

**INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL**

**USO DE IMAGENS NA AVALIAÇÃO DE**  
**ESTRESSE HÍDRICO E NO**  
**MONITORAMENTO DE CULTIVO DA**  
**CANA-DE-AÇÚCAR**

**WELLINGTON QUADROS TANNO**

Orientadora: Regina Célia de Matos Pires

Tese apresentada como requisito  
para obtenção de título de  
**Doutor** em Agricultura Tropical  
e Subtropical, área de  
concentração em Tecnologia de  
Produção Agrícola

Campinas, SP

2025

Ficha elaborada pela bibliotecária do Núcleo de Documentação Científica do Instituto Agrônômico

T167u Tanno, Wellington Quadros  
Uso de imagens na avaliação de estresse hídrico e no monitoramento de cultivo da cana-de-açúcar / Wellington Quadros Tanno. Campinas, 2025. 75 fls.

Orientadora: Regina Célia de Matos Pires  
Tese (Doutorado) Agricultura Tropical e Subtropical – Instituto Agrônômico

1. Cana-de-açúcar. 2. Imagens - Monitoramento. 3. Manejos hídricos  
I. Pires, Regina Célia de Matos. II. Título

CDD. 633.61



GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO  
SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO  
**AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA DOS AGRONEGÓCIOS**  
**INSTITUTO AGRÔNOMICO**



Pós-Graduação – Agricultura Tropical e Subtropical  
Reconhecimento Homologado pela Portaria MEC Nº 609 de 14/03/2019 - D.O.U. 18/03/2019

## ATA DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

Aos 05 de maio de 2025, às 14h00, reuniu-se a banca examinadora homologada pelo Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, composta pelos membros abaixo listados visando à defesa de tese de doutorado de Wellington Quadros Tanno, para obtenção do título de "DOUTOR", conforme Processo SAA nº PRT150/2021. A sessão presidida pela Profª. Drª. Regina Célia de Matos Pires, orientadora do aluno, foi realizada em sessão pública aberta. Iniciados os trabalhos, o candidato submeteu-se ao exame de sua tese, intitulada "USO DE IMAGENS NA AVALIAÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO E NO MONITORAMENTO DE CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR". Terminado o exame, procedeu-se ao julgamento, cujo resultado foi o seguinte:

Profª. Drª. Regina Célia de Matos Pires - IAC	APROVADO (X)	REPROVADO ( )
Prof. Dr. Gabriel Constantino Blain - IAC	APROVADO (X)	REPROVADO ( )
Profª. Drª. Samira Domingues Carlin Cavallari - IAC	APROVADO (X)	REPROVADO ( )
Prof.. Dr. Douglas Roberto Bizari - UFSCar	APROVADO (X)	REPROVADO ( )
Prof. Dr. Augusto Yukitaka Pessinatti Ohashi - CITROSUCO	APROVADO (X)	REPROVADO ( )

Apurados os resultados, constatou-se que o candidato foi habilitado, fazendo jus, portanto, ao título de "DOUTOR EM AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL", na área de concentração: Sistema de Manejo e Qualidade Ambiental, do que, para constar, lavrou-se a presente ata, assinada pelos membros da comissão examinadora:

Profª. Drª. Regina Célia de Matos Pires - IAC

Prof. Dr. Gabriel Constantino Blain - IAC

Profª. Drª. Samira Domingues Carlin Cavallari - IAC

Prof. Dr. Douglas Roberto Bizari - UFSCar

Prof. Dr. Augusto Yukitaka Pessinatti Ohashi - CITROSUCO

## **DEDICATÓRIA**

*À Anita e ao Matheus, meus filhos, razão maior da minha caminhada. Que esta conquista sirva como exemplo de que é possível sonhar alto e chegar lá, com esforço, coragem e fé.*

*A todos que, de alguma forma, me apoiaram nesta jornada, minha eterna gratidão.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de força, sabedoria e serenidade durante toda esta caminhada.

À minha orientadora, Dra. Regina Célia de Matos Pires, por sua orientação firme, generosa e inspiradora ao longo de toda a pesquisa.

Aos membros da banca — Dr. Gabriel Constantino Blain, Dra. Samira Domingues Carlin Cavallari, Dr. Douglas Roberto Bizari e Dr. Augusto Yukitaka Pessinatti Ohashi — pelo tempo dedicado, pelas valiosas contribuições e pela troca de conhecimento.

Aos amigos e colegas da pós-graduação do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), pelo convívio enriquecedor, pelo apoio mútuo e pela parceria ao longo desta jornada.

À equipe do Centro de Cana IAC de Ribeirão Preto, especialmente à Dra. Raffaella Rossetto e ao Engenheiro Agrônomo Rômulo Henrique Petri, pela colaboração essencial e pelo acolhimento durante as etapas do trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa de doutorado.

Ao Leandro Marconi, da Fenotipagem Digital, pelo suporte técnico com as imagens e índices, que foram fundamentais para a realização deste estudo.

E, por fim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram, incentivaram e participaram desta conquista — meu sincero muito obrigado.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	2
LISTA DE TABELAS.....	4
LISTA DE FIGURAS.....	5
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	10
2.1. A cultura da cana-de-açúcar .....	10
2.2. Mudas Pré Brotadas – MPB.....	13
2.2. Fisiologia da cana-de-açúcar .....	13
2.3. O estresse hídrico na cana-de-açúcar .....	15
2.4. Transpiração e temperatura foliar.....	17
2.5. Condutância estomática .....	18
2.6. A irrigação da cana-de-açúcar .....	20
2.7. Estratégias para irrigação da cana-de-açúcar .....	22
2.8. O uso de drones na agricultura .....	24
2.9. Uso de imagens termais .....	26
2.10. Câmeras e índices de vegetação.....	27
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	30
3.1. Localização .....	30
3.2. Caracterização do solo.....	30
3.3. Cultivares de cana-de-açúcar .....	33
3.4. Implantação e cultivo dos experimentos .....	32
3.5. Delineamento experimental .....	33
3.6. Monitoramento do clima .....	34
3.7. Irrigação .....	36
3.8. Imagens aéreas.....	37
3.9. Imagens Termais.....	38
3.10. Imagens RGB.....	39
3.11. Imagens multiespectrais.....	40
3.12. Monitoramento do sistema radicular.....	41
3.13. Monitoramento da condutância estomática.....	42
3.14. Monitoramento da umidade do solo.....	43

3.15. Produtividade.....	44
3.16. Análise estatística.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1. Clima .....	45
4.1.1. Temperatura e umidade relativa do ar.....	45
4.1.2. Precipitação e evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ).....	47
4.2. Irrigação.....	49
4.3. Água no solo.....	50
4.4. Condutância estomática.....	52
4.5. Comprimento das raízes.....	54
4.6. Índices de vegetação.....	56
4.7. Temperatura do dossel.....	60
4.8. Produtividade.....	63
5. CONCLUSÕES.....	65
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise Química do Solo.....	30
Tabela 2: Datas dos voos, DAC – dias após a colheita e respectivo estágio fenológico da cultura.....	38
Tabela 3: Lâmina de irrigação total mensal (mm), valores de Kc.....	50
Tabela 4: Condutância estomática da cana-de-açúcar, expressos em mmol/m <sup>2</sup> /s, em dois experimentos diferentes: irrigado e sequeiro, em três cultivares: IACSP01-5503, CTC02-2994 e IACCTC07-8008, nos meses de março, abril, maio, junho e julho de 2023.....	52
Tabela 5: Comprimento de raiz da cana-de-açúcar, expressos em mm totalizado desde a superfície do solo até 80 cm de profundidade, em dois experimentos diferentes: irrigado e sequeiro, e três cultivares: IACSP01-5503, CTC02-2994 e IACCTC07-8008, nos meses de novembro de 2022 a julho de 2023.....	54
Tabela 6: Média dos índices de vegetação EXG em dois experimentos diferentes: irrigado e sequeiro, e três cultivares: IACSP01-5503, CTC02-2994 e IACCTC07-8008.....	57
Tabela 7: Média dos índices de vegetação NDRE em dois experimentos diferentes: irrigado e sequeiro, e três cultivares: IACSP01-5503, CTC02-2994 e IACCTC07-8008.....	58
Tabela 8: Média dos índices de vegetação NDVI em dois experimentos diferentes: irrigado e sequeiro, e três cultivares: IACSP01-5503, CTC02-2994 e IACCTC07-8008.....	59
Tabela 9: Temperaturas médias do dossel foliar das cultivares em diferentes datas de avaliação, sob condições irrigadas e de sequeiro, ao longo do ciclo experimental.....	60
Tabela 10: Diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura foliar expressos em °C, em dois experimentos diferentes: irrigado e sequeiro, em três cultivares: IACSP01-5503, CTC02-2994, e IACCTC07-8008.....	62
Tabela 11: Valores médios de produtividade das diferentes cultivares no experimento irrigado e no de sequeiro.....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estádios fenológicas da cana-de-açúcar.....	15
Figura 2: Localização do experimento no Centro de Cana do IAC em Ribeirão Preto - SP.....	30
Figura 3: Croqui dos experimentos.....	34
Figura 4: Estação meteorológica automática.....	35
Figura 5: Sistema de irrigação por gotejamento.....	37
Figura 6: Equipamento de imageamento aéreo, drone DJI Matrice 300 RTK e sua estação de correção.....	38
Figura 7: Câmera termográfica Wiris Agro R.....	39
Figura 8: Câmera DJI Zenmuse P.....	39
Figura 9: Câmera RGB + NIR Sentera 6X.....	40
Figura 10: Minirhizotron Root Scanner CI-600 e sistema de análise radicular.....	42
Figura 11: Equipamento SC-1 Leaf Porometer utilizado para medir condutância estomática.....	43
Figura 12: Sensores TEROS 12 utilizados no monitoramento da umidade do solo.....	44
Figura 13: Valores diários de temperatura média, mínima e máxima.....	45
Figura 14: Valores diários umidade relativa do ar média, mínima e máxima.....	46
Figura 15: Valores diários de precipitação e evapotranspiração de referência.....	48
Figura 16: Balanço hídrico climatológico durante o período experimental.....	49
Figura 17: Umidade do solo.....	51

# USO DE IMAGENS NA AVALIAÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO E NO MONITORAMENTO DE CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR

## RESUMO

A cana-de-açúcar é a principal matéria prima para o setor sucroenergético do Brasil, com previsão de produção de 678,7 milhões de toneladas para a safra 2024/25, cobrindo mais de 8,7 milhões de hectares. A agricultura de precisão, através do uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) acopladas com câmeras RGB, multiespectrais e termográficas, vem sendo utilizado para monitorar a cultura com diferentes finalidades. O objetivo do presente estudo foi de avaliar o uso de imagens aéreas para indicação do estado hídrico das plantas e de outros atributos de cultivares de cana-de-açúcar com e sem uso da irrigação por gotejamento. A área de estudo foi no Centro Avançado de Pesquisa e Desenvolvimento de Cana do Instituto Agrônomo (IAC) localizado em Ribeirão Preto -SP. Foram implementados dois experimentos em blocos ao acaso, sendo avaliadas três cultivares, com quatro repetições. O fator de variação entre os experimentos foi a condição de cultivo irrigado e sob sequeiro. Cada parcela constou de quatro linhas de plantio com oito metros cada. O plantio da área experimental ocorreu em 26 de junho de 2021, com mudas pré-brotadas (MPB) no espaçamento de 0,6 m entre mudas e 1,5 m entre linhas de plantio. As cultivares avaliadas foram CTC02-2994, IACSP01-5503 e IACCT07-8008. As avaliações foram realizadas na primeira soca, após a colheita da cana planta realizada em 05 de agosto de 2022. Foram realizadas as avaliações de umidade do solo, condutância estomática, comprimento de raiz, índices de vegetação NDVI - Normalized Difference Vegetation Index, NDRE - Normalized Difference Red Edge e EXG - Excess Green Index, temperatura foliar do dossel e a produtividade. Durante o período experimental houve elevado volume de chuvas o que acarretou redução das diferenças entre os experimentos irrigado e não irrigado. Na avaliação da condutância estomática, as cultivares mostraram diferenças em ambos os experimentos. A cultivar a IACCTC07-8008 apresentou maior condutância estomática. Em relação ao total de comprimento radicular no perfil do solo desde a superfície do solo até 0,8 m de profundidade a cultivar IACSP01-5503 se destacou com maior crescimento de raiz. Em relação as produtividades a cultivar IACSP01-5503, se destacou em ambos os experimentos atingindo 137,0 e 127,6 t ha<sup>-1</sup> nos experimentos irrigado e sequeiro, respectivamente. Os resultados indicaram que a maior condutância estomática não resultou necessariamente em maior produtividade. O uso de imagens térmicas e índices de vegetação apresentaram diferenciação entre os materiais genéticos e manejos hídricos distintos. Tal fato mostra o potencial para promover avanço do conhecimento e na caracterização de cultivares o que

poderá contribuir com os programas de melhoramento genético e para o manejo varietal em áreas de produção.

Palavras chaves: *Saccharum spp*, índices de vegetação, temperatura do dossel, condutância estomática, sistema radicular.

# USE OF IMAGES IN THE EVALUATION OF WATER STRESS AND IN THE MONITORING OF SUGARCANE CULTIVATION

## ABSTRACT

Sugarcane is the main source for Brazil's sugarcane-energy sector, with a projected production of 678.7 million tons for the 2024/25 harvest, covering more than 8.7 million ha. Precision agriculture, using remotely piloted aircraft (RPAs) coupled with RGB, multispectral, and thermographic cameras, has been used to monitor the crop for various purposes. The aim of this study was to evaluate the use of aerial imagery to indicate plant water status and other attributes of sugarcane cultivars with and without drip irrigation. The study was done at Sugarcane Center of the Agronomic Institute (IAC), located in Ribeirão Preto, São Paulo. Two randomized block experiments were installed, evaluating three cultivars and four replicates. The variation between the experiments was irrigated and rainfed cultivation conditions. Each plot consisted of four eight-meter planting rows. The experimental area was planted on June 26, 2021, with pre-sprouted seedlings (MPB) transplanted every 0.6 m in the planting row and with spacing between planting rows of 1.5 m. The cultivars evaluated were CTC02-2994, IACSP01-5503, and IACCT07-8008. Evaluations were carried out during the first ratoon crop, after the sugarcane plant harvest on August 5, 2022. Assessments were made of soil moisture, stomatal conductance, root length, vegetation indices (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), NDRE - Normalized Difference Red Edge, and EXG - Excess Green Index), canopy leaf temperature, and yield. During the experimental period, there was high rainfall, which reduced the differences between the irrigated and non-irrigated experiments. In the evaluation of stomatal conductance, the cultivars showed differences in both experiments. In the evaluation of stomatal conductance, the cultivars showed differences in both experiments. Cultivar IACCTC07-8008 presented higher stomatal conductance. Regarding the total root length in the soil profile from the soil surface up to 0.8 m depth, cultivar IACSP01-5503 stood out with greater root growth. Regarding productivity, cultivar IACSP01-5503 stood out in both experiments, reaching 137.0 and 127.6 t ha<sup>-1</sup> in the irrigated and rainfed experiments, respectively. The results indicated that higher stomatal conductance did not necessarily result in higher productivity. The thermal images and vegetation indices showed differences between cultivars and irrigated and rainfed areas. This fact demonstrates the potential for advancing knowledge and characterizing cultivars, which could contribute to crop breeding programs and varietal management in production areas.

Keywords: *Saccharum* spp., vegetation indices, canopy temperature, stomatal conductance, root system.

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é a principal cultura do setor sucroenergético brasileiro, com uma área colhida prevista de mais de 8,7 milhões de hectares para a safra 2024/25 e uma produção estimada de 678,67 milhões de toneladas, segundo o último levantamento de safra 24/25 da CONAB (2024). Contudo houve redução da produtividade média em torno de 4,36%, resultando em apenas 78,0 toneladas por hectare, principalmente devido a baixas precipitações e temperaturas elevadas no Centro-Sul, que representa 91% da produção total do país.

A deficiência hídrica é um dos principais desafios para o bom desempenho da cultura da cana-de-açúcar. A escassez hídrica interfere em diversos mecanismos fisiológicos e bioquímicos da planta, prejudicando o crescimento, a fotossíntese e assim com impacto na biomassa e na produção de açúcar.

A demanda de água pela cultura pode variar entre 1.500 e 2.500 mm anuais, dependendo de vários fatores como o clima da região, tipo de solo, cultivar, duração do ciclo e do estágio de desenvolvimento (DOORENBOS & KASSAN, 1994; MONTEIRO, 2009). Portanto, para um manejo eficiente da cultura se faz necessário o monitoramento da necessidade hídrica das plantas, pois existem diversos fatores que influenciam na demanda de água.

Há disponibilidade de técnicas para manejo da irrigação na canavicultura. Entretanto, ainda é comum decisões com base empírica, por observações visuais das plantas ou do solo, ou mesmo, sem utilização de critérios técnicos. Em áreas de cultivo com adoção de tecnologia para o manejo da irrigação a adoção de estações meteorológicas e/ou de sensores de umidade do solo é verificada.

A utilização de sensores de umidade do solo permite o monitoramento da disponibilidade de água no solo e auxilia na identificação do momento de irrigação, bem como na detecção de excessos ou déficits na irrigação, na estimativa o consumo hídrico por meio do balanço hídrico de campo e o ajuste no manejo, se necessário. O uso das estações meteorológicas possibilita o monitoramento do clima e a estimativa da demanda de água do clima e das plantas, evapotranspiração de referência e da cultura, respectivamente, dados relevantes para manejo das irrigações.

O interesse pela adoção de tecnologias capazes de monitorar áreas extensas, como por exemplo o uso do sensoriamento remoto e imagens aéreas obtidas principalmente por satélites e drones (VANTs) vem crescendo e se mostrando como ferramenta poderosa

para fins agrícolas. Esse tipo de monitoramento permite calcular diferentes índices de vegetação, além de estimar a temperatura do dossel das culturas. Nesse contexto, o uso dessas ferramentas tem se mostrado interessante para acompanhar diversos fatores relacionados ao desenvolvimento das culturas, como densidade da vegetação, área foliar, acúmulo de biomassa, deficiências nutricionais, teor de clorofila, presença de pragas e doenças, além de identificar de estresse hídrico.

Estudos em diversas culturas mostraram o monitoramento da temperatura de plantas por drones indicaram o estado hídrico das plantas de forma adequada (MELO, 2022; KHANAL *et al.*, 2017; QUEBRAJO *et al.*, 2018). O déficit hídrico das plantas acarreta aumento da temperatura foliar com a consequente redução da transpiração. Assim, plantas sob deficiência hídrica apresentam temperaturas do dossel mais elevadas em relação às sob condições de disponibilidade de água adequada. Assim, o uso dessa tecnologia, adequadamente consistida poderá otimizar o manejo e a tomada de decisão nas áreas de produção de cana-de-açúcar no Brasil.

Diante do contexto, o objetivo deste trabalho foi de avaliar o uso de imagens aéreas para indicação do estado hídrico e de outros atributos de cultivares de cana-de-açúcar com e sem uso da irrigação por gotejamento.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. A cultura da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande relevância para o Brasil, tanto do ponto de vista econômico quanto histórico e social (BRAIBANTE, 2013). Desde o período colonial, a cana-de-açúcar tem sido um pilar da agricultura brasileira e continua desempenhando um papel fundamental na matriz energética e econômica do país.

Introduzida no Brasil no século XVI pelos colonizadores portugueses, a cana-de-açúcar rapidamente se tornou a base da economia colonial, com destaque para a região Nordeste. A produção de açúcar fomentou o desenvolvimento de um sistema econômico voltado para a exportação, fundamentado no trabalho escravo (BRAIBANTE, 2013). A importância da cana continuou crescendo ao longo dos séculos, e, atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, responsável por cerca de 40% da produção global (CONAB, 2024).

No contexto moderno, o cultivo da cana no Brasil está intimamente ligado à produção de biocombustíveis, especialmente etanol. Desde o lançamento do Programa Nacional do Alcool (Proálcool) nos anos 1970, o etanol derivado da cana-de-açúcar tem sido uma alternativa estratégica ao petróleo, desempenhando um papel importante na matriz energética brasileira. De acordo com LEMÕES *et al.*, (2022), a cana-de-açúcar é uma das culturas mais relevantes para a sustentabilidade do setor energético, visto que o etanol de cana apresenta balanço energético positivo e reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa, gerando créditos de carbono, atualmente comercializados pelas empresas.

