



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

ALEXANDRE FERREIRA DO NASCIMENTO

**SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL E SUBORBITAL PARA ANÁLISE DE
DÉFICIT HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR**

**AREIA
2022**

ALEXANDRE FERREIRA DO NASCIMENTO

**SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL E SUBORBITAL PARA ANÁLISE DE
DÉFICIT HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR**

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

Orientador: Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz
Melo.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N244s Nascimento, Alexandre Ferreira do.

Sensoriamento remoto orbital e suborbital para
análise de déficit hídrico em cana-de-açúcar /
Alexandre Ferreira do Nascimento. - Areia, 2022.
50 f. : il.

Orientação: Davi de Carvalho Diniz Melo.
TCC (Graduação) - UFPB/CCA-AREIA.

1. Agronomia. 2. Aeronave. 3. Déficit hídrico. 4.
Câmera termográfica. 5. Saccharum sp. I. Melo, Davi de
Carvalho Diniz. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635(02)



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

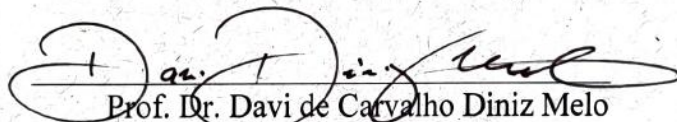
DEFESA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

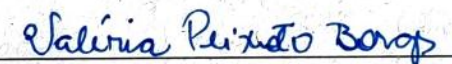
Aprovada em 12 / 012 / 2022

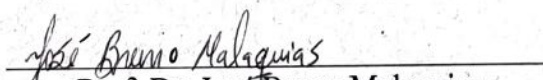
**“Sensoriamento Remoto Orbital e Suborbital para Análise de Déficit
Hídrico em Cana-de-açúcar”**

Autor: Alexandre Ferreira do Nascimento

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo
Orientador(a) – UFPB


Prof.ª Dr.ª Valéria Peixoto Borges
Examinador(a) – UFPB


Prof. Dr. José Bruno Malaquias
Examinador(a) – UFPB

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus pela dádiva da vida, pela Graça concedida através do Senhor Jesus. Por me ter dado a oportunidade de estudar e poder concluir o curso, por sempre estar comigo, pela saúde concedida e por tudo que já conquistei até aqui.

A Universidade Federal da Paraíba e ao Centro de Ciências Agrárias pela oportunidade.

A minha mãe, Ivonete Martins, minha esposa Rejane Pontes e meu filho Bento Pontes por todo amor, compreensão, incentivo, admiração, sacrifício e apoio para que eu possa alcançar meus objetivos e realizar meus sonhos. Por me fazer crescer pessoalmente e serem exemplos de solidariedade, minha gratidão!

A meu pai Manoel Ferreira (*in memoriam*), embora fisicamente ausente, sentia sua presença ao meu lado, dando-me força.

Aos meus irmãos Rafael Martins, Manoella Ferreira e Maria Eugênia por fazerem parte da minha história de vida.

Ao professor Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo (orientador), obrigado pela atenção, disponibilidade, ensinamentos, por toda humildade e por ser o profissional que contribuiu bastante na minha formação profissional.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET AgroBio) na pessoa do meu Tutor Prof. Dr. Jacinto de Luna Batista, por toda orientação, acompanhamento, troca de conhecimentos, amizade, por sempre ser prestativo quando precisei, por ser um exemplo de profissional.

As amizades que ao longo da vida e caminho acadêmico construí, Allef de Souza, João Victor, José Jurandez, Murilo Luiz, Wagner de Pontes e Mayra Alves e espero levar essas amizades sempre.

Aos colegas do Projeto Cana-Drone, Ericka Aguiar e Germana Pontes, por compartilhar dias de sol, chuva, fome e pelas andanças para coleta de dados no campo e que ajudaram na execução desse trabalho.

Dedico este trabalho a todos os pesquisadores que conheci em minha jornada até o dia de hoje, tanto os que tive a honra de cumprimentar pessoalmente, quanto aqueles que conheci apenas em literatura.

RESUMO

O monitoramento do conteúdo de água no solo é fundamental para a irrigação de precisão, entretanto, as medidas feitas *in loco* podem não ser representativas de toda a área. O sensoriamento remoto oferece a possibilidade de realizar estimativas da necessidade de irrigação de maneira espacializada. Apesar do contínuo melhoramento dos sensores a bordo dos satélites, novas tecnologias de sensoriamento remoto suborbital têm possibilitado a aquisição de imagens com alta resolução espaço-temporal. As imagens térmicas podem ser uma solução eficaz para a programação da irrigação. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar indicadores relacionados ao estresse hídrico a partir de imagens de sensoriamento remoto. A área de estudo está localizada na bacia do rio Miriri, Município de Rio Tinto (6°53'5.32"S, 35° 2'5.52"O), região da Zona da Mata Paraibana, Brasil. O local do experimento foi escolhido estrategicamente, sendo este composto por três parcelas (talhões) de cana-de-açúcar onde o proprietário aplica diferentes lâminas mensais de irrigação. Dados meteorológicos de estação micrometeorológica instalada na área de experimento foram aplicados para correção de temperatura na câmera térmica utilizada em voo. Foram usados software de análise térmica e confecção de ortomosaico (off-line) para uma melhor análise das imagens capturadas a 80m de altura, na análise de quantidade de água no solo foi utilizada sonda de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e a fim de analisar a vegetação no decorrer do tempo foi gerado NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) em software livre na nuvem (on-line). Os resultados mostraram que as imagens térmicas geradas em aeronave remotamente pilotada mostraram diferenças (da temperatura) na distribuição térmica do dossel da cultura da cana-de-açúcar em função da lâmina de irrigação aplicada. A temperatura média do dossel aumentou com o aumento dos níveis de estresse hídrico adotados em lâminas com menor disponibilidade de água, permitindo estimar a temperatura do dossel, possibilitando uma tomada de decisão rápida, diferente de sensores orbitais, em que muitas das vezes não conseguem cumprir sua função devido à alta quantidade de nuvens afetando diretamente a quantidade e a qualidade das imagens e o tempo de tomada de decisão. A estimativa de água no solo por meio de sensoriamento suborbital com uso de câmera térmica se mostrou insatisfatório, pois ao analisar a temperatura e superfície, não foi possível estimar a quantidade de água em subsuperfície.

Palavras-Chave: agronomia; aeronave; déficit hídrico; câmera termográfica; *saccharum* sp.

ABSTRACT

Monitoring the water content in the soil is essential for precision irrigation, however, measurements taken in loco may not be representative of the entire area. Remote sensing offers the possibility of estimating the need for irrigation in a spatialized manner. Despite the continuous improvement of sensors on board satellites, new suborbital remote sensing technologies have enabled the acquisition of images with high spatio-temporal resolution. Thermal imaging can be an effective solution for irrigation scheduling. In this context, the objective of this work was to analyze indicators related to water stress from remote sensing images. The study area is located in the Miriri river basin, Municipality of Rio Tinto (6°53'5.32"S, 35° 2'5.52"W), Zona da Mata region of Paraíba, Brazil. The location of the experiment was strategically chosen, which is composed of three plots (plots) of sugarcane where the owner applies different monthly irrigation depths. Meteorological data from a micrometeorological station installed in the experiment area were applied for temperature correction in the Mavic 2 Enterprise Advanced remotely piloted aircraft. Thermal analysis software and orthomosaic creation (off-line) were used for a better analysis of the images captured at 80m height. In order to analyze the vegetation over time, a NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was generated using free software in the cloud (online). The results showed that the thermal images generated in a remotely piloted aircraft showed differences (of temperature) in the thermal distribution of the canopy of the sugarcane crop as a function of the irrigation depth applied. The average temperature of the canopy increased with the increase in water stress levels adopted in depths with less water availability, allowing to estimate the temperature of the canopy, allowing a quick decision-making, unlike orbital sensors, in which many times they are not able to fulfill its function due to the high amount of clouds directly affecting the quantity and quality of the images and the decision-making time. The estimation of water in the soil through suborbital sensing using a thermal camera proved to be unsatisfactory, because when analyzing the temperature and surface, it was not possible to estimate the amount of water in the subsurface.

Keywords: agronomy; aircraft; water déficit; thermographic câmera; *saccharum* sp.

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Sonda TDR HydroSense II (A) e sonda FDR Diviner 2000 (B).	17
Figura 2: Localização da área de pesquisa com destaque para fotogrametria com resolução de (A) RGB com 2,7 cm / pixel e (B) Termográfica com 8,5 cm / pixel.....	24
Figura 3: Vista aérea da área de estudo. Os valores em mm indicam as diferentes lâminas mensais de irrigação aplicadas em cada uma das áreas destacadas em amarelo.	25
Figura 4: Estação micrometeorológica instalada na área do experimento.	27
Figura 5: Alvos para aferição de temperatura em solo, (A) papelão, folha de alumínio, plástico preto, protetor solar de para-brisa em alumínio, piso cerâmico frente e verso e (B) folhas no dossel.	29
Figura 6: Software DJI Thermal Analysis Tool 2 (A) e software Pix4Dmapper, usado na análise de temperatura e índice de pixel (B).....	29
Figura 7: Hydrosense II com sonda CS658 de 20 cm.	30
Figura 8: Polígonos criados no GEE delimitando as áreas para obtenção do NDVI.	33
Figura 9: Índices térmicos mínimo e máximo em °C, em três diferentes lâminas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar.	36
Figura 10: Mapa de temperatura da área de pesquisa.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais características das câmeras empregadas	28
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: perfil temporal de NDVI em área de cana-de-açúcar recuperado no GEE, utilizando o satélite Sentinel-2, pré-filtragem com máximo 20% de nuvens. (A) área com lâmina de 80 mm, (B) área com lâmina de 60 mm e (C) área com lâmina de 40 mm.....	32
Gráfico 2: Relação entre temperaturas medidas nos alvos utilizando o pirômetro (referência) e a partir da câmera termográfica instalada no M2EA	34
Gráfico 3: Obtenção da equação através de regressão entre temperaturas medidas nos alvos com pirômetro e índice gerado no ortomosaico do Pix4Dmapper.	35
Gráfico 4: Caracterização da média da estimativa de água no solo e média de temperatura no raio de 10 m de cada ponto de controle.	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVO	12
2.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1	CANA-DE-AÇÚCAR	13
3.2	A VARIEDADE RB92579	14
3.3	IRRIGAÇÃO	15
3.4	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	16
3.5	ANÁLISE TEMPORAL DA VEGETAÇÃO COM SENSOR DE MÉDIA RESOLUÇÃO	17
3.6	AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (ARPS)	19
3.7	RADIAÇÃO TERMAL DA SUPERFÍCIE	20
3.8	MONITORAMENTO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA PLANTA	21
4	MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1	ÁREA DE ESTUDO	24
4.2	IRRIGAÇÃO	25
4.3	DADOS METEOROLÓGICOS	25
4.4	ÍNDICE DE VEGETAÇÃO	27
4.5	IMAGEAMENTO TERMAL	27
4.6	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	29
5	RESULTADOS e DISCUSSÃO	31
5.1	ANÁLISE TEMPORAL DE VEGETAÇÃO	31
5.2	RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURAS MEDIDA	33
5.3	CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA COM DADOS OBTIDOS EM CAMPO	34
5.4	ANÁLISE DE ÍNDICE TÉRMICO	35
5.5	RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO SOLO E UMIDADE DO SOLO	37
6	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético tem na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* sp) seu maior expoente. A cana-de-açúcar é uma planta semi-perene, originária de regiões tropicais da Ásia, especialmente da Índia. Contém 57% de água, juntamente com palha, bagaço e açúcares (VANDENBERGHE, 2022).

