



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA

MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DA TEMPERATURA
FOLIAR COM SENSOR PROXIMAL PARA DETECÇÃO DE
ESTRESSE HÍDRICO

BISMARC LOPES DA SILVA

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA - BRASIL
2025

BISMARC LOPES DA SILVA

**MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DA TEMPERATURA
FOLIAR COM SENSOR PROXIMAL PARA DETECÇÃO DE
ESTRESSE HÍDRICO**

Tese apresentada à Universidade Estadual do
Sudoeste da Bahia como parte dos
requerimentos do programa de pós-graduação
em Agronomia, na área de concentração de
Fitotecnia, para obtenção do título de doutor.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Tagliaferre

VITÓRIA DA CONQUISTA – BA
BAHIA - BRASIL
2025

S579m

Silva, Bismarc Lopes da.

Monitoramento automático da temperatura foliar com sensor proximal para detecção de estresse hídrico. / Bismarc Lopes da Silva, 2025.

105f. : il.

Orientador (a): Dr. Cristiano Tagliaferre.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Fitotecnia. Vitória da Conquista, 2025.

Inclui referências F. 79 - 92

1. Agricultura digital. 2. Índice termal. 3. Internet-das-coisas. 4. Irrigação inteligente. 5. Redes de sensores sem fio. I. Tagliaferre, Cristiano. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. T.

CDD 631.587

Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134

UESB - Campus Vitória da Conquista – BA



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
Área de Concentração em Fitotecnia

Campus de Vitória da Conquista, BA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DA TEMPERATURA FOLIAR COM SENSOR PROXIMAL PARA DETECÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO”.

AUTOR (A): Bismarc Lopes da Silva

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA, pela seguinte Banca Examinadora:



CRISTIANO TAGLIAFERRE
Data: 27/02/2025 12:06:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Cristiano Tagliaferre, D.Sc. (UESB)



Documento assinado digitalmente
FERNANDO FRANÇA DA CUNHA
Data: 27/02/2025 14:00:11-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Fernando França Cunha, D.Sc. (UFV)



Documento assinado digitalmente
ODAIR LACERDA LEMOS
Data: 02/03/2025 08:28:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Odair Lacerda Lemos, D.Sc.



Documento assinado digitalmente
MARCELO ROCHA DOS SANTOS
Data: 27/02/2025 14:37:06-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Marcelo Rocha dos Santos, D.Sc. (IFBAIANO)



Documento assinado digitalmente
OTÁVIO NETO ALMEIDA SANTOS
Data: 27/02/2025 18:55:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Otávio Neto Almeida Santos, D.Sc. (UESB)

Data de realização: 27 de fevereiro de 2025.

Estrada do Bem Querer, Km 4, CEP 45031-900, Caixa Postal 95, Vitória da Conquista, Bahia, Brasil
Telefone: (77) 3425-9383, e- mail: ppgagronomia@uesb.edu.br

Agradecimentos

Primeiramente, e acima de tudo, ao Criador que já escreveu tudo de forma perfeita. Assim, agradeço por cada experiência, oportunidade, desafio, provação, ensinamentos e pessoas que fizeram parte da minha vida nesses últimos quatro anos.

Agradeço aos meus pais por me dar valores, ensinamentos e condições para a realização dos meus objetivos.

Sou grato ao excelente programa de pós-graduação em Agronomia da UESB, por me dar tantas oportunidades de crescimento profissional e pessoal desde 2018.

À Fundação de Amparo à Pesquisa da Bahia (FAPESB), pela concessão da bolsa de estudos que me permitiu aprofundar meus conhecimentos; e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de estudos e treinamento no exterior.

Ao meu orientador, Cristiano, pela sua confiança, ensinamentos e por me permitir integrar o Laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem (LHID). Obrigado a todos os integrantes, atuais e antigos, do laboratório: Erik, John, Ana Carolina, Rosilene, Genilson, Emerson, Laércio e Lorena, pelo apoio, risadas e amizade.