O avanço da tecnologia agrícola tem permitido melhorias contínuas na produtividade da cana-de-açúcar. Isso inclui o desenvolvimento de novas cultivares resistentes a pragas, técnicas de manejo de solo e irrigação e o uso de máquinas cada vez mais eficientes para o plantio e colheita. Segundo OLIVEIRA (2024), a adoção de novas tecnologias tem contribuído com o aumento da produtividade por hectare, ao mesmo tempo em que reduz o impacto ambiental. Além disso, a expansão das práticas de agricultura de precisão e o uso de biotecnologia na cana-de-açúcar têm otimizado o uso de recursos, como água e fertilizantes, melhorando o desempenho econômico e ambiental da cultura (OLIVEIRA, 2024).

Dado a recente demanda na produção de biocombustíveis e bioenergia, ambos sustentáveis, a cana-de-açúcar é um tema recorrente nas pesquisas. De acordo com PEREIRA *et al.*, (2019), a diversificação dos subprodutos da cana, como o bagaço para cogeração de energia e a vinhaça para fertilização do solo, tem transformado a indústria sucroalcooleira em um modelo de economia e de produção sustentáveis.

A cana-de-açúcar tem grande relevância para a economia brasileira, sendo uma das principais culturas de exportação. Segundo dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2024), o setor sucroenergético gerou mais de 1,5 milhão de empregos diretos e indiretos, com impacto significativo principalmente nas regiões Centro-Sul e Nordeste. O estado de São Paulo, maior produtor de cana do país, concentra mais de 60% da produção nacional, o que demonstra a importância regional dessa atividade (CONAB, 2024).

A cana-de-açúcar deve continuar desempenhando um papel de destaque na economia brasileira e no mercado global devido à crescente demanda mundial pela

transição energética para os biocombustíveis. De acordo com LEMÕES *et al.* (2022), a inovação na produção de etanol de segunda geração, que utiliza resíduos da colheita da cana para produzir combustível, pode aumentar ainda mais a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais da cultura.

Além disso, a integração de tecnologias de captura e sequestro de carbono (CCS) no processo de produção de etanol tem o potencial de transformar a cana-de-açúcar em uma cultura de emissão carbono negativo, contribuindo para os esforços globais de mitigação das mudanças climáticas (SILVA *et al.*, 2023). Essas perspectivas fazem da cana-de-açúcar um tema central para pesquisas no campo da sustentabilidade e bioenergia.

## **2.2. – Mudanças Pré-Brotadas de cana-de-açúcar (MPB)**

A utilização de mudas pré-brotadas (MPB) tem se consolidado como uma inovação tecnológica importante no setor sucroenergético, promovendo avanços significativos na formação de viveiros e contribuindo para renovação e expansão de canaviais com maior uniformidade, eficiência e sustentabilidade. O sistema de MPB consiste na produção de mudas a partir das gemas da cana-de-açúcar. Esse modelo representa uma alternativa moderna ao sistema tradicional de plantio com toletes, oferecendo vantagens como a melhoria na sanidade das mudas, o uso mais racional de material propagativo e a aceleração do ganho genético no campo (XAVIER *et al.*, 2020).

Uma das principais contribuições do sistema de MPB está relacionada à qualidade fitossanitária. Além disso, favorece a uniformidade das mudas, e possibilita o uso mais eficiente do material genético. O método convencional de plantio utiliza em média de 15 a 20 toneladas de colmos por hectare, enquanto com a adoção do sistema de MPB é possível reduzir cerca de 80% desse volume em até 80%. Isso contribui para tornar o processo mais sustentável (NORONHA *et al.*, 2018). Além disso, o menor volume de material necessário para o plantio de novas áreas e com isso possibilita o escalonamento na adoção de cultivares mais produtivas e resistentes a estresses bióticos e abióticos.

O plantio mecanizado das MPBs também é uma realidade em expansão, com máquinas adaptadas que garantem padronização do plantio e contribui para a eficiência produtiva (CAMPANA *et al.*, 2016). Contudo, a adoção do sistema de MPB ainda

enfrenta desafios, como o custo inicial mais elevado em comparação ao método tradicional e requer mão-de-obra qualificada para o sistema produtivo. A logística de transporte e plantio requer cuidados para evitar danos às mudas e garantir o bom pegamento no campo (XAVIER *et al.*, 2016). Apesar dessas limitações, a tendência é de expansão do uso das MPBs, especialmente em programas de renovação de canaviais, onde os ganhos de produtividade compensam os investimentos iniciais.

Em síntese, as mudas pré-brotadas representam um avanço importante na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, oferecendo um sistema mais eficiente, sustentável e alinhado às exigências modernas de produção agrícola.

### **2.3. Fisiologia da cana-de-açúcar**

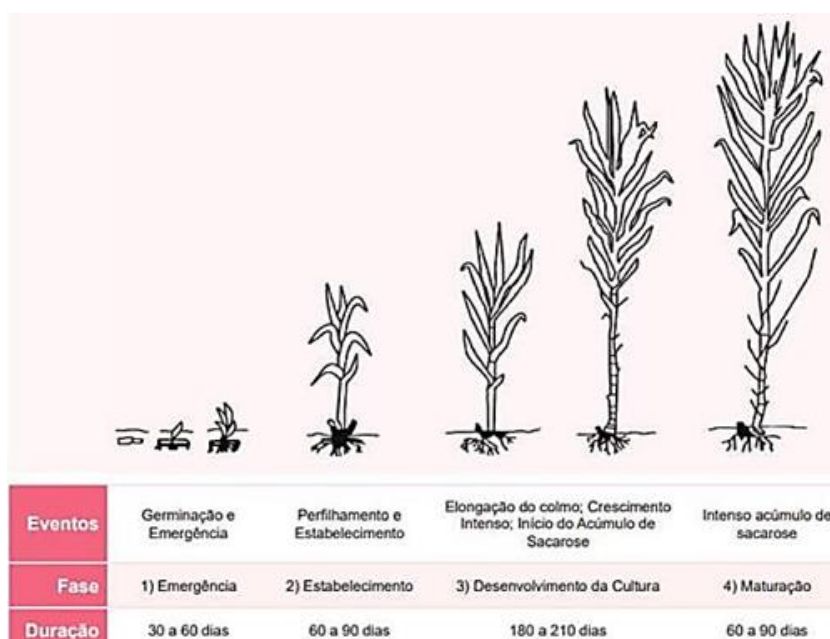
A cana-de-açúcar é uma planta da família das Poaceae, sendo, portanto, uma monocotiledônea do gênero *Saccharum* e alógama. Sua principal característica é a capacidade de converter água e nutrientes em açúcares, como sacarose, glicose e frutose, que se concentram nos colmos e possuem valor econômico (MATOS & EICHLER, 2020; MELO, 2018). Trata-se de uma planta semiperene, originária de regiões quentes e temperadas da Ásia, especialmente da Índia (MATOS & EICHLER, 2020). Atualmente, existem cultivares híbridas interespecíficas que envolvem espécies como *Saccharum officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* (JADOSKI *et al.*, 2010).

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma gramínea tropical que se destaca por seu elevado potencial produtivo e adaptabilidade a diferentes condições ambientais. Uma de suas principais vantagens fisiológicas é o fato de ser uma planta do tipo C4, ou seja, a fotossíntese otimiza a fixação de carbono e a utilização da água. O metabolismo C4 é particularmente eficiente em ambientes com alta luminosidade, elevadas temperaturas e sem limitação hídrica. Isso ocorre porque, nesse tipo de metabolismo, a planta realiza a fixação inicial do CO<sub>2</sub> em uma célula diferente daquela onde ocorre o ciclo de Calvin, reduzindo significativamente a fotorrespiração e aumentando a eficiência da fotossíntese, especialmente em condições de estresse abiótico (TAIZ *et al.*, 2017).

A cana-de-açúcar possui um sistema radicular profundo e bem desenvolvido, sem limitação do solo que o circunda, o que possibilita a exploração de camadas mais

profundas do solo em busca de água e nutrientes. Essa característica permite que a planta se adapte a períodos de déficit hídrico sem comprometer severamente sua produtividade e melhor aproveitamento das precipitações naturais. De acordo com Inman-Bamber (2004), o sistema radicular extenso é uma das razões pelas quais a cultura pode manter o crescimento mesmo em condições de limitação hídrica, temporária, desde que essa não coincida com estágios críticos do desenvolvimento, como o perfilhamento e o alongamento do colmo e não seja muito intensa.

Os estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar são quatro (Figura 1). O primeiro é a emergência, que ocorre até os 60 dias após o plantio. Esse período pode variar conforme as condições ambientais, fatores genéticos e tecnologias utilizadas no plantio. O segundo estágio é o de perfilhamento, marcado pelo crescimento dos colmos, com duração de 60 a 90 dias, dependendo da luz solar, temperatura e umidade do solo. O terceiro estágio é o de desenvolvimento vegetativo, no qual os colmos se alongam e inicia-se o acúmulo de sacarose. Esse é o estágio o mais longo, levando de 180 a 210 dias. Por fim, ocorre a maturação, caracterizada por um acúmulo intenso de sacarose, com duração de 60 a 90 dias após o estágio anterior (MARIN *et al.*, 2009).



**Figura 1.** Estádios fenológicas da cana-de-açúcar. Fonte: (MARIN, 2009)

Resumidamente, a cana-de-açúcar possui dois ciclos, o de cana-planta e outro denominado cana-soca ou simplesmente, soqueira. Após a cultura ser plantada, ela se desenvolve até ocorrer o primeiro corte, esse estágio, entre o plantio e a primeira colheita, é denominado de cana-planta, que pode ter duração entre 12 a 18 meses, dependendo da

época de plantio. Depois do primeiro corte, ou seja, da primeira colheita, começa o ciclo da cana-soca. O período de cana-soca é de cerca de 12 meses, independente da cultivar e da duração da cana-planta (MARIN *et al*, 2009). A quantidade de cortes da cana-soca será limitada pelo decaimento da produtividade, que ocorre devido ao clima, disponibilidade de nutrientes e água do solo e da cultivar utilizada (MARIN *et al*, 2009).

A longevidade do canavial de cana-de-açúcar está diretamente relacionada à capacidade da planta de manter a produtividade ao longo dos ciclos de corte, que geralmente variam entre 4 a 6 anos, dependendo das condições ambientais, práticas de manejo e características genéticas da cultivar. A manutenção produtiva do canavial ao longo do tempo é influenciada por fatores como compactação do solo, o controle de pragas e doenças, aporte nutricional e a adequação do manejo da colheita mecanizada.

#### **2.4. O estresse hídrico na cana-de-açúcar**

O estresse hídrico ocorre quando a demanda por água pela planta é maior que a disponibilidade. Esse fenômeno afeta vários processos fisiológicos da cana-de-açúcar, dentre eles, podemos destacar a diminuição da fotossíntese. Em condições de estresse hídrico, ocorre o fechamento dos estômatos como mecanismo de economia de água, o que limita a entrada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e reduz a taxa de fotossíntese. Estudos mostram que a capacidade fotossintética diminui drasticamente com a redução do potencial hídrico das folhas (BRUNINI, 2017).

A cana-de-açúcar, sob estresse hídrico dependendo da intensidade pode apresentar alterações no crescimento da parte aérea e do sistema radicular. Nesse caso, o crescimento das raízes é priorizado em detrimento da parte aérea, e, assim acessar água no solo, reduzindo, assim, o acúmulo de biomassa nos colmos, afetando a produtividade (SILVA, 2019). O aumento no desenvolvimento das raízes mais profundas é regulado por hormônios, como o ácido abscísico (ABA), que possibilita a planta explorar as camadas mais profundas do solo, e, com isso aumentar a água disponível para as plantas (MACHADO *et al.*, 2009).

A compreensão dos efeitos negativos que o estresse hídrico provoca na cana-de-açúcar tem implicações diretas para o seu manejo, como, por exemplo, na justificativa do uso da irrigação para mitigar esses efeitos. Além da irrigação, a escolha de variedades tolerantes ao estresse hídrico também é uma estratégia promissora para aumentar a

resiliência da cultura frente aos cenários recentes de mudanças climáticas e de escassez hídrica (SILVA, 2019).

## 2.5. Transpiração e temperatura foliar

A temperatura do dossel é um dos indicadores do estresse hídrico em plantas cultivadas e, portanto, pode ser utilizada para monitorar o estado hídrico da lavoura (ZARCO-TEJADA *et al*, 2012).

Plantas em condições favoráveis de hidratação, realizam a transpiração para regular a temperatura e manter a fotossíntese. Durante o dia, as folhas absorvem a radiação solar, em ondas médias e longas, como o azul e o infravermelho, respectivamente. Parte dessa energia é utilizada na fotossíntese, enquanto o restante aquece a folha, elevando a temperatura das células do mesofilo. Nesse tecido, a água é mantida no estado líquido e o aumento da temperatura provoca maior energia cinética nas moléculas de água, favorecendo sua transição para o estado gasoso (CARDOSO & COSTA, 2012). Nesse processo de evaporação da água, grande quantidade de energia térmica é consumida num processo denominado de “calor latente de vaporização”, o qual retira calor das células do mesofilo, reduzindo a temperatura da folha, garantindo que a temperatura foliar permaneça abaixo do limite crítico para a fotossíntese (DEERY, 2016).

Por outro lado, quando ocorre redução na disponibilidade de água no solo, os estômatos tendem a se fechar e, com isso, a transpiração é reduzida, o resfriamento evaporativo diminui, levando a um aumento na temperatura foliar em relação à temperatura do ar (PIMENTEL, 2004).

Portanto, o processo de abertura e o fechamento dos estômatos desempenham um papel crucial no processo de resfriamento da planta. Essas estruturas vegetais ajustam sua atividade em resposta à disponibilidade de água no solo e às condições ambientais do momento, além de influenciarem diretamente a capacidade da planta de se adaptar e sobreviver (ZINGARETTI *et al*, 2012; ELSAYED *et al.*, 2017).

Esse equilíbrio entre regulação térmica e conservação de água é essencial para a sobrevivência das plantas em diferentes condições ambientais, sendo um fator determinante na produtividade de culturas como a cana-de-açúcar em climas tropicais (YU *et al.*, 2015)

A temperatura foliar está diretamente relacionada a absorbância e reflectância de radiações de ondas curtas e longas, como o infravermelho, e tem sido utilizada como um

indicativo do status hídrico das plantas (DEERY *et al.*, 2016). Esse fenômeno pode ser identificado com o auxílio de sensores de radiação infravermelha, que são ferramentas úteis no diagnóstico do estresse hídrico (IDSO *et al.*, 1980, 1981).

A termografia por infravermelho é uma técnica amplamente utilizada para medir a temperatura do dossel, sendo um método não destrutivo e sem contato com as plantas (BIJANZADEH E EMAM, 2012; MARIANO *et al.*, 2016). Recentemente, essa abordagem tem sido aplicada não apenas na programação de irrigação, mas também na previsão da produtividade de culturas agrícolas, tais como trigo, soja e algodão (GONZALEZ-DUGO *et al.*, 2013; LÓPEZ *et al.*, 2009).

## 2.6. Condutância estomática

A condutância estomática refere-se à taxa pela qual os estômatos, presentes na epiderme das folhas, realizam a troca de gases entre a planta e a atmosfera. Este processo inclui a entrada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para a fotossíntese e a perda de vapor d'água pela transpiração e a liberação de oxigênio ( $\text{O}_2$ ). Essa troca gasosa é crucial para o controle da eficiência do uso da água pelas plantas e no comportamento destas perante ao estresse hídrico e as mudanças ambientais de temperatura, umidade e concentração de  $\text{CO}_2$  (TAIZ & ZEIGER, 2017).

A fotossíntese das plantas C4 apresenta como característica principal um mecanismo de concentração de  $\text{CO}_2$  nas folhas, que contribui para saturar o processo fotossintético e minimizar a fotorrespiração, tornando-a mais eficiente do que as plantas C3 perante condições atmosféricas adversas (TAIZ E ZEIGER, 2017). Esse mecanismo é crucial, uma vez que a fotossíntese constitui a fonte primária de carbono e energia para o crescimento e a produção de biomassa das plantas. Assim, compreender a relação entre condutância estomática e a produtividade é essencial para desvendar os fatores que levam ao aumento do rendimento agrícola (KHOLOVÁ *et al.*, 2010). Indicadores como taxas de fotossíntese e evapotranspiração são utilizados para avaliar o nível de estresse hídrico em plantas (YU *et al.*, 2015).

A condutância estomática reflete o estado hídrico das plantas, sendo um indicador relevante do grau de estresse hídrico e da capacidade de tolerância à seca, contudo, há uma alta variabilidade dos seus valores entre diferentes genótipos (YU *et al.*, 2015). Por esse motivo, há a necessidade de desenvolver métodos que permitam essas comparações de forma independente das condições ambientais. Ainda não se estabeleceu claramente a

relação entre condutância estomática em condições irrigadas e a tolerância à seca em diferentes espécies de plantas (KHOLOVÁ *et al.*, 2010).

Os estômatos regulam a troca gasosa por meio da abertura e fechamento dos poros estomáticos, o que é influenciado por diversos fatores ambientais e fisiológicos. A fotossíntese e a transpiração ocorrem simultaneamente, por isso, quando ocorre a absorção de CO<sub>2</sub>, também ocorre a perda de água. A eficiência na regulação desse processo é essencial para a sobrevivência e produtividade das plantas, especialmente em ambientes com recursos hídricos limitados (SILVA *et al.*, 2011).

A condutância estomática é influenciada por diversos fatores, tanto internos quanto externos. A luz, por exemplo, estimula a abertura dos estômatos, favorecendo a entrada de CO<sub>2</sub> necessário para a fotossíntese. Por outro lado, altas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera tendem a reduzir a abertura estomática, limitando a condutância. A disponibilidade de água no solo também exerce grande influência: em condições de déficit hídrico, ocorre o fechamento dos estômatos como mecanismo de defesa da planta para reduzir a transpiração e evitar perdas excessivas de água. A temperatura afeta esse processo, temperaturas elevadas podem intensificar a transpiração, no entanto, extremos térmicos podem levar ao fechamento estomático (TAIZ E ZEIGER, 2017)

No caso da cana-de-açúcar, a condutância estomática está fortemente associada à sua capacidade de se adaptar a diferentes condições ambientais, incluindo estresse hídrico. Durante períodos de déficit hídrico, a cana-de-açúcar apresenta uma redução significativa na condutância estomática, o que resulta em uma diminuição da transpiração para evitar a perda excessiva de água (MACHADO *et al.*, 2009). Sob estresse hídrico severo, a taxa de fotossíntese pode ser significativamente reduzida devido ao fechamento estomático prolongado, o que compromete a produtividade (NATARAJAN *et al.*, 2022; JAVED *et al.*, 2020).

Há diversas técnicas são utilizadas para medição da condutância estomática, incluindo o uso de câmaras de trocas gasosas, que permitem medições da transpiração e da fotossíntese. Uma alternativa mais viável e simples é o uso de porômetros, que medem a passagem do vapor d'água através dos estômatos.

## 2.7. A irrigação da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura com alta demanda de água durante seu ciclo de crescimento. Em regiões que apresentam déficit hídrico acentuado a irrigação torna-se essencial para garantir a produtividade e a qualidade (NASCIMENTO *et al.*, 2023).

A água é fundamental na fisiologia da cana-de-açúcar, dentre esses: fotossíntese, transpiração e absorção de nutrientes. De acordo com SILVA *et al.* (2020) a irrigação adequada potencializa a taxa fotossintética, contribuindo para um maior acúmulo de biomassa e, conseqüentemente, maior produção de açúcar e bioenergia.

A irrigação também influencia a absorção de nutrientes, nesse sentido NASCIMENTO *et al.* (2023), relatam que a irrigação adequada pode aumentar a eficiência da absorção de nutrientes, promovendo um desenvolvimento mais vigoroso da planta. O manejo da irrigação, em combinação com a fertilização, é crucial para garantir que a cana-de-açúcar atinja seu potencial produtivo máximo.