Segundo estimativa da CONAB (2022), a área colhida na safra 2022/23 da cana-de-açúcar no País ultrapassará de 8,1 milhões de hectares de onde se espera produzir 572,9 milhões de toneladas. Isso significa uma redução de 2,6% e 1%, respectivamente, em relação à área colhida e produção na safra 2021/22.

Tal redução tem sido atribuída à menor disponibilidade hídrica e sua aplicação adequada durante o crescimento da planta, bem como condições meteorológicas que não favoreceram um aumento da produção e qualidade da cana-de-açúcar (CONAB, 2022; CÂNDIDO, 2021)

A irrigação na cultura da cana-de-açúcar pode ser utilizada com diferentes enfoques, são eles: a irrigação de salvamento, deficitária, complementar às chuvas e plena (FRIZZON, 2007). A irrigação de salvamento representa grande porcentagem de área irrigada no Brasil, totalizando área superior a 1,5 milhões de ha (ANA, 2017).

A necessidade hídrica anual da cultura é da ordem de 1.500 a 2.500 mm, variando conforme a localização, clima, variedades, tipo de solo e divididos de acordo com a demanda de seu crescimento (DOORENBOS, 1994; MONTEIRO, 2009). Sabendo que a água é um fator limitante para qualquer cultura (INMAN-BAMBER, 2005), a determinação da necessidade hídrica com precisão é fundamental para, de um lado, garantir o uso dos recursos hídricos de maneira sustentável e, por outro lado, evitar impor uma situação de estresse hídrico à planta, comprometendo seu desenvolvimento.

Assim, o monitoramento da disponibilidade de água no solo torna-se indispensável para o estabelecimento de estratégias de projeto e manejo que otimizem o uso da água pelas culturas (CINTRA et al., 2000). Tradicionalmente, esse monitoramento é feito com o uso de tensiômetro e por ter um menor custo (SIQUEIRA, 1994; SANCHES, 2022). Mais recentemente, sensores automáticos que medem remotamente umidade do solo tem sido adotado. Nas últimas décadas, o uso de dados de satélites foi bastante facilitado,

potencializando seu uso para diversas finalidades, inclusive o monitoramento agrícola. Dentre as diversas aplicações possibilitadas pelos produtos de sensoriamento remoto orbital com sensores térmicos, citam-se: Landsat, GOES e MODIS.

Apesar desses avanços, o uso de dados de sensoriamento remoto orbital pode ser inviabilizado em regiões com elevado grau de nebulosidade. A princípio, essa dificuldade pode ser sobreposta pelo uso de dados de sensoriamento remoto suborbital (SILVEIRA, 2017). Nos últimos anos, as aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) têm sido utilizadas para monitoramento em diversas áreas: detecção de incêndios, inspeção de infraestruturas e principalmente na agricultura com o seu emprego no monitoramento de falha no plantio, pragas, doenças, pulverização de defensivos, contagem de plantas e no uso eficiente da irrigação (LOPES, 2021; Climate FieldView, 2022).

O uso de Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) pode otimizar o uso da água de irrigação com monitoramento constante supervisionando o estado da água no vegetal por meio de indicadores fisiológicos para evitar efeitos indesejáveis sobre a produção agrícola (POIRIER-POCOVI, 2020; TEIXEIRA, 2021). Nesse contexto, este trabalho propõe verificar se é possível tomar decisões rapidamente utilizando imagens suborbital térmica e orbital por NDVI em área com três diferentes lâminas de irrigação subsuperficial.

2 OBJETIVO

Analisar indicadores relacionados ao estresse hídrico com imageamento orbital e suborbital em cultivo de cana-de-açúcar.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Aplicação do modelo de regressão linear em diferentes materiais para verificar temperatura em pirômetro e em ARP com câmera térmica em voo de 80 metros de altura;

Determinar uma equação de regressão nos valores dos pixels obtidos em ortomosaico com as temperaturas obtidas com pirômetro no solo;

Avaliar a temperatura em três parcelas com diferentes lâminas de irrigação;

Avaliar série temporal do NDVI obtido através da ferramenta no Google Earth Engine;

Aplicação do modelo de regressão linear para avaliação de temperatura obtida com ARP com câmera térmica e quantidade de água no solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar pertencente à família Poaceae (gramíneas) e foi descrita taxonomicamente, pela primeira vez, por Linnaeus, em 1753, no livro “Species Plantarum” (HITCHCOCK, 1923), e ao gênero *Saccharum*, que abrange várias espécies, as atuais variedades de cana-de-açúcar são híbridos originados de cruzamentos interespecíficos feitos no início do século XX envolvendo principalmente plantas de *S. officinarum* e *S. spontaneum*. Estes híbridos são citados como *Saccharum* spp. (LANDELL, 2008), é uma planta do tipo C4, apresenta maior taxa fotossintética na captação de CO₂ da atmosfera. Adapta-se a grandes variedades de temperatura, escassez de água e intensidade luminosa, necessitando de grande quantidade de água para o suprimento hídrico (SEGATO et al., 2006).

A planta se reproduz de forma sexuada, porém o cultivo comercial é feito através do plantio de pedaços do colmo, por propagação vegetativa (SILVA et al., 2010), contendo as gemas, das quais são responsáveis pela brotação, constituindo uma fase importante no ciclo da cultura, pois o processo de transição da gema do estado de dormência para o de crescimento ativo é um fenômeno complexo, sendo sensível às variáveis ambientais (MALAVOLTA, 1964; SILVA, 2004; MAGALHÃES, 2015).

Para o crescimento da cana-de-açúcar há vários componentes fenológicos como o número de perfilhos, densidade dos colmos, a altura dos colmos, que são de controle genético, mas que estão sujeitos a influências ambientais (SUGUITANI, 2006). O crescimento da planta pode ser dividido em três etapas, em cuja primeira fase o crescimento da planta é lento e vai até 200 dias após o plantio. Na segunda fase, o crescimento se torna rápido e dura de 200 a 400 dias após o plantio e a planta acumula 75% do total de sua massa. Na fase final, o crescimento se torna lento, o acúmulo chega a 11% de sua massa total. Essa fase pode durar de 400 a 500 dias após o plantio (Machado et al., 1982). Os processos fisiológicos podem variar de acordo com as fases de desenvolvimento da planta, no caso da cana-de-açúcar, esses processos podem ser classificados como brotação, perfilhamento, crescimento, maturação e florescimento (CASAGRANDE, 2008).

A principal finalidade na produção de cana-de-açúcar é a produção de sacarose para a fabricação de açúcar, produção de álcool como fonte alternativa de combustível e bebida

destilada. Contudo o que sobra, seu melaço pode ser utilizado para fabricação de rações e o bagaço utilizado pela indústria na geração de energia elétrica e na alimentação animal.

3.2 A VARIEDADE RB92579

Os cultivos comerciais de cana-de-açúcar buscam variedades cada vez mais adaptadas às condições edafoclimáticas da região ao qual será inserida, fazendo que novas tecnologias inseridas no campo transformem em incremento de produtividade aos canaviais brasileiros.

Com a instalação no ano de 1969 da PLANALSUCAR - Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar, designado para atuar como área de pesquisas no antigo IAA – Instituto do Açúcar e do Alcool, seguido da implantação da RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (DAROS et al., 2015). Variedades de importância econômica foram desenvolvidas ao longo dos anos de pesquisa, com destaque para a RB867515, com cerca de 25% e RB92579, com cerca de 10% de toda a área de cana-de-açúcar do Brasil (BRAGA et al., 2018).

A RB92579 tem sido plantada nas regiões do litoral e zona da mata nordestina. Devido a ocorrência das chuvas nesta região ser frequentemente nos períodos de março a agosto, os cultivos em épocas mais secas são dependentes da irrigação (ABREU et al., 2013).

A liberação da variedade RB92579 ocorreu em 2003 e foi de grande aceitabilidade por parte dos produtores. A sua genealogia é resultado do cruzamento entre a variedade RB75126 fecundada com pólen da variedade RB72199. A RB92579 tem característica de crescimento ereto, arquitetura foliar com pontas curvas, copa de volume regular e tonalidade intermediária, folhas de limbo largo e fraco serrilhamento do bordo, difícil despalha, palmito curto de seção circular de cor verde-roxa e fraca presença de cera, colmos com entrenós cilíndricos de comprimento e diâmetro médios de aspecto manchado com pouca cera, de cor roxa ao sol e amarelo-verde sob a palha e gema do tipo triangular. Um dos fatores que a levam a ter grande aceitabilidade está relacionado às suas características agroindustriais, pois é altamente responsiva à irrigação e muito eficiente no uso da água, além de apresentar boa recuperação após períodos de seca e possuir alto teor de açúcares totais recuperáveis (ATR) (DAROS et al., 2015).

O requerimento hídrico total da cana-de-açúcar irrigada, cultivada por aproximadamente 12 meses na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba – PB, é de 1205,14 mm, capaz de produzir volumes superiores a 100 t ha⁻¹ de colmo (CARVALHO, 2009; SABOYA, 2014)

3.3 IRRIGAÇÃO

A irrigação da cana-de-açúcar é uma prática que tem elevado a produtividade da cultura e o custo de produção, por isso, a quantidade de estudos relacionados ao consumo de água pela cultura e ao uso de recursos hídricos para a irrigação vem-se tornando cada vez mais frequentes (TEODORO et al., 2013).

A irrigação da cana-de-açúcar em pequenas e médias áreas, com nível tecnológico intermediário é economicamente menos atrativa, mas ao advento de novas tecnologias esse uso está se tornando mais frequente uma vez que os custos de implantação do sistema estão diminuindo, ainda sim, são custos elevados, chegando a R\$ 20 mil ha⁻¹ para sua implantação e R\$13,5 mil ha⁻¹ para sua manutenção anual. Contudo, em grandes áreas, sobretudo em usinas que utilizam mais tecnologia as vantagens de tais sistemas são mais evidentes (COELHO, 2007; BARBOSA, 2019; RPA NEWS, 2022).

Para dar suporte à formulação de calendários de irrigação as pesquisas têm sido guiadas sob quatro enfoques de manejo da irrigação: irrigação total, irrigação suplementar, irrigação com déficit e irrigação de “salvação”. Uma irrigação ótima implica menores lâminas aplicadas em relação à irrigação plena, com consequente redução da produtividade da cultura, porém com algumas vantagens significativas (FRIZZON, 2007).

Na irrigação com déficit, planeja-se atender somente uma fração da demanda de água da cultura por evapotranspiração. Esse tipo de manejo pode ser praticado com irrigação total e com irrigação suplementar. O déficit de água pode ser imposto durante todo o ciclo da cultura ou somente nas fases não críticas ao déficit hídrico. Neste último caso, são possíveis menores reduções na produtividade da cultura (FRIZZONE, 2007).

Considerando as condições de campo, a média de consumo hídrico da cana-de-açúcar em diferentes ambientes pode variar de 2,3 mm dia⁻¹ até 6,1 mm dia⁻¹. Apesar do grande número de informações sobre a demanda d'água na cana-de-açúcar em vários lugares do mundo, a lâmina d'água total exigida em condições irrigadas depende das condições do

tempo, da variedade, do ciclo (cana planta ou soca) e da fase fenológica, podendo chegar ao consumo máximo de $8,6 \text{ mm dia}^{-1}$ (SCARDUA, 1987; PERES, 1988; MONTEIRO, 2009; TEIXEIRA, 2016; AVILEZ, 2018). Uma irrigação é considerada de alta qualidade quando o teor de água no solo é mantido com valores adequados durante o desenvolvimento da cultura, e as perdas por evaporação, por escoamento superficial e por drenagem profunda minimizadas (SAAD, 1994).

