	Perfilhamento	59
25/11/2022	Perfilhamento	80
01/02/2023	Crescimento	148
24/02/2023	Crescimento	171
24/03/2023	Crescimento	199
28/04/2023	Crescimento	234
12/05/2023	Crescimento	248
26/05/2023	Crescimento	262

#### 4.5 Estatística dos dados

Para a obtenção do NDVI e do NDRE relativo à cada planta amostrada em campo, os ortomosaicos gerados pelo processamento das imagens no Pix4DMapper foram adicionados ao QGIS Desktop 3.28.8 e feita a estatística zonal em cada um dos tratamentos, por meio de um buffer de 25 m de diâmetro, compondo área de 490,9 m<sup>2</sup> no centro de cada talhão analisado. Deste conjunto de dados, que totalizava mais de 400.000 pixels, foram eliminados aqueles cujo valor dos índices fosse inferior a 0,05, em seguida extraídos 300.000 dados de cada data e parcela para as análises estatísticas (descritivas e análise de variância).

Aos dados espectrais (índices de vegetação), dados de RFAA, altura de plantas, diâmetro dos colmos, produtividade, índice de maturação foi aplicada uma análise de variância unidirecional (ANOVA-ONEWAY), para verificar se há diferenças na média entre os tratamentos, ou seja, entre as três lâminas aplicadas. A ANOVA é um teste paramétrico que tem como hipótese nula que não há diferenças na média entre os grupos ( $p > 0,05$ ) e a alternativa que há diferenças na média entre os grupos ( $p < 0,05$ ). A ANOVA exige que as amostras sejam homogêneas, e os testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk foram utilizados para verificar a homogeneidade das amostras. Tais testes apresentam como hipótese nula que as variâncias são homogêneas ( $p > 0,05$ ), e como hipótese alternativa que as variâncias não são homogêneas ( $p < 0,05$ ). Quando as amostras não apresentaram homogeneidade foi aplicado um Bootstrapping para 1000 re-amostragens, com intervalo de confiança de 95% e correção de Bias Correction accelerated (BCa). Havendo diferenças entre as médias, foi aplicado o teste de Tukey (para amostras homogêneas) ou de Games-Well (para amostras não-homogêneas, após a correção de Welch) para indicar entre quais tratamentos ocorreu a diferença na média (Haukoos; Lewis, 2005). Todas as análises foram realizadas no pacote estatístico IBM SPSS.

Os modelos de estimativa de Kc com os índices de vegetação foram gerados somente com os dados espectrais da parcela de 80mm, pois a estação meteorológica estava localizada neste tratamento. Para tanto, fez-se uma regressão linear simples entre os dados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Condições meteorológicas e Evapotranspiração

A seguir, são apresentados os dados das variáveis meteorológicas obtidas da torre micrometeorológica durante o período de estudo. Os dados de radiação solar (figura 8) foram obtidos através do piranômetro que faz parte do saldo radiômetro. Os valores de Radiação Solar (Figura 8) foram atenuados durante o decorrer do ano de 2023 devido à ocorrência de precipitação e consequentemente aumento de nebulosidade na área.

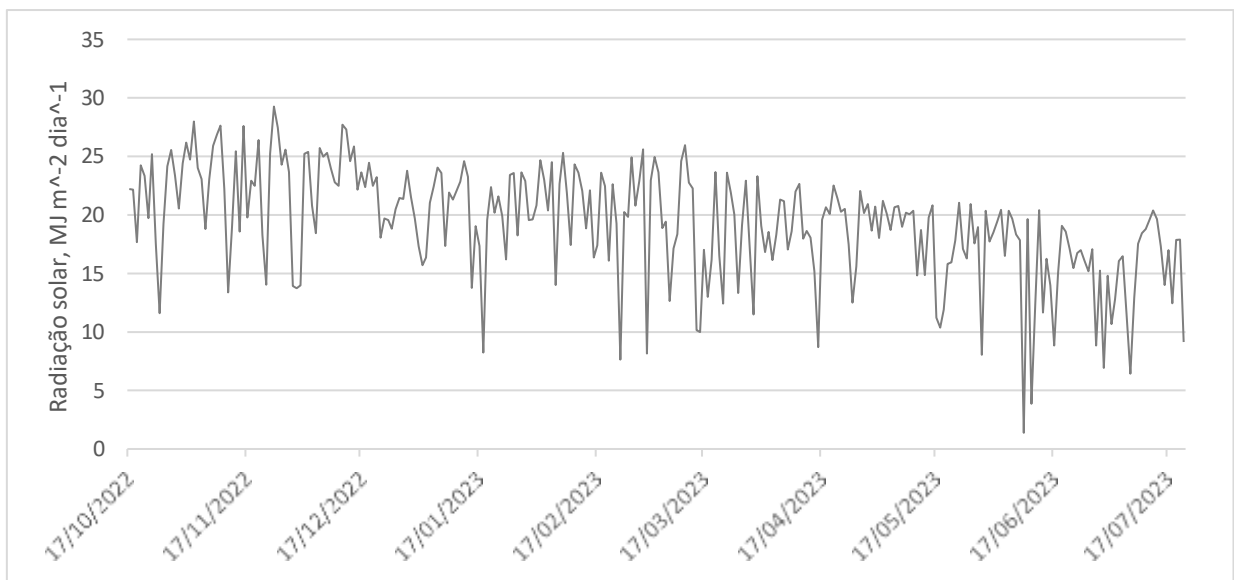


Figura 8 - Dados de Radiação Global durante o período de estudos.

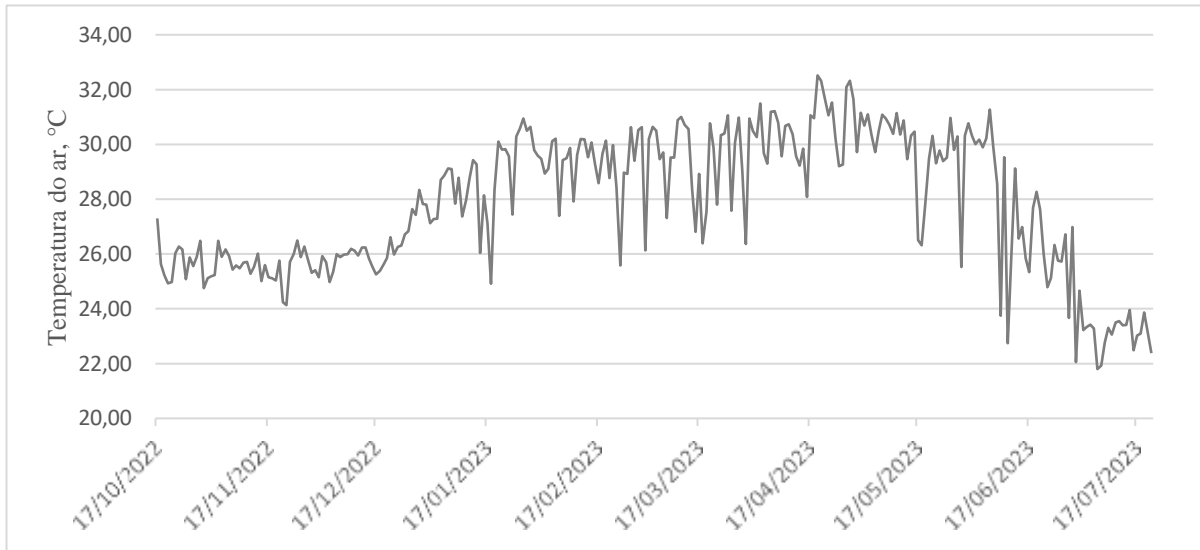


Figura 9 - Dados de Temperatura do Ar obtidos através da Sonda Vaisalla ao decorrer do período de estudo.

Os dados de temperatura são apresentados por meio da figura 9. Mielezrki (2020) aponta que a temperatura ideal para o crescimento da cultura de estar entre 25 e 30°C, de modo que se observa que a tempera estava dentro do padrão ideal.