Diferentes métodos de irrigação têm sido desenvolvidos e avaliados visando otimizar o uso da água e maximizar os ganhos produtivos na cultura da cana-de-açúcar. Entre eles, destacam-se a irrigação por aspersão, por sulcos e o gotejamento, cada um com características específicas que podem ser adaptadas conforme o objetivo, disponibilidade hídrica e estágio de desenvolvimento da cultura. A irrigação por aspersão, amplamente utilizada devido à sua versatilidade, permite a aplicação uniforme de água em grandes áreas, porém apresenta maiores perdas por evaporação e deriva do que outros sistemas. Já a irrigação por sulcos, embora tradicional e de baixo custo inicial, é menos eficiente, pois depende da infiltração do solo e está sujeita a perdas por percolação profunda e evaporação.

Por outro lado, a irrigação por gotejamento tem se destacado como uma tecnologia de alta eficiência hídrica e nutricional. Esse sistema promove a aplicação localizada e controlada de água diretamente na zona radicular, minimizando perdas por evaporação e escoamento superficial. Além disso, possibilita a fertirrigação, ou seja, a aplicação conjunta e precisa de fertilizantes dissolvidos na água de irrigação, o que potencializa a absorção de nutrientes pelas plantas. Estudos recentes indicam que a irrigação por gotejamento pode reduzir em até 40% o consumo de água em relação à aspersão, além de melhorar o rendimento agrícola, especialmente em regiões com restrição hídrica (NASCIMENTO *et al.* 2023).

Respeitando o método de irrigação adotado, o manejo da água contribui para a redução do estresse hídrico, promovendo crescimento radicular e da planta, o que se traduz em maior produção de biomassa e teor de sacarose. A uniformidade na disponibilidade hídrica também reduz a incidência de doenças associadas ao déficit ou ao excesso de umidade, melhorando a qualidade da cana colhida. Tais benefícios são fundamentais para garantir a sustentabilidade do cultivo, especialmente diante das variações climáticas e da crescente demanda por recursos hídricos. Assim, a adoção de sistemas de irrigação eficientes, tem papel estratégico na elevação da produtividade e qualidade da cana-de-açúcar, ao mesmo tempo em que contribui para o uso racional da água e a conservação ambiental.

As mudanças climáticas representam um desafio significativo para a agricultura, e a irrigação pode ser uma ferramenta importante para mitigar seus efeitos. A variabilidade na precipitação e o aumento das temperaturas podem impactar a produção de cana-de-açúcar. Em um estudo de PINTO *et al.* (2017), foi evidenciado que a irrigação pode ajudar a compensar a seca em algumas regiões produtoras, garantindo a estabilidade da produção.

## **2.8. Estratégias para irrigação da cana-de-açúcar**

Diversas estratégias de irrigação são aplicadas para otimizar o uso da água, garantir a produtividade e reduzir os impactos ambientais. Entre as abordagens mais comuns estão a irrigação de salvamento, a irrigação deficitária e a irrigação plena (BUFON, 2021).

A irrigação de salvamento é uma técnica que busca mitigar o estresse hídrico em momentos críticos do ciclo de cultivo da cana-de-açúcar. Ela é aplicada quando há escassez de água natural (chuvas insuficientes) e visa garantir o desenvolvimento adequado da planta durante os estágios mais sensíveis, como o crescimento inicial e o enchimento de colmos (FERREIRA *et al.*, 2020)

Segundo FERREIRA *et al.* (2020), a irrigação de salvamento é particularmente eficaz em regiões semiáridas, onde a precipitação irregular pode afetar a produtividade. O estudo aponta que, mesmo com volumes de água relativamente baixos, essa técnica consegue manter a produtividade da cana-de-açúcar dentro de limites economicamente viáveis, evitando perdas significativas durante períodos de seca. A principal vantagem da

irrigação de salvamento é o baixo consumo de água em comparação com outras técnicas, tornando-a uma solução econômica e eficiente em áreas com escassez hídrica (PEREIRA, 2015).

A irrigação deficitária envolve a aplicação de água em volumes inferiores às necessidades da cultura, submetendo a planta a desenvolver mecanismos de tolerância ao estresse hídrico. Essa estratégia é usada para otimizar a eficiência no uso da água (EUA) sem grandes perdas de produtividade, ao manter a planta em condições de estresse hídrico controlado (REZENDE & ANDRADE JUNIOR, 2023).

De acordo com o estudo de PEREIRA (2015), a irrigação deficitária é uma prática eficaz para aumentar a EUA da cana-de-açúcar, principalmente em regiões com recursos hídricos limitados. O estudo demonstrou que, quando aplicada de forma planejada, a irrigação deficitária pode resultar em reduções mínimas na produtividade, ao mesmo tempo em que economiza água em comparação com a irrigação plena.

A irrigação deficitária pode ser particularmente útil em regiões sujeitas à competição por recursos hídricos, pois aumenta a sustentabilidade do cultivo. Contudo, a gestão dessa estratégia requer monitoramento cuidadoso para evitar que o estresse hídrico afete de forma irreversível o crescimento da planta, o que poderia comprometer a produtividade e a qualidade da cana (BUFON, 2021).

A irrigação plena consiste em suprir toda a demanda hídrica da cana-de-açúcar ao longo de seu ciclo de desenvolvimento, garantindo que não haja limitação de água em nenhum estágio. Essa técnica maximiza a produtividade, pois assegura que a planta receba água suficiente para realizar suas funções fisiológicas, como fotossíntese e absorção de nutrientes (FERREIRA *et al.*, 2020). Os autores ainda relacionam a a irrigação plena a obtenção de maior produtividade. Em áreas onde é possível implementar essa técnica, o aumento da produção de açúcar e biomassa é substancial, podendo chegar a incrementos de até 40% quando comparado com áreas não irrigadas ou irrigadas de forma deficitária.

A principal vantagem da irrigação plena é o aumento da produtividade e da eficiência no uso de nutrientes. No entanto, essa estratégia tem um custo elevado em termos de uso de água e energia, e pode não ser ambientalmente sustentável em regiões com recursos hídricos limitados. Além disso, o uso excessivo de água pode aumentar o risco de lixiviação de nutrientes e salinização do solo (SILVA *et al.*, 2022).

A eficiência no uso da água (EUA) é um dos principais indicadores para avaliar o desempenho de diferentes estratégias de irrigação. A irrigação deficitária geralmente proporciona o melhor balanço entre uso eficiente de água e produtividade, enquanto a irrigação de salvamento se destaca em regiões com escassez severa de água, onde o foco principal é evitar grandes perdas na produção (SILVA *et al.*, 2022).

Estudos como os de OLIVEIRA (2011) demonstram que a irrigação plena promove os maiores níveis de fotossíntese e crescimento vegetativo, devido à ausência de estresse hídrico. No entanto, as estratégias deficitárias e de salvamento, apesar de manterem algum nível de estresse hídrico, também favorecem a fotossíntese e o crescimento, embora de forma mais moderada. Essas técnicas forçam a planta a desenvolver maior resiliência ao estresse, o que pode ser uma vantagem em ambientes com restrições hídricas (OLIVEIRA, 2011).

Em termos de sustentabilidade, a irrigação deficitária e a irrigação de salvamento se apresentam como alternativas mais viáveis em regiões com restrição de recursos hídricos. Já a irrigação plena, é vista como uma estratégia menos sustentável devido a maior demanda de água e energia, aumentando o custo de produção (REZENDE & ANDRADE JUNIOR, 2023). Portanto, as diferentes estratégias de irrigação da cana-de-açúcar devem ser escolhidas com base na disponibilidade de recursos hídricos, nas condições ambientais e compatibilizando o manejo da água e características do método de irrigação adotado.

## **2.9. O uso de drones na agricultura**

O uso de drones, também conhecidos como veículos aéreos não tripulados (VANTs), na agricultura vem recebendo atenção como uma ferramenta inovadora que possibilita aumento da produtividade ao promover maior eficiência das práticas agrícolas. A agricultura de precisão, que busca otimizar o uso de insumos e monitorar as condições das culturas, se beneficia com adoção das tecnologias implementadas nos drones, que permitem o monitoramento aéreo, e coleta de dados georreferenciados e possibilita a aplicação localizada e mais eficiente dos insumos agrícolas (OLIVEIRA, 2024).

As aeronaves têm a capacidade de capturar imagens aéreas de áreas agrícolas com alta resolução, por meio de câmeras multiespectrais, sensores térmicos e outros dispositivos de sensoriamento remoto. Isso permite aos agricultores e pesquisadores obterem informações detalhadas sobre a sanidade das plantas, variações no solo, estado

hídrico e presença de pragas e doenças da cultura (ZHANG *et al.*, 2021). Quando equipados com câmeras multiespectrais permitem o monitoramento detalhado das culturas, auxiliando na detecção precoce de problemas como deficiência de nutrientes, estresse hídrico, infestação por pragas, análise da saúde das plantas e da eficiência fotossintética (KHANAL *et al.*, 2017).

Ainda outra aplicação para os drones é no mapeamento do solo e da topografia. As imagens obtidas pelas aeronaves fornecem informações importantes relacionadas à topografia e estrutura do solo, que possibilita a identificação de áreas suscetíveis à erosão, drenagem inadequada e compactação do solo (KHANAL *et al.*, 2017; SISHODIA *et al.*, 2020).

A aplicação localizada de insumos, como fertilizantes, defensivos agrícolas e até sementes também pode ser realizada com os drones. Isso permite uma distribuição mais precisa, minimizando o desperdício e o impacto ambiental. Essa prática é especialmente útil em áreas de difícil acesso para máquinas convencionais (CHEN *et al.*, 2021).

Infestações de pragas e doenças podem ser precocemente identificadas através da captura de imagens de alta resolução por câmeras acopladas em drones e a posterior análise de padrões na vegetação. A detecção em fase inicial de alterações no dossel e que sejam correlacionadas a problemas fitossanitários é essencial para o controle eficaz, podendo evitar a propagação e conseqüentes perdas na produção (BARBEDO, 2019, BENDIG *et al.*, 2015).

Sensores térmicos acoplados aos drones podem detectar diferenças na temperatura do solo e das plantas, o que auxilia na identificação de áreas com estresse hídrico. Isso possibilita o ajuste do manejo da irrigação, permitindo que a água seja aplicada de maneira eficiente (ZARCO-TEJADA *et al.*, 2012; JAVAID *et al.*, 2023).

O uso de drones na agricultura apresenta alguns desafios e limitações, como o custo de implementação. Embora os drones tenham se tornado mais acessíveis nos últimos anos, o custo de aquisição, manutenção e treinamento ainda é um desafio para pequenos produtores, especialmente em países em desenvolvimento. Além disso, os sensores de alta precisão, necessários para algumas aplicações podem ser caros (TSOUROS *et al.*, 2019). Um fato a ser considerado é com relação a regulamentação e a legislação. O uso de drones está sujeito a regulamentações específicas em cada país, que podem variar desde restrições de voo até exigências de licenciamento, eventualmente, isso pode limitar a adoção em algumas regiões agrícolas (TSOUROS *et al.*, 2019).

Um aspecto a ser considerado trata das limitações técnicas, relacionadas a condições climáticas adversas, tais como ventos fortes e chuvas, dentre outros. A duração limitada da bateria dos drones restringi o tempo de voo e requer planejamento adequado em especial em grandes áreas (CHEN *et al.*, 2021).

O avanço tecnológico contínuo que ocorre nos drones e sensores, bem como a integração com adoção da inteligência artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT), promete expandir ainda mais as possibilidades do uso de drones na agricultura. A coleta e análise de grande volume de dados, também conhecida como "Big Data", deverá facilitar o processo de tomada de decisão das atividades agrícolas, com base em análises preditivas e aprendizado de máquina (TSOUROS *et al.*, 2019).

## **2.10. Uso de imagens termais**

O uso de imagens térmicas na agricultura está se consolidando como uma ferramenta importante para monitoramento de condições fisiológicas das plantas, em especial para a detecção do estresse hídrico (MAES & STEPPE, 2012; MAES & STEPPE, 2019).

As imagens térmicas são geradas a partir da detecção da radiação infravermelha refletida por objetos, neste caso, as plantas, permitindo a medição indireta de sua temperatura. Quando as plantas estão em condições de déficit hídrico, seus estômatos tendem a fechar, reduzindo a transpiração e aumentando a temperatura foliar (QUEBRAJO *et al.*, 2018).

A tecnologia de câmeras térmicas permite identificar áreas da plantação onde o estresse hídrico está se manifestando, auxiliando no planejamento de sistemas de irrigação. Ao medir a temperatura foliar, é possível detectar pequenas mudanças que pode indicar possíveis alterações na transpiração (MAES & STEPPE, 2019).

Câmeras térmicas também são utilizadas para avaliar a uniformidade da irrigação. Ao mapear as diferenças de temperatura do dossel vegetativo ou mesmo índices diferentes poderão facilitar a identificação de problemas no sistema de irrigação e/ou identificar problemas nas áreas de produção (GONZALEZ-DUGO *et al.*, 2013).

A literatura relata que além da detecção de estresse hídrico, imagens térmicas podem ser utilizadas para monitorar a saúde geral das plantas, identificando problemas relacionados à nutrição, doenças ou pragas. Quando as plantas estão acometidas por patógenos e/ou com

desequilíbrio nutricional, a transpiração também pode ser afetada, resultando em alterações detectáveis por câmeras térmicas (MAES & STEPPE, 2019).

O uso de câmeras térmicas na agricultura ainda está em fase inicial, mas tem grande potencial para ser integrado em práticas agrícolas. A combinação dessa tecnologia com inteligência artificial e algoritmos de aprendizado de máquina pode aprimorar ainda mais a interpretação dos dados e fornecer diagnósticos automatizados, precisos e em tempo real (KHANAL *et al.*, 2017).

Além disso, espera-se que com os avanços na miniaturização dos sensores e o aumento da autonomia dos drones tornem essa tecnologia mais acessível e eficiente, o que facilitará sua adoção em diversas escalas agrícolas, incluindo pequenos e médios produtores.

Um estudo conduzido por SILVA *et al.*, (2021) utilizou câmeras termográficas para avaliar o impacto de diferentes níveis de irrigação na temperatura das folhas de cana-de-açúcar. Os resultados mostraram que as plantas submetidas a irrigação deficitária apresentaram um aumento significativo na temperatura foliar em comparação com as plantas irrigadas adequadamente. A termografia, nesse contexto, demonstrou ser uma ferramenta útil para o manejo da irrigação, permitindo identificar áreas que necessitam de maior quantidade de água e ajustando o sistema de irrigação de forma precisa.

A técnica da termografia apresenta alguns desafios como o custo de implantação e as interferências ambientais, como a radiação solar, vento e umidade relativa do ar que afetam a precisão das medições térmicas (SILVA *et al.*, 2021). Além disso, a análise das imagens térmicas requer conhecimento técnico especializado, o que pode ser uma barreira para a adoção em larga escala (MELO, 2022).

## **2.11. Câmeras e índices de vegetação**

A aplicação de índices de vegetação com o uso de imagens aéreas tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a agricultura de precisão. O uso dessas tecnologias possibilita o monitoramento da saúde das plantas, a detecção de estresses bióticos e abióticos, a otimização no uso de insumos, a estimativa de produção de biomassa, promovendo maior sustentabilidade e produtividade agrícola (ZHANG *et al.*, 2021).

Quando a iluminação incide sobre uma superfície, uma parte significativa é refletida, outra é transmitida, e a porção remanescente é absorvida. As proporções relativas de luz refletida, transmitida e absorvida são intrinsecamente dependentes da natureza da superfície, apresentando variações conforme o comprimento de onda da luz. No ambiente terrestre, a luz que atinge o solo é predominantemente refletida ou absorvida, com uma fração mínima sendo transmitida, e as alterações relativas em função do comprimento de onda são relativamente pequenas. No entanto, no contexto vegetal, especialmente nas proximidades do infravermelho próximo (NIR), observa-se que a maior parte da luz é refletida, com absorção mínima, ao contrário dos comprimentos de onda visíveis, como o azul e o vermelho, onde a absorção prevalece, com baixa refletância e transmissão. Esses fenômenos ópticos são distintivos e fundamentais na interação luz-vegetal, destacando-se como elementos essenciais na interpretação de dados espectrais (JACKSON E HUETE, 1991).

Câmeras RGB e multiespectrais são capazes de detectar essas diferenças de bandas de cores e, por isso, são amplamente utilizadas em estudos de vegetação e apresentam diferentes capacidades para levantamento de índices devido às suas faixas de captura no espectro eletromagnético (THOMPSON *et al.*, 2019).

As câmeras RGB (vermelho, verde, azul) capturam o comprimento de onda relativo ao espectro da luz visível, o que permite análises de vegetação baseadas apenas nas informações de cores do espectro visível ao olho humano, como é o caso do índice EXG - *Excess Green Index* (EXG) (THOMPSON *et al.*, 2019).

O Índice EXG (*Excess Green Index*) ou Índice de Excesso de Verde é um índice de vegetação que utiliza as bandas espectrais verde, azul e vermelha para avaliar a presença e a saúde da vegetação de determinada área. A imagem obtida neste índice realça em tons mais claros a vegetação e tons mais escuros outras superfícies, ou seja, o EXG tem sido amplamente utilizado em áreas de produção (ZHANG *et al.*, 2021).

O índice NDRE (*Normalized Difference Red Edge*) ou Índice de Diferença Normalizada de Borda Vermelha é um índice de vegetação que é usado para avaliar a saúde e o vigor das plantas. Este índice utiliza em sua equação a ondas do infravermelho próximo (NIR). O NDRE é particularmente sensível à quantidade de clorofila nas folhas das plantas e é especialmente útil para estimar a quantidade de biomassa e o conteúdo de clorofila em culturas. O índice NDRE varia de -1 a 1, e valores mais altos indicam uma

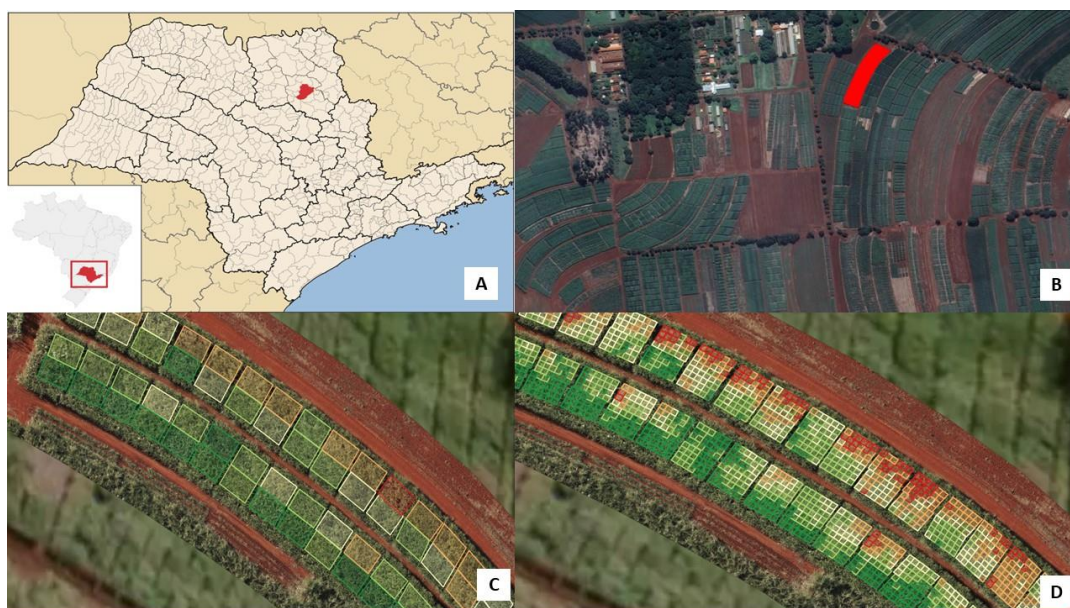
vegetação mais saudável e vigorosa. Como o NDRE é mais sensível às mudanças na clorofila das plantas, ele pode fornecer informações mais detalhada das plantas (THOMPSON *et al.*, 2019).

O índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) ou Índice de Vegetação de Diferença Normalizada é um dos índices de vegetação amplamente utilizado em sensoriamento remoto e geoprocessamento para avaliar o desenvolvimento vegetativo. Valores próximos de -1 indicam que a superfície não é vegetada. Valores próximos de 1 indicam cobertura vegetal intensa, como florestas densas ou culturas em estágio vegetativo com densa cobertura vegetal do solo. A base teórica para o NDVI está na diferença de contraste entre as assinaturas espectrais de reflectância vegetal no vermelho e NIR. À medida que a quantidade de vegetação verde aumenta em um pixel, a reflectância vermelha diminuirá devido à absorção de clorofila, enquanto a região espectral NIR não absorvida geralmente aumentará, especialmente a estrutura foliar e a biomassa (AHMAD, 2012). Em áreas com cobertura vegetal incipiente e superfície do solo exposta, a reflectância da luz nos espectros vermelho e infravermelho próximo influenciará os valores dos índices de vegetação (AHMAD, 2012).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 - Localização**

O experimento foi conduzido no Centro Avançado de Pesquisa de Cana do Instituto Agrônomo de Campinas localizado em Ribeirão Preto, nas coordenadas geográficas 21°12'33''S, 47° 52'27''O e a 631 m de altitude, em Latossolo Vermelho Eutrófico (Figura 1).



**Figura 1.** A. Localização da cidade de Ribeirão Preto no estado de São Paulo; B. Localização do experimento no Centro de Cana do IAC (destaque em vermelho); C. Vista aérea do experimento com a delimitação das parcelas; D. Vista aérea do experimento com as subdivisões das parcelas em grids amostrais para as análises de imagens.

### 3.2 – Caracterização do solo

A análise química do solo foi realizada em setembro de 2020, antes da implantação do experimento e os resultados estão apresentados na Tabela 1. A partir da análise química e física do solo, a recomendação de adubação foi realizada de acordo com a literatura pertinente (RODELLA et al., 1984; RAIJ et al., 1996; SOBRAL & GUIMARÃES, 1992; VITTI et al, 2016). O solo possui uma classificação textural franco-argiloso (TEIXEIRA et al, 2017).

**Tabela 1.** Análise química e física do solo da área experimental nas camadas de 0-20; 20-40 e 80-100cm.

Camada cm	Mat.Org. %	pH -	P mg.kg <sup>-1</sup>	K	Ca	Mg cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	Al	H + Al
0-20	2,38	6,0	117	0,08	4,15	1,64	<0,1	2,39
20-40	2,02	6,1	76	0,05	3,66	1,30	<0,1	2,47
80-100	1,23	6,3	17	0,01	1,93	0,63	<0,1	1,78

Camada cm	Areia Fina %	Areia Grossa %	Areia Total %	Argila %	Silte %	SB cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	CTC	V %
0-20	19,90	21,50	41,40	44,30	14,30	5,87	8,26	71,07
20-40	19,60	21,70	41,30	42,20	16,50	5,01	7,48	66,98
80-100	17,10	23,60	40,70	42,70	16,60	2,57	4,35	59,08

### 3.3. Cultivares de cana-de-açúcar

Para o experimento foram selecionadas algumas cultivares de interesse pelo setor produtivo. As cultivares selecionadas foram a CTC02-2994, a IACSP01-5503 e a IACCTC07-8008. A seguir algumas das características fundamentais de cada uma delas.

- **CTC02-2994** – A cultivar de cana-de-açúcar CTC02-2994, desenvolvida pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), é uma variedade recomendada para ambientes com alto e médio potencial produtivo, por apresentar alto potencial produtivo em biomassa e teor de sacarose. É recomendada para ambientes de produção\* A, B e C, com período de colheita entre os meses de julho a novembro. (CTC, 2022).
- **IACSP01-5503** - Desenvolvida pelo Programa Cana do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), é reconhecida por elevada produtividade e adaptação a diversas condições edafoclimáticas e com restrição hídrica. Recomendada para plantio em ambientes de produção\* de A, B, C e D, com colheita entre os meses de junho a setembro. Possui a alta adaptabilidade a ambientes restritivos em fertilidade e com pouca disponibilidade hídrica (LANDELL et al, 2016).
- **IACCTC07-8008** – Desenvolvida pelo Programa Cana do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), essa cultivar se destaca por sua tolerância ao déficit hídrico. Essa característica é fundamental para cultivo em regiões com maior probabilidade de ocorrência de déficit hídrico. Recomendada para ambientes de produção\* A, B, C e D, solos com boa fertilidade e colheita de junho a agosto. (LANDELL et al, 2016).

\*Nota: De acordo com PRADO (2008) os ambientes de produção de cana-de-açúcar, são classificados em A, B, C, D e E. São classificações utilizadas na cultura da cana-de-açúcar para diferenciar as condições edafoclimáticas (solo e clima) das áreas de cultivo, e são fundamentais para a recomendação de variedades de cana. Essa classificação ajuda a definir quais cultivares são mais adequadas para maximizar o rendimento em diferentes ambientes. A seguir breve descrição dos ambientes:

- Ambiente de Produção A: Áreas com altíssimo potencial produtivo e solos de alta fertilidade.

- Ambiente de Produção B: Alto potencial produtivo, mas com algumas limitações em termos de fertilidade do solo ou disponibilidade hídrica. Solos são geralmente bons, mas podem requerer manejo adicional, como irrigação suplementar ou correção de fertilidade.
- Ambiente de Produção C: Ambiente de médio potencial produtivo. Apresenta limitações moderadas de solo, como fertilidade média. A produtividade pode ser boa, mas não tão elevada quanto nos ambientes A e B.
- Ambiente de Produção D: Baixo potencial produtivo, com solos de menor qualidade e baixa fertilidade. A produtividade é limitada e o uso de tecnologias de manejo, como nutrição e irrigação, são essenciais para evitar grandes perdas.
- Ambiente de Produção E: Ambientes com baixíssimo potencial produtivo, sendo altamente limitantes devido a solos pobres e regiões sujeitas a longos períodos de seca. Nesses ambientes, a escolha de cultivares específicas e o manejo intensivo são fundamentais para viabilizar a produção.

#### **3.4. Implantação e cultivo dos experimentos**

O canavial foi formado a partir do transplântio das mudas pré-brotadas (MPB), em 26 de junho de 2021. O solo foi preparado por meio de aração e gradagem. Os sulcos foram realizados com espaçamento de 1,5 metros entre linhas e a profundidade de 20 a 25 cm. Simultaneamente a abertura dos sulcos foi aplicado o fertilizante, NPK 08-28-16, na dosagem de 500kg ha<sup>-1</sup> e o inseticida Fipronil, na dosagem de 0,5 kg ha<sup>-1</sup>.

As mudas pré brotadas (MPBs) utilizadas no experimento apresentavam, em média, três folhas expandidas e sistema radicular bem estabelecido, a aproximadamente 60 dias desde a colocação das gemas nas bandejas para produção das mudas (XAVIER et al, 2020).

Logo após o transplântio das mudas foi aplicada lâmina de irrigação de 30 mm por gotejamento superficial para promover o pegamento das mudas nos dois experimentos. Após a irrigação foram utilizados os herbicidas Atrazina + Sencor, na dosagem de 3 L ha<sup>-1</sup> para controle de plantas daninhas.

A colheita da cana planta foi realizada em 05 de agosto de 2022, e logo a seguir iniciaram-se as avaliações do presente estudo, na primeira soca.

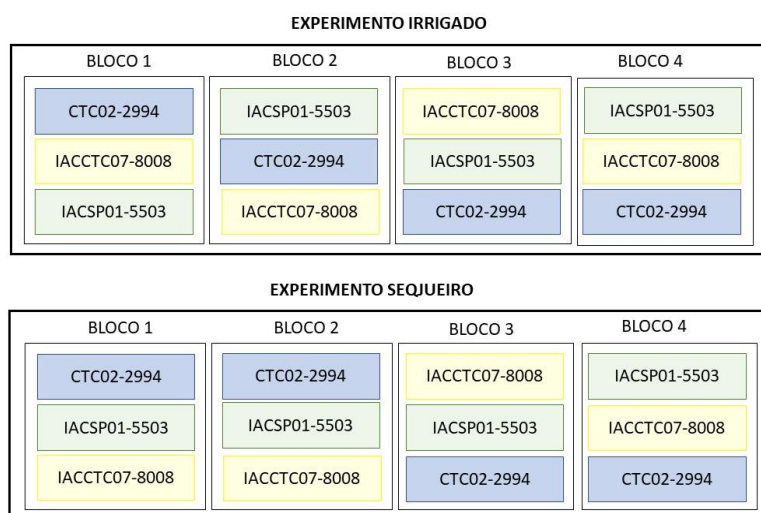
Após a colheita da cana planta, foi realizada irrigação de gotejamento superficial de 30mm e, na sequência, a aplicação de fertilizante NPK 08-28-16, aplicadopor cobertura, na dosagem de 300kg ha<sup>-1</sup>e aplicação dos herbicidas Atrazina + Sencor, na dosagem de 3 L ha<sup>-1</sup>.

### 3.5. Delineamento experimental

Os experimentos foram conduzidos na primeira soca, com dois experimentos distintos, em blocos ao acaso, com quatro repetições. A diferença entre os dois experimentos foi a condição de cultivo, sendo um irrigado e outro em condições de sequeiro (sem irrigação).

Foram avaliadas três cultivares de cana-de-açúcar, com quatro repetições para cada tratamento, totalizando 12 parcelas por experimento (Figura 3).

Cada parcela experimental era composta por quatro linhas de plantio, com 8 metros de comprimento e espaçamento de 1,5 metros entre linhas. Para evitar o efeito de bordadura nas análises, as duas linhas centrais de cada parcela foram utilizadas como área útil para as avaliações.



**Figura 3.** Croqui dos experimentos instalados em delineamento de blocos ao acaso, com três cultivares e quatro repetições, sendo um irrigado e outro sob cultivo de sequeiro.

### 3.6. Monitoramento do clima

O monitoramento climático do experimento foi realizado por meio de uma estação meteorológica automática da marca *Metos*®, instalada a aproximadamente 500 metros da

área experimental (Figura 4). Foram monitorados os seguintes elementos do clima: temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>), radiação solar (W m<sup>-2</sup>) e precipitação (mm), em escala horária e diária.

A evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), foi estimada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), considerado método padrão para esta finalidade Equação 1. Com base na precipitação observada (P) e na ET<sub>0</sub> estimada, foi elaborado o balanço hídrico climatológico, conforme o método de THORTHWAITE E MATHER (1955). Esse método permite estimar o armazenamento de água no solo, o excesso de água e o déficit hídrico, possibilitando a caracterização da disponibilidade hídrica para as plantas ao longo do ciclo de cultivo.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad Eq. 1$$

Onde:

ET<sub>0</sub>: Evapotranspiração de referência (mm/dia).

Δ: Inclinação da curva de pressão de vapor saturado em relação à temperatura (kPa/°C).

R<sub>n</sub>: Radiação líquida na superfície da cultura (MJ/m<sup>2</sup>/dia).

G: Fluxo de calor no solo (MJ/m<sup>2</sup>/dia).

γ: Constante psicrométrica (kPa/°C).

T: Temperatura média do ar (°C).

u<sub>2</sub>: Velocidade do vento medida a 2 metros de altura (m/s).

e<sub>s</sub>: Pressão de vapor saturado (kPa).

e<sub>a</sub>: Pressão de vapor real (kPa).

(e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>): Deficiência de pressão de vapor (kPa).

Para o cálculo do balanço hídrico, considerou-se a capacidade de água disponível (CAD) no solo de 80 mm, valor previamente determinado com base nas características físico-hídricas do solo da área experimental e na profundidade efetiva das raízes. O balanço hídrico foi realizado de acordo com o ROLIM *et al.* (1998).

### 3.7 - Irrigação

No experimento irrigado (Figura 5), a água foi aplicada por gotejamento superficial, com uma linha de tubo gotejador por linha de plantas, com emissores espaçados a 0,6m e com vazão de 1 Lh<sup>-1</sup>.

Para fins de manejo das irrigações foi adotado o critério de regas deficitárias com aplicação de 50% da evapotranspiração da cultura (ETc).

Para estimativa da ETc utilizou-se a evapotranspiração de referência (ETo) em base diária, (equação 1) e o coeficiente de cultivo (Kc), conforme a seguir (ALLEN *et al.*, 1998):

$$ETc = Kc \times ETo \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

ETc: evapotranspiração da cultura (mm dia<sup>-1</sup>);

Kc: coeficiente de cultura;

ETo: evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>).

Os valores coeficiente de cultura (Kc) foram ajustados ao longo do ciclo de acordo com os estádios fenológicos da cultura da cana-de-açúcar, conforme proposto por DOORENBOS & KASSAN (1979) e ALLEN *et al.*, (1998) para a cultura da cana-de-açúcar. Os estádios fenológicos da cana-de-açúcar são relacionados conforme aos períodos descritos a seguir: brotação, que corresponde ao período de 30 a 40 dias após o plantio (DAC); perfilhamento, entre 30 a 90 DAC; crescimento vegetativo, 90 a 270 DAC; e, maturação, a partir de 270 DAP até a colheita (DOORENBOS & KASSAM, 1979).



**Figura 5.** Gotejamento superficial, com uma linha de tubo gotejador por linha de soqueira.

### 3.8. Imagens aéreas

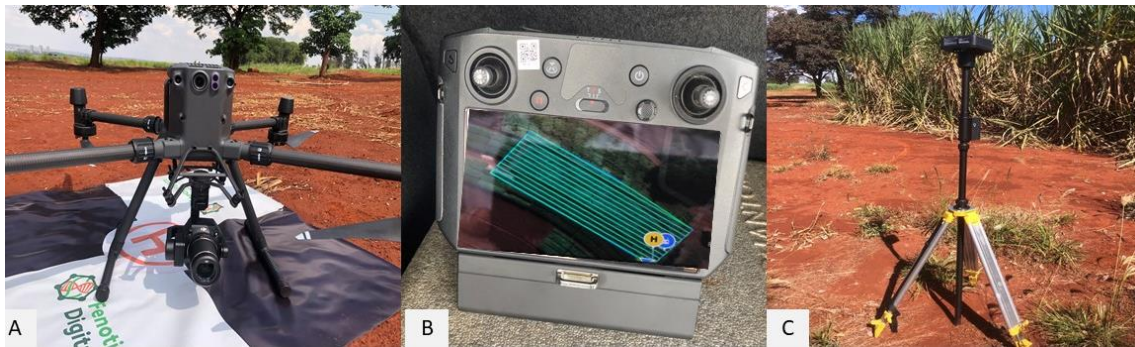
Para obtenção das imagens aéreas, foram realizados sete voos em datas distintas de acordo com a Tabela 2, considerando os dias após o corte (DAC) e os estádios de desenvolvimento da cultura. Os voos foram realizados entre às 12h e 14h, horário local. Esse período foi escolhido devido à intensidade de radiação solar, temperaturas elevadas, caracterizando período crítico para a cultura. Durante esse horário, o ângulo de elevação solar está próximo do seu ponto mais alto, minimizando a formação de sombras pronunciadas nas imagens e proporcionando maior homogeneidade nos dados de refletância, fundamental para obtenção das imagens para posterior análise (JENSEN, 2007). Ainda vale destacar que intensidade máxima da radiação solar ao meio-dia permite também que os contrastes térmicos nas imagens sejam mais evidentes, especialmente nas capturas termais (KULLBERG *et al.*, 2017).

**Tabela 2.** Relação dos voos, datas, número de dias após o corte (DAC) e estágio fenológico da cultura.

Voo	Data	DAC	Câmera	Estádio fenológico
1°	13/10/2022	112	termal	Crescimento vegetativo
2°	14/12/2022	174	RGB; termal	Crescimento vegetativo
3°	09/02/2023	231	RGB; multiespectral; termal	Crescimento vegetativo
4°	01/03/2023	251	RGB; multiespectral	Crescimento vegetativo
5°	04/04/2023	293	RGB; multiespectral	Maturação
6°	25/05/2023	313	RGB; multiespectral; termal	Maturação
7°	27/07/2023	356	RGB; multiespectral; termal	Maturação

O modelo utilizado foi o *Drone Asa Rotativa DJI Matrice 300 RTK* (Figura 6A). O plano de voo foi realizado através do DJI Pilot, software padrão (Figura 6B). Para este experimento foi definida a altitude de 30 m, com sobreposição frontal e lateral de 80%, velocidade de 4 m s<sup>-1</sup>. Para ajuste do georreferenciamento das imagens, utilizou-se a estação de correção RTK (real time kinematic), modelo *D-RTK 2*, da fabricante *DJI* (Figura 6C). Foram instalados e georreferenciados, cinco pontos de controle instalados

na superfície do solo, que foram utilizados para ajustar as imagens obtidos de cada câmera utilizada, em todos os voos.



**Figura 6.** Drone Asa Rotativa DJI Matrice 300 RTK (A); controlador da aeronave com o plano sobre o experimento inserido através do software padrão DJI Pilot (B); estação de correção de sinal via satélite modelo *D-RTK 2*, da fabricante DJI (C).

### 3.9. Imagens termais

A temperatura do dossel foi obtida por meio de imagens termais, utilizando a câmera de infravermelho *Wiris Agro R – Workswell* (Figura 7) acoplada no drone. Esta câmera possui resolução de 640 x 512 pixels e sensibilidade térmica de 0,03°C e a faixa de temperatura de operação é de -10°C a 60°C

Os valores obtidos foram relativos a terceira linha de cada parcela experimental. Esse critério foi adotado para eliminar possíveis efeitos de bordadura.



**Figura 7.** Câmera termográfica infravermelho *Wiris Agro R – Workswell* utilizada no experimento.

### 3.10. Imagens RGB

Para a obtenção de imagens RGB, foi utilizada a câmera *DJI Zenmuse P1* (Figura 8).



**Figura 8.** Câmera multiespectral *DJI Zenmuse P1* utilizada no experimento.

### 3.11. Imagens multiespectrais

Para a obtenção de imagens em RGB + NIR foi utilizada a câmera *Sentera 6X*, (Figura 9) equipada com sensores capazes de capturar imagens em cinco bandas do espectro eletromagnético: azul (475 nm), verde (550 nm), vermelho (670 nm), red-edge (715 nm) e infravermelho próximo (NIR) (840 nm).



**Figura 9.** Câmera multiespectral *Sentera 6X* utilizada no experimento.

De mesma forma que as imagens termais, as imagens RGB e Multiespectrais foi selecionada a terceira linha de cada parcela experimental para evitar efeito de bordadura.

Todas as imagens capturadas foram processadas por meio do software *Agrisoft Metashape*®. A partir do processamento das s imagens, foram estimados os seguintes índices de vegetação:

NDRE (Normalized Difference Red Edge (ÄNÄKKÄLÄ *et al*, 2022; TORINO *et al*, 2014):

$$NDRE = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge} \quad \text{eq. 3}$$

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index (ÄNÄKKÄLÄ *et al*, 2022)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{eq. 4}$$

O índice EXG – *Excess Green Index*, pela seguinte equação (GUIJARRO *et al.*, 2011; LU *et al.* 2019):

$$EXG = 2 * g - r - b \quad \text{eq. 5}$$

Sendo o r, g e b obtido pelas equações a seguir:

$$r = \frac{red}{red + green + blue} \quad \text{eq. 6}$$

$$g = \frac{green}{red + green + blue} \quad \text{eq. 7}$$

$$b = \frac{blue}{red + green + blue} \quad \text{eq. 8}$$

Os índices estimados foram calculados passou pelas médias da parcela ao longo das cinco datas das imagens, com relação a temperatura e os demais parâmetros avaliados.