3.4 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Em condições de campo, a estimativa do conteúdo de água do solo por métodos diretos é de difícil realização em função de uma série de fatores, particularmente, devido ao comportamento dinâmico da fase líquida na sua redistribuição no perfil do solo (BRAGANÇA, 2005). Em função das dificuldades envolvidas na determinação pontual da umidade do solo pelos métodos diretos, geralmente utilizam-se métodos indiretos para determinar a umidade do solo (MIRANDA et al., 2007).

A determinação precisa da umidade de solo pode ser feita através de métodos indiretos usando sensores calibrados e cálculo da taxa de evapotranspiração (RAMADAN, 2018). Os métodos indiretos são os mais indicados nos estudos de monitoramento de água no solo, devido à praticidade, rapidez e possibilidade de repetição das medidas em um determinado ponto do perfil do solo, sendo estes métodos são bastante utilizados em pesquisas e sistemas de agricultura de precisão (SILVA, 2008). Neste sentido, os principais métodos indiretos para a estimativa do teor de água no solo se fundamentam em parâmetros como a tensão da água no solo (SANCHES, 2022) e a permissividade elétrica relativa do meio (KANZARI, 2012).

O método da tensão da água no solo é uma das técnicas de monitoramento da quantidade de água no solo mais acessíveis (MACEDO, 2008; SANCHES, 2022), este método utiliza sensores chamados de tensiômetros, que medem a umidade do solo, através da tensão de retenção da água do solo no local especificado (BERNARDO, 2006).

O método de permissividade elétrica relativa do meio é uma das técnicas de monitoramento baseados na constante dielétrica do solo. Os mais utilizados são o Time Domain Reflectometry (TDR) ou reflectometria no domínio do tempo, e Frequency Domain

Reflectometry (FDR) ou reflectometria no domínio da frequência, denominada também de técnica por capacitância. (Silva, 2008) (Figura 1).



Figura 1: Sonda TDR HydroSense II (A) e sonda FDR Diviner 2000 (B).

Como o solo se constitui de um sistema trifásico (partículas sólidas, água e ar), a técnica TDR é uma das formas de analisar a propriedade dielétrica do solo, em virtude de a diferença entre as constantes dielétricas da água, do ar e das partículas sólidas que o compõe. As sondas TDR consistem em duas hastes metálicas paralelas de comprimento, que funcionarão como guia de ondas ou linha de transmissão curta. Com TDR inserida no solo, emite-se um pulso eletromagnético, via gerador de sinais, no início das hastes, para então medir o tempo de propagação que esse pulso leva para percorrê-las (COLLIN, 1992). A técnica FDR analisa a propriedade dielétrica do solo, usando a capacitância elétrica para determinar o teor volumétrico de água no solo, onde é criado um campo elétrico de alta frequência ao redor de cada sensor, partindo do tubo de acesso e penetrando pelo solo. A frequência medida é uma função da quantidade de água existente no solo (TEDESCHI, 2014).

3.5 ANÁLISE TEMPORAL DA VEGETAÇÃO COM SENSOR DE MÉDIA RESOLUÇÃO

A atividade fotossintética das plantas, bem como as variações estruturais do dossel, são algumas das informações mais importantes para analisar a saúde de uma cultura agrícola. Há

algumas décadas, a análise desses fenômenos tem sido feita utilizando índices de vegetação, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), realizando cálculo aritmético de canais espectrais dos sensores, na maioria dos casos provenientes de satélites. Desta forma, as aplicações dos cálculos de NDVI na agricultura são várias, seguindo a fórmula:

$$\text{Reflectância} = (\lambda\text{NIR} - \lambda\text{RED}) / (\lambda\text{NIR} + \lambda\text{RED})$$

em que λNIR e λRED são, respectivamente, as refletâncias nos comprimentos de onda no infravermelho próximo (842 nm) e vermelho (665 nm).

A fórmula da equação acima é realizada em cada pixel, resultando num valor final entre -1 e 1. Quanto mais próximo de 1, maior é a atividade vegetativa no local representado pelo pixel. Valores negativos ou próximos de 0 indicam áreas de água, edificações, solo nu, enfim, onde há pouca ou nenhuma atividade clorofilada (ENGESAT, 2022).

Obtidos a partir de imagens de satélites processadas *off-line*. Nos últimos anos, esse processamento tem sido feito na nuvem (*on-line*), graças ao Google Earth Engine. O Google Earth Engine (GEE) é ferramenta gratuita, sua geração e visualização de perfis temporais dos Índices de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) é baseada na hospedagem em nuvem e projetada para fornecer acesso instantâneo do Sentinel-2 MSI (Instrumento Multiespectral, Nível 2A). A arquitetura do sistema baseia-se em um banco de dados geoespacial modelado para armazenar as séries temporais de imagens e garantir consultas instantâneas e atualização eficiente (AMANI, 2020; TAMIMINIA, 2020; GOOGLE, 2022).

Os compósitos Sentinel-2 são construídos a partir de pixels de qualidade multiespectral de ampla extensão, de alta resolução e multiespectral missão de imagiologia de apoio aos estudos de monitorização de terras do Copernicus, no período de revisita de 5 dias e resolução espacial de 10 metros. com 12 bandas espectrais variando de 442 nm até 2.202 nm (GOOGLE, 2022; EMBRAPA, 2021).

A alta frequência de cobertura de nuvens no nordeste do Brasil dificulta bastante a aquisição de dados de sensoriamento remoto. O litoral nordestino é coberto por uma nebulosidade constante em torno dos 80%. Portanto, o monitoramento via sensoriamento remoto por satélite da cultura da cana-de-açúcar é bastante dificultado (SILVEIRA, 2017).

3.6 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (ARPS)

As ARPs remontam ao século 19, quando os austríacos utilizavam balões sem tripulantes para atacar alvos em Veneza, com o objetivo de resistir a ambientes hostis e para trabalhos pesados onde seriam de difícil acesso para o ser humano. Hoje é aplicado em diferentes setores da sociedade, principalmente na agricultura (UBIRATAN,2015; JORGE, 2018).

Segundo Polo et al. (2015) uma maneira de classificar as ARPs é pelo tipo de voo: asas fixas (aviões), asas rotativas (helicóptero) ou multirotores que geralmente têm de duas a oito hélices de rotor, tendo eles a vantagem de pairar para coletar imagens e decolar e pousar verticalmente e em balões. Quanto à aplicabilidade, cada tipo tem característica que os destacam para determinados fins. Atualmente a mais usada para monitorar as culturas agrícolas são os multirotores, graças ao custo e a facilidade de operar em diferentes condições de trabalho.

Jensen (2009) afirmava que o imageamento termal aéreo tinha um custo relativamente alto do sensor termal e de mobilização de uma aeronave para aquisição dos dados, além da dificuldade para calibrar e interpretar corretamente a imagem ou dado adquirido. Atualmente, este cenário está sendo alterado. Um dos motivos é porque o uso de ARPs surgiu como uma importante opção na agricultura de precisão, favorecida e facilitada pelo atual estágio de desenvolvimento tecnológico, principalmente pela redução do custo e do tamanho dos equipamentos (JORGE, 2014). Em comparação com sistemas terrestres de sensoriamento, as ARPs têm a capacidade de examinar áreas com maior velocidade e sem perturbar a cobertura presente (BURKART, 2015). Com custo reduzido em comparação com outras plataformas para obtenção de dados, surgiram como um substituto viável e/ou complementar às atuais plataformas de sensoriamento remoto, como satélites e aviões tripulados (SALAMÍ, 2014).

As ARPs fabricados hoje em dia estão se tornando mais tecnificadas, integrando tecnologia de código aberto, mais tempo de voo, sensores inteligentes, fazendo monitoramento agrícola e tomando decisões mais rapidamente. (PURI, 2017). As principais vantagens no uso de ARP no sensoriamento remoto é a captura de imagens mais detalhadas e precisas, permitindo que com o uso de imagens obtidas, limitações possam ser superadas na agricultura, fazendo que exista melhorias na eficiência do uso de recursos, monitorar de áreas

de fácil ou de difícil acesso, supervisionando grandes áreas num curto espaço de tempo. Assim, pode tomar medidas com maior assertividade, visando o bom desenvolvimento das plantas e a produtividade, sendo essa a ferramenta que mais se destaca na atualidade e recursos, com isso a água para irrigação pode ser usada com eficiência quando aplicados análises espaciais e temporais em dados obtidos por meio de ARPs (FLEMING et al., 2000; FOLEY et al., 2011; BASSO et al., 2011; POIRIER-POCOVI, 2020; TEIXEIRA, 2021).

3.7 RADIAÇÃO TERMAL DA SUPERFÍCIE

Dutorchet em 1840 foi o primeiro a medir a temperatura de uma planta e seus órgãos como folhas. Mais tarde, muitos estudos mostraram que a temperatura do dossel da planta é diferente de seu entorno (Krishnan, 2014). Todo objeto com uma temperatura acima do zero absoluto (0 K, - 273 °C, - 459 °F), emite radiação térmica, que o olho humano não pode perceber. A imagem térmica infravermelha é um método de detecção de radiação térmica e criação de uma imagem com base nas informações. A quantidade de radiação liberada por um corpo depende de sua emissividade e temperatura (PRAKASH, 2000), seguindo a Lei de Stefan-Boltzmann, onde (W) é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta (T) e σ é a constante $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$:

$$W = \sigma T^4$$

Portanto, quanto maior a temperatura do corpo, maior a intensidade da radiação emitida pelo objeto (Prakash, 2000; Khanal et al., 2017). A emissividade é uma característica sem unidade de materiais do mundo real que depende de vários fatores, incluindo: comprimento de onda, temperatura, composição do material e características da superfície (incluindo, rugosidade, ângulo e direção). É o fator mais importante de uma superfície que afeta a quantidade de energia que irradia dela (Minkina, 2009).

A nova geração de câmeras com imagem de Infravermelho Térmico foi recentemente desenvolvida para uso com ARPs pequenas. Trata-se de um microbolômetro radiometricamente calibrado não resfriado que é capaz de produzir dados utilizáveis em

softwares específicos dentro do Infravermelho de Ondas Longas de 7,5 μm a 14,0 μm (DEANE, 2020; CRASTES, 2021; TANKUT, 2017; LAURENT, 2018; LEBLANC, 2021).

As câmeras de imagem térmica inferem a temperatura dos objetos por medições sem contato, e fornecem a leitura da temperatura para cada pixel da imagem (BANERJEE, 2018). A interpretação dos dados na faixa do infravermelho de ondas longas entre 8 e 14 μm , tem sido alvo de maior interesse para o sensoriamento remoto termal da superfície terrestre (OLIVEIRA, 2017), permitindo fornecer variabilidade de temperatura sobre o dossel de forma confiável e não invasiva (ZHOU, 2021).

Os sensores térmicos acoplados em ARP trabalham com o mesmo princípio de que os pirômetros, pois procuram medir a maior quantidade possível de energia radiante emitida pelo corpo quente (ROCHA, 1998). Logo, a imagem térmica do dossel da cultura pode fornecer as temperaturas do dossel da cultura e do solo diretamente (BANERJEE, 2018). O imageamento termal é uma técnica rápida e eficaz usada para medir remotamente os parâmetros estomatáticos. Essa técnica pode ser aplicada a quase qualquer escala espacial e temporal, desde mudas em laboratórios até folhas individuais, copas de plantas e culturas de campo inteiras (Jones et al., 2009). Nesse sentido a imagem térmica pode ser usada para medir temperaturas, que podem, então, ser usadas para estimar o estado da água das plantas e, portanto, auxiliar no agendamento da irrigação de várias culturas (Ballester et al., 2013; Struthers et al., 2015; Gerhards et al., 2016; Craparo et al., 2017; García-Tejero et al., 2017).