A umidade relativa expressa a quantidade de vapor de água presente no ar em relação à quantidade máxima que o ar poderia conter, sendo influenciada e determinada pela temperatura, expressa como uma porcentagem de saturação do ar com vapor de água. Sendo uma relação entre o teor de vapor d'água que o ar contém (bulbo seco) e o teor máximo (bulbo úmido) que ele poderia conter na mesma temperatura (Heldwein, 2008).

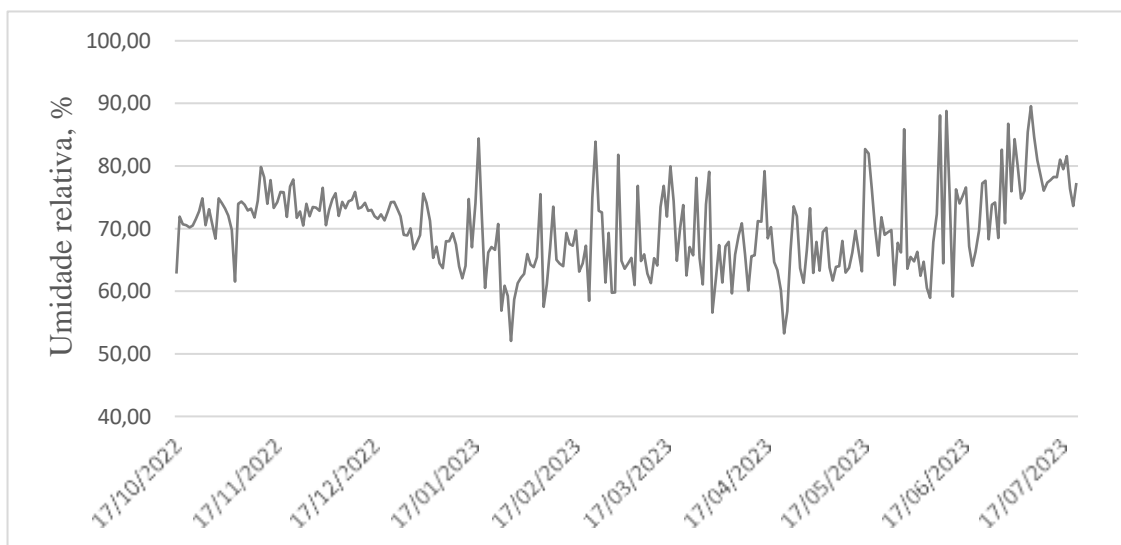


Figura 10 - Dados de Umidade Relativa ao decorrer do período de estudo.

Ao compararmos os dados de umidade relativa com os dados de precipitação e temperatura, observa-se que nos períodos que apresentam precipitação a temperatura do ar diminui e a umidade relativa aumenta, sendo uma relação inversamente proporcional. Por exemplo, no período de junho de 2023 a umidade relativa apresentou o valor de 90% (Figura 10), coincidindo com o período de menor temperatura registrada (22°C) e com precipitação de 41 mm.

A necessidade hídrica para a cultura da cana-de-açúcar varia de 1500 e 2500 mm para atingir bons níveis de produtividade (Ometto, 1980). O período analisado neste trabalho corresponde as fases de perfilhamento e crescimento. Na fase de crescimento a ocorrência de estresse hídrico pode acarretar a redução do comprimento de entrenós, provocando a diminuição da altura da planta e consequentemente reduzindo a produtividade, pois entrenós longos armazenam mais reservas (Mielezrski, 2020). Durante o período de outubro de 2022 a agosto de 2023 o total acumulado foi de 1520 mm, sendo o suficiente para atender a demanda hídrica da cultura (Figura 11).

Observa-se que os maiores volumes foram concentrados nos meses de junho e julho, havendo uma condição de déficit hídrico entre outubro de março.

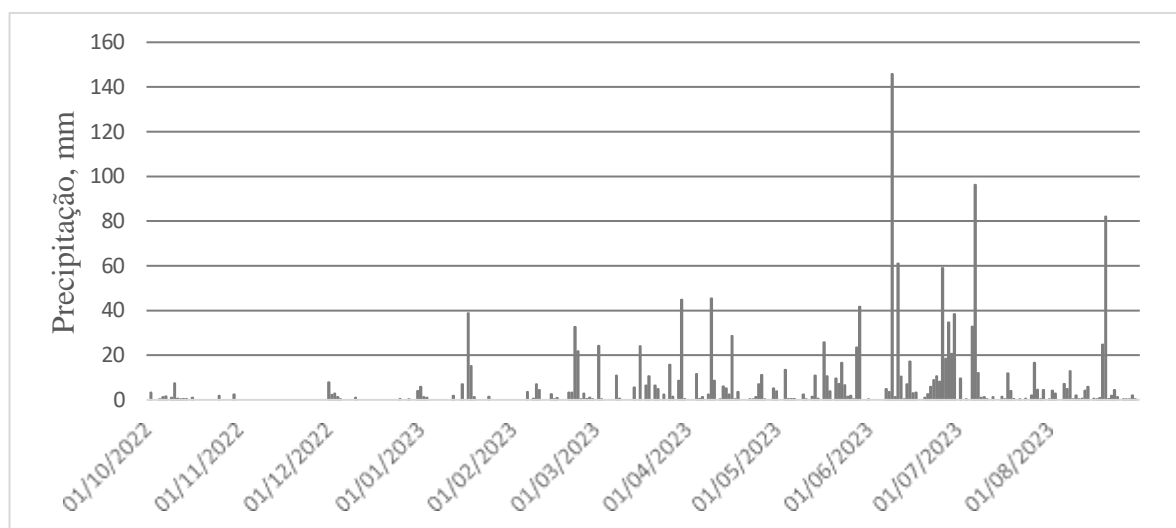


Figura 11 - Dados de Precipitação Total ao decorrer do período de estudo.

### 5.1.1 Evapotranspiração

Durante o ciclo, a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), acumulou o total de 1350 mm, com mínima de 0,251 mm dia-1 no dia 09/06/2023 e máxima de 6,519 mm dia-1 no dia 28/01/2023. A evapotranspiração da Cultura (ET<sub>c</sub>), acumulou o total de 896 mm dia-1, com

mínima de 0,145 mm dia-1 no dia 03/09/23 e máxima de 4,554 mm dia-1 no dia. Na Figura 9, observa-se que os valores de  $ET_0$  são menores entre os meses de junho e outubro e maiores durante os demais meses do ciclo. Isso indica que a demanda atmosférica é reduzida no período em que a precipitação é mais alta e frequente, resultando em maior nebulosidade, menor intensidade de radiação solar e menor aquecimento da atmosfera.

Thompson e Boyce (1967) realizaram medições utilizando lisímetros em cana-de-açúcar cultivada sob as condições climáticas de Pongola, na África do Sul, e registraram um valor máximo de  $ET_c$  de 6,8 mm por dia. A evapotranspiração da cana-de-açúcar em diferentes regiões do mundo observou que os valores de  $ET_c$  podem variar significativamente conforme a variedade da cultura, o local de plantio e o sistema de produção. De acordo com Silva (2015), os valores mínimos, médios e máximos de  $ET_c$  para a cana-de-açúcar variam de 0,52 a 4,10 mm/dia, 2,33 a 5,70 mm/dia e 3,70 a 8,60 mm/dia, respectivamente, logo estando de acordo com os dados obtidos (figura 12).