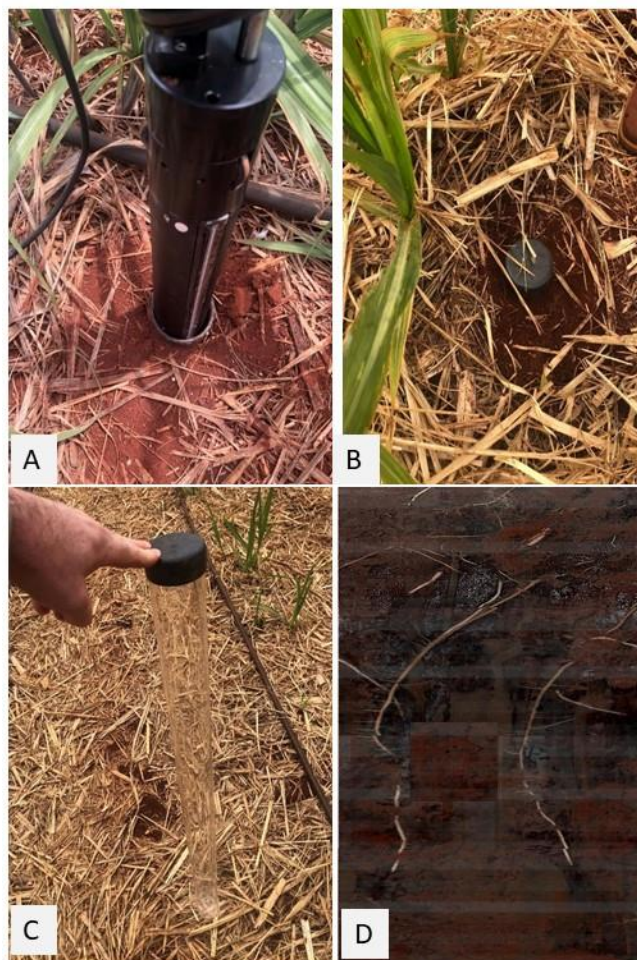
### **3.12. Monitoramento do sistema radicular**

Para avaliar o desenvolvimento do sistema radicular das plantas de cana-de-açúcar ao longo do tempo, foi utilizado o minirhizotron Root Scanner CI-600®, da CID Bio-Science Inc. (Camas, WA, EUA), (figura 10 A e B). Para análise das imagens obtidas foi utilizado o software RootSnap!®, para obtenção do comprimento de raízes (Figura 10).

Em todas as parcelas foram instalados tubos de acrílico transparentes com 1,0 metro de profundidade (Figura 10C) no sentido vertical. Esses tubos foram posicionados a aproximadamente 0,2 metros da linha de plantio, visando garantir a captação de imagens representativas do sistema radicular. No total, foram instalados 24 tubos de acesso, distribuídos entre três cultivares, com quatro repetições para cada cultivar nos dois experimentos.

As imagens foram capturadas a intervalos regulares de 0,2 metros de profundidade, desde a superfície do solo até 0,8 m de profundidade.

As imagens foram obtidas em oito datas ao longo da primeira soca. . As datas de captura das imagens foram: 08/11/2022 (95 dias após o corte da cana - DAC), 14/12/2022 (131 DAC), 25/01/2023 (173 DAC), 24/02/2023 (203 DAC), 04/04/2023 (242 DAC), 25/05/2023 (293 DAC), 14/06/2023 (313 DAC) e 27/07/2023 (356 DAC).



**Figura 10.** Minirhizotron Root Scanner CI-600®, da CID Bio-Science Inc (A e B); tubo de acrílico transparentes com 1,0 metro de profundidade instalado em cada parcela experimental (C); imagem obtida pelo software *RootSnap!*®.

### 3.13. Monitoramento da condutância estomática

A condutância estomática foi avaliada nas mesmas datas em que foram realizados os voos para a captura das imagens, ou seja, em 09/02/2023; 01/03/2023, 04/04/2023, 25/05/2023 e 27/07/2023, aos 231, 251, 293, 313 e 356 DAC, respectivamente. As medições foram realizadas entre às 12h e às 14h.

As medições de condutância estomática foram realizadas utilizando um porômetro portátil *SC-1 Leaf Porometer*, da *METER Group*, (Figura 11A).

Para cada data de medição, foram selecionadas seis plantas de cada cultivar, sempre na terceira rua, nos dois experimentos. As medições foram feitas especificamente

na folha +3 (a terceira folha a partir do ápice do perfilho principal), em folhas completamente expandidas, saudáveis e não senescentes (Figura 11B).



**Figura 11.** Porômetro portátil *SC-1 Leaf Porometer*, da *METER Group* utilizado no experimento (A) e medição na folha +3.

### 3.14. Monitoramento da umidade do solo

O monitoramento da umidade do solo com base em volume foi realizado com adoção de sensores de capacitância *TEROS 12*, fabricados pela *METER Group*, que tem como princípio de funcionamento a capacitância e conectados a datalogger *ZL6* para armazenamento dos dados horários (Figuras 12 A, B e C).

Os sensores foram instalados em três profundidades distintas: 0,2 m, 0,4 m e 0,6 m, nas três cultivares em ambos os experimentos, com três repetições. A escolha dessas profundidades visou cobrir as principais camadas de solo onde se concentra o sistema radicular da cana-de-açúcar, permitindo avaliar a dinâmica da água no solo.



**Figura 12.** Sensor de capacitância *TEROS 12*, fabricados pela *METER Group* (A); datalogger *ZL6* para armazenamento dos dados (B); sondas instaladas em três profundidades: 0,2 m, 0,4 m e 0,6 m (C).

### 3.15. Produtividade

A colheita foi realizada no dia 18 de agosto de 2023, aos 378 dias após o corte da cana-planta. Foram avaliadas as plantas úteis de cada parcela (duas linhas centrais) com colheitadeira mecânica, ajustada para realizar o corte próximo à base do colmo. A produção de cada parcela foi avaliada por célula de carga, logo após o corte. A partir das informações de massa obtidas em campo foi estimada a produtividade em toneladas por hectare.

### 3.16. Análise estatística

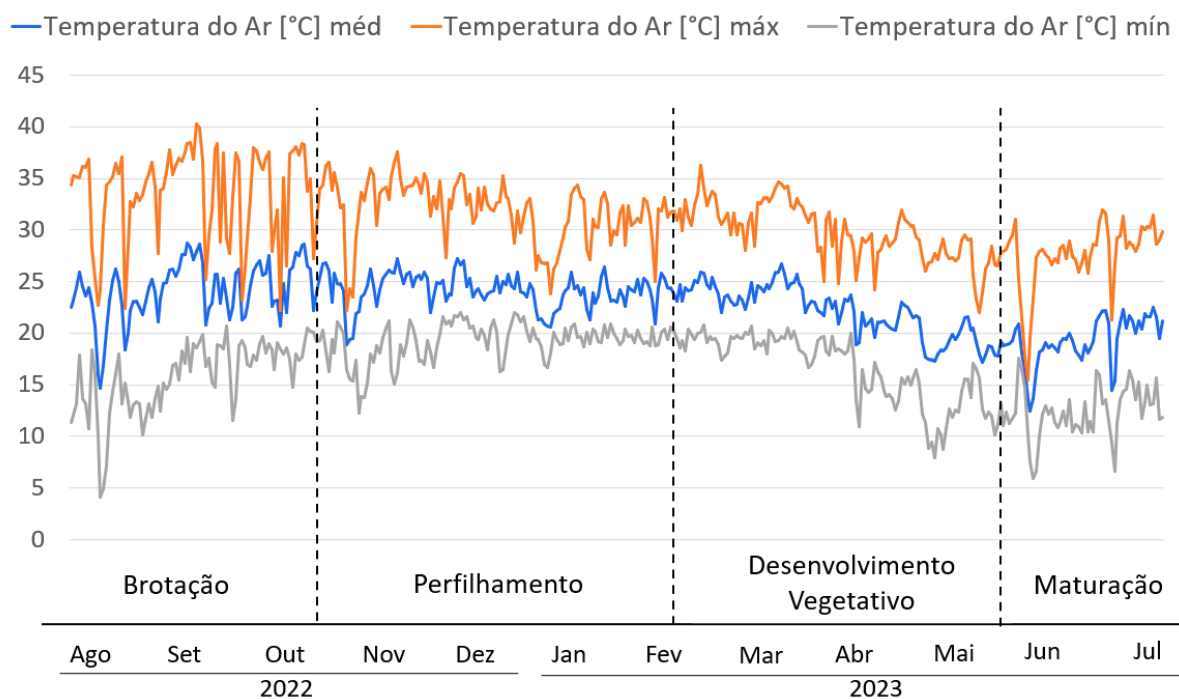
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Foi adotado o teste de normalidade dos resíduos Shapiro- Wilk a 5% de significância e teste de homogeneidade da variância por meio do teste “ONeillmathews” (ONeill & Mathews, 2000), para estas análises foi utilizado o pacote “ExpDes” por meio do software R.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

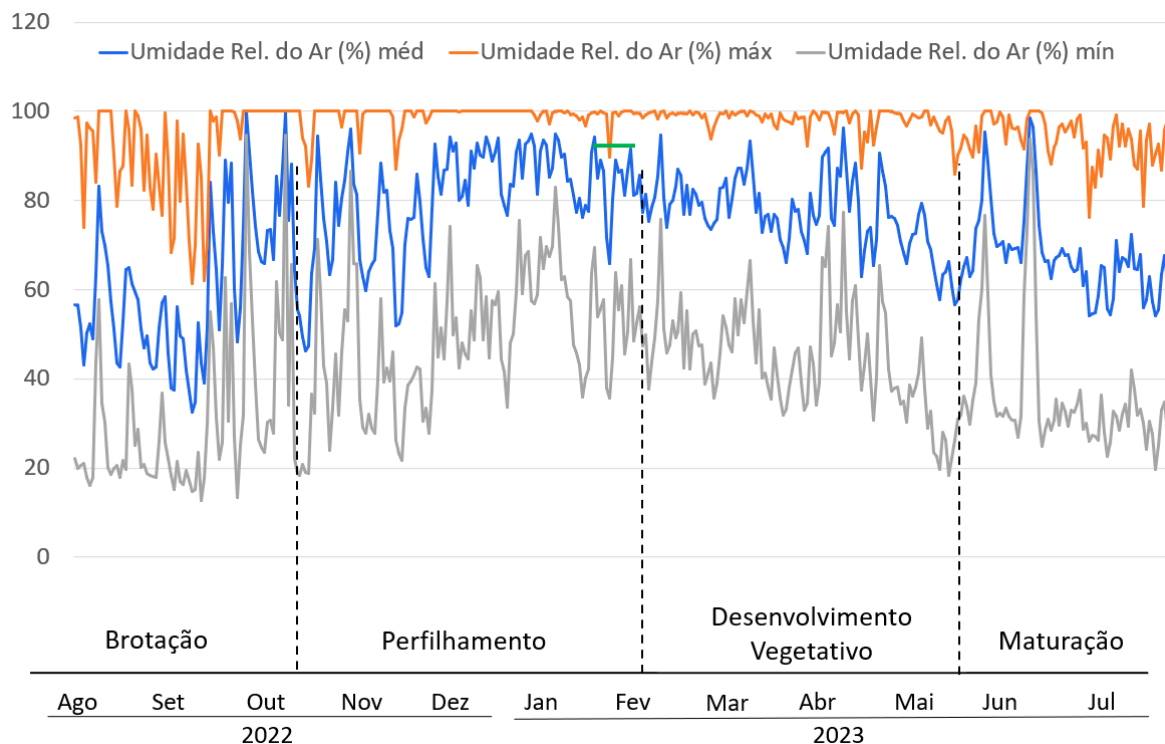
### 4.1. Clima

#### 4.1.1. Temperatura e Umidade Relativa do Ar

Os valores diários de temperatura (°C) e umidade relativa do ar (UR%), do período estudado, entre agosto de 2022 a julho de 2023, encontram-se nas Figuras 13 e 14, respectivamente. Nas figuras estão indicados os estádios fenológicos da cultura, que são eles: de brotação; perfilhamento; crescimento vegetativo e, finalmente, maturação (INMAN-BAMBER; 2005; DOORENBOS & KASSAN, 1979).



**Figura 13.** Valores diários de temperaturas do ar máxima, média e mínima (°C) ocorridos durante a primeira soca (agosto de 2022 a julho de 2023), em Ribeirão Preto -SP.



**Figura 14.** Valores diários de umidade relativa do ar (UR%) máxima, média e mínima (°C) ocorridos durante a primeira soca (agosto de 2022 a julho de 2023), em Ribeirão Preto -SP.

Temperaturas acima e abaixo dos valores basais superior e inferior podem afetar diretamente o ciclo de cultivo, e, além disso, a UR% tem influência direta na taxa de transpiração das plantas, a qual quando muito baixa pode levar à perda excessiva de água e, conseqüentemente, ao estresse hídrico. Em relação a UR% muito elevada, favorece o aparecimento de doenças fúngicas, como a “Ferrugem Marrom” (*Puccinia melanocephala*) (PARANHOS, 1987).

A partir da segunda quinzena de agosto de 2022 até final de março de 2023 ocorreram valores de 30 e 34 °C de temperatura máxima. As mínimas situaram-se entre 15 e 20 °C, no mesmo período. A partir de abril de 2023 nota-se a redução das temperaturas, em especial, as mínimas, com valores próximos a 10 °C, chegando a próximo de 5 °C (Figura 13). A temperatura ótima para crescimento da cana-de-açúcar encontra-se entre 28 a 30°C (MARIN, 2009). Valores de temperatura máxima acima deste intervalo ocorreram em grande parte do ciclo (Figura 13). Em relação a temperatura média do ar, observaram-se valores inferiores aos citados pelo autor, em grande parte do período experimental. Ao final do ciclo, a redução na temperatura mínima do ar, em

especial, a partir de abril de 2023 é importante para a maturação da cana (ANDRÉ *et al.*, 2010).

Em relação a UR verificou-se que maiores intervalos de variação, em especial em relação aos valores mínimos ocorreram nos meses de setembro a novembro de 2022 e em junho de 2023. Por outro lado, as máximas se aproximaram de 100% em grande parte do ciclo, exceto em agosto, setembro e meados de junho e julho (Figura 14).

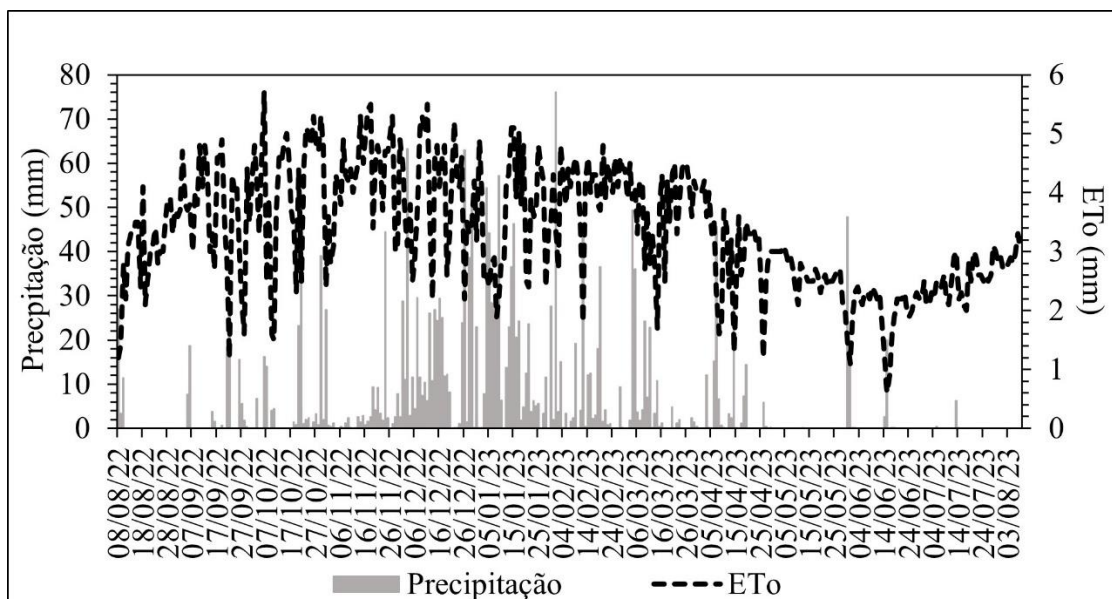
#### **4.1.2. Precipitação, evapotranspiração de referência e balanço hídrico climatológico**

A Figura 15 apresenta os valores diários de precipitação e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) de agosto de 2022 a julho de 2023. A precipitação e evapotranspiração de referência totais do período experimental foram de 2229 mm e 1231,2 mm, respectivamente. O ciclo da primeira soca caracterizou por volume de precipitação elevado considerando a duração de 378 dias. Houve precipitação em todos os meses ao longo do ciclo, com concentração mais acentuada desde setembro até abril.

De acordo com os valores de ET<sub>o</sub> (Figura 15), verificou-se que o período com elevada demanda atmosférica ocorreu, em geral, de setembro de 2022 até o final de março de 2023, com valores de ET<sub>o</sub> de 4,0 a 5,7 mm dia<sup>-1</sup>. Após esse período houve redução da demanda e os menores valores observados de 0,6 e 1,1 mm dia<sup>-1</sup>. As maiores precipitações ocorreram nos meses de dezembro e janeiro, 563,4 mm e 528,8 mm, respectivamente. Importante observar que apenas nos meses de dezembro de 2022 e janeiro de 2023 o volume de precipitação atingiu aproximadamente 50% do total ocorrido no ciclo.

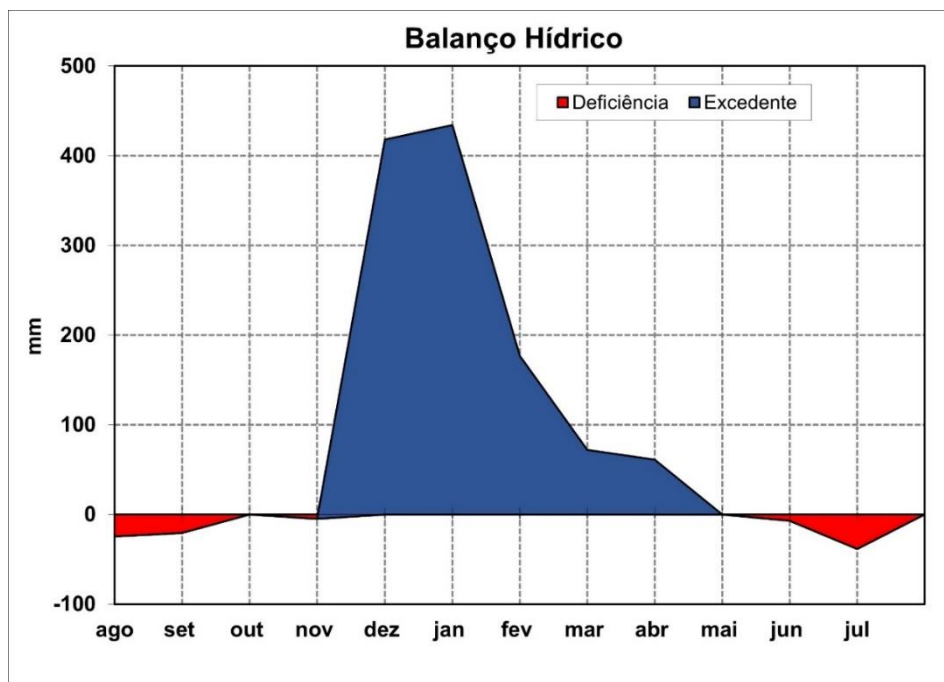
A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) variou ao longo do ciclo atingindo valores mais elevados de outubro a dezembro de 2022 e os menores de abril a junho de 2023. Em geral, a partir de abril de 2023 verificou-se tendência de redução dos valores e também ocorreu associado a dias de chuva.

Ocorreram 21 dias com ET<sub>o</sub> acima de 5,0 mm dia<sup>-1</sup>, com pico de 5,7 mm dia<sup>-1</sup>, 213 dias com ET<sub>o</sub> entre 3,0 e 4,9 mm.dia<sup>-1</sup> e o restante dos dias, com ET<sub>o</sub> entre 1,0 e 2,9 mm.dia<sup>-1</sup>.



**Figura 15.** Valores diários de precipitação e evapotranspiração de referência (ETo), ocorridos entre agosto de 2022 a agosto de 2023 em Ribeirão Preto - SP.