Um dos desafios do uso eficaz da imagem térmica é a calibração apropriada e a correção da atmosfera/emissividade. A temperatura radiométrica no sensor que é capturada por câmeras térmicas integradas a ARP geralmente precisa ser convertida em temperatura de superfície em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) por meio de correções atmosféricas e de emissividade para aplicações futuras (Sagan et al., 2019). Equações/algoritmos de calibração que são fornecidas pelo fornecedor do sensor ou pelo software de processamento, são aplicados para obter informações sobre a temperatura da superfície. Além disso, o método empírico da linha que se baseia na relação linear entre a temperatura radiométrica no sensor e a temperatura superficial correspondente tem sido utilizado em uma variedade de estudos (TORRES-RUA, 2017; RAEVA, 2018; AGUDO, 2018).

3.8 MONITORAMENTO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA PLANTA

Monitorar o estado da água do solo e da planta em tempo real permite combinar melhor a irrigação com as necessidades da planta, bem como prevenir danos irreversíveis aos sistemas vegetais e efeitos adversos no rendimento da cultura. A temperatura do dossel é considerada um indicador adequado do estado da água da cultura (HIBA, 2017).

Segundo Assunção (1989) o dossel pode ser classificado em duas categorias: incompleto e completo. O dossel incompleto apresenta baixa porcentagem de cobertura do solo, ou seja, cultura agrícola no início do desenvolvimento vegetativo. O dossel completo corresponde à cobertura vegetal próximo de 100%. A taxa de fechamento do dossel é o principal indicador de maior produtividade (LYNCH, 1995).

A temperatura foliar varia próxima a valores correspondentes à temperatura do ar, e esta variação ocorre principalmente em função da abertura estomática. Os estômatos são constituídos por células-guarda que funcionam de forma dinâmica como válvulas hidráulicas sensoriais respondendo a fatores ambientais, como intensidade e qualidade da luz, temperatura, condição hídrica foliar e concentração intracelular de CO₂, e, por isso regulam a abertura e o fechamento estomático (Angellocci, 2002). TRENTIN (2011) observou que na ausência de estresse hídrico e em condições de céu completamente nublado, encontrou diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar de -2,9 °C. Em contraste, sob condições de estresse hídrico severo e valores elevados de radiação solar global, a temperatura foliar atingiu até 6,6 °C acima da temperatura do ar, podendo chegar a 10 °C (FRAGA JUNIOR, 2021).

À temperatura ambiente, como referência, considera-se a emissividade das folhas de plantas no infravermelho térmico na faixa de 0,95-0,98 (DE SOUSA, 2020). A emissividade representa a razão na mesma temperatura entre a energia radiante emitida por uma superfície e a emitida por um corpo negro. Câmeras com sensores termais tem a função de ajustar a emissividade de acordo com as propriedades físicas da superfície do alvo (PORTES, 2018).

À medida que os estômatos se abrem, a perda de água ocorre através da transpiração foliar que, conseqüentemente, resfria a planta, uma vez que o vapor d'água conduzido da folha para a atmosfera transporta o calor acumulado no limbo foliar. Em contrapartida, quando os estômatos se fecham, seja por fatores internos ou externos à planta no continuum solo-planta-atmosfera, a temperatura foliar tende a aumentar em valores acima da temperatura do ar, uma vez que a transpiração, quando interrompida, não mais dissipa o calor acumulado nas folhas (FRAGA JUNIOR, 2021).

Estas oscilações de temperatura foliar ao longo do dia ocorrem naturalmente, mesmo em plantas devidamente supridas por água no solo, pois os estômatos estão constantemente fechando e abrindo em função da redistribuição de água no interior dos tecidos vegetais (mecanismos fisiológicos internos da planta), como também em resposta à variação nos elementos meteorológicos como o déficit de pressão de vapor e a radiação solar (ANGELOCCI, 2002).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada em cultivo de cana-de-açúcar na bacia do rio Miriri, Município de Rio Tinto ($6^{\circ}53'5.32''\text{S}$, $35^{\circ} 2'5.52''\text{O}$), região da Zona da Mata Paraibana, Brasil. A área é destinada a produção de açúcar e etanol (Figura 2).

Experimentos de campo foram realizados no período de 03/2022 a 11/2022 (abrangendo montagem da estação de monitoramento micrometeorológico, instalação de pontos de controle e monitoramento com GNSS RTK e os parâmetros físicos-hídricos do solo), o voo para captura com solo da área do projeto possui um predomínio em sua classificação textural da fração areia (ERICKA, 2022). A variedade da cana-de-açúcar é a RB92579 estando em sua 2^o soca. A precipitação acumulada anual varia entre 1200 e 1700 mm, com período úmido compreendido entre março e agosto, setembro é considerado o mês mais seco e, no restante do ano, as chuvas ocorridas são de forma isolada (FRANCISCO, 2017).

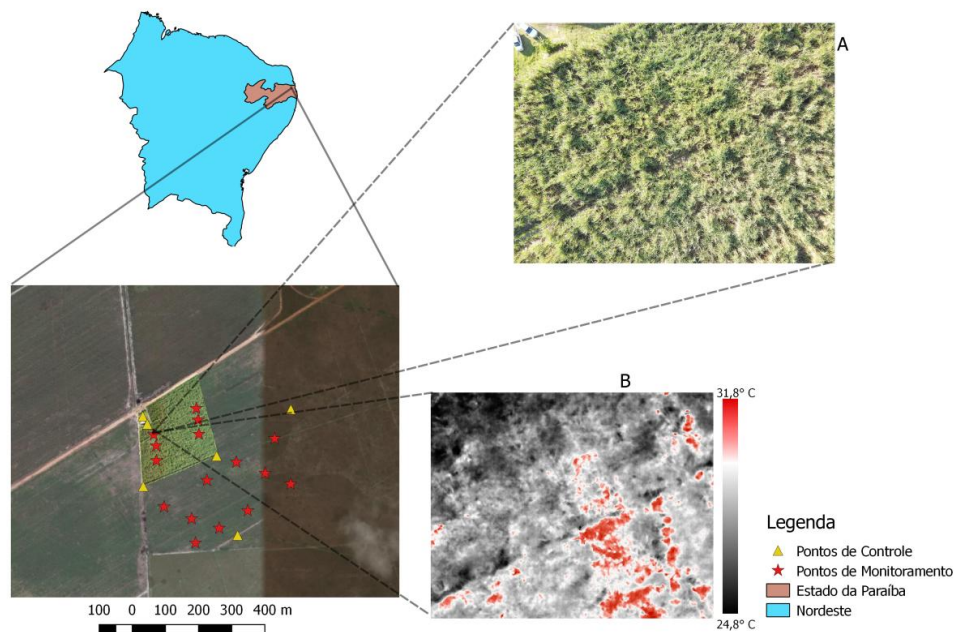


Figura 2: Localização da área de pesquisa com destaque para fotogrametria com resolução de (A) RGB com 2,7 cm / pixel e (B) Termográfica com 8,5 cm / pixel

O local do experimento possui uma área de 18 ha e foi escolhido estrategicamente, sendo este composto por três parcelas de cana-de-açúcar onde o proprietário aplica lâminas com 80, 60 e 40 mm mensais de irrigação, por gotejamento, com objetivo de definir a melhor relação mínima lâmina vs. máxima produtividade (Figura 3).

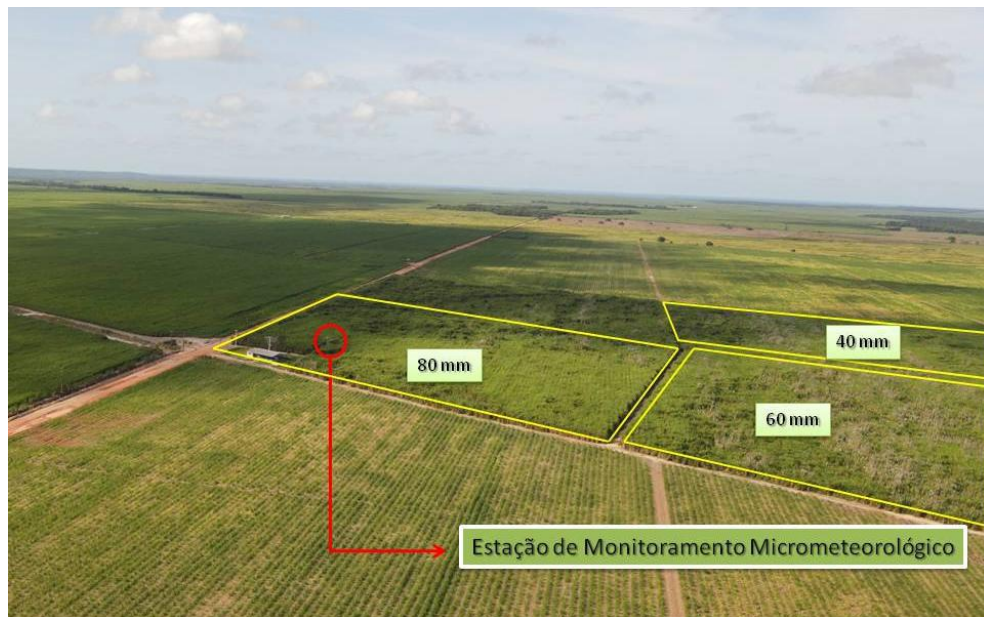


Figura 3: Vista aérea da área de estudo. Os valores em mm indicam as diferentes lâminas mensais de irrigação aplicadas em cada uma das áreas destacadas em amarelo.

4.2 IRRIGAÇÃO

A irrigação é feita com um sistema de gotejamento subsuperficial com mangueiras enterradas a 0,20 m na linha de cana-de-açúcar, emissores autocompensantes tipo labirinto, com vazão de $0,6 \text{ L h}^{-1}$. As irrigações foram executadas diariamente nos meses não chuvosos. Sendo 2 horas de irrigação para a lâmina de 40mm (10:30 às 12:30 h), 3 horas de irrigação para a lâmina de 60mm (16:00 às 19:00) e 4 horas de irrigação para a lâmina de 80mm (16:00 às 20:00).

4.3 DADOS METEOROLÓGICOS

Para obtenção dos dados necessários à pesquisa foi instalada uma estação de monitoramento micrometeorológico com os seguintes instrumentos:

Termo-higrômetro (HMP45 Vaisala) - Sonda de temperatura e umidade relativa (UR). A sonda mede a UR acima da faixa de 0 a 100% de resistência a umidade e temperatura acima da faixa de -40° a +60°C. Esta sonda é adequada para monitoramento de longo prazo, sem vigilância (Campbell, 2022);

Termopar ultrafino (Campbell FW3) - Mede gradientes ou flutuações de temperatura atmosférica com precisão de grau de pesquisa;

Anemômetro sônico (RM Young 81000) - Sensor que mede a velocidade do vento em 3 eixos, para aplicações em estudos de turbulência atmosférica;

Placas de solo Hukseflux – Sensor que mede a taxa de energia transferida através de uma superfície (fluxo de calor no solo);

Pluviômetro (Texas Electronics TR-525) - medidor de chuva estilo balança que mede a precipitação líquida (Texas Electronics, 2022);

Sensores de temperatura do solo (Campbell T109 e Campbell T107) - Sonda que mede a temperatura do ar, do solo e da água para uma variedade de aplicações (Campbell, 2022);

Sensores de umidade do solo (Campbell CS 615 e CS616) - Mede o teor de água volumétrica do meio porosa usando métodos de medição em TDR. A sonda produz uma frequência de oscilação de mega-hertz, que é dimensionada para baixo e facilmente lida por um datalogger (Campbell, 2022).