Agradeço também a Marlovich, pelas conversas sobre tecnologia, filmes e possibilidades para o futuro. A Naasoom e Poliana, por sua amizade e ajuda nos trabalhos do doutorado. Aos demais amigos pela presença em momentos de lazer. E ao professor Ian Dodd, pela nova perspectiva sobre a ciência e por abrir as portas de seu laboratório no local onde aprendi muito.

Por fim, desejo agradecer a cada pessoa que conheci nos últimos quatro anos. Cada pessoa me ensinou algo valioso que levarei para a vida toda.

Obrigado!

RESUMO

DA SILVA, B. L. Vitória da Conquista - BA, UESB, 2025. 105 p. (Tese: Doutorado em Agronomia; Área de Concentração: Fitotecnia)*.

A aplicação de sensores na agricultura irrigada inclui o monitoramento e o controle sistemático do manejo da irrigação, sendo fundamental no processo de automação. Os sensores infravermelhos permitem o monitoramento da temperatura foliar (T_F), uma variável que fornece informações relevantes sobre o status hídrico das culturas. No entanto, dentre as dificuldades do uso dessa técnica, encontram-se o custo elevado dos equipamentos e a dificuldade na interpretação dos resultados. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar um protótipo de dispositivo embarcado para monitorar a T_F e detectar o estresse hídrico de plantas de forma automática e remota. Usou-se componentes facilmente encontrados no mercado para o desenvolvimento do protótipo. As leituras do dispositivo desenvolvido foram comparadas com um instrumento de referência (padrão) para verificar a acurácia das leituras. No campo, a capacidade do protótipo em identificar o estresse hídrico de plantas foi testada nas culturas do maracujazeiro e do rabanete, irrigadas com duas lâminas de irrigação, uma plena e uma com déficit suficiente para causar estresse hídrico, condição essa verificada com análises de crescimento, de produção e bioquímicas. A comparação com o instrumento padrão revelou um erro médio absoluto (MAE) de 0,71 e 0,67 °C e raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 0,84 e 0,83 °C, para as medidas realizadas nas plantas de rabanete com irrigação plena e com déficit, respectivamente. Na comparação entre os sensores de menor custo, o MAE variou entre 0,17 e 0,37 °C, dentro das especificações do fabricante ($\pm 0,5$ °C). Nas avaliações com as culturas, houve diferenças de T_F acima de 2,0 °C ($p < 0,01$) entre as plantas bem irrigadas com as submetidas à irrigação com déficit. As plantas estressadas tiveram reduções no crescimento e na produtividade, além de alterações bioquímicas, como maior produção de açúcares redutores, prolina e sólidos solúveis. O protótipo desenvolvido consegue receber e transmitir dados até uma distância de 50 m de forma autônoma e se conectar com a Internet, apresentando grande potencial no desenvolvimento de sistema de manejo de irrigação inteligentes, desde que seu design seja refinado, para garantir maior robustez para aplicações em condições práticas de campo.

Palavras-chave: agricultura digital; índice termal; internet-das-coisas; irrigação inteligente; redes de sensores sem fio.

ABSTRACT

DA SILVA, B. L. Vitória da Conquista - BA, UESB, 2025. 105 p. (Thesis: Doctor in Agronomy; Area of Concentration: Crop Science)*.