Na Figura 16 verifica-se o Balanço Hídrico Climatológico pelo método de THORNTHWAITE E MATHER (1955), realizada através da planilha eletrônica de ROLIM et al. (1998). De acordo com o resultado, pode-se observar que ocorreram períodos de déficit e excedente hídrico, prevalecendo períodos com excedente hídrico. Em agosto e setembro de 2022, bem como em junho e julho de 2023, verificou-se deficiência hídrica. A partir de novembro de 2022, inicia-se período de excedente hídrico que permanece até maio de 2023. Os valores apresentados como excedente hídrico atingem valores bem acima da capacidade de armazenamento de água no solo. Além disso, o excesso de água no solo acarreta redução da aeração do solo e com isso redução de oxigênio na região do sistema radicular das plantas, fator de estresse e afeta a absorção de água e de nutrientes. Solos com excesso de água no solo por períodos prolongados podem favorecer a ocorrência de doenças fúngicas, como a podridão de raiz, que podem comprometer o vigor da planta e reduzir a produtividade da cultura (PARANHOS, 1987). Fato importante é que esse longo período de excedente hídrico foi desfavorável a esse estudo, pois eliminou as diferenças esperadas entre os tratamentos irrigado e sequeiro, já que as plantas do experimento sequeiro tiveram água disponível, o que influenciou diretamente nos resultados e no desempenho esperado das cultivares.



**Figura 16.** Balanço hídrico climatológico (Thornthwaite e Mather, 1955), no período de agosto de 2022 a julho de 2023, para Ribeirão Preto-SP.

## 4.2. Irrigação

Na Tabela 3 estão apresentados os dados de irrigação ao longo do período de agosto de 2022 a julho de 2023. A tabela ainda inclui o Kc (coeficiente de cultura) adotado o número de dias de irrigação e a lâmina de irrigação líquida, em mm.

De acordo com a tabela verifica-se que a irrigação foi necessária em apenas 23 dias ao longo do ciclo. Em apenas seis meses a irrigação foi necessária, são eles: agosto, setembro, novembro, maio, junho e julho.

As precipitações foram volumosas ao longo do período experimental (Figura 15) e ocorreram em todos os meses do ciclo, com concentração, desde o final de agosto de 2022 até meados de abril de 2023. Tal fato, associado ao fato da adoção da estratégia da irrigação com déficit hídrico, acarretou baixa demanda de irrigação e com isso minimizando as diferenças em relação a disponibilidade hídrica nos dois experimentos (Figuras 3 e 4). Poucas irrigações foram necessárias ao longo do período experimental. Estas ocorreram no início da primeira soca, após a colheita da cana planta, em agosto (7 mm), setembro, novembro de 2022 e a partir de maio até agosto de 2023 (Tabela 3), totalizando 52,0 mm de lâmina de irrigação aplicada para a cultura.

**Tabela 3.** Lâmina de irrigação total mensal (mm), valores de Kc (DOORENBOS & KASSAM, 1979), número de dias irrigados de agosto de 2022 até julho de 2023 em Ribeirão Preto - SP.

Mês	Kc adotado	Nº de dias irrigados	Lâmina de Irrigação líquida (mm)
agosto-22	0,45	2	6,9
setembro-22	0,5	3	6,7
outubro-22	0,9	0	0
novembro-22	1	2	5,4
dezembro-22	1,2	0	0
janeiro-23	1,2	0	0
fevereiro-23	1,2	0	0
março-23	1,2	0	0
abril-23	1,2	0	0
maio-23	1,2	10	20
junho-23	0,8	3	6,5
julho-23	0,7	3	6,1
<b>Total</b>	-	<b>23</b>	<b>52</b>

### 4.3. Água no solo

A Figura 17 apresenta o teor de água no solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em três camadas no perfil do solo (0-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade) em ambos os experimentos, irrigado e sequeiro. Os períodos monitorados em cada experimento diferiu devido a problemas operacionais dos equipamentos em campo.

O efeito das irrigações na umidade do solo, pode ser verificada no período de redução de precipitação (a partir de maio) nos sensores nas diferentes profundidades (Figura 17), fato esse que não foi observado no experimento sequeiro (Figura 17). Verificou-se que mesmo com volume de precipitação elevado, houve ao final do ciclo, período no qual a redução da umidade do solo pode ser verificada no experimento de sequeiro.

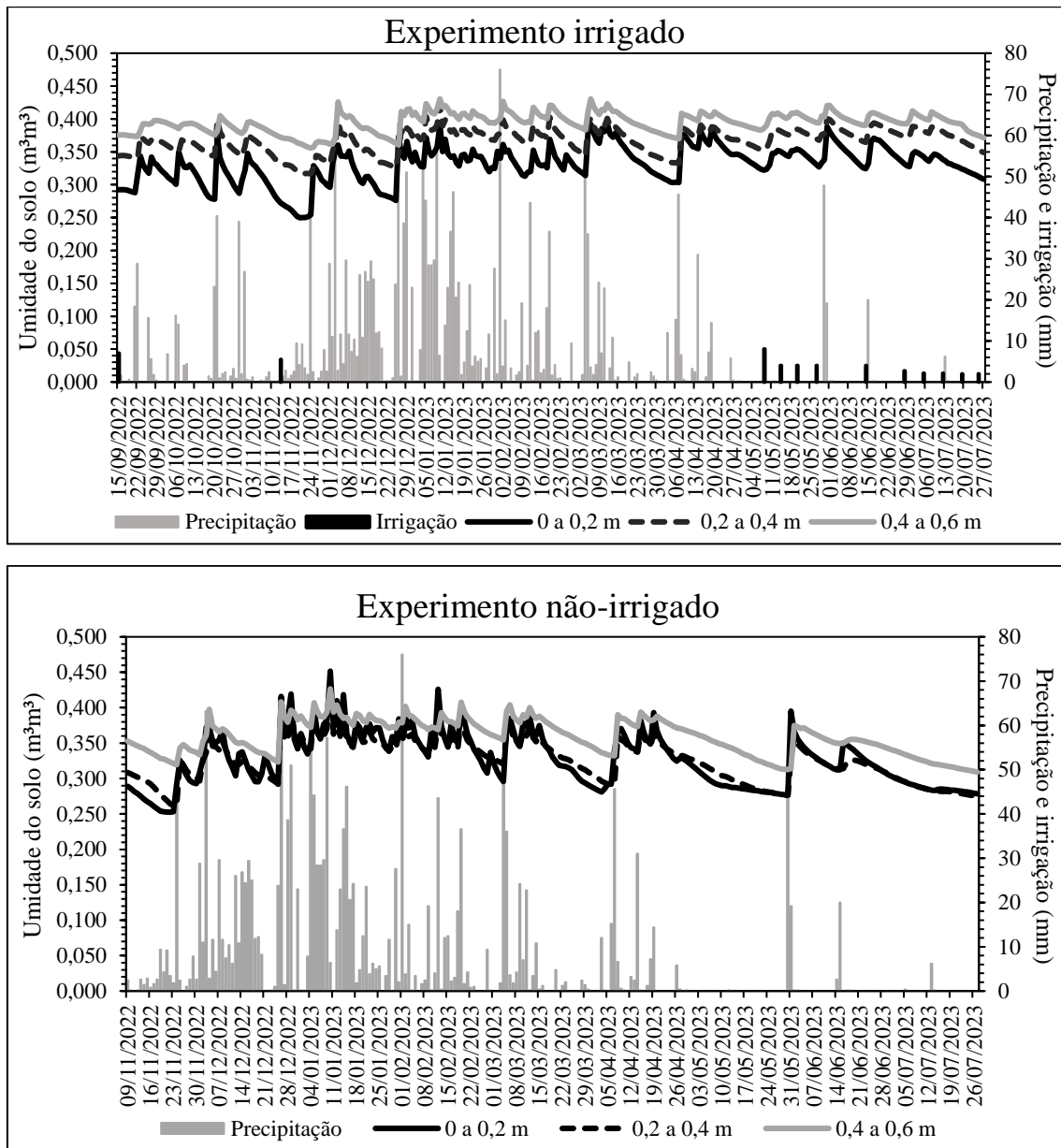


Figura 17. Umidade do solo a 0,2, a 0,4 e a 0,6 m de profundidade no experimento irrigado (setembro 2022 a agosto de 2023) e não-irrigado (novembro de 2022 até agosto de 2023) em Ribeirão Preto, SP.

Na camada mais superficial do solo (0-20 cm), observa-se que, em determinados períodos, o tratamento sequeiro apresenta valores ligeiramente superiores ao tratamento irrigado. Variações diminutas podem ocorrer por alterações naturais na dinâmica da infiltração e na redistribuição da água no solo, além da própria heterogeneidade das condições edafoclimáticas (HILLEL, 2004).

#### 4.4. Condutância estomática

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados de condutância estomática avaliada em ambos os experimentos em todas as cultivares, em fevereiro, março, abril, maio e julho de 2023 aos 189, 208, 243, 294 e 357 dias após o corte (DAC), respectivamente.

**Tabela 4.** Condutância estomática das cultivares IACSP01-5503, CTC02-2994, e IACCTC07-8008 ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), avaliada aos 189, 209, 243, 294 e 357 DAC, nos dois experimentos, irrigado e sequeiro, em Ribeirão Preto, SP.

Cultivares	Irigado					Sequeiro				
	Dias após o corte									
	189	209	243	294	357	189	209	243	294	357
	( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) *									
CTC02-2994	92,2 a	30,3 b	30,6 b	28,9 b	32,3 b	82,4 b	29,0 b	30,8 b	28,7 b	31,3 b
IACCTC078008	118,3 a	123,0a	112,6 a	105,1 a	117,1 a	137,8 a	78,3 a	77,8 a	73,0 a	70,8 a
IACSP01-5503	76,4 a	31,7 b	36,0 b	45,8 b	35,4 b	96,0 b	39,9 b	34,5 b	34,1 b	34,0 b
P value	0,17	0,0002	0,0002	0,00009	0	0,0007	0,0002	0,0001	0,001	0,0002
CV%	37,5	33,1	30,5	31,4	21,4	16,7	33,7	26,7	24,5	25,9
DMS	56,8	32,4	28,9	29,8	20,8	27,8	26,2	20,1	17,5	18,6

\*Médias seguidas das mesmas letras na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% ( $p < 0,05$ ).

Valores de condutância maiores na cultivar IACCTC078008 foram observados ao longo do ciclo, em ambos os experimentos, exceto aos 189 DAC no experimento irrigado. Diferenças não foram observadas nos valores de condutância estomática das cultivares CTC02-2994 e IACSP01-5503 nas avaliações realizadas tanto na área irrigada como sob sequeiro.

Ao longo do período experimental, a avaliação realizada aos 294 DAC, ocorreu no período de irrigações (Figura 17). Mesmo assim, verificou-se a mesma tendência, em relação às demais avaliações, no que diz respeito a diferenças ou não na condutância estomática entre as cultivares (Tabela 4). Tal fato, pode ser atribuído ao clima, ao horário da medição e ao manejo das irrigações adotado, mas também característica da cultivar.

Em diferentes condições hídricas, BASNAYAKE *et al.* (2015) relataram que em 131 clones de cana-de-açúcar verificaram valores com variação de 57,6 e 428,0  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para condutância estomática. Por outro lado, valores menores foram reportados por MACHADO *et al.* (2009) com variação da condutância estomática entre 3 e 28  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  relacionados a duas

cultivares de cana-de-açúcar em condições de déficit e de boa disponibilidade hídrica, respectivamente.

Valores similares aos verificados por MACHADO *et al.* (2009) ocorreram nas cultivares CTC02-2994 e IACSP01-5503 em ambos os experimentos (Tabela 4) e menores aos relatados por BASNAYAKE *et al.* (2015). Por outro lado, a cultivar IACCTC07-8008 em ambos os experimentos apresentou valores de condutância maiores, variando entre 105,1 e 123  $\text{mmol m}^2 \text{s}^{-1}$  no experimento irrigado, e, no experimento não irrigado, apenas na primeira avaliação atingiu 137  $\text{mmol m}^2 \text{s}^{-1}$  e nas medições que se seguiram variação de 78 e 70  $\text{mmol m}^2 \text{s}^{-1}$  (Tabela 4). De modo geral, as cultivares apresentaram tendência de reduzido intervalo de variação para os valores de condutância ao longo do período avaliado, exceto na primeira avaliação aos 189 DAC (Tabela 4), em ambos os experimentos, irrigado e sequeiro.

Cultivares de cana-de-açúcar apresentam variações consideráveis na condutância estomática, com algumas cultivares podendo ser mais eficientes no uso da água. A tolerância ao estresse hídrico é foco dos programas de melhoramento genético para melhorar a características de tolerância a seca, e evitar grandes perdas de produtividade quando da ocorrência de longos períodos de deficiência hídrica (MEINZER & GRANTZ, 1990).

Em ambientes onde a disponibilidade de água é limitada, uma maior condutância estomática pode não ser vantajosa, pois aumenta a perda de água. Isso pode levar a um estresse hídrico caso a planta não consiga compensar esta perda através da absorção de água do solo, a qual depende da sua disponibilidade de água do solo. Por outro lado, em condições adequada de água no solo, a maior condutância estomática pode ser benéfica, pois a planta pode manter as trocas gasosas de acordo com a demanda climática estágio de crescimento das plantas e expressar seu potencial de produção (RADIN *et al.*, 1994; TAIZ e ZEIGER, 2017).

Em estudo sobre a tolerância ao estresse hídrico de cana-de-açúcar, FERREIRA *et al* (2017) encontraram valores de condutância entre 150 a 350  $\text{mmol m}^2 \text{s}^{-1}$ , em condições de deficiência hídrica moderada.

Em seus estudos, TIPPAYAWAT *et al* (2023) avaliaram respostas fisiológicas de diferentes genótipos de cana-de-açúcar sob variações na duração da seca. A condutância estomática e a transpiração, foram reduzidas em genótipos sensíveis, enquanto os mais tolerantes mantiveram taxas elevadas e melhor desempenho agrônômico. JAVED *et al.*, (2020) discutiram a resposta da condutância estomática à seca em plantas C4 destacando a importância

de genes envolvidos na resposta ao estresse hídrico e os desafios para a melhoria genética das culturas.

#### 4.5. Comprimento das raízes

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados de comprimento de raízes, expressos em mm de raiz encontradas em 1688 cm<sup>2</sup>, ou seja, considerando a área de cada imagem (422 cm<sup>2</sup>) multiplicados pelas quatro camadas de profundidade (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 cm), nos experimentos irrigado e não irrigado, entre os meses de novembro de 2022 a julho de 2023.

**Tabela 5.** Comprimento de raiz de três cultivares de cana-de-açúcar, IACSP01-5503, CTC02-2994, e IACCTC07-8008, totalizado desde a superfície do solo até 80 cm de profundidade, nos experimentos irrigado e sequeiro avaliado no período de novembro de 2022 a julho de 2023. (Médias seguidas pela mesma letra, em cada época de avaliação, na comparação entre as cultivares, não diferem entre si, pelo teste de Tukey 5%.)

Comprimento de raiz (mm)								
Cultivares	08/11/22	14/12/22	25/01/23	24/02/23	04/04/23	25/05/23	14/06/23	27/07/23
	Experimento Irrigado							
CTC02-2994	10262 a	10620 a	9819 a	11751 a	12731 a	13088 a	13427 a	13520 a
IACCTC078008	8305 a	8877 a	11256 a	10127 a	11390 a	11788 a	12259ab	12512 a
IACSP01-5503	15630 b	15925 b	16713 b	17001 b	18170 b	18510 b	18560 b	18682 b
P value	0,0000	0,0098	0,01	0,0106	0,0129	0,0123	0,018	0,0000
CV%	11,69	21,87	20,38	19,76	18,82	18,06	17,85	5,87
DMS	24,69	5101,2	5071,6	5060,45	5242	5161,89	5201,84	1728,34
Experimento Sequeiro								
CTC02-2994	4068 a	7205 a	5948 a	6309 a	8127 a	8377 a	8523 a	8686 a
IACCTC078008	5707 a	6662 a	7553 a	7985 a	9617 a	12242 a	12258 a	12341 b
IACSP01-5503	14329 b	15749 b	16725 b	17254 b	18762 b	19057 b	19112 b	19372 c
P value	0,0000	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0019	0,0000	0,0000
CV%	20,41	22,6	16,63	15,17	13,67	22,24	13,28	12,47
DMS	3240,82	4408,65	3310,88	3152,04	3286,28	5811,13	3315,07	3317,36

Pelos resultados, podemos observar que, em ambos os experimentos, o comprimento radicular na camada avaliada foi maior na cultivar IACSP01-5503 em relação as demais cultivares. A única exceção ocorreu em 14/06/2023, no experimento irrigado, onde a cultivar IACCTC078008 apresentou valor similar ao alcançado pela IACSP01-5503. Por sua vez, as cultivares CTC02-2994 e IACCTC078008 não

diferenciaram o comprimento radicular, em ambos os experimentos. A exceção ocorreu no dia 27/07/2023 em que a CTC02-2994 foi estatisticamente inferior a duas demais cultivares, no experimento sob sequeiro.

Diferenças do comprimento de raiz entre as cultivares podem ser explicadas por alguns fatores, dentre estes podemos destacar, o fator genético (COSTA, 2005); a disponibilidade de água e profundidade do solo, presença ou não de compactação (CINTRA, 2006); o manejo agrícola (CAMARGO, 2018) e a competição e estresse hídrico e/ou nutricional (CINTRA, 2006), dentre outros.

Outro fator relevante é que os programas de melhoramento genético em busca por genótipos mais tolerantes a seca têm a tendência de selecionar cultivares com sistema radicular mais desenvolvidos. Segundo ZINGARETTI *et al.* (2012), o desenvolvimento de sistema radicular profundo e eficiente é importante para a adaptação da cana-de-açúcar em condições de estresse hídrico. Raízes profundas possibilitam aumento na água disponível para as plantas e assim manter o consumo de água e nutrientes em camadas mais profundas do solo. Esse resultado confirma o estudo de INMAN-BAMBER *et al.* (2012), que apontaram que cultivares com sistemas radiculares mais profundos demonstram maior resistência em solos de baixa retenção de água.

## **4.6. Índice de vegetação**

### **4.6.1. Índice EXG**

Os valores do índice EXG (Excess Green) observados nas cultivares CTC02-2994, IACCTC07-8008 e IACSP01-5503 nos dois experimentos, são apresentados na Tabela 6. No presente estudo, o índice variou entre 0,030 e 0,233. Os resultados também variaram entre as cultivares e o estágio fenológico da cultura (Tabela 6). A cultivar IACCTC07-8008 apresentou os maiores índices ExG em ambos os experimentos, exceto na primeira avaliação em dezembro de 2022 em ambos os experimentos e em fevereiro de 2023 no experimento não irrigado. Para essa cultivar, no experimento irrigado, o índice variou de 0,103 observado na primeira avaliação (dezembro de 2022) a 0,233 na última avaliação (julho de 2023) menor e o maior valor observado, respectivamente. No experimento irrigado, na primeira avaliação, em 14/12/2022, aos 188 dias após o corte, a cultivar IACSP01-5503 apresentou o maior valor de EXG (0,1760), indicando uma maior cobertura vegetal em relação as demais. No entanto, a partir da segunda avaliação, foi a IACCTC07-8008 que passou a apresentar os maiores índices.

Na cultivar IACCTC07-8008, no experimento não-irrigado os valores absolutos observados foram menores que os verificados no experimento irrigado. O intervalo de variação no cultivo sob sequeiro variou entre 0,030 na primeira avaliação (dezembro de 2022) a 0,196 obtido na última avaliação (julho de 2023). Contudo, o padrão do índice ExG para essa cultivar foi similar ao observado no experimento irrigado. No experimento sob sequeiro, na primeira avaliação, a cultivar IACSP07-8008 apresentou um índice significativamente inferior às demais (0,030). Na segunda avaliação, os índices não diferiram entre as três cultivares. Na terceira avaliação, em março, a IACSP07-8008 obteve o maior índice que a IACSP015503. Nas avaliações subsequentes (quarta, quinta e sexta), a IACSP07-8008 não diferiu da CTC02-2994 e foi maior que a IACSP015503.

**Tabela 6** Índices de vegetação ExG (Excess Green) obtidos nas três cultivares, nos experimentos irrigado e sequeiro na primeira soca em Ribeirão Preto, SP.