Os instrumentos da estação micrometeorológica estavam programados para leituras contínuas, a frequência de medição dos sensores varia desde 10 Hz (anemômetro e termopar ultrafino) até 1 minuto (demais sensores), com o registro das médias dos dados foi feito a cada 30 minutos em dois sistemas de aquisição e armazenamento Campbell CR1000 e Campbell CR1000X (Figura 4).

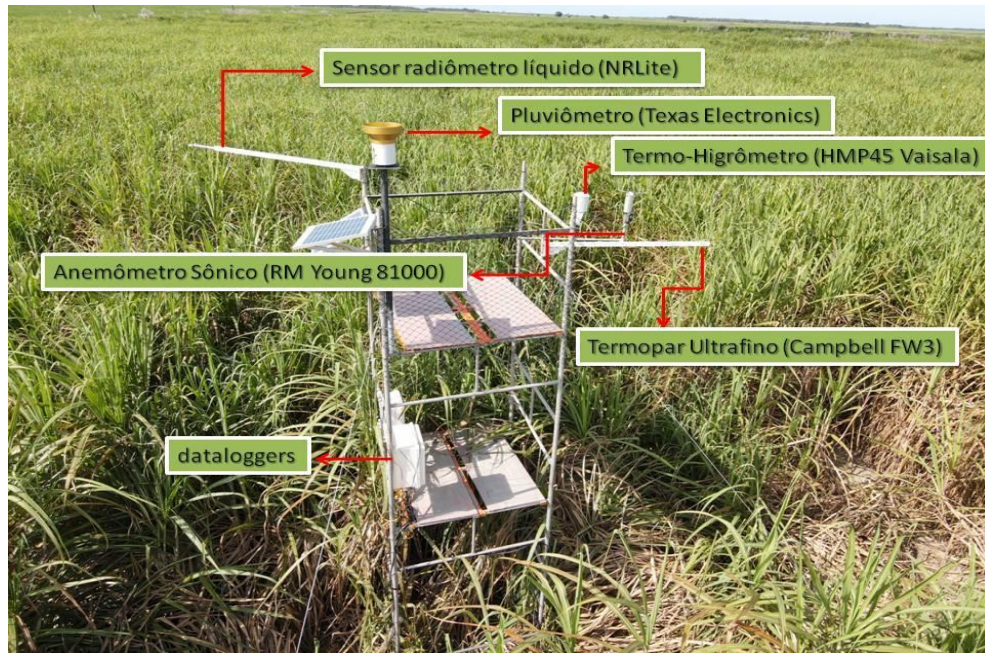


Figura 4: Estação micrometeorológica instalada na área do experimento.

4.4 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

A série temporal do índice de vegetação NDVI nas lâminas de 80, 60 e 40 mm, foi gerada a partir das reflectâncias medidas pelo sensor multiespectral MSI a bordo do satélite Sentinel-2. Essa série compreende o período correspondente ao último ciclo da cultura na área de estudo, que se estende de 06/2020 a 09/2022. As séries temporais foram coletadas a partir do Google Earth Engine. Para obtenção do índice, foi utilizado um filtro para retornar apenas os pixels com no máximo 20 % de cobertura de nuvens.

4.5 IMAGEAMENTO TERMAL

O voo foi realizado em 16/11/2022, a ARP utilizada neste trabalho foi o modelo Mavic 2 Enterprise Advanced (M2EA), o qual realiza a aquisição de imagem de sinais visíveis e dados de imagem termográfica. O M2EA está equipado com câmeras de luz dupla avançadas, incluindo uma câmera de imagem termográfica com resolução de 640×512 e uma câmera de 48 megapixels na banda do visível usando um sensor CMOS de 1/2 polegada (Tabela 1).

Tabela 1: Principais características das câmeras empregadas

Características	Câmera termográfica	Câmera red, green e blue (RGB)	Foto
Sensor	Microbolômetro VOx sem ventilação	CMOS de 1/2"; Píxeis efetivos: 48 MP	
Distância focal	38 mm	24mm	
Resolução do sensor	640×512 a 30 Hz	8000×6000	
Alcance espectral	8-14 µm	-	
Dimensão da imagem	640×512	8000×6000	
Formato de foto	R-JPEG	JPEG	

O trajeto de voo foi feito na plataforma Google Earth Pro, tendo sido gerado um arquivo kml, o qual foi importado no software de preparação de planos de voo (DJI Go). Foi adotado um recobrimento lateral de 70% e frontal de 80 % em voos de 80 m de altura.

Tendo em vista que a leitura feita pela câmera termal precisa ser corrigida (vide seção 3.7), foram utilizados materiais diversos (papelão, folha de alumínio, plástico preto, protetor solar de para-brisa em alumínio e piso cerâmico frente e verso), e folha do dossel para determinar a temperatura dos objetos em solo para servirem de referência para tal correção. A determinação da temperatura em solo foi realizada utilizando pirômetro de sensor infravermelho de - 50 °C a + 550 °C, de emissividade ajustável, exatidão: 0°C ± 2°C/2% (0° a 550°C), distância focal: 12:1, portátil, modelo ST-620, marca INCOTERM. O termômetro foi posicionado a uma distância de 50 cm dos alvos, 10 cm da folha de cana-de-açúcar e ajustando a uma emissividade de 0.95 para todos os alvos (Figura 5).

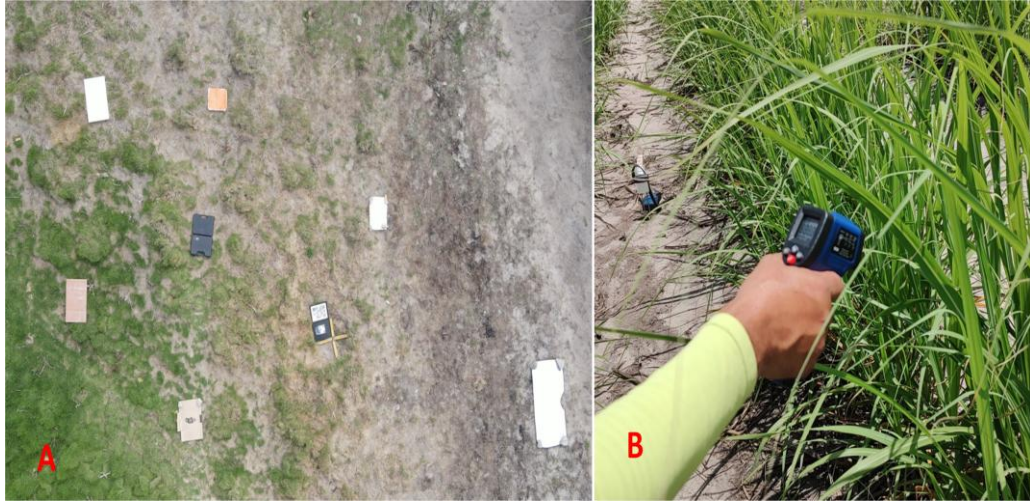


Figura 5: Alvos para aferição de temperatura em solo, (A) papelão, folha de alumínio, plástico preto, protetor solar de para-brisa em alumínio, piso cerâmico frente e verso e (B) folhas no dossel.

4.6 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

As análises termográficas nas imagens foram feitas de forma individual, com o software DJI Thermal Analysis Tool 2 e posteriormente as imagens foram mosaicadas na plataforma Pix4Dmapper, a correção geométrica das imagens foram feitas através de pontos colocados estrategicamente na área de experimento com a utilização do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) e o mosaico foi exportado em GeoTiff para o software QGIS, versão 3.28.0 para determinar uma equação de regressão no Excel com valores dos pixels de cada objeto em solo gerado em 8 bits com Pix4D e gerar a temperatura em cada pixel na calculadora de índice do Pix4Dmapper (Figura 6).

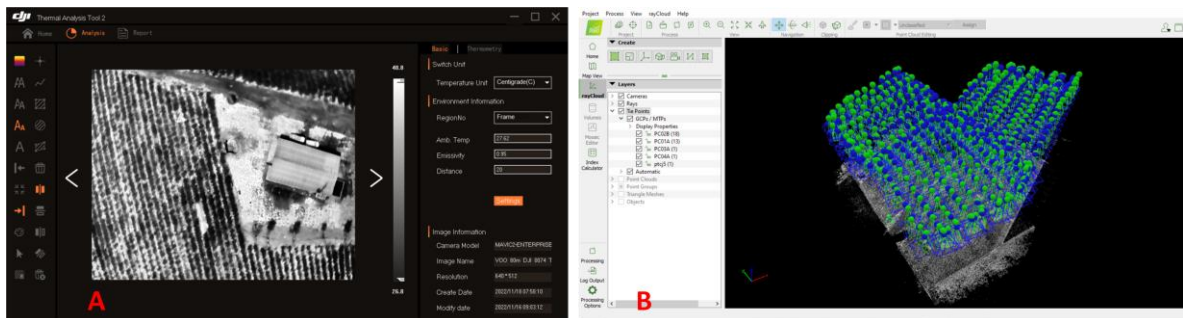


Figura 6: Software DJI Thermal Analysis Tool 2 (A) e software Pix4Dmapper, usado na análise de temperatura e índice de pixel (B).

Para a obtenção de dados especializados do conteúdo de água no solo, utilizou-se, o medidor de umidade do solo, modelo Hydrosense II (com sonda CS658 de 20 cm; Campbell Scientific), a qual constitui um tipo de sonda TDR. Os valores de umidade foram coletados em 9 pontos georeferenciados por GNSS RTK, sendo 3 pontos para cada parcela, cada ponto obteve 5 amostras e realizado a média das 5 amostras para cada ponto (Figura 7).

Os valores de temperatura médio nos 9 pontos foram obtidos através de buffer com raio de 10 m e média 19.732 pixels por ponto, gerados a partir de GeoTiff obtido com a temperatura no Pix4Dmapper e transferido para o software QGIS



Figura 7: Hydrosense II com sonda CS658 de 20 cm.

5 RESULTADOS e DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE TEMPORAL DE VEGETAÇÃO

Os gráficos A, B e C mostram uma boa resposta do NDVI em relação aos estágios de crescimento da cultura: rebrota (08/2020), fase 1 (08/2020 a 01/2021) e fase 2 (01/2021 a 05/2021). Os valores mínimos de NDVI ($<0,2$) representam as transições da cobertura do solo, isto é, plantio ou rebrota de cana-de-açúcar no solo em (08/2020) e (09/2022). Do início da série temporal até o mês de maio de 2021 pode-se observar valores de NDVI se elevando ao longo do período em função da crescente cobertura vegetal frente ao solo exposto. Em junho de 2021 é possível ver uma pequena queda no gráfico sugerindo que a diminuição do NDVI no gráfico seja pela diminuição da fotossíntese. Foi verificado também que não é possível obter uma linha temporal fina devido à filtragem de nuvens (Gráfico 1).

SOUZA (2018) descreve que entre os três a quatro meses de desenvolvimento, em que são registradas as maiores taxas de fotossíntese, a cana forma uma copa operacional. Após atingir esse estágio e até os seis meses de desenvolvimento, a cada folha produzida pela planta outra folha abaixo da copa começa a envelhecer. A planta começa a armazenar sacarose, no colmo e nas raízes, e amido nas folhas até os 12 meses. Nessa fase, a cana-de-açúcar praticamente deixa de fazer fotossíntese.