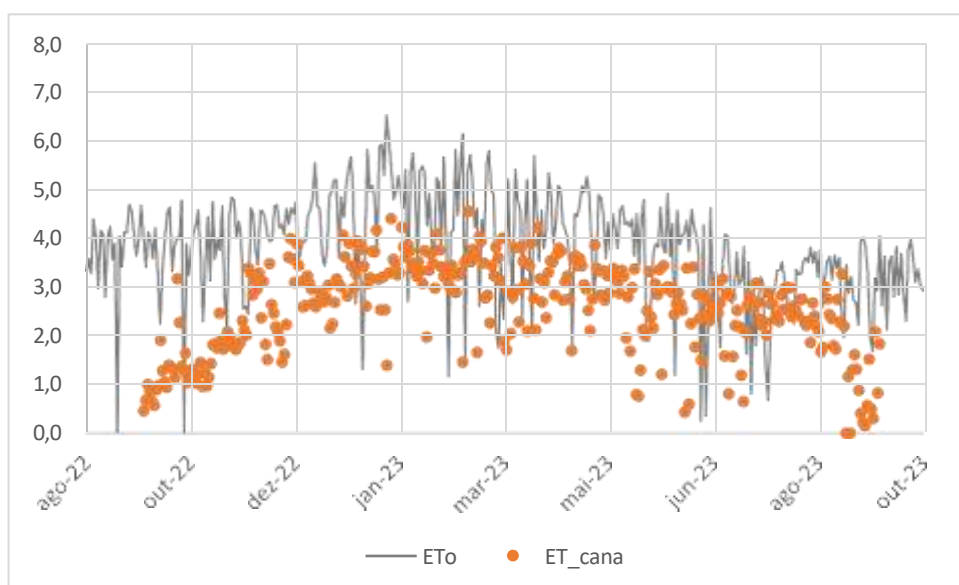


Figura 12 - Dados de  $ET_0$  (evapotranspiração referencial) e  $ET_c$  (evapotranspiração da cultura).

Segundo Silva (2015) observou que, à medida que a cultura aumentou sua área foliar, a superfície de solo exposta foi reduzida, diminuindo, assim, a evaporação direta. Em outras palavras, a evapotranspiração passou a ser predominantemente composta pela transpiração, pois a área foliar tornou-se mais expressiva e relevante no processo.

## 5.2 Análise do desenvolvimento, uso de luz e produção da cana nas três lâminas de irrigação

A partir dos dados coletados durante o ciclo da cultura foi plotado um gráfico considerando os valores das médias das medidas de altura (Figura 13) e diâmetro (Figura 14), com o objetivo de acompanhar o desenvolvimento da cultura por meio dos pontos de cada lâmina de irrigação. Vale ressaltar que durante o período de estudo ocorreram mudanças nas plantas que estavam sendo aferidas devido às intercorrências, tais como: perda de marcadores e corte das plantas.

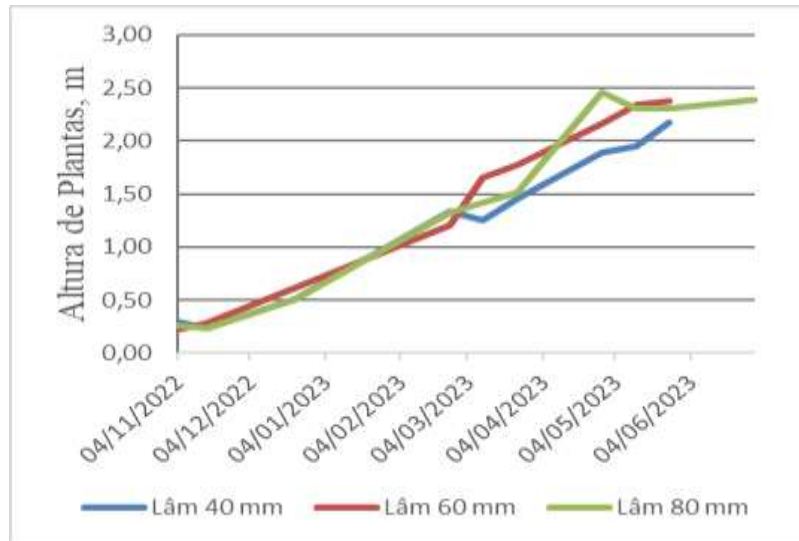


Figura 13 - Médias das medidas de altura das plantas em cada lâmina de irrigação.

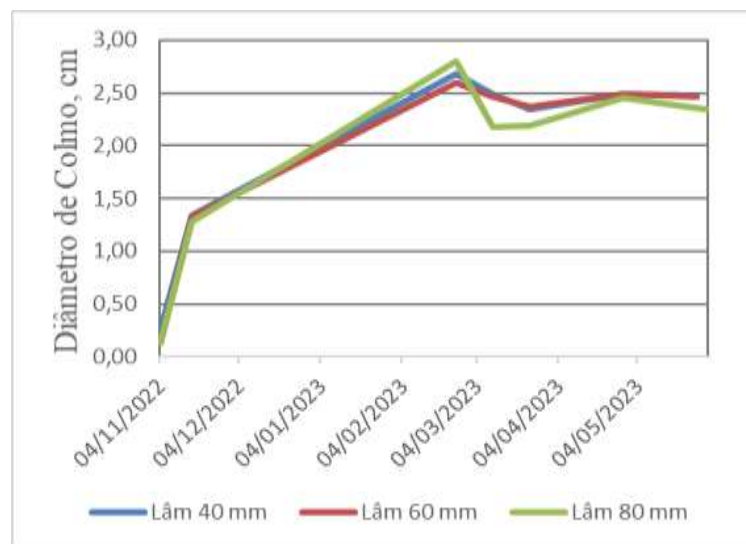


Figura 14 - Médias das medidas de diâmetro de colmos em cada lâmina de irrigação.

O estresse hídrico pode reduzir a altura das plantas e área foliar em até 30 e 60 %, em comparação a plantas que não sofreram falta de água (Holanda *et al.*, 2014). Diante dos gráficos foi possível observar que não houve diferenças expressivas nas medidas morfológicas da cultura. Provavelmente a causa desse resultado foi o intenso regime de chuvas a partir de março de 2023 (Figura 14) que não possibilitou observar diferenças entre os tratamentos.

A análise dos dados de APAR mostrou que somente no dia 12/05/2023 houve diferença na média entre os tratamentos para a RFAA. Desse modo, após aplicação do teste de Tukey, verifica-se que a diferença na média se encontra entre as lâminas de 40 e 80 mm, conforme mostra a Tabela 2. Portanto, o regime diferente de irrigação não afetou a absorção de luz para o processo fotossintético.

Tabela 2 - Teste de Tukey para as medidas do dia 12/05/2023.

Variável dependente	Lâmina de irrigação (mm)	Diferença média	Erro	Sig.	
RFAA (12/05/2023)	40	60	1,02400	0,60419	0,244
		80	1,97300*	0,57847	<b>0,012</b>
	60	40	-1,02400	0,60419	0,244
		80	0,94900	0,57847	0,264
	80	40	-1,97300*	0,57847	<b>0,012</b>
		60	-0,94900	0,57847	0,264
	60	40	-0,10502	0,05326	0,159
		80	0,00462	0,05099	0,995
	80	40	-0,10965	0,05099	0,118
		60	-0,00462	0,05099	0,995

Em unidades do Nordeste brasileiro, tem-se registrado alta produtividade agrícola da variedade RB92579, com médias superiores a 80 t/ha, e produtividades ainda mais expressivas sob irrigação plena, superando 140 t/ha. Esses resultados têm contribuído significativamente para a competitividade de diversas empresas da região. Um exemplo marcante é o da Usina Agrovale, na Bahia, onde, em uma área de 60 hectares cultivada com a RB92579 sob irrigação plena, foram obtidas 260 t/ha em treze meses de cultivo da cana-planta, estabelecendo um recorde mundial de produção, sendo altamente responsiva à irrigação e muito eficiente no uso da água e apresenta boa recuperação após períodos de seca (Ridesa, 2015). A tabela 3 apresenta os resultados obtidos na colheita, estando de acordo com os parâmetros de localidade e manejo. Foi realizada a análise estatística para analisar se houve diferença significativa, porém não teve significativa entre os tratamentos.

Tabela 3 - Dados de tonelada de cana por hectare (THC) em cada parcela.

Parcela	TCH médio (Kg)
80 mm	168,06
60 mm	162
40 mm	144,14

Pela análise do grau brix e do índice de maturação, verifica-se que, de acordo com a média das amostras, todos os tratamentos estavam aptos para a colheita (Tabela 4), variando de 0,85 a 0,96 no 262º DPC (oitavo mês). Segundo Leal (2016), a variedade RB92579 apresentou um valor de 1,02 no oitavo mês. Foi realizada a análise estatística para analisar se houve diferença significativa entre os tratamentos, porém não teve significativa entre os tratamentos.