	12/22	02/23	03/23	04/23	05/23	07/23
<b>Cultivares</b>	<b>Experimento Irrigado</b>					
CTC02-2994	0,119 a	0,155 a	0,149 a	0,108 a	0,070 a	0,191 a
IACCTC078008	0,103 a	0,215 b	0,215 b	0,212 b	0,172 b	0,233 b
IACSP015503	0,176 b	0,174 a	0,152 a	0,124 a	0,037 a	0,165 a
P value	0,002	0,002	0,001	0,004	0,0003	0,011
C.V. (%)	11,92	7,15	8,2	18,42	23,37	10,81
DMS	0,034	0,028	0,031	0,059	0,047	0,046
<b>Cultivares</b>	<b>Experimento Sequeiro</b>					
CTC02-2994	0,085 b	0,143a	0,147 ab	0,122 b	0,151 b	0,195 b
IACCTC07-8008	0,030 a	0,155 a	0,175 b	0,141 b	0,162b	0,196 b
IACSP01-5503	0,106 b	0,156 a	0,135 a	0,066 a	0,125 a	0,150 a
P value	0,001	0,74	0,036	0,004	0,001	0,0002
C.V. (%)	21,15	17,55	10,9	18,01	4,28	4,2
DMS	0,034	0,058	0,036	0,043	0,013	0,016

(\*Médias seguidas pela mesma letra, em cada época de avaliação entre as cultivares, não diferem entre si pelo teste de Tukey.).

O EXG utiliza somente as bandas verde, vermelha e azul, sendo eficaz para detectar a presença de vegetação verde. O índice EXG é utilizado para distinguir a presença de cobertura vegetal e do solo (ZHANG *et al.*, 2021).

#### 4.6.2. Índice NDRE

Os valores obtidos com o índice NDRE estão apresentados na Tabela 7. No experimento irrigado, na primeira avaliação em 02/23 as cultivares apresentaram os índices NDRE mais elevados, variando de 0,280 a 0,312, não apresentando diferenças, entre cultivares (Tabela 7). A partir da segunda avaliação em 03/23 nota-se redução nos valores dos índices e ainda, nesta avaliação sem diferenças entre as cultivares. A partir das avaliações de 04/23 e 05/23 a redução nos valores do índice NDRE continua, contudo notou-se diferença entre cultivares. A cultivar com menores índices nas duas avaliações, foi a IACSP01-5503, os índices obtidos foram 0,130 e 0,076, respectivamente (Tabela 7). A redução nos valores dos índices se manteve na última avaliação em 07/23, valores variaram entre 0,063 e 0,105, não apresentando diferenças significativas entre as cultivares (Tabela 6).

No experimento sequeiro, não ocorreu diferenças nos valores do NDRE entre as cultivares na primeira, terceira e quarta avaliação (Tabela 7). Diferenças foram observadas na segunda e na última avaliação. A CTC02-2994 foi maior que a IACSP01-5503 na segunda e na última avaliação. Ainda nestas duas avaliações não houve diferenças entre a IACCTC07-8008 e a IACSP01-5503. Considerando os valores absolutos, o índice NDRE apresentou tendência similar nos dois experimentos.

**Tabela 7.** Valores do índice de vegetação NDRE obtidos nos dois experimentos com três cultivares, durante o ciclo da primeira soca em Ribeirão Preto, SP.

Cultivares	02/23	03/23	04/23	05/23	07/23
	<b>Experimento Irrigado*</b>				
CTC02-2994	0,312 a	0,274 a	0,258 b	0,191 b	0,105 a
IACCTC07-8008	0,341 a	0,298 a	0,269 b	0,317 c	0,091 a
IACSP01-5503	0,280 a	0,199 a	0,130 a	0,076 a	0,063 a
P value	0,42	0,12	0,017	0,001	0,14
CV (%)	19,65	22,83	19,89	26,66	29,74
DMS	0,13	0,13	0,09	0,11	0,06
Cultivares	<b>Experimento Sequeiro</b>				
CTC02-2994	0,235 a	0,206 b	0,223 a	0,145 a	0,094 b
IACCTC07-8008	0,172 a	0,138 ab	0,107 a	0,119 a	0,012 a
IACSP01-5503	0,193 a	0,106 a	0,078 a	0,043 a	0,028 a
P value	0,09	0,02	0,07	0,09	0,002
CV (%)	16,15	23,91	53,88	51,31	42,1
DMS	0,07	0,08	0,04	0,11	0,04

(\*Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey P<0,05.)

Este índice também foi utilizado por SANTOS (2024) para estimar o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) da cana-de-açúcar, apresentando um bom ajuste dos dados ( $R^2 = 0,62$ ). Isso indica que o NDRE é uma ferramenta eficaz para detectar o crescimento das plantas, otimizar a irrigação e a gestão de recursos hídricos.

Além disso, estudo de SALVADOR NETO (2022) utilizou o NDRE na avaliação da variabilidade espacial e temporal da produtividade da cana-de-açúcar. Nesse estudo que utilizou imagens de sensoriamento remoto obtidas por sensor multiespectral embarcado em drone, o NDRE permitiu avaliar a variabilidade da produtividade, identificar zonas de manejo e a variabilidade de teores de nutrientes como fósforo e potássio nos tecidos vegetais.

#### 4.6.2. Índice NDVI

Os valores médios do índice NDVI são apresentados na tabela 8. No experimento irrigado, os valores foram similares e não diferiram estatisticamente entre as cultivares durante o ciclo avaliado na maior parte das avaliações. Apenas na quinta avaliação em 05/23 a cultivar IACCTC07-8008 apresentou 0,317 de índice NDVI, maior que as demais cultivares. Ainda na mesma avaliação o menor valor ocorreu na IACSP01-5503.

O índice NDVI aumentou para 0,174 na última avaliação (07/23), valor que não diferiu estatisticamente comparada as demais cultivares. Tal fato, pode estar relacionado as irrigações aplicadas no período anterior a avaliação o que acarretou a elevação do índice (Tabela8 e Figura 17).

No experimento não irrigado, não ocorreu diferenças entre os valores do NDVI na primeira e na última avaliação. Nas demais a CTC02-2994 alcançou valores maiores que a IACSP01-5503. A IACCTC07-8008 não diferiu da CTC02-2994 na terceira e quarta avaliação e também não diferiu da IACSP01-5503 na segunda e na terceira avaliação.

**Tabela 8.** Valores do índice de vegetação NDVI obtidos nos dois experimentos com três cultivares, durante o ciclo da primeira soca em Ribeirão Preto, SP.

Cultivares	12/23	03/23	04/23	05/23	07/23
	<b>Experimento Irrigado*</b>				
CTC02-2994	0,312 a	0,274 a	0,243 a	0,198 b	0,264 a
IACCTC07-8008	0,341 a	0,297 a	0,326 a	0,317 c	0,269 a
IACSP01-5503	0,280 a	0,206 a	0,181 a	0,093 a	0,174 a

P value	0,42	0,13	0,01	0,001	0,06
C.V. (%)	19,65	21,49	30	21,48	21,5
DMS	0,13	0,12	0,16	0,09	0,11
<b>Cultivares</b>	<b>Experimento Sequeiro*</b>				
CTC02-2994	0,235 a	0,217 b	0,194 b	0,162 b	0,222 a
IACCTC07-8008	0,135 a	0,137 a	0,123 ab	0,147 b	0,119 a
IACSP01-5503	0,209 a	0,131 a	0,070 a	0,042 a	0,082 a
P value	0,06	0,01	0,01	0,05	0,06
C.V. (%)	24,69	18,53	27,67	29,02	47,6
DMS	0,02	0,06	0,08	0,07	0,15

(\*Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey  $P < 0,05$ .)

Segundo BARBIERI (1993), na cana, à medida que ocorre o alongamento dos colmos e o acúmulo de peso, aumenta a quantidade de palha nas camadas inferiores do dossel o que pode ter influenciado a maior diminuição da reflectância.

A análise dos índices indica que a resposta espectral da cana-de-açúcar é influenciada conjuntamente pelas mudanças fisiológicas no dossel da cultura causado pelo avanço do seu estágio de desenvolvimento. Pelo exposto, uma consideração importante ao interpretar os índices de vegetação ao longo do ciclo da cana-de-açúcar é que esses índices tendem a diminuir conforme a planta se aproxima do estágio de maturação. Nesse estágio, ocorre uma natural redução da coloração verde devido ao aumento das folhas mortas, resultando em menores valores de NDVI, NDRE e EXG.

#### 4.7. Temperatura do dossel

A Tabela 9 apresenta os dados de temperaturas do dossel das três cultivares de cana-de-açúcar avaliadas. No experimento irrigado as cultivares apresentaram valores similares, abaixo dos 30 °C na primeira avaliação em 10/22 e na quarta avaliação, em 05/23. Na segunda avaliação (12/22), os valores se aproximaram de 30°C. As temperaturas foram mais elevadas em 02/23, terceira avaliação, com valores de 40 °C (Tabela 9).

Levando em conta os valores obtidos no experimento sequeiro, a temperatura do dossel apresentou tendência de atingir valores maiores que os verificados no irrigado da segunda até quarta avaliação (12/22, 02/23 e 05/23). (Tabela 9).

No experimento irrigado, não ocorreram diferenças nos valores de temperatura do dossel observados entre as cultivares IACCTC07-8008 e CTC02-2994 nas medições realizadas, exceto na última avaliação. Na última avaliação não houve diferenças entre as

cultivares na temperatura do dossel vegetativo. Por outro lado, a IACSP01-5503 apresentou valores menores que a IACCTC07-8008 nas avaliações de outubro, dezembro e maio, já em fevereiro esta diferença não ocorreu.

No experimento não irrigado, diferença na temperatura do dossel ocorreu apenas na avaliação de dezembro de 2022, na qual a IACCTC07-8008 atingiu valor acima das demais cultivares.

**Tabela 9.** Temperatura do dossel da cana-de-açúcar das três cultivares, nos experimentos irrigado e não irrigado, obtidos durante o ciclo da primeira soca em Ribeirão Preto, SP.

Cultivares	Temperatura do dossel (°C)*				
	10/22	12/22	02/23	05/23	07/23
	Experimento Irrigado				
CTC02-2994	28,4 ab	31,0 ab	41,3 b	28,4 ab	35,9 a
IACCTC07-8008	29,1 b	31,9 b	40,0 ab	29,1 b	33,7 a
IACSP01-5503	27,9 a	29,1 a	39,2 a	27,9 a	34,6 a
P value	0,01	0,02	0,02	0,01	0,10
C.V. (%)	1,3	3,07	1,72	1,3	3,36
DMS	0,80	2,04	1,50	0,80	2,54
	Experimento Sequeiro				
CTC02-2994	27,6 a	32,5 a	44,3 a	37,7 a	33,5 a
IACCTC07-8008	27,5 a	36,6 b	45,6 a	37,3 a	33,9 a
IACSP01-5503	27,3 a	31,4 a	42,6 a	36,5 a	33,5 a
P value	0,14	0,01	0,14	0,11	0,79
C.V. (%)	0,86	2,03	3,99	1,91	2,59
DMS	0,51	1,47	3,83	1,54	1,89

(\*Médias seguidas pela mesma letra, na comparação entre as cultivares, não diferem entre si, pelo teste de Tukey.)

A Tabela 10 apresenta a diferença da temperatura do dossel em relação à temperatura do ar, em ambos os experimentos. Na primeira avaliação em outubro, as plantas ainda não apresentavam o dossel foliar com fechamento das entrelinhas, em início do desenvolvimento vegetativo, com isso há interferência da superfície do solo e da presença de palha. Em outubro de 2022, foi a única avaliação em que ocorreram valores negativos, não havendo diferenças entre as cultivares no cultivo sob sequeiro. Por outro lado, no experimento irrigado as cultivares IACSP01-5503 e a CTC02-2994 apresentando valores mais negativos. Na área irrigada, a IACCTC07-8008 não apresentou diferenças em relação CTC02-2994 conforme a Tabela 10.

No experimento irrigado, nas avaliações de dezembro de 2022, fevereiro e maio de 2023, diferenças entre as cultivares ocorreram. Condição que indica intensidade de estresse hídrico maior considerando a diferença entre a temperatura foliar em relação ao ar, ocorreu na IACCTC07-8008 na segunda, terceira e quarta avaliações. A cultivar que indicou menor intensidade de estresse neste mesmo período foi a IACSP01-5503. Ainda é relevante salientar que na terceira avaliação (fevereiro de 2023) a diferença entre elas não foi significativa. Considerando a avaliação ocorrida em maio de 2023, na qual tem-se dados de condutância e da imagem termal e ainda foi um dos poucos períodos com irrigação verificou-se que a menor condutância estomática da IACSP01-5503 (Tabela 4) resultou em menor diferença entre a temperatura foliar e a do ar. Por outro lado, a maior diferença de temperatura (Tabela 10) observada na IACCTC07-8008 correspondeu em maior condutância estomática (Tabela 4). Tal fato, é relevante pois indica a possível correlação entre esses parâmetros o que poderá contribuir para avanço do conhecimento para programas de melhoramento genético, manejo varietal e práticas de manejo. Há necessidade de se intensificar as avaliações nesta linha de pesquisa para gerar avanço no conhecimento e promover o uso potencial das imagens para indicação do estado hídrico das plantas em grandes áreas ou mesmo com grande diversidade vegetal seja sistematizado. Ainda na área irrigada, na última avaliação, a qual ocorreu no estágio de maturação, diferenças não foram verificadas entre as cultivares.

No experimento de sequeiro, interessante notar que as diferenças entre as temperaturas do dossel em relação ao ar foram sempre maiores no sequeiro em relação a área irrigada (Tabela 10), mesmo com o volume elevado de precipitação ocorrido durante o ciclo (Figura 15). Ainda neste contexto, a avaliação em maio de 2023 equivale a período no qual as irrigações ocorreram e nesta avaliação as diferenças entre os experimentos foi ainda maior. Ainda no experimento cultivado sob sequeiro, só ocorreu diferença significativa na avaliação de dezembro de 2022, na qual a cultivar IACCTC07-8008 apresentou maior valor, mostrando que o estresse estava mais acentuado (Tabela 10).

**Tabela 10.** Diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura foliar expressos em °C, em dois experimentos diferentes: irrigado e sequeiro, em três cultivares: IACSP01-5503, CTC02-2994, e IACCTC07-8008, nos meses de outubro e dezembro de 2022 e dos meses de fevereiro, maio e julho de 2023, aos 69, 131, 188, 293 e 356 dias após o corte da cana planta. (Médias seguidas pela mesma letra, na comparação entre as cultivares, não diferem entre si, pelo teste de Tukey.)

Diferença entre a Temperatura Ambiente da Temperatura Foliar					
	13/10/22	14/12/22	09/02/23	25/05/23	27/07/23
Temperatura ambiente					
	32,2	27,2	30,3	27,1	28,7
Experimento Irrigado					
Cultivares					
CTC02-2994	-3,8 ab	3,8 ab	11,0 a	1,3 ab	7,2 a
IACCTC07-8008	-3,1 b	4,7 a	9,7 ab	2,0 a	5,0 a
IACSP01-5503	-4,3 a	1,9 b	8,9 b	0,8 b	5,9 a
Experimento Sequeiro					
Cultivares					
CTC02-2994	-4,6 a	5,3 b	14,0 a	10,6 a	4,8 a
IACCTC07-8008	-4,7 a	9,4 a	15,3 a	10,2 a	5,2 a
IACSP01-5503	-4,9 a	4,2 b	12,3 a	9,4 a	4,8 a

Conforme MONTEITH & UNSWORTH (2013) relatam que a exposição a radiação pode resultar em aquecimento da superfície foliar, especialmente, se a planta não estiver dissipando calor eficientemente por transpiração. TAIZ *et al.* (2015) também reportam que a redução na transpiração pode ocorrer devido a condições climáticas desfavoráveis com ocorrência de fechamento parcial ou total dos estômatos, com redução do fluxo de vapor de água, como forma de evitar perda hídrica excessiva. Ainda, URBAN *et al.* (2017) atribuíram ao fechamento parcial dos estômatos, às condições ambientais, como elevadas temperaturas ou acentuado déficit de pressão de vapor (VPD), pois mesmo com solo úmido, pode acarretar o fechamento parcial dos estômatos. Tal estratégia previne estresse hídrico futuro, mas, também reduz a transpiração e, conseqüentemente, a dissipação de calor. WAY & YAMORI (2014) ressaltam a inibição fotossintética por elevadas temperaturas, pois, enzimas como a Rubisco podem ser inibidas, reduzindo a taxa fotossintética. Esse efeito reduz a abertura estomática e por conseguinte diminuem as trocas gasosas, resultando em aumento da temperatura foliar. JONES (2013), acrescenta ainda que a dissipação de calor foliar depende também da movimentação de ar ao redor das folhas. Assim com valores reduzidos de velocidade do vento, o calor gerado pela radiação solar e a atividade metabólica da planta também resultam em temperaturas foliares elevadas. Desta forma, o efeito dos elementos do clima associados

a condição de disponibilidade hídrica do solo, atuam nas trocas gasosas das plantas e tem efeito na temperatura foliar.

Pelo exposto, a temperatura foliar isolada não deve ser considerada um indicativo conclusivo de necessidade de irrigação, pois, como observado, fatores como radiação solar, umidade relativa do ar e o déficit de pressão de vapor desempenham papéis cruciais na dinâmica térmica das folhas. A implementação de dois experimentos, sendo um irrigado e outro sob sequeiro, tinham como objetivo principal avaliar condições de disponibilidade hídrica diferenciada ao longo do ciclo. No entanto, com a ocorrência chuvas em todos os meses do período experimental, bem como o elevado valor ocorrido atingindo mais de 2000 mm (Figura 15) não favoreceram a diferenciação acentuada entre os dois experimentos.

#### 4.8. Produtividade

Na Tabela 11 apresenta a produtividade dos experimentos irrigado e não irrigado, em toneladas de cana por hectare (TCH).

**Tabela 11.** Valores médios de produtividade das diferentes cultivares no experimento irrigado e no de sequeiro (Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey.)

Tratamentos	TCH	
	Irrigado	Sequeiro
CTC02-2994	97,9 a	109,3 ab
IACCTC07-8008	115,6 ab	96,3 a
IACSP01-5503	136,9 b	127,6 b
P value	0,0081	0,0326
CV%	9,7	11,18
DMS	24,57	26,93

No experimento irrigado, não ocorreu diferença na produtividade entre as cultivares CTC02-2994 e IACCTC07-8008. A cultivar IACCTC07-8008 também não apresenta diferença significativa em relação a cultivar IACSP01-5503. No entanto, as cultivares CTC02-2994 e IACSP01-5503 apresentaram diferenças. A maior produtividade sob irrigação ocorreu para a cultivar IACSP01-5503 a qual não diferiu da IACCTC07-8008 (Tabela 11). Assim, verificou-se que apesar dos menores valores de condutância estomática (Tabela 4) ocorridos no período

das 12 às 14h, a cultivar IACSP01-5503, resultou em maior produtividade, o que pode sugerir em eficiência do material.

No experimento sequeiro, as produtividades das cultivares CTC02-2994 e IACCTC07-8008 não se diferenciaram entre si, porém, ambas, se diferenciaram da cultivar IACSP01-5503, a qual apresentou maior produtividade.

Em ambos os experimentos, a cultivar IACSP01-5503 esteve entre as maiores produtividades. A cultivar IACCTC07-8008 a qual mostrou tendência de valores mais elevados de condutância estomática (Tabela 4) alcançou patamar de maior produtividade no cultivo irrigado e já no sequeiro, outra cultivar se sobressaiu em produtividade (IACSP01-5593) (Tabela 11). Interessante notar que a IACSP01-5503, apresentou maior comprimento de raiz no perfil, em ambos os experimentos (Tabela 5) e alcançou patamar de maiores produtividades, tanto sob sequeiro como na área irrigada. Este fato, indica a importância do desenvolvimento radicular no cultivo sob sequeiro para melhor aproveitamento da água das precipitações naturais.

No que diz respeito aos índices de vegetação e à temperatura do dossel, a cultivar IACCTC07-8008 apresentou valores ligeiramente superiores em comparação às demais cultivares avaliadas. No entanto, essa diferença não foi constante ao longo de todas as épocas de monitoramento.

## **5.0. Conclusão**

- O uso de imagens térmicas e índices de vegetação se mostraram interessantes e com capacidade de diferenciar materiais genéticos e manejos hídricos distintos e com isso tem grande potencial para promover avanço do conhecimento e na caracterização junto aos programas de melhoramento genético e áreas de cultivo para fins de manejo varietal e de práticas culturais.

## 6. Referências bibliográficas

Ahmad, F. (2012). Spectral vegetation indices performance evaluated for Cholistan Desert. *Journal of Geography and Regional Planning*; 5(6), 165-172. DOI: 10.5897/JGRP11.098

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & ZINGARETTI, M. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1998).