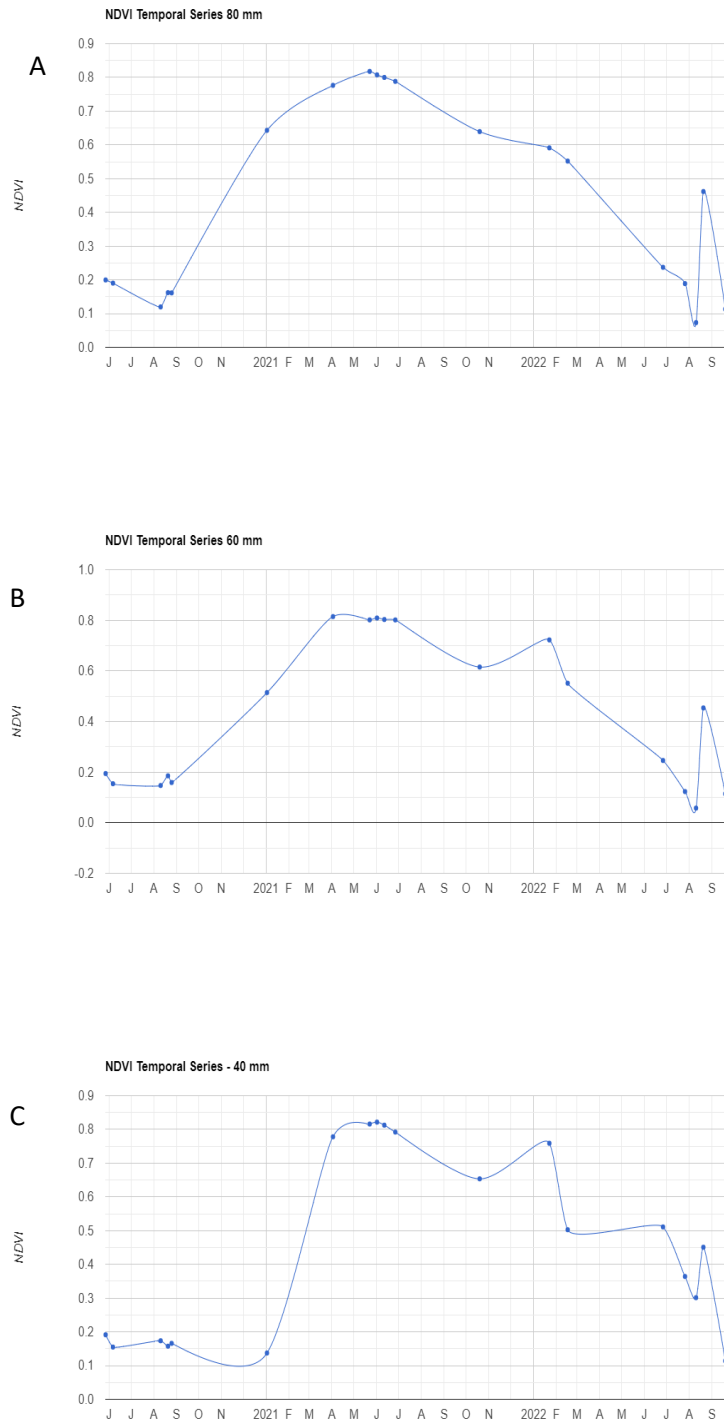


Gráfico 1: perfil temporal de NDVI em área de cana-de-açúcar recuperado no GEE, utilizando o satélite Sentinel-2, pré-filtragem com máximo 20% de nuvens. (A) área com lâmina de 80 mm, (B) área com lâmina de 60 mm e (C) área com lâmina de 40 mm.



Figura 8: Polígonos criados no GEE delimitando as áreas para obtenção do NDVI.

5.2 RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURAS MEDIDA

No Gráfico 2 estão apresentadas temperaturas dos alvos em solo no ARP ajustados com temperatura do ar 27,62 °C e emissividade em 0,95 no software DJI Thermal Analysis Tool 2 e valores de temperatura dos objetos que estão posicionados em solo, com a ajuda de pirômetro ajustado a uma emissividade de 0,95 uma vez que todos os alvos adotados possuem essa emissividade, onde é possível observar que existe uma boa relação entre a temperatura dos objetos medidos em solo e a temperatura obtida com câmera térmica em voo a 80 m de altura.

O erro na estimativa da temperatura a partir da câmera termográfica dependerá das características da câmera (resolução do sensor, distância focal, distância entre pixel, alcance espectral etc.). Qualquer viés desse tipo não pode ser compensado apenas pelo software, uma vez que a correção da temperatura no Pix4D leva em consideração as características especificadas. Na prática, usar como referência uma medição de temperatura local no solo é a solução mais simples e eficaz (Pix4D, 2018).

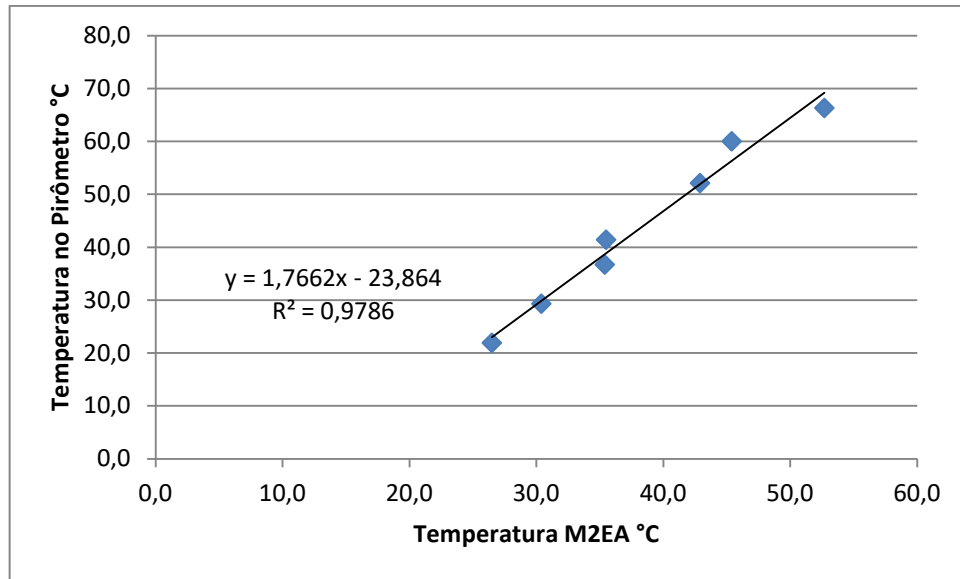


Gráfico 2: Relação entre temperaturas medidas nos alvos utilizando o pirômetro (referência) e a partir da câmera termográfica instalada no M2EA

5.3 CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA COM DADOS OBTIDOS EM CAMPO

Os alvos serviram para se registrar os valores da temperatura com o pirômetro e do ortomosaico foram extraídos valores dos números digitais de pixels em 8 bits, a partir de então, realizou-se a calibração radiométrica das imagens.

No Gráfico 3 é possível observar uma regressão linear de 0,93 entre temperatura medida em solo com pirômetro (referência) e o número digital dos pixels, gerado a partir da emitância dos alvos no comprimento de onda de 10,5 μm , obtida no processamento das imagens termográfica no software Pix4Dmapper e analisado os pixels dos alvos no QGIS.

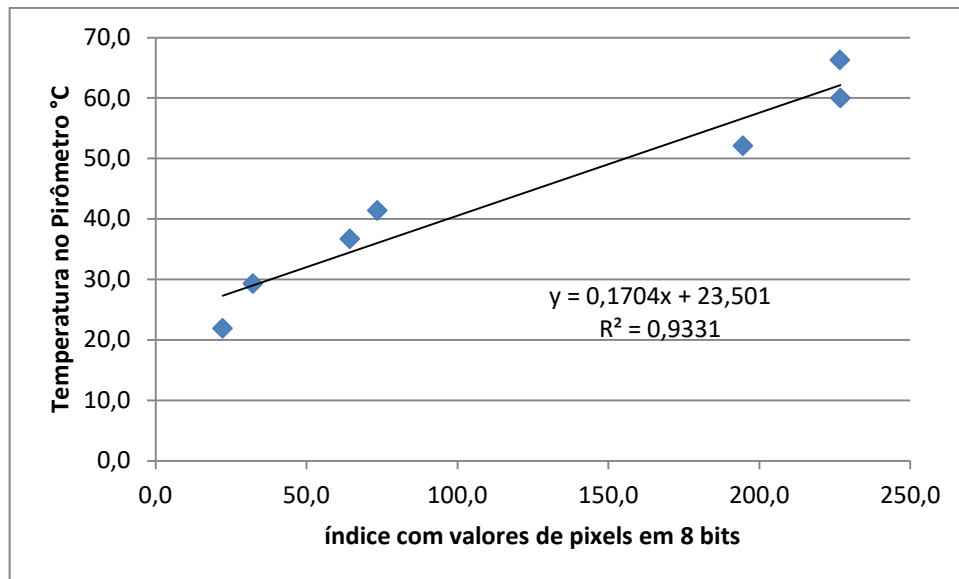


Gráfico 3: Obtenção da equação através de regressão entre temperaturas medidas nos alvos com pirômetro e índice gerado no ortomosaico do Pix4Dmapper.

5.4 ANÁLISE DE ÍNDICE TÉRMICO

Após o processamento das imagens e geração do ortomosaico, corrigidas previamente de modo indireto, com auxílio de alvos, foram gerados mapas térmicos com resolução espacial de 12,3 cm/pixel. A partir desses mapas, foram obtidos os percentuais de áreas para diferentes faixas de temperaturas. Observa-se que a lâmina de 40 mm e 60 mm são as que possuem menor porcentagem de área com menor temperatura e a lâmina de 80 mm possui maior porcentagem em área com menor temperatura podendo realizar uma análise qualitativa do estresse hídrico na cultura da cana-de-açúcar e permitindo identificar que na parcela com aplicação diária de $1,2 \text{ l m}^{-2}$, necessita de maior tempo de irrigação para melhor desenvolvimento da cana-de-açúcar tendo em vista que nessa parcela foi identificada a área com menor quantidade de temperatura próxima a temperatura ambiente e sua produção em colheita anterior foi 10 % menor que a área com $2,4 \text{ l m}^{-2}$ diário ($150,06 \text{ t ha}^{-1}$), mostrando que ARPs com câmera térmica é uma boa ferramenta como método indireto, uma vez que permite reduzir tempo para estimar o estado da água das plantas (Figura 9).

Lâmina de 40mm

Color	Min	Max	Area [ha]	Area [%]
	54.48	61.65	0.14	2.08
	47.32	54.48	0.82	12.10
	40.15	47.32	1.81	26.84
	32.99	40.15	2.67	39.57
	25.82	32.99	1.31	19.41

Lâmina de 60mm

Color	Min	Max	Area [ha]	Area [%]
	54.48	61.65	0.43	6.36
	47.32	54.48	1.00	14.82
	40.15	47.32	1.51	22.38
	32.99	40.15	1.89	27.97
	25.82	32.99	1.92	28.48

Lâmina de 80mm

Color	Min	Max	Area [ha]	Area [%]
	54.48	61.65	0.27	5.98
	47.32	54.48	0.67	14.81
	40.15	47.32	1.01	22.51
	32.99	40.15	1.27	28.17
	25.82	32.99	1.29	28.52

Figura 9: Índices térmicos mínimo e máximo em °C, em três diferentes lâminas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar.