Using sensors in irrigated agriculture allows the systematic monitoring of plants and precise control of water use. Infrared sensors can measure leaf temperature (T_L), a variable that provides relevant information about the crop's water status. However, the cost of the equipment and the difficult data interpretation are major challenges to the widespread adoption of this approach. Therefore, the objective of this work was to develop and evaluate a prototype of an embedded device (sensor node) consisting of a proximal sensor to monitor T_L and detect water stress in plants automatically and remotely. Low-cost, easily available components were used to build the prototype. The sensor node readings were compared with a reference instrument to assess reading accuracy. The low-cost proximal sensors were also compared with each other to evaluate their precision. In the field, the prototype's capability to identify plant water stress was assessed on passion fruit and radish plants irrigated with two water levels: full irrigation and deficit irrigation sufficient to cause water stress, a condition verified through growth, yield, and biochemical analyses. The comparison with the reference instrument revealed a mean absolute error (MAE) of 0.71 and 0.67 °C and root mean squared error (RMSE) of 0.84 and 0.83 °C in fully and deficit irrigated radish plants, respectively. When comparing the low-cost proximal sensors, the MAE varied between 0.17 and 0.37 °C, within the manufacturer's specification (± 0.5 °C). In the field trials, there were differences in T_L above 2.0 °C ($p < 0.01$) between the well-irrigated plants and deficit irrigated plants, which resulted in decreased growth and yield, and biochemical changes, such as increased leaf contents of reducing sugars, proline, and soluble solids. The prototype can receive and transmit data up to a distance of 50 m autonomously and connect to the Internet, showing great potential for the design of smart irrigation systems, provided its design is refined to ensure greater robustness for applications in practical field conditions.

Keywords: digital agriculture; thermal index; internet-of-things; smart irrigation; wireless sensor networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração demonstrando as relações entre o conteúdo de água no solo e alguns processos físicos e fisiológicos no sistema solo-planta-atmosfera.....	17
Figura 2. Arquitetura de uma rede de sensores sem fio composta por nós sensores interconectados, um nó coordenador (base de controle) que conecta a rede à plataforma na nuvem para processamento, análise e tomada de decisão.	20
Figura 3. Ilustração do balanço de água no solo em cultura irrigadas, adaptado de Fereres et al. (1981).....	38
Figura 4. Esquema simplificado de um controle com retroalimentação no controle da umidade do solo.....	40
Figura 5. Controle com retroalimentação e modelagem preditiva.	41
Figura 6. Conexão dos componentes do dispositivo de temperatura infravermelho embarcado, composto por um relógio de tempo real (a), um microcontrolador (b), um sensor de infravermelho (c), um sensor de temperatura e umidade (d) e uma fonte e energia (e)..	46
Figura 7. Algoritmo para realizar as medidas de temperatura no protótipo nó sensor. ..	49
Figura 8. Médias diárias da temperatura do ar (C°) e umidade relativa do ar (%) no interior da casa de vegetação durante o período experimental.....	52
Figura 9. Protótipo do nó sensor infravermelho de baixo custo na esquerda, com microcontrolador e sensor de temperatura e umidade do ar na caixa (dentro do retângulo vermelho) e sensor MLX90614 no abrigo de ABA (na elipse amarela). Na direita, detalhe no sensor MLX dentro do abrigo.....	55
Figura 10. Médias da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar ($W\ m^{-2}$) e evapotranspiração de referência ($E_{To} - mm\ dia^{-1}$), durante o ciclo do rabanete medido em dias após a emergência (DAE).	56
Figura 11. Comportamento das medidas do sensor de baixo custo (MLX) com o sensor referência (SI-111-SS) (A) e análise de regressão linear da comparação (B)..	61
Figura 12. Gráfico de dispersão entre a temperatura (°C) medida com o instrumento de referência (temperatura de referência) e com o sensor de baixo custo (temperatura do MLX) em uma planta de rabanete irrigada com 100% ou 65% da evapotranspiração da cultura (100% da E_{Tc} e 65% da E_{Tc} , respectivamente)... ..	62
Figura 13. Temperatura foliar do maracujazeiro amarelo sob irrigação plena (100% E_{Tc}) e com redução de 50% em relação à irrigação plena (50% E_{Tc}).	64
Figura 14. Massa seca (% , A) e teor relativo de água (% , B) do maracujazeiro, submetido a dois tipos de irrigação: irrigação plena, para repor 100% da evapotranspiração (100% E_{Tc}); e irrigação com déficit, para repor 50% da lâmina de 100% E_{Tc} (50% E_{Tc})...	65
Figura 15. Curso de oito dias da temperatura foliar (T_F), temperatura (T_A) e umidade relativa do ar (UR - %) de plantas de rabanete bem irrigadas (100% E_{Tc} - A) e com	