Tabela 4 - Valores dos índices de maturação das amostras.

80 mm	60 mm	40 mm
1,00	0,95	0,83
0,78	0,80	1,15
0,72	0,78	0,91
1,16	0,96	0,99
1,10	0,79	0,53
1,08	0,91	0,93
0,94	0,78	0,84
0,90		
Média	Média	Média
0,96	0,85	0,88

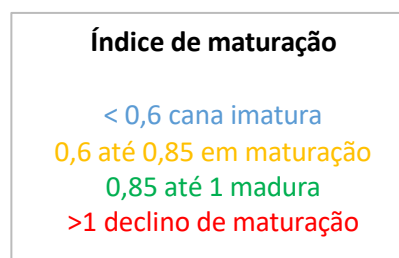


Figura 15 - Parâmetros de índice de maturação.

(Mielezrski, 2020)

### 5.3 Mapeamento e análise dos índices espectrais de vegetação

A Figura 16 apresenta os ortomosaicos em NDVI e a figura 17 apresenta os ortomosaicos em NDRE correspondentes a cada estágio fenológico da cultura da cana-de-açúcar. Nota-se uma variação nas classes de NDVI em resposta à evolução vegetativa da planta. No estágio fenológico de brotação, observa-se uma predominância de valores próximos a 0, o que reflete a maior exposição do solo. À medida que a cultura se desenvolve, os valores de NDVI aproximam-se de 1, indicando a plena saúde das plantas e criando um contraste evidente com as áreas afetadas, resultados semelhantes foram encontrados por Alface (2019). Valores baixos representam a condição onde há maior absorção de radiação na faixa do infravermelho

próximo, o que explica os baixos valores de NDVI nas fases iniciais do ciclo fenológico (Formaggio; Sanches, 2017).

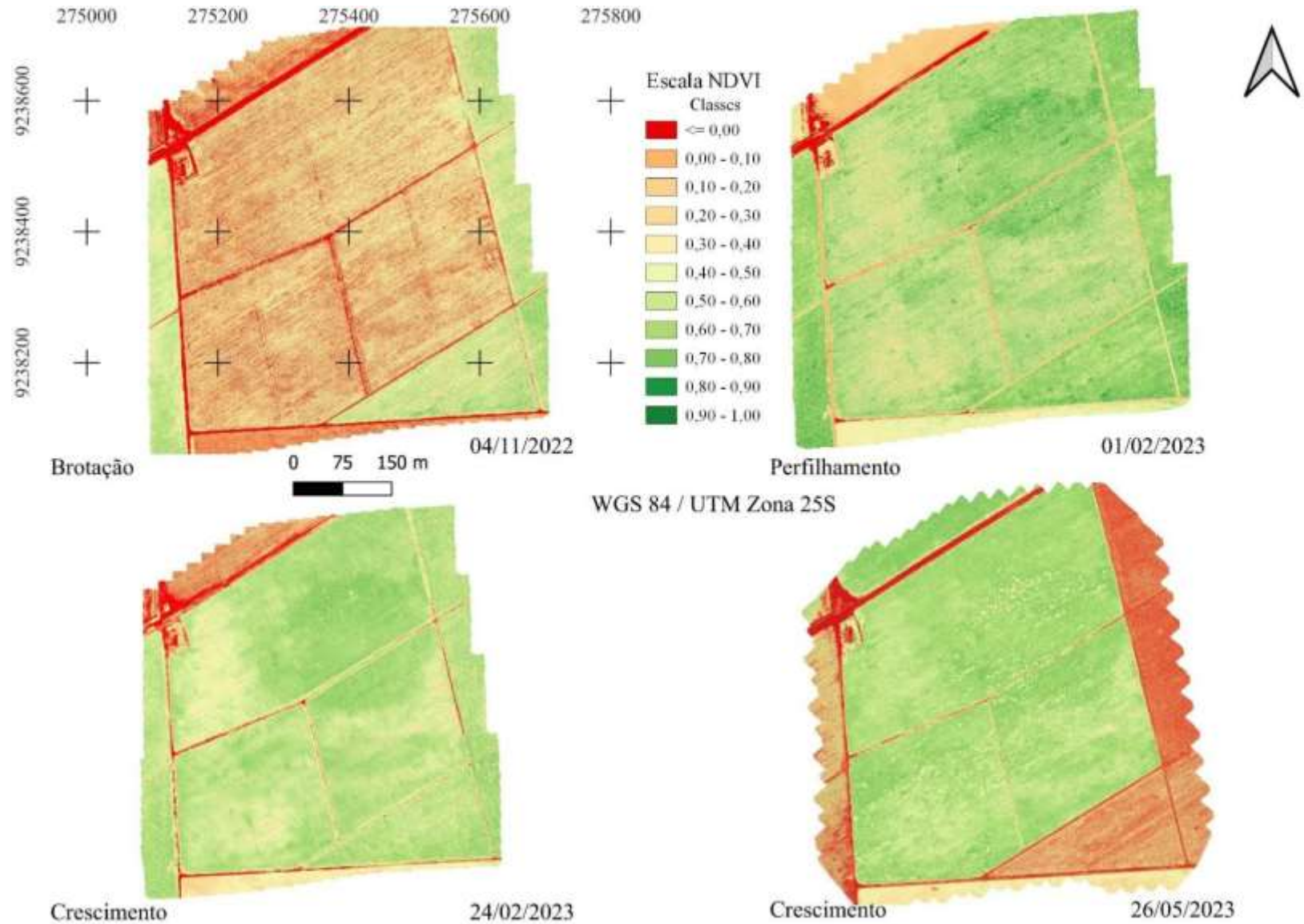


Figura 16 - Mapa com ortomosaicos em NDVI correspondentes a cada estágio fenológico da cultura da cana-de-açúcar.