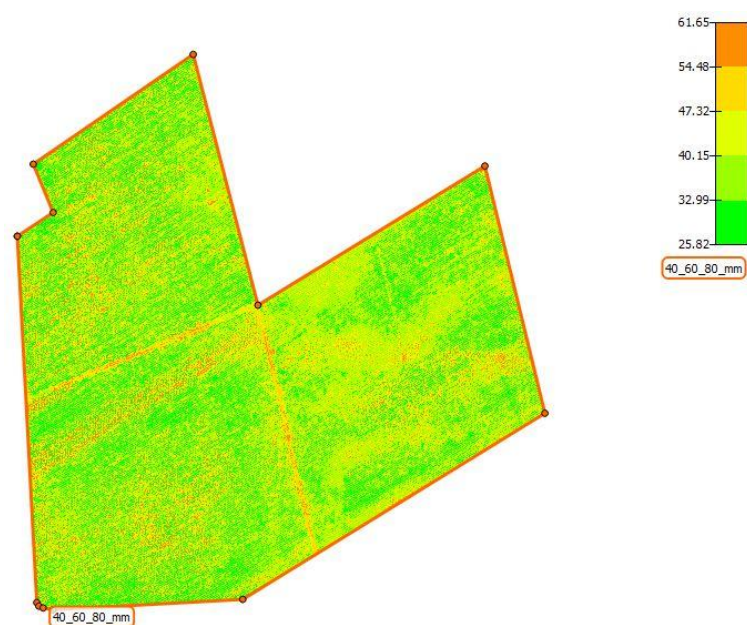


Figura 10: Mapa de temperatura da área de pesquisa

5.5 RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO SOLO E UMIDADE DO SOLO

A estimativa de quantidade de água subsuperficial no solo feita com a Hydrosense II não fica caracterizada quando se utiliza ARP com sensor térmico (Gráfico 4). Talvez devido as imagens obter apenas estimativa de temperatura da superfície do solo, permitindo identificar onde ocorrem superfícies mais aquecidas e subestimar que essa superfície não vá ter umidade suficiente à está disponível para a planta. Isso possa ocorrer por a área de estudo ser muito ampla e conter manchas de solo, necessitando uma caracterização física do solo de cada ponto.

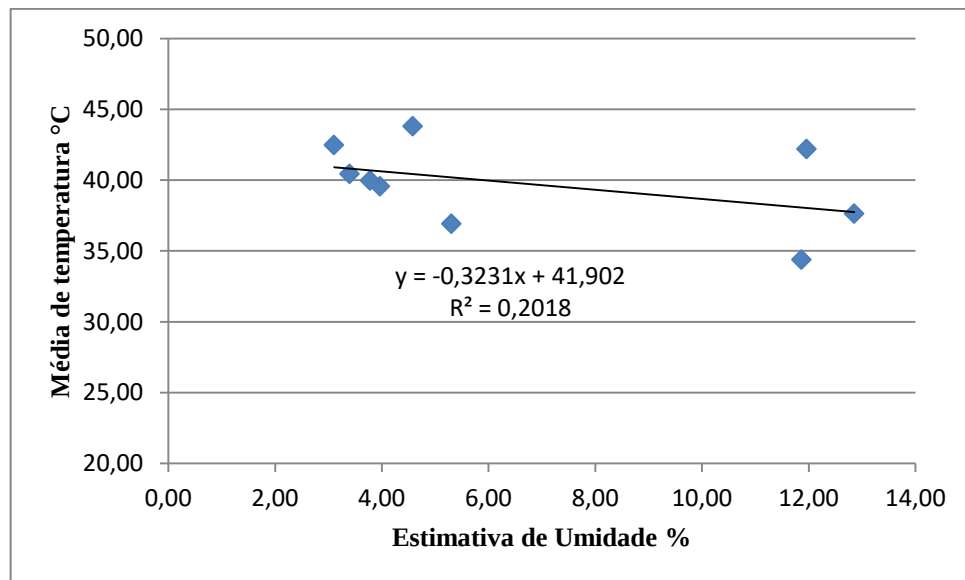


Gráfico 4: Caracterização da média da estimativa de água no solo e média de temperatura no raio de 10 m de cada ponto de controle.

6 CONCLUSÃO

O sensoriamento térmico com uso de ARP a 80 m de altura possibilitou a análise de mapas térmicos gerados a partir de software com geração de ortomosaico.

O método de estimar cobertura vegetal por NDVI com o uso do GEE, não é tão interessante quando se busca tomar decisões rapidamente, pois mesmo passando a cada 5 dias o Satélite Sentinel-2, a cobertura da imagem por nuvens o torna ineficiente quando se quer esses dados e o GEE não consegue filtrar, tendo em vista que a área de estudo é uma área litorânea, possuindo a maior parte do tempo nebulosidade.

A comparação entre quantidade de água no solo em subsuperfície e a temperatura obtida pelo ARP com câmera térmica, não foi possível estimar a quantidade de água no solo, tendo em vista que a imagem térmica só consegue analisar a superfície do solo. Sugerindo que é necessário mais estudo diferenciando a temperatura superficial, classificação textural do solo e quantidade de água no solo subsuperfície.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. L.; SILVA, et al. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 3, p.262-270, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA), Atlas Irrigação - Uso da Água na Agricultura Irrigada, 2017, Agência Nacional de Águas. -- Brasília: **ANA**, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA), Levantamento da Cana-de-Açúcar Irrigada na Região Centro-Sul do Brasil. Agência Nacional de Águas. -- Brasília: **ANA**, 2017. 31p.

AGUDO, Paula Uribe et al. The potential of drones and sensors to enhance detection of archaeological cropmarks: A comparative study between multi-spectral and thermal imagery. **Drones**, v. 2, n. 3, p. 29, 2018.

AMANI, M. et al. Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 5326-5350, 2020.

ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba: R. L. Angelocci, 2002.
<https://repositorio.usp.br/item/001269531>.

ARTIOLI, F; BELONI, T. Diagnóstico do perfil do usuário de Drones no Agronegócio Brasileiro. **Revista IPecege**, v. 2, n. 3, p. 40-56, 2016. DOI:
<http://dx.doi.org/10.22167/r.ipecege.2016.3.40>.

ASSUNÇÃO, G. V. **O sensoriamento remoto na agricultura**. São José dos Campos: INPE, (INPE-4806-MD/39). 1989. 217p.

AUDE, Maria Isabel da Silva. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência rural**, v. 23, p. 241-248, 1993.

AVILEZ, A. M. A. et al. Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 171-188, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2018v1n1p171-188>

BALLESTER, C. et al. Thermographic measurement of canopy temperature is a useful tool for predicting water deficit effects on fruit weight in citrus trees. **Agricultural water management**, v. 122, p. 1-6, 2013.

BANERJEE, K.; KRISHNAN, P.; MRIDHA, N. Application of thermal imaging of wheat crop canopy to estimate leaf area index under different moisture stress conditions. **Biosystems Engineering**, v. 166, p. 13-27, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.012>.

BANERJEE, V. et al. Crop Status Index as an indicator of wheat crop growth condition under abiotic stress situations. **Field crops research**, v. 181, p. 16-31, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.06.009>.

BARBOSA, A. B.; MARTINS, E. A. Irrigação Automatizada para Pequenas Propriedades. **Anais Sintagro**, v. 11, n. 1, 2019.

BASSO, B. et al. Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. **Sci. Total Environ.** 2016, 545–546, 227–235.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006, 625p

BRAGA, R. L. C. et al. Censo Varietal Iac No Brasil - Safra 2016/17 e na Região Centro-Sul – Safra 2017/18. **A/C Revista Canavieiros**. Sertãozinho – SP, fev. 2018, n. 140, 120 p.

BRAGANÇA, R. et al. Avaliação da umidade de um Latossolo da região sul do estado do Espírito Santo por diferentes métodos de determinação. In: **IX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**, 2005, São José dos Campos. Anais. 2005, v.único, p.643-646.

BRUNINI, R. G.; TURCO, J. E. P. Índices de estresse hídrico para a cultura de cana-de-açúcar em diferentes superfícies irrigadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 10, p. 925-929, 2016. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n10p925-929

CAMPBELL SCIENTIFIC BRASIL. (2022). **linha de produtos**. Disponível em: <https://www.campbellsci.com.br/products>. Acesso em:18/11/2022.

CANDIAGO, S. et al. Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. **Remote Sensing**, v.7(4): 4026-4047, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70404026>

CÂNDIDO, A. F.; NASCIMENTO, R. S.; BORGES, V. P. IMPACTOS Agroclimáticos para Culturas Agrícolas no Estado da Paraíba Sob Condições de Mudanças Climáticas. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 1, p. 105-126, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n1p105-126>.

CARNEIRO, E. A. et al. Parâmetros Físicos-Hídricos do Solo Visando a Detecção do Déficit Hídrico em Área de Cana-De-Açúcar. **XVI simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste e 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**. 2022. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14289>. Acesso em 05 de dezembro de 2022.

CARVALHO, C. M. et al. Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 72-77, 2009. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v4i1a12>

CARVALHO, S. A. D.; FURTADO, A. T. O melhoramento genético de cana-de-açúcar no Brasil e o desafio das mudanças climáticas globais. **Gestão & Conexões: Management and Connections Journal**, v.2, n.1, p.22-46, 2013.

CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A.C M.; ANDRADE LANDELL, M. G. DE. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 57-78.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar, seringueira, coqueiro, dendezeiro e oliveira. **Cosmópolis: Stoller do Brasil**, p. 138, 2001.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. **Functional plant biology**, v. 30, n. 3, p. 239-264, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP02076>.

Climate FieldView. **Conheça 12 funções dos drones na agricultura**. 2022. Disponível em: <https://blog.climatefieldview.com.br/drones-agricultura>. Acesso em 07 de dezembro de 2022.

COELHO, R. D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no brasil**. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 192 p., 2007.

CRAPARO, A. C. W. et al. Application of thermography for monitoring stomatal conductance of Coffea arabica under different shading systems. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 755-763, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.158>.

CRASTES, A. et al. Recent uncooled IR development based on state of the art digital ROIC. In: **Infrared Sensors, Devices, and Applications XI**. SPIE, 2021. p. 40-49. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2593706>.

DA SILVA, T. G. F. et al. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 64-71, 2012.

DAROS, E.; OLIVEIRA, R.A.; BARBOSA, G.V.S. **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa**. Curitiba: Graciosa, 2015. 156 p.

DE MIRANDA, F.R., et al. Calibração do sensor dielétrico ECH2O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, n.3, p.317-321, 2007.

DE SOUSA, C. A. F. et al. **Uso de câmeras térmicas embarcadas em aeronaves remotamente pilotadas, visando à fenotipagem de plantas**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2020.

DEANE, S. et al. **Comparison of cooled and uncooled ir sensors by means of signal-to-noise ratio for ndt diagnostics of aerospace grade composites**. *Sensors*, v. 20, n. 12, p. 3381, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123381>.

DJI. (2022). **Mavic 2 Enterprise Advanced**. Disponível em: <https://www.dji.com/br/mavic-2-enterprise-advanced>. Acesso em:19/11/2022.

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).

DUFT, D. G. et al. Identificação de fechamento de dossel de cana-de-açúcar através de imagens de VANT. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto –SBSR**. 2017.

EBLANC, G. et al. A Practical Validation of Uncooled Thermal Imagers for Small RPAS. **Drones**, v. 5, n. 4, p. 132, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5040132>.

EMBRAPA. **SENTINEL - Missão Sentinel**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel> Acesso em 05 de dezembro de 2022.

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

ESQUERDO, J. C. D. M. et al. SATVeg: A web-based tool for visualization of MODIS vegetation indices in South America. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, p. 105516, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105516>.

FLEMING, K. L. et al. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. **Precis.Agric.**2000, 2, 201–215.

FOLEY, J. A. et al. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, 2011, 478, 337–342.

FRAGA JUNIOR, L. S. **Medição da temperatura do dossel da cana-de-açúcar por sensores de infravermelho fixados no pivô central**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.11.2021.tde-03082021-105915>.

FRANCISCO, P. R. M.; DJAIL, S. **Climatologia do Estado da Paraíba**. EDUEFCG, Campina Grande – PB, 2017.

FRIZZONE, J. A. Planejamento da irrigação com uso de técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 1, n. 1, p. 24-49, 2007. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v1n100107>.

GALVINCIO, J. D. Estimativa da temperatura da superfície com imagens obtidas com drones. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**. v.9, n.6, 2019.