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. - 2. ed. – Brasília: ANA, 2021. 27p.

ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; MARQUES V. S.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: Balanço de Radiação e Parâmetros Derivados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n.3, p. 375 - 382, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000300009>

Änäkälä, M., Lajunen, A., Hakojärvi, M., Alakukku, L. (2022). Evaluation of the influence of Field Conditions on Aerial Multispectral Images and Vegetation Indices. *Remote Sensing* 14(19), 4792. DOI:<https://doi.org/10.3390/rs14194792>

Barbedo, J. G. A. (2019). A review on the use of unmanned aerial vehicles and imaging sensors for monitoring and assessing plant stresses. *Drones*, 3(2), 40.

Barbieri, V. (1993). Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*); um modelo matemático-fisiológico de estimativa. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Basnayake, J, Jackson, P. A., Inman-Bamber, N. G., Lakshmanan, P. (2015). Sugarcane for water-limited environments. Variation in stomatal conductance and its genetic correlation with crop productivity. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 66, No. 13 pp. 3945–3958, doi:10.1093/jxb/erv194.

Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 7(8), 9256-9273. <https://doi.org/10.3390/rs61110395>

Bijanazadeh, E.; Eman, Y. 2012. Evaluation of crop water stress index, Canopy temperature na grain yield of five iranian eheat cultivars under late season drought stress. *Journal os plant physiology and breeding*, v. 2, n.1, p. 23-33.

Braibante, M. E. F. (2013) A cana-de-açúcar no Brasil sob um olhar químico e histórico: uma abordagem interdisciplinar. *Química nova na escola*, v. 35, n. 1, p. 3-10.

Brunini, R. G. Índices de estresse hídrico em cana-de-açúcar nas diferentes fases de desenvolvimento. Jaboticabal, 2017 v, 97 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017

Bufon, V. B.; Maia, F. C. de O.; Pereira, R. M. 2021. Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: métodos, recomendações e resposta produtiva. In: Paolinelli, A.; Dourado Neto, D.; Mantovani, E. C. (org.). *Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura*. Piracicaba: ESALQ, 2021. Cap. 26.

Camargo, L. Influência de preparos do solo no sistema radicular da cana-de-açúcar. 2018. Tese de Doutorado. Masters dissertation. Agronomic Institute, Campinas.

CAMPANA, Mário Pércio et al. Cana-de-açúcar para a produção de material de propagação nos sistemas de mudas pré-brotadas (mpb) e tradicional. **STAB**, p. 221, 2016.

Cardoso, V. J. M., Costa, F. A. P. L. Por que as plantas transpiram? 2012. *Naturalia* (eISSN:2177-0727) UNESP, Rio Claro, v.35, p. 1-6.

Chen, H.; Yubin L., Bradley K. F.; Hoffmann, W. C.; Shengbo L.. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 14, n. 1, p. 38-49, 2021.

Cintra, L. F. D. Distribuição das raízes de cana-de-açúcar em sistemas de cultivo com adubação orgânica e *Crotalaria spectabilis* - Aracaju, SE, 2006. 20 (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1961; 12)

Coelho, E. F., Or, D., & Camilo de Lelis, T. (1995). Avaliação de regime permanente em irrigação por gotejamento e posicionamento de sensores de umidade e de potencial matricial no bulbo molhado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 30(11), 1327-1333.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. v.12 – Safra 2024/2025. n.3 – Terceiro levantamento. Novembro 2024. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>. Acesso em 27 mar 2025.

COSTA, M. C. G. Distribuição e crescimento radicular em soqueiras de cana-de-açúcar: dois cultivares em solos com características distintas. Tese de doutorado, Piracicaba – ESALQ. 2005.

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira. Bula Técnica CTC2994. Disponível em: [https://ctc.com.br/produtos/wp-content/uploads/2021/09/Bula-CTC2994\\_Ajustado\\_comp.pdf](https://ctc.com.br/produtos/wp-content/uploads/2021/09/Bula-CTC2994_Ajustado_comp.pdf). Acesso em 09 nov de 2024.

Deery, D. M. et al. 2016. Methodology for High-Throughput field phenotyping of canopy temperature using airborne thermography. *Frontiers in plant Science*, v. 7, p. 1808. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01808>.

Doorenbos, J.; Kassam, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB; FAO, 1994. 306 p. (Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33).

Doorenbos, J.; Kassam, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper, 33

Elsayed, S. et al. 2017 Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. *Agricultural water management*, v. 189, p. 98-110.

Ferreira, T. H. S.; Tsunada, M. S.; Bassi, D.; Araújo, P.; Mattiello, L.; Guidelli, G. V.; Righetto, G. L.; Gonçalves, V. R.; Lakshmanan, P.; Menossi, M. (2017) Sugarcane Water Stress Tolerance Mechanisms and Its Implications on Developing Biotechnology Solutions. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, p. 1077, DOI: 10.3389/fpls.2017.01077.

Ferreira, T. de S., Cunha, F. F. da, Ferreira, L. B., Costa, F. M., & Silva Neto, E. da. (2020). Desenvolvimento inicial da cana-soca sob lâminas de irrigação de salvamento. *Agrarian*, 13(50), 493–503. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v13i50.10909>

Fini, A.; Bellasio, C.; Pollastri, S.; Tattini, M.; Ferrini, F. Water relations, growth, and leaf gas exchange as affected by water stress in *Jatropha curcas*. *Journal of Arid Environment*, v. 89, p. 21-29. 2013.

Franco, B. M., Ziani, F. A., Konrad, J., & Andres, C. M. (2019). Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração potencial e de referência. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 4(2), 180-189.

Gomes, F., Lima, J., & Neto, L. P. (2021). Aplicações da termografia na agricultura. *Agrarian Academy*, 8(16).

Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P. J., Nicolás, E., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., & Intrigliolo, D. S. (2013). Using high-resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within commercial orchards. *Precision Agriculture*, 21(3), 841-854. DOI 10.1007/s11119-013-9322-9

Guijarro, M., Pajares, G., Riomoros, I., Herrera, P. J., Burgos-Artizzu, X. P., Ribeiro, A., (2011). Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images. *Computer and electronics in Agriculture*, 75(1), 75-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.09.013>

Hillel, D. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press. 2004

Landell, A. G. A., Xavier, M. A., Silva, D. N. et al. Variedades de cana-de-açúcar para o Centro-Sul do Brasil: 21.a liberação do programa cana IAC (1959-2021). Campinas: Instituto Agrônômico, 2021. 40 p. on-line (Série Tecnologia APTA. Boletim técnico IAC, 227.

Inman-Bamber, N. G. (2004). Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field Crops Research*, 89(1), 107-122. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.018>

Inman-Bamber, N. G., Lakshmanan, P., & Park, S. (2012). Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. *Field Crops Research*, 134, 95-104.

Inman-Bamber, N.G.; Smith, D.M. (2005). Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, v.92, p.185-202, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>.

Jackson, R. D. & Huete, A. R. (1991) Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11(3-4), 185-200. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2).

Jadoski, C. J., Toppa, E. V. B., Julianetti, A., Hulshof, T., Ono, E. O., & Rodrigues, J. D. (2010). Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. *Applied Research & Agrotechnology*, 3(2), 169–186. <https://doi.org/10.5777/paet.v3i2.1064>.

Javaid, S. Communication and control in collaborative UAVs: Recent advances and future trends. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 24, n. 6, p. 5719-5739, 2023. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3248841>.

Javed, T., Shabbir, R., Ali, A., Afzal, I., Zaheer, U., Gao, San-ji. (2020). Transcription Factors in Plant Stress Responses: Challenges and Potential for Sugarcane Improvement. *Plants*.

Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. 2nd ed. Pearson Prentice Hall.

Jones, H. G. (2013). *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511845727

Khanal, S., Fulton, J., & Shearer, S. (2017). An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139, 18-29. DOI:10.1016/j.compag.2017.05.001

Kholová, J. et al. 2010. Constitutive water-conserving mechanisms are correlated with the terminal drought tolerance of pearl Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). *Journal of Experimental Botany*, v. 61, n.2, p. 369-377.

Kullberg, Emily G.; Dejonge, Kendall C.; Chávez, 2017. José L. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. *Agricultural water management*, v. 179, p. 64-73.

Landell, M. G. A.; Braga Jr., R. IAC lança projeto Censo Varietal de Cana-de-açúcar. *Stab – Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v.35, n.1, p.22, 2016. Acesso: Maio. 25. Landell, M. G. A.; Braga Jr., R. IAC lança projeto Censo Varietal de Cana-de-açúcar. *Stab – Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v.35, n.1, p.22, 2016. Available from: . Accessed: Feb. 15 2020. 2025.

Lemões, Lucas Silva. Cana-de-açúcar na produção de energia e forragem. 2022. 79f. Tese (Doutorado em Sistemas de Produção Agrícola Familiar) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2022.

Lu, N., Quebrajo, J., Han, Z., Li, D., Cao, Q., Yao, X., Cheng, T. (2019). Improved estimation of aboveground biomass in wheat from RGB imagery and point cloud data acquired with a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Plant Methods*, 15(1), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0402-3>

Machado, H.; Lamparelli, R. A.c. (2007). Desenvolvimento metodológico para amostragem em cana-de-açúcar, considerando a resposta espectral da biomassa em imagens orbitais. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 59, n. 2, DOI:10.14393/rbcv59n2-44897.

Machado, R. S., Ribeiro, R. V., Marchiori, P. E. R., Machado, D. F. S. P., Magalhães Filho, J. R., & Landell, M. G. A. (2009). Respostas fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar sob déficit hídrico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(12), 1575-1582.

Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in Plant Science*, 24(2), 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>

Maes, W. H.; Steppe, K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*, Londres, v. 63, n. 13, p. 4671-4712. 2012. doi:10.1093/jxb/ers165

Marin, F. R., Pellegrino, G.Q., Assad, E.D., Pinto, H.S.; Zullo Junior, J. (2009). Cana-de-açúcar. Cap. 7. In: Monteiro, J. *Agrometeorologia dos Cultivos - O fator meteorológico na produção agrícola*. Brasília-DF: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, pp. 109–130.

Matos, M., Santos, F., & Eichler, P. (2020). Sugarcane world scenario. In: *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*. Elsevier, pp. 1–19. DOI: [doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00003-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00003-2).

Meinzer, F. C.; Grantz, D. A. 1990 Stomatal and hydraulic conductance in growing sugarcane: stomatal adjustment to water transport capacity. *Plant, Cell & Environment*, v. 13, n. 4, p. 383-388.

Melo, P. L. A. de. (2018). Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palha mantidas na superfície do solo. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Melo, L. DE. Deep learning for identification of water deficits in sugarcane based on thermal images. *Agricultural Water Management*, v. 272, p. 107820, 2022.

Monteiro, J. E. B. A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, 2009.

Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (2013). *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*. Academic Press.

Moraes, G. S., dos Santos, L. N. S., Cunha, F. N., Teixeira, M. B., da Silva, E. C., & Cunha, G. N. (2023). Desenvolvimento e produtividade de cana-de-açúcar irrigada e adubada com diferentes fontes de nitrogênio. *IRRIGA*, 28(2), 439-453.

Nascimento, V. P. 2023. Efeito do gotejamento contínuo e pulsado e lâminas de irrigação sobre as relações hídricas e características morfofisiológicas da cana-de-açúcar. 2023. TCC de Graduação (Agronomia) - Universidade Federal do Amazonas.

Natarajan, et al. (2022). Comparative analysis of growth and physiological responses of sugarcane elite genotypes to water stress. *MDPI Plants*.

Noronha, R. H. D. F. (2018). Plantio de mudas pré brotadas (MPB) de cana de açúcar em sistemas de manejo conservacionista de solo. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018

Oliveira, R. K. (2024). Avaliação de cultivos por meio de índices de vegetação obtidos por câmera multiespectral. Tese (doutorado) – USP. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz. Piracicaba.

Oliveira, E. C. A. (2011). Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 46, p. 617-625.

Paranhos, S. B. (1987). *Cana de Açúcar. Cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, V II, 432p.

Pereira, R. M. (2015) Viabilidade econômica da irrigação de cana-de-açúcar no cerrado brasileiro. *Irriga*, v. 1, n. 2, p. 149-157, 2015.

Pereira, I. Z. (2019) Uma breve revisão sobre a indústria sucroalcooleira no Brasil com enfoque no potencial de geração de energia. *Revista Brasileira de Energia—Vol*, v. 25, n. 2.

Pimentel, C. (2004). *A relação da planta com a água*. Seropédica, RJ: Edur, 191p.

Pinto, Pal de A.; Silva, W. K. de M.; Coelho Junior, L. M. (2017). Mudanças climáticas e impactos na produção de cana-de-açúcar na Paraíba. *Encontro nacional sobre gestão empresarial e meio ambiente*, v. 19. Universidade de Pernambuco – UFPE. Dez. 2017

Prado, H, et al. *Solos e ambientes de produção: cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p.179-204.

Quebrajo, L.; Perez-Ruiz, M.; Perez-Urrestarazu, L.; Martínez, G.; Egea, G. (2018). Linking thermal imaging and soil remote sensing to enhance irrigation management of sugar beet. *Biosystems Engineering*, v. 165, p. 77-87.

Radin, J.W., Lul Z., Percy, R.G., Zeiger E. (1994) Genetic variability for stomatal conductance in Pima cotton and its relation to improvements of heat adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 91, 7217–7221.

Raij, B. Van; Cantarella, H. Quaggio, J. A.; Furlani, A. M C. 1996. *Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. Ed. Campinas. SP. Instituto Agrônômico de Campinas & Fundação IAC. 285 p. In.: *Cana-de-Açúcar: do plantio a colheita*. Santos, F.; Borém, A. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2016.

Rezende, R. S.; Andrade Junior, A. S. (2023). Agência EMBRAPA de informações tecnológicas. Cana. Irrigação. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/manejo/irrigacao>. Acesso em 11/11/20214

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2018. Disponível em <https://www.R-project.org> (Acessado em 8 de julho de 2024).

Rodella, A. A.; Zambello Jr. E.; Orlando filho, J. (1984) Calibração de cálcio, magnésio e acidez no solo para a cana-de-açúcar cultivada na região de cerrado. STAB-Açúcar e álcool e subprodutos. v. 2. p. 45-49. In. Silva. A. L. B. O. Desenvolvimento vegetativo e radicular da cana-de-açúcar sob irrigação de salvamento no cerrado brasileiro. Instituto Agrônômico de Campinas. 2019. Tese de doutorado.

Rolim, G.S.; Sentelhas, P.C.; Barbieri, V. (1998). Planilhas do ambiente EXCEL™ para cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.6, n.1. p.133-137.

Sampaio, H. S., Bourscheidt, V., Sarracini, L. H., Jorge, L. D. C., Bettioli, G. M., & Bernardi, A. D. C. (2020). Comparação entre índices de vegetação obtidos por imagens aéreas com veículo aéreo não tripulado (VANT) e satélite. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 14(2), 111-124.

Santos, A. P. dos. (2024). Análise do desenvolvimento e uso de água da cana-de-açúcar por meio de índices de vegetação e coeficiente de cultura. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/32455>

Saraiva, G.; Andrade, R.; Souza, G. (2014) Termografia por infravermelho como Ferramenta de diagnóstico precoce de estresse hídrico severo em soja. *Agrarian Academy*, v. 1, n. 2, p. 158-169. Disponível <<http://www.conhecer.org.br/Agrarian%20Academy/2014b/termografia.pdf>>.

Silva, A. L. B. O. (2019). Desenvolvimento vegetativo e radicular da cana-de-açúcar sob irrigação de salvamento no cerrado brasileiro. Tese. Instituto Agrônômico de Campinas. 93p.

Silva, Vicente de P.R. da. (2013). Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agricultural water management*, v. 128, p. 102-109, 2013.

Silva, A. A. (2017) Stalk yield of sugarcane cultivars under different water regimes by subsurface drip irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 3, p. 169-174.

Silva, M. de A., Arantes, M. T., Rhein, A. F. de L., Gava, G. C. V., Kolln, O. T. (2014) Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.18, n.3, p.241–249.

Silva, M. A., Jifon, J. L., Santos, C. M., & Silva, J. A. G. (2013). Photosynthetic capacity and water use efficiency in sugarcane genotypes subject to water deficit during early growth phase. *Australian Journal of Crop Science*, 7(3), 363-375. Brazilian archives of biology and technology an international journal - Braz. Arch. Biol. Technol. v.56 n.5: pp. 735-748, Sept/Oct 2013

Silva, M. de A.; Jifon, J. L.; DA Silva, J. A. G.; DOS Santos, C. M.; Sharma, V. (2014) Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. *The Journal of Agricultural Science*, v. 152, n. 1, p. 104-118, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859612000834>

Salvador Neto, A. (2022). Utilização de imagens de sensoriamento remoto através de sensor multiespectral para avaliar a variabilidade de fósforo e potássio na cultura da cana-de-açúcar. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista (UNESP). Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/36224037-0c85-420f-81a2-4600a1488b72/content>

Sishodia, Rajendra P.; RAY, Ram L.; SINGH, Sudhir K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote sensing*, v. 12, n. 19, p. 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. Artmed.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2017). *Fisiologia Vegetal*. 6ª edição. Porto Alegre: Artmed.

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. – Brasília, DF. Embrapa, 574 p

Thompson, C. N., Guo, W., Sharma, B., Ritchie, G. L. (2019). Using normalized difference red edge index to assess maturity in cotton. *Crop Science*, 59 (5), 2167-2177.  
<https://doi.org/10.2135/cropsci2019.04.0227>

Thorthwaite, C.W.; Mather, J.R. (1995) The water balance. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology; 104p.

Tippayawat, A.; Jogloy, S.; Vorasoot, N.; Songsri, P.; Kimbeng, C.A.; Jifon, J.L.; Janket, A.; Thangthong, N.; Jongrunklang, N. (2023) Differential Physiological Responses to Different Drought Durations among a Diverse Set of Sugarcane Genotypes. *Agronomy*, 13, 2594.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy13102594>

Torino, M. S., Ortiz, B. V., Fulton, J. P., Balkcom, K. S., Wood, C. W. (2014). Evaluation of vegetation indices for early assessment of corn status and yield potential in the southeastern United States. *Agronomy Journal*, 106 (4), 1389-1401, DOI: 10.2134/agronj13.0578

Tsouros, D. C., Bibi, S., Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.

Urban, J., Ingwers, M. W., McGuire, M. A., & Teskey, R. O. (2017). Stomatal conductance increases with rising temperature. *Plant, Cell & Environment*, 40(10), 2194-2202.  
[doi.org/10.1080/15592324.2017.1356534](https://doi.org/10.1080/15592324.2017.1356534)

Vitti, G. C.; Luz, P. H. C.; Altran, W. S. (2016). Nutrição e Adubação. Cana-de-Açúcar: do plantio a colheita. Santos, F.; Borém, A. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2016. Cap. 3.

Way, D. A., & Yamori, W. (2014). Thermal acclimation of photosynthesis: on the importance of adjusting photosynthetic capacity and thermal tolerance in a warming world. *Frontiers in Plant Science*, 5, 511.

Xavier, M. A., Landell, M. G. de A., Pires, R. C. M. et al. (2020). Gemas brotadas de cana-de-açúcar: produção sustentável e utilização experimental na formação de áreas de multiplicação. Campinas: Instituto Agrônomo, 52 p. (Documentos IAC, 115) on-line. Disponível em [https://www.iac.sp.gov.br/media/publicacoes/iacdoc115.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.iac.sp.gov.br/media/publicacoes/iacdoc115.pdf?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 30 mar 2025.

Yu, M. et al. (2015) Using plant temperature to evaluate the response of stomatal conductance to soil moisture deficit. *Forests*, v. 6, n. 10, p. 3748-3762.

Zarco-Tejada, P. J.; González-Dugo, V.; Berni, J. A.J. (2012) Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote sensing of environment*, v. 117, p. 322-337

Zingaretti, S. M. et al. (2012). Sugarcane responses at water deficit conditions. *Water stress*, p. 255-276.

Zhang, L., Zhang, H., Han, W., Niu, Y., Chávez, J. L., & Ma, W. (2021). The mean value of gaussian distribution of excess green index: A new crop water stress indicator. *Agricultural Water Management*, 251.