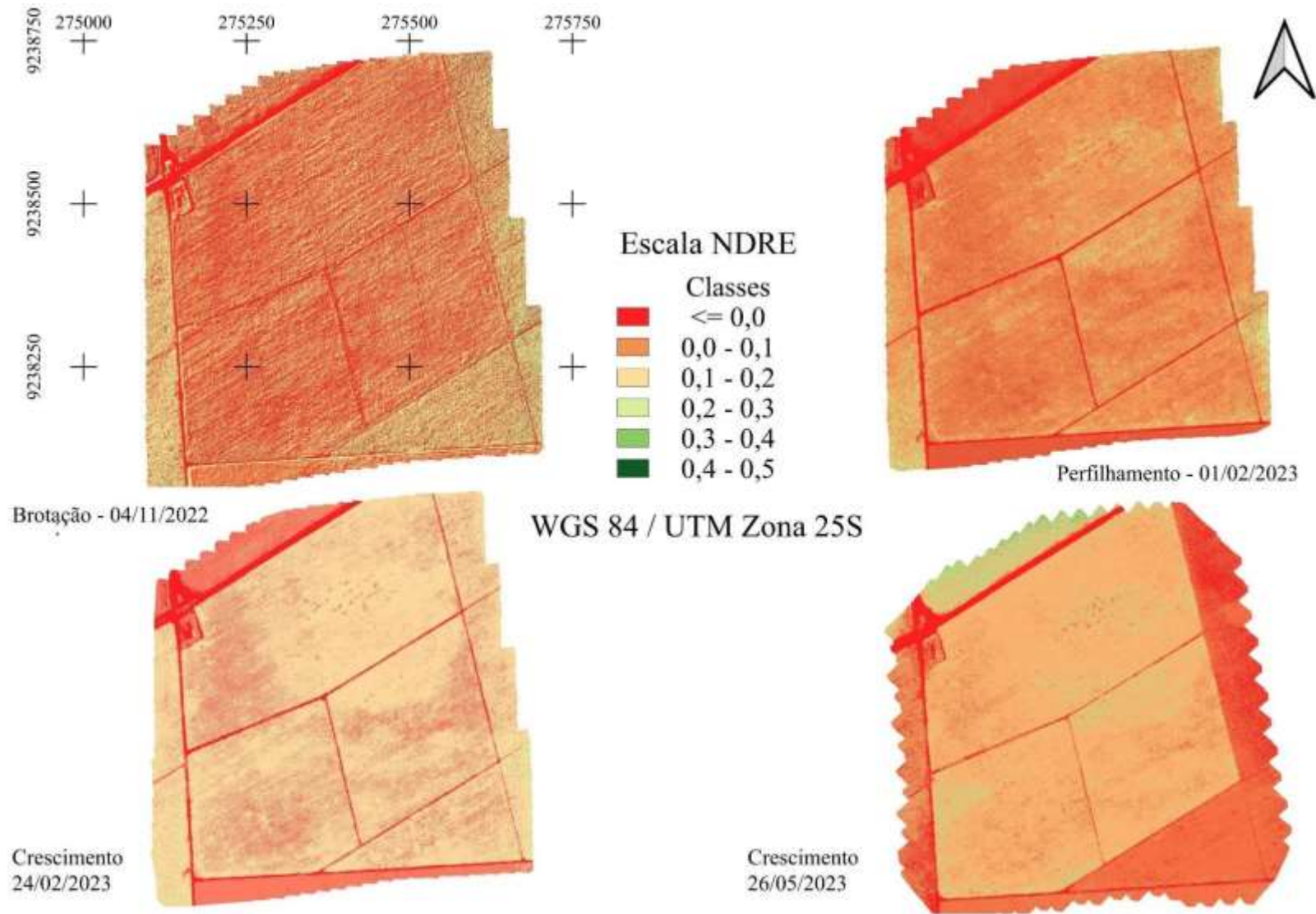


Figura 17 - Mapa com ortomosaicos em NDRE correspondentes a cada estágio fenológico da cultura da cana-de-açúcar.

É importante ressaltar que, de maneira geral, o NDVI da cana-de-açúcar começa a diminuir a partir do sétimo mês do ciclo da cultura, o que indica que a planta atingiu seu máximo índice de área foliar e está apresentando um crescimento mais lento nesta fase. Esses dados corroboram os resultados observados por Lucas e Schuler (2007).

Nas Tabelas 4 e 5, são apresentados os resultados da estatística descritiva dos valores extraídos dos pixels para os índices NDVI e NDRE. Aplicou-se o teste de normalidade e homogeneidade das variâncias, sendo necessário realizar o procedimento de *bootstrapping* antes da aplicação do teste de médias (Games-Howell). Apesar da ANOVA e do teste de médias mostrar diferenças entre as parcelas de irrigação, estas podem ser consideradas irrelevantes dentro dos limites inferior e superior do intervalo de confiança. Portanto, não foram registradas diferenças significativas entre as lâminas em nenhuma das datas avaliadas, tanto para NDVI quanto para NDRE. Nos três tratamentos avaliados, observa-se uma média crescente dos índices, acompanhando o desenvolvimento da cultura.

O NDVI varia de 0,173 a 0,787 e o NDRE de 0,23 a 0,48. Percebeu-se que à medida que a cultura se desenvolve, o CV diminui, devido a cultura se estabelecer, assim diminuindo a área de solo exposto, tornando a amostra mais homogênea. O valor reduzido dos índices na primeira data de avaliação é atribuído à maior proporção de solo exposto em relação à cultura, que ainda estava em seu estágio inicial (brotação). Com o progresso do desenvolvimento, a cultura se estabelece, o que resulta no aumento dos valores dos índices e na redução do coeficiente de variação. Segundo Thompson et al. (2019), os valores máximos de NDRE são observados quando a cultura está totalmente estabelecida e o dossel cobre o solo, indicando crescimento considerável, caso a planta esteja saudável, no qual variaram entre 0,18 e 0,28. Os valores obtidos neste trabalho foram semelhantes, devido a área analisada não obter valores superiores, valores maiores do índice encontra-se fora da área analisada.

As médias de NDRE não acompanham o padrão de médias e coeficiente de variação do NDVI, talvez porque o NDRE seja muito sensível ao teor de clorofila, no qual pode ter respondido aos problemas fitossanitários encontrados.

Tabela 5 - Estatística descritiva do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) para as lâminas de irrigação (40, 60 e 80 mm).

Data	40 mm			Média	60 mm			Média	80 mm		
	Média	Desvio padrão	CV (%)		Desvio padrão	CV (%)	Desvio padrão		CV (%)		
07/10/2022	0,19	0,14	74,59	0,20	0,14	69,91	0,18	0,13	73,12		
17/10/2022	0,29	0,18	61,04	0,24	0,13	56,47	0,22	0,09	43,50		
04/11/2022	0,34	0,15	44,50	0,34	0,15	44,50	0,32	0,14	43,76		
25/11/2022	0,46	0,20	42,67	0,39	0,21	54,65	0,39	0,20	51,40		
01/02/2023	0,55	0,15	27,40	0,52	0,16	31,75	0,51	0,17	33,09		
24/02/2023	0,61	0,10	17,08	0,64	0,09	14,37	0,57	0,08	14,75		
24/03/2023	0,59	0,12	19,84	0,65	0,10	14,98	0,64	0,10	16,39		
28/04/2023	0,73	0,06	7,74	0,78	0,04	5,33	0,79	0,04	5,27		
12/05/2023	0,65	0,07	11,23	0,66	0,07	11,29	0,67	0,07	10,58		
26/05/2023	0,65	0,07	11,20	0,67	0,07	10,72	0,68	0,07	9,96		

Tabela 6 - Estatística descritiva do índice de vegetação da diferença normalizada na borda do vermelho (NDRE) para as lâminas de irrigação (40, 60 e 80 mm).

Data	40 mm			Média	60 mm			Média	80 mm		
	Média	Desvio padrão	CV (%)		Desvio padrão	CV (%)	Desvio padrão		CV (%)		
07/10/2022	0,06	0,01	19,59	0,07	0,01	19,61	0,07	0,01	20,74		
17/10/2022	0,08	0,02	31,05	0,08	0,03	31,88	0,08	0,03	33,15		
04/11/2022	0,13	0,06	46,43	0,12	0,06	47,19	0,10	0,04	39,55		
25/11/2022	0,08	0,02	26,71	0,08	0,02	25,72	0,08	0,02	26,06		
01/02/2023	0,12	0,03	29,46	0,11	0,04	31,51	0,12	0,04	30,19		
24/02/2023	0,10	0,03	24,81	0,12	0,03	27,14	0,12	0,03	28,05		
24/03/2023	0,11	0,03	27,03	0,12	0,03	24,29	0,13	0,03	24,36		
s)28/04/2023	0,15	0,03	18,04	0,15	0,03	21,63	0,14	0,03	23,60		
12/05/2023	0,11	0,02	20,84	0,12	0,03	21,16	0,12	0,02	18,72		
26/05/2023	0,13	0,03	21,57	0,13	0,03	19,09	0,14	0,03	18,49		

Foram consideradas duas situações diante da ausência de diferença significativa nos resultados entre os tratamentos. A primeira é que a alta precipitação ocorrida durante o período de avaliação tenha prevalecido em relação às lâminas de irrigação, eliminando assim qualquer diferença. A segunda hipótese está relacionada ao tipo de solo presente na área de estudo; por se tratar de um solo com alto teor de areia, sua capacidade de retenção de água na camada onde se encontram as raízes é baixa, o que impede que as plantas absorvam adequadamente a água disponível.

#### 5.4 Estimativa de Kc através do NDVI e NDRE

Bezerra et al. (2010) afirmam que a reflectância espectral das culturas agrícolas pode fornecer uma estimativa indireta dos valores de Kc. Esse aspecto também é evidenciado pela semelhança entre as curvas de Kc e as dos índices de vegetação até a data 24/03/2023. A série temporal representada pela figura 18 mostra a evolução do Kc e NDVI e NDRE durante o ciclo da cana. Nota-se bastante semelhança entre o comportamento dos índices.