GARCÍA-TEJERO, I. F. et al. Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. **Agricultural Water Management**, v. 188, p. 50-60, 2017.

GERHARDS, M. et al. Water stress detection in potato plants using leaf temperature, emissivity, and reflectance. **International journal of applied Earth observation and geoinformation**, v. 53, p. 27-39, 2016.

GOOGLE. **Catálogo de Dados do Earth Engine**. 2022. Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR>. Acesso em 07 de dezembro de 2022.

HETHERINGTON, A. M.; WOODWARD, F. I. The role of stomata in sensing and driving environmental change. **Nature**, v. 424, n. 6951, p. 901-908, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01843>.

HIBA, G. et al. **Potential of Thermal Images and Simulation Models to Assess Water and Salt Stress: Application to Potato Crop in Central Tunisia**. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1758119>.

HITCHCOCK, A. S. Type species of the first 100 genera of Linnaeus' Species plantarum. **American Journal of Botany**, v.10, n.9, p.510-514, 1923. DOI: 10.2307/2446390

HUKSEFLUX BRASIL. (2022). **Sensor de Fluxo de Calor**. Disponível em: <https://huksefluxbrasil.com.br/>. Acesso em: 07/12/2022.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p.107-122, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.018>.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. 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>.

JENSEN, J. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.

JONES, H. G. et al. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 11, p. 978-989, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP09123>.

JONES, H. G. Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology. **Cambridge university press**, 2013.

JONES, H. G.; CORLETT, J. E. Current topics in drought physiology. **The Journal of Agricultural Science**, v. 119, n. 3, p. 291-296, 1992.

KANZARI, S. et al. Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunisia (Bou Hajla, Kairouan)–Salinization risk of soils and aquifers. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 86, p. 34-42, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.010>.

KHANAL, S.; FULTON, J.; SHEARER, S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 22-32, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.001>.

KRISHNAN, P. Application Thermal Imaging in Plant Physiological Research. In: **Souvenir–National Conference on Plant Physiology-2014: Frontiers of Plant Physiology Research: Food Security and Environmental Challenges**. 2014. p. 63-64.

JORGE, L. A. C.; BRANDÃO, Z. N.; INAMASU, R. Y. Insights and recommendations of use of UAV platforms in precision agriculture in Brazil. **SPIE Remote Sensing**, v.9239: 18p, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2067450>

LANDELL, M. G. A.; BRESSIANI, J. A. Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal. **Cana-de-açúcar**, v. 1, p. 101-155, 2008.

LAURENT, L. et al. 12- μ m-pitch electromechanical resonator for thermal sensing. **Physical Review Applied**, v. 9, n. 2, p. 024016, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.024016>.

LAWLOR, D. W. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata vs. metabolism and the role of ATP. **Annals of Botany**, v.89, p.871-885, 2002.

LEBLANC, G. et al. A Practical Validation of Uncooled Thermal Imagers for Small RPAS. **Drones**, v. 5, n. 4, p. 132, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5040132>.

LOPES, I. C. Drones, proteção de dados pessoais e direitos conexos. **Revista Electrónica de Direito**. RED, v. 25, n. 2, p. 210-236, 2021. DOI: 10.24840/2182-9845_2021-0002_0009

Lynch, J. Root architecture and plant productivity. **Plant Physiology**, v. 109, n. 1, p. 7-13, 1995.

MACHADO, E. C. et al. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.17, n.9, p.1323-1329, 1982.

MALAVOLTA, E.; HAAG, H. P. Fisiologia. MALAVOLTA, E., SEGALA, AL, GOMES, F.P, et al. **Cultivo e adubação da cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Brasileiro de Potassa, p. 221-236, 1964.

MANHÃES, C. M. C. et al. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v. 17, n. 1, p. 163-181, 2015. DOI: 10.5935/1809-2667.20150011

Minkina, W.; Dudzik, S. **Infrared Thermography: Erros and Uncertainties**; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2009.

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

OLIVEIRA, L. A. R. **Diversidade genética e respostas in vitro aos estresses hídrico e salino em Saccharum spp**. Tese de doutorado. 2019.

OLIVEIRA, L. A. R. **Diversidade genética e respostas in vitro aos estresses hídrico e salino em Saccharum spp**. 2019. 87 f. Tese (Doutorado em Agricultura e Biodiversidade) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2019.

OLIVEIRA, L. T. D. **Avaliação do uso de sensor termal a bordo de VANT através de análises radiométricas, espectrais, espaciais e posicionais**. 2017. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

OLIVEIRA, R. A. **Análise de crescimento da cana-de-açúcar, na região Noroeste do Paraná**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

PERES, F. C. Determinação dos coeficientes de cultura (Kc) da cana-de-açúcar: ciclo de cana soca. 1988. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PIX4D. **Processamento de imagens térmicas**. 2018. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000173463-Processing-thermal-images#label11>. Acesso em 07 de dezembro de 2022.

POIRIER-POCOVI, M.; VOLDER, A.; BAILEY, B. N. Modeling of reference temperatures for calculating crop water stress indices from infrared thermography. **Agricultural Water Management**, v. 233, p. 106070, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106070>.

POLO, J. et al. Design of a low-cost Wireless Sensor Network with UAV mobile node for agricultural applications. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.119: 19-32, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.024>

PORTES, M. F. Sensoriamento remoto termal usando veículo aéreo não-tripulado na cafeicultura de montanha. 2018. URI: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/12459>

PRAKASH, A. Thermal remote sensing: concepts, issues and applications. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, n. B1; PART 1, p. 239-243, 2000.

PURI, V.; NAYYAR, A., RAJA, L. Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. **Journal of Statistics and Management Systems**, v.20(4): 507-518, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/09720510.2017.1395171>

RAEVA, P.L.; ŠEDINA, J.; DLESK, A. Monitoring of crop fields using multispectral and thermal imagery from UAV. **European Journal of Remote Sensing**. 2018.

RAMADAN, K. M. et al. Design and implementation of a low cost photovoltaic soil moisture monitoring station for irrigation scheduling with different frequency domain analysis probe structures. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.148, p. 148-159, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.038>

RAO, C. M.; KUMAR, M. V.; REDDY, L. K. Management of sugarcane clones under limited moisture situations (drought) at formative stage. **Indian Sugar**, v. 54, p. 949-953, 2005.

ROBERTSON, M.J. et al. Physiology and productivity of sugarcane with early and midseason water deficit. **Field Crops Research**, v.64, p.211-227, 1999.

ROCHA, J. G. **Protótipo de um pirômetro autocalibrado independente da emissividade**. 1998. Tese de Doutorado. URI: <https://hdl.handle.net/1822/385>.

RPA NEWS. **Irrigação por gotejamento em cana: qual é o payback?**. Disponível em: <https://revistarpanews.com.br/irrigacao-por-gotejamento-em-cana-qual-e-o-payback/>. Acesso em 05 de dezembro de 2022.

SAAD, A. M.; LIBARDI, P. L. Qualidade da irrigação controlada por tensiômetros em pivô central. **Scientia Agrícola**, v. 51, p. 549-555, 1994.

SABOYA, L. M. F. et al. COEFICIENTE DE CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR NOS TABULEIROS COSTEIROS DA PARAÍBA. **II INOVAGRI International Meeting**, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.12702/ii.inovagri.2014-a342>

SANCHES, A. C. et al. Tensiômetro automatizado de baixo custo e alta eficiência para monitoramento da irrigação em tempo real. Revista **Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 390-395, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p390-395>

SANTOS, E. C. A.; ARAÚJO, L. E.; MARCELINO, A. Análise climática da Bacia Hidrográfica do Rio Mamanguape. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.1, p.9–14. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p9-14>

SBCS, Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, v. 3, 2013.

SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Irrigação da cana-de-açúcar. In: **PARANHOS, S.B. et al. Cana-de-açúcar; cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.373-431.

SCHIRRMANN, M. et al. A mobile sensor for leaf area index estimation from canopy light transmittance in wheat crops. **Biosystems engineering**, v. 140, p. 23-33, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.09.005>.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E. et. al. (Eds.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. 1.ed. Piracicaba: Livrocere, 2006. p.19-36.

SILVA, A. L. B. O. **Desenvolvimento vegetativo e radicular da cana-de-açúcar sob irrigação de salvamento no cerrado brasileiro**. Tese de Doutorado (Agricultura Tropical e Subtropical, Área de Concentração em Tecnologia da Produção Agrícola) - Instituto Agrônomo, Campinas, SP, 2019.

SILVA, A. M.; CARLIN, S. D.; PERECIN, D. Fatores que afetam a brotação inicial da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v.51, p.457-466, 2004.

SILVA, M. A. et al. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M.A.; ROSSETTO, R.; SORATTO, R.P. (org.). Fenologia da cana-de-açúcar. Botucatu: FEPAF – Fundação de Estudos Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2010. p. 8-21.

SILVA, M. A. et al. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 620-627, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600008>.

SILVA, M.A. et al. Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar. In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M.A.; ROSSETTO, R.; SORATTO, R.P. (org.). **Fenologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: FEPAF – Fundação de Estudos Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2010. p. 8-21.

SILVA, S. et al. Demanda hídrica da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 849-856, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n9p849-856>

SILVEIRA, H. L. F. et al. Análise da cobertura de nuvens no nordeste do Brasil e seus impactos no sensoriamento remoto agrícola operacional. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. 2017.

SIQUEIRA, P.M.; STONE, L.F. **Manejo da irrigação do feijoeiro: uso do tensiômetro e avaliação do desempenho do pivô central**. Brasília: Embrapa-SPI, 1994.

SOUZA, A. P. et al. Diurnal variation in gas exchange and nonstructural carbohydrates throughout sugarcane development. **Functional Plant Biology**, v. 45, n. 8, p. 865-876, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP17268>

STRUTHERS, Raymond et al. Thermal infrared imaging of the temporal variability in stomatal conductance for fruit trees. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 39, p. 9-17, 2015.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosicas**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. DOI: 10.11606/T.11.2006.tde-19092006-170424.

TAMIMINIA, H. et al. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 164, p. 152-170, 2020.

TANAKA, S. et al. Spectral index for quantifying leaf area index of winter wheat by field hyperspectral measurements: A case study in Gifu Prefecture, Central Japan. **Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 5329-5346, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70505329>.

TANKUT, F. et al. An 80x80 microbolometer type thermal imaging sensor using the LWIR-band CMOS infrared (CIR) technology. **In: Infrared Technology and Applications XLIII**. SPIE, 2017. p. 447-456. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2275161>.

TEIXEIRA, A. et al. SAFER applications for water productivity assessments with aerial camera onboard a remotely piloted aircraft (RPA). A rainfed corn study in Northeast Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, p. 100514, 2021.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J.F.; RONQUIM, C.C.; VICTORIA, D.C. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, v. 6, p. 84-95, Jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.14355/ijrsa.2016.06.009>.

TEODORO, I. et al. Isoquantas de Produtividade da Cana-de-açúcar em Função de Níveis de Irrigação e Adubação Nitrogenada. **Irriga**, v. 18, n. 3, p. 387-401, 2013.

TORRES-RUA, A. Vicarious calibration of sUAS microbolometer temperature imagery for estimation of radiometric land surface temperature. **Sensors**, v. 17, n. 7, p. 1499, 2017.

TRENTIN, Roberto et al. Transpiration and leaf temperature of sugarcane under different matrix potential values. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 1085-1095, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000600006>.

UBIRATAN, E. Aero Magazine. **A origem dos VANT**. 2015. Disponível em: <http://aeromagazine.uol.com.br/artigo/origem-dos-vant_1907.html>. Acesso em: 05 de dezembro de 2022.

ZHOU, Z. et al. Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications. **Computers and**

Electronics in Agriculture, v. 182, p. 106019, 2021. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106019>.