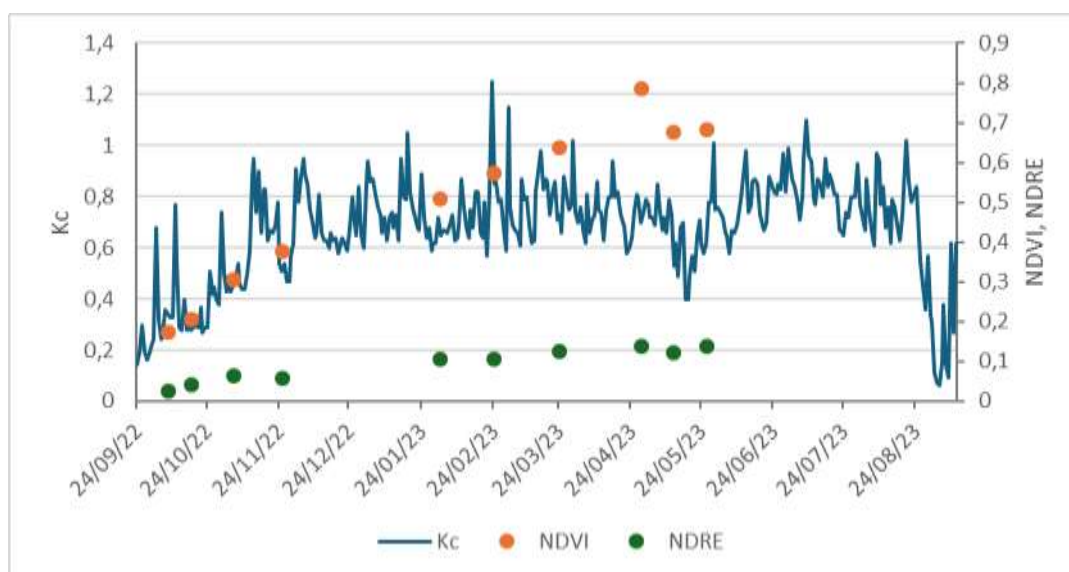


Figura 18 - Evolução do Kc e NDVI e NDRE durante o ciclo da cana.

A tabela 6 mostra a média mensal dos valores Kc que foram registrados pela torre micrometeorológica durante o desenvolvimento da cultura. O estágio fenológico de brotação considera o primeiro mês (setembro) após o corte quando houve déficit hídrico, porém, neste período os dados de evapotranspiração variaram entre 0,14 a 0,77, com média de 0,23 estando dentro dos valores de referência segundo a tabela de valores de referência da tabela da FAO

(tabela 7), logo a lâmina de irrigação foi suficiente para suprir a demanda hídrica nesta fase. A fase de perfilhamento ocorre durante o 2º mês (outubro), no qual o Kc variou de 0,27 a 0,95, com média de 0,38, porém de acordo com o valor máximo de 0,95, estando dentro dos parâmetros recomendados. A fase de crescimento detém o maior período, estando entre o final do 3º até o 9º mês. Os valores estão de acordo com a tabela 7.

Tabela 7 - Média mensal dos valores de Kc registrada pela torre micrometeorológica.

Mês	Kc_torre
9	0,23
10	0,38
11	0,61
12	0,71
1	0,75
2	0,74
3	0,78
4	0,74
5	0,67
6	0,84
7	0,83
8	0,72

Tabela 8 - Valores do coeficiente de cultura (Kc) para cana-de-açúcar, segundo a FAO (1977; 1979).

Idade da cultura (meses)		Estádio de desenvolvimento	Mínimo	Kc Médio	Máximo
Cana-planta	Cana-soca				
0—2	0—1	Do plantio até 0,25 de cobertura	0,4	0,5	0,6
2—3	1—2	De 0,25 a 0,5 de cobertura	0,75	0,8	0,85
3—4	2—3	De 0,5 a 0,75 de cobertura	0,9	0,95	1
4—7	3—4	De 0,75 a cobertura completa	1	1,1	1,2
7—14	4—9	Utilização máxima	1,05	1,2	1,3
14—16	9—10	Início da maturação	0,8	0,95	1,05
16—18	10—12	Maturação	0,6	0,7	0,75

A equação ajustada foi baseada na relação entre o NDVI médio e o Kc determinado com o experimento de campo (figura 19), considerando a área irrigada com a lâmina de 80mm. Observa-se que 62% da variação nos valores de Kc pode ser explicada pela variação do NDVI e NDRE médio da cultura da cana-de-açúcar no campo. Observa-se que os valores variam minimamente entre os índices de vegetação. No entanto, houve um aumento considerável do Kc em uma das datas analisadas, alcançando o valor de 0,85. Esse aumento provavelmente se

deve à alta precipitação ocorrida entre os dias 22 e 23 de fevereiro de 2023, o que resultou em um solo mais úmido, aumentando assim a evapotranspiração.

Resultados semelhantes foram observados por Alface (2019), e por Singh & Irmak (2009), que também encontraram uma boa correlação entre os valores de KcNDVI e KcFAO ao estabelecer a relação entre NDVImax e KcFAO para culturas de milho e soja na região Centro-Sul do estado de Nebraska. É importante destacar que a utilização dos valores médios de NDVI nessa análise proporcionou um melhor ajuste dos dados, pois permite uma representação mais precisa da cultura no campo. Para o índice NDRE foi encontrado regressão semelhante à gerada com o NDVI (Figura 20).

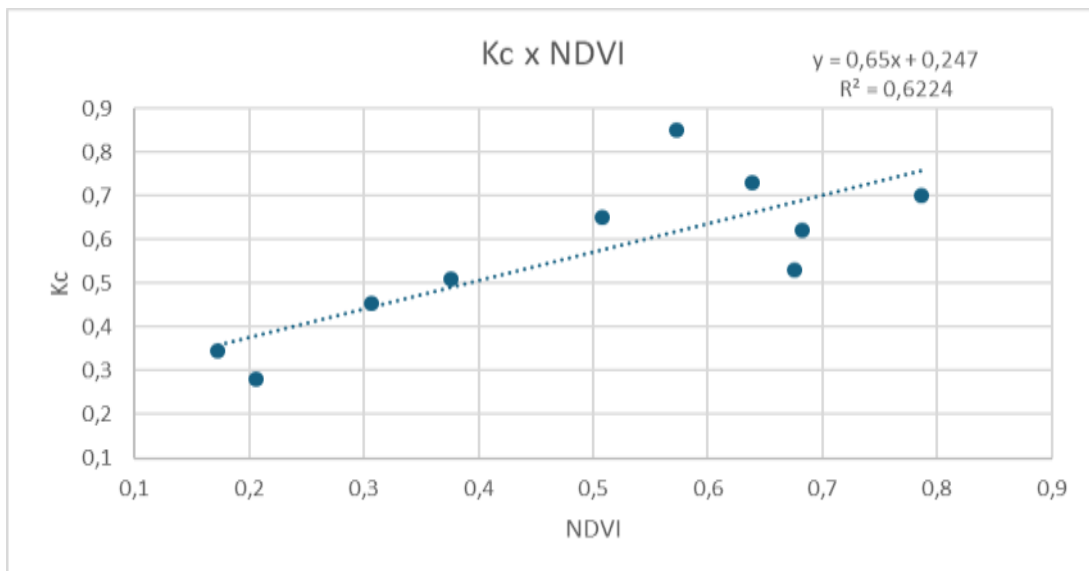


Figura 19 - Regressão linear obtida com os dados de NDVI e Kc.

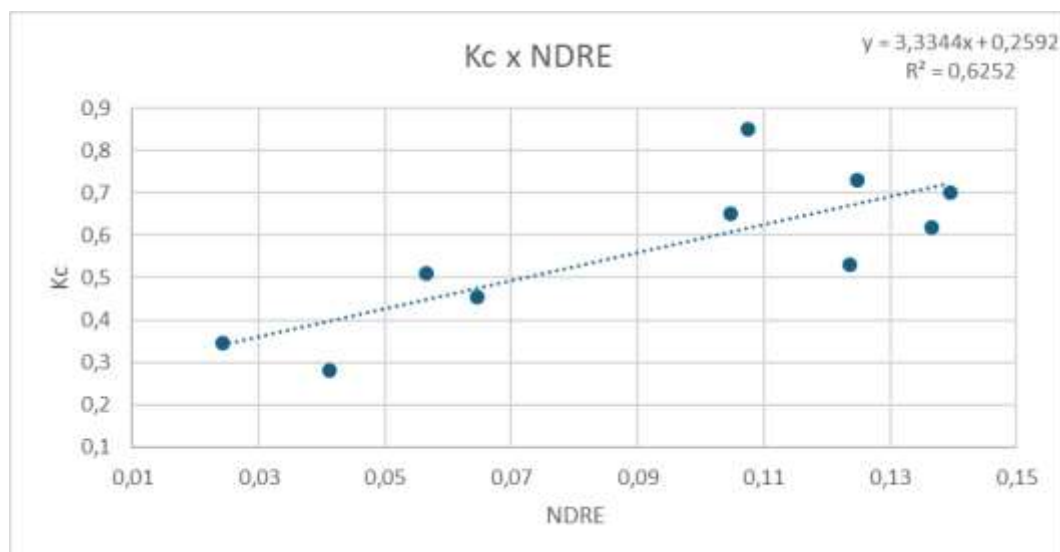


Figura 20 - Regressão linear obtida com os dados de NDRE e Kc.

## 6 CONCLUSÃO

Os índices de vegetação mostraram-se adequados para avaliar o desenvolvimento da cultura. Contudo, com base nos dados obtidos e nos resultados da análise estatística, não foi observada diferença significativa entre as três lâminas de irrigação em relação aos índices avaliados.

Os dados referentes ao TCH indicaram que a lâmina de irrigação de 80 mm apresentou desempenho superior à de 60 mm, que, por sua vez, superou a de 40 mm. O índice de maturação não apresentou diferenças significativas entre as lâminas de irrigação, assim como a radiação fotossinteticamente ativa, que também não demonstrou variação estatística entre os tratamentos.

A relação entre o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) e os índices NDVI e NDRE apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,62, considerado aceitável, levando-se em consideração as condições climáticas adversas enfrentadas durante o ciclo da cultura.

## REFERÊNCIAS

- AFCP – ASSOCIAÇÃO DOS FORNECEDORES DE CANA DE PERNAMBUCO. **Relatório Anual de Produção 2024**. Disponível em: <http://www.afcp.com.br> . Acesso em: 3 agosto de 2024.
- AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SILVA, F. W.; ADAMI, M.; MELLO, M. P. Remote sensing images in support of environmental protocol: Monitoring the sugarcane harvest in São Paulo State, Brazil. **Remote Sensing**, v.3, p.2682-2703, 2011. <https://doi.org/10.3390/rs3122682>.
- ARANHA, C.; YAHN, C. A. **Botânica da cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B. (coord.) Cana-de-açúcar: Cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. Cap.1, p.3-13.
- ARAÚJO, A. C., et al. A influência das variáveis climáticas nas necessidades hídricas da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 33 p. 19-330, 2019.
- ARIZONO, H.; MATSUOKA, S.; GHELLER, Y.; MASUDA, H.P.; HOFFMANN, B.A.I.; MENESEZ, L.L. Alternativas para avaliação de produção de cana-de-açúcar. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.16, n.5, p.20, 1998.
- ASPLAN-PB – ASSOCIAÇÃO DOS PLANTADORES DE CANA DA PARAÍBA. **Análise da Safra de Cana-de-Açúcar 2024**. Disponível em: <http://www.asplanpb.com.br> . Acesso em: 3 atrás. 2024.
- ASSUCARNORTE – ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE AÇÚCAR DO RIO GRANDE DO NORTE. **Produção de Cana-de-Açúcar 2024**. Disponível em: <http://www.assucarnorte.com.br> . Acesso em: 3 atrás. 2024.
- BAI, Y., et al. Comparison of Vegetation Indices for Estimating Leaf Area Index in Sugarcane. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 265, p. 186-195, 2019.
- BERNARDI, A. C. DE C.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G. Variabilidade espacial de parâmetros físicoquímica do solo e biofísicos de superfície em cultivo do sorgo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.623- 630, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000600009>.
- BEZERRA, B. et al. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 25, p. 404-414, 2010.
- BLAIR, G. J.; ZIMMER, E.; NETTO, A. S. **Sugarcane: guide to climate and soil requirements**. 2023. Disponível em: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/SC069>. Acesso em: 1 out. 2024.
- BOIARSKII, Boris; HASEGAWA, Hideo. Comparison of NDVI and NDRE indices to detect differences in vegetation and chlorophyll content. **J. Mech. Contin. Math. Sci**, v. 4, p. 20-29, 2019.

BRASIL ENERGIA. **Diversificação de produtos derivados da cana-de-açúcar e desenvolvimento sustentável**. 2024. Disponível em: <  
<https://brasilenergia.com.br/petroleoegas/downstream/diversificacao-de-produtos-derivados-da-cana-de-acucar-e-desenvolvimento-sustentavel>> . Acesso em: 3 atrás. 2024.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **A produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica**. Brasília: Conab, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br> . Acesso em: 16 jul. 2024.

CARNEIRO, Ericka Aguiar et al. **Parâmetros Físicos-Hídricos do Solo Visando a Detecção do Déficit Hídrico em Área de Cana-De-Açúcar**. XVI simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste e 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. 2022. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14289>. Acesso em 28 de abril de 2023.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar 2023/2024** . Disponível em: <https://www.conab.gov.br> . Acesso em: 3 atrás. 2024.

CRISPIM, J. E. Manejo correto da cana é essencial para alta produtividade. **Revista Campo & Negócios**, Uberlândia, v.1, n. 37, p. 16-18, 2006.

DA SILVA, N. D.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A. Evapotranspiration over a processing cassava field: a comparative analysis of micrometeorological methods and remote sensing. **Theoretical and Applied Climatology**, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05008-3>

DA SILVA, Vicente de Paulo Rodrigues; BORGES, Cicera Josefa Rozangela; DE ALBUQUERQUE, Walker Gomes. Necessidades hídricas da cana-de-açúcar cultivada em clima tropical. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 625-632, 2014.

DE LA CASA, A., OVANDO, G., BRESSANINI, L., MARTÍNEZ, J., DÍAZ, G., MIRANDA, C. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 146, p. 531-547, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018><br

DIAS, R. C. S. et al. **Índice de vegetação por diferença normalizada em mamoeiro**. XXVI Congresso Brasileiro de Fruticultura. Juazeiro e Petrolina, p. 1.491- 1.494, 2019.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Aspectos Técnicos da Produção de Cana-de-Açúcar: Documento 256**. Brasília: Embrapa, 2022. Disponível em: [www.embrapa.br/documentos/256](http://www.embrapa.br/documentos/256) . Acesso em: 3 atrás. 2024.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Variedades de Cana Adaptadas ao Clima do Nordeste** . Disponível em: <https://www.embrapa.br> . Acesso em: 3 atrás. 2024.

ENGESAT. NDVI: CRIANDO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NO GLOBAL MAPPER. 2022. Disponível em: <http://www.engesat.com.br/>. Acesso em: 07/12/2022.

FAGUNDES, Fabiano. **Análise do uso da água para irrigação na bacia hidrográfica do Rio Formoso**. 2021. 83f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Palmas, 2021.

FERREIRA FILHO, Dimas. **Calagem em primeira soca de dez genótipos de cana-de-açúcar**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Universidade Federal da Paraíba. Areia. 2019.

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

GCOS, 2019. Essential Climate Variables [WWW Document]. URL. <https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables> (accessed 5.2.19).

GLOBORURAL. **Inovações Tecnológicas em Cana-de-Açúcar do Nordeste**. Disponível em: <https://revistagloborural.globo.com>. Acesso em: 3 atrás. 2024.

GROFF, A. M. **Fatores de produção agropecuária**. Campo Mourão FECILCAM Departamento de Engenharia de Produção, 2010.

HU, B.; et al. Assessing the impact of atmospheric attributes on the effectiveness of solar irradiance for photosynthesis of urban vegetation in Attica, Greece. **Theoretical and Applied Climatology**, 2023. DOI: 10.1007/s00704-022-04036-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-022-04036-2>. Acesso em: 22 ago. 2024.

HUANG, Y.; et al. Mapping long-term and high-resolution global gridded photosynthetically active radiation using the ISCCP H-series cloud product and reanalysis data. **Earth System Science Data**, 2023. DOI: 10.5194/essd-2023-14. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/14/1233/2022/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

HÖRTENSTEINER, S. Chlorophyll degradation during senescence. **Annual Review of Plant Biology**, v. 57, p.55–77, 2006.

IEA – INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Produtividade da Cana-de-Açúcar – 2024**. Disponível em: <http://www.iaa.agricultura.sp.gov.br>. Acesso em: 03 de agosto de 2024.

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.F.; HEWITT, M.L.; JACKSON, J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.59, p.13-26, 2008.

JAMES, G. **Sugarcane**. 2.ed. Oxford: Blackwell, 2004. 216p.

LAMB, CRC et al. **Cultivo e adaptação de vinte e seis genótipos de cana-de-açúcar na região serrana do estado do Rio Grande do Sul**. 2014.

LEAL, Ygor Henrique. **Características agrônômicas e bioquímicas de variedades de cana-de-açúcar cultivadas no semiárido pernambucano** / Ygor Henrique Leal. – Recife, 2016.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Tecnologias de Irrigação para Cana-de-Açúcar**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura>. Acesso em: 3 abr. 2024.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; BARBOSA, F. J. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in Southern Brazil. **Climatic Change**, v.1, p.1-13, 2012.

MULIANGA, B.; BÉGUÉ, A.; CLOUVEL, P.; TODOROFF, P. Mapping Cropping Practices of a sugarcane-based cropping system in Kenya using remote sensing. **Remote Sensing**, v.7, p.14428-14444, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs71114428>.

MIELEZRSKI. **Cultivo da cana-de-açúcar na Paraíba** / Fabio Mielezrski, Gleidyane Novais Lopes (organizadores). João Pessoa: Editora UFPB, 2020.

MATILE, P.; HÖRTENSTEINER, S.; THOMAS, H. Chlorophyll degradation. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p.67-95, 1999.

MOURA, Paula Caroline Silva. **Correlações entre variáveis morfológicas, fisiológicas e tecnológicas na maturação da cana-de-açúcar**. 2016.

MYNENI, R.B.; RAMAKRISHNA, R.; NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, p.1380-1393, 1997.

NASCIMENTO, Alexandre Ferreira do. **Sensoriamento remoto orbital e suborbital para análise de déficit hídrico em cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/25651/1/AFN29122022-MA1218.pdf> <> p.15. Acesso em: 12 de agosto de 2023.

NÄSI, R.; HONKAVAARA, E.; LYYTIKÄINEN-SAARENMAA, P.; BLOMQVIST, M.; LITKEY, P.; HAKALA, T.; HOLOPAINEN, M. Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 15467-15493, 2015.

NITSCH, M. O programa de biocombustíveis Proálcool no contexto da estratégia energética brasileira. **Revista de Economia Política**, v.11, p.123-138, 1991.

OGUTU, B.O., DASH, J., DAWSON, T.P. Developing a diagnostic model for estimating terrestrial vegetation gross primary productivity using the photosynthetic quantum yield and Earth Observation data. **Glob. Chang. Biol.** 19, 2878–2892, 2013. <https://doi.org/10.1111/gcb.12261>.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 127 p.

RAMME, FERNANDO LP; LAMPARELLI, RUBENS AC; ROCHA, JANSLE V. Perfis temporais NDVI MODIS, na cana-soca, de maturação tardia. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 480-494, 2010.

REUTERS. **Projeção de Exportação de Açúcar Brasileiro para 2024**. Disponível em: [www.reuters.com](http://www.reuters.com) . Acesso em: 3 atrás. 2024.

RIDESA. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar** / Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. – Curitiba, 2010. 136 p. il.

RIDESA. **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa** / Edelclaiton Daros, Ricardo Augusto de Oliveira, Geraldo Veríssimo de Souza Barbosa, organizadores. – 1. ed. – Curitiba: Graciosa, 2015. 156 p. : il., color. ; 22 cm

RICHARDSON, A.D., KEENAN, T.F., MIGLIAVACCA, M., RYU, Y., SONNENTAG, O., TOOMEY, M.. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. **Agric. For. Meteorol.** V. 169, p. 156–173, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>.

SCHULTZ, B.; IMMITZER, M.; FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. A.; BARRETO LUIZ, A. J.; ATZBERGER, C. Self-guided segmentation and classification of multi-temporal Landsat 8 images for crop type mapping in Southeastern Brasil. **Remote Sensing**, v.7, p.14482- 14508, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs71114482>.

SELLERS, P.J., DICKINSON, R.E., RANDALL, D.A., BETTS, A.K., HALL, F.G., BERRY, J.A., COLLATZ, G.J., DENNING, A.S., MOONEY, H.A., NOBRE, C.A., SATO, N., FIELD, C.B., HENDERSONSELLERS, A. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**. 275, 502–509, 1997. <https://doi.org/10.1126/science.275.5299.502>.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p.1729-1737, 1998.

SILVA, Allef de Souza. **Sensoriamento remoto suborbital de alta resolução no monitoramento do desenvolvimento vegetativo em cana-soca irrigada**. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/27225/1/ASS26062023%20-%20MA1243.pdf> <> p. 25. Acesso em: 12 de agosto de 2023.

SILVA, J. et al. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **SciELO Brasil**, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br>. Acesso em: 1 out. 2024.

SINDACARоба – SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE AÇÚCAR DO ESTADO DA BAHIA. **Relatório de Produção 2024**. Disponível em: <http://www.sindacaroba.com.br> . Acesso em: 3 atrás. 2024.

SINDACÚCAR-AL – SINDICATO DA INDÚSTRIA DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL NO ESTADO DE ALAGOAS. **Produção de Cana-de-Açúcar em Alagoas 2024** . Disponível em: <http://www.sindacucar-al.com.br> . Acesso em: 3 atrás. 2024.

SOUZA, A. P.; GASPAR, M.; SILVA, E. A.; ULIAN, E. C.; WACLAWOSKY, A. J.; NISHIYAMA JR., M. Y.; SANTOS, R. V.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO<sub>2</sub> increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, Cell & Environment**, v.31, p.1116-1127, 2008.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C. Maize canopies under two soil water regimes. II. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 201-213, 1998.

SUYKER, A.E.; VERMA, S.B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 417-427, 2008.

SUZIN, Vilmar. **Avaliação e estimativa de correlação espectral de variáveis biofísicas e bioquímicas causada por fitonematoides na cultura do milho**. 2022. 106. Trabalho de Conclusão de Curso Dissertação de Mestrado em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2022.<br />

THOMÉ, PEDRO; VAZ, TACIANA ALTEMARI; GROFF, ANDRÉA MACHADO. **Fatores e Técnicas do cultivo Cana-De-Açúcar e sua correlação com a Qualidade e a Produtividade**. XI EEPA – Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial. 2018. Anais ISSN 2176-3097

THOMPSON, C. N. et al. Using Normalized Difference Red Edge Index to Assess Maturity in Cotton. **Crop Science**. V. 59, n. 5 p. 2167-2177, 2019.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Relatório Anual 2024**. Disponível em: [www.unica.com.br](http://www.unica.com.br) . Acesso em 03 de agosto de 2024.

ZHANG L., GONG ZN, WANG QW, JIN D., WANG X. Mapeamento de áreas úmidas do Delta do Rio Amarelo com base na otimização de múltiplas características de imagens Sentinel-2. **J. Remote Sens**. V. 23, p. 313–326, 2019.