restrição hídrica (65%ETc – B) e a diferença entre T_F e T_A nas duas condições de irrigação (C).....	67
Figura 16. Temperatura foliar média horária (°C) coletada com os protótipos instalados em seis plantas de rabanete, irrigadas para repor ou 100% da evapotranspiração (ETc) ou 65% da ETc ao longo de oito dias (0-7)..	68
Figura 17. Temperatura foliar (°C) referente à média de três médias horárias (11:00-13:00), coletadas em plantas de rabanete irrigadas para repor 100% ou 65% da evapotranspiração da cultura (ETc).	70
Figura 18. Relação entre a evapotranspiração da cultura (ETc) da planta sob irrigação plena (100% da ETc) e com restrição hídrica (65% da ETc) e os graus acima da planta sem estresse (DANS) (A). ETc das plantas de rabanete sob irrigação para repor 100% e 65% da ETc em função dos dias após o início dos tratamentos (B)..	71
Figura 19. Teores de amido (A), prolina (B), sólidos solúveis (C) e açúcares redutores (D) nas folhas de plantas de rabanete irrigadas com lâminas para repor 100% e 65% da evapotranspiração da cultura (ETc)...	72
Figura 20. Médias da massa fresca (MFPA - A) e seca da parte aérea (MSPA - B), produtividade de raízes (C) e área foliar (AF - D) de plantas de rabanete irrigadas com lâminas para repor 100% e 65% da evapotranspiração da cultura (ETc)..	74
Figura 21. Recepção de sinal entre dois nós sensores instalados a um metro acima do solo e separados nas distâncias de 5, 10, 25, 50 e 100 m.....	75
Figura 22. Ilustração do sistema proposto.....	77
Figura 1A. Experimento com maracujazeiro em casa de vegetação.	94
Figura 2A. Plantas de rabanete aos 22 dias após a emergência.....	94
Figura 3A. Algumas versões preliminares do nó sensor. Na direita, a ideia de um clipe para prender na folha se mostrou inviável e perturbava muito a amostra. Na esquerda, a primeira versão do nó, inspirado nos sensores disponíveis no mercado.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Componentes do protótipo nó sensor funcional.....	46
Tabela 2. Especificações dos sensores de infravermelho MLX90614BAA e SI-111-SS48	
Tabela 3. Caracterização física do solo utilizado no estudo.....	53
Tabela 4. Análise química do solo antes e depois da correção	51
Tabela 5. Diferença média entre a temperatura foliar (°C) de plantas de rabanete irrigadas com 65% da evapotranspiração da cultura diária (ETc) e a temperatura foliar de plantas irrigadas com 100% da ETc.....	.69
Tabela 1A. Análise de variância para as variáveis de crescimento e bioquímica do rabanete submetido a duas lâminas de irrigação, para repor 100% e 65% da ETc	.96

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CWSI	índice de estresse hídrico da cultura
DANS	graus acima do dossel não estressado (°C)
DPV	déficit de pressão de vapor (kPa)
e_s	pressão de saturação do vapor d'água no ar (kPa)
e_a	pressão parcial do vapor d'água do ar (kPa)
ET _c	evapotranspiração da cultura (mm dia ⁻¹)
ET _o	evapotranspiração de referência (mm dia ⁻¹)
E λ	fluxo de calor latente de vaporização (W m ²)
g_s	condutância estomática ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
H	fluxo de calor sensível (W m ²)
IA	inteligência artificial
IAoT	inteligência artificial das coisas
IoT	internet das coisas
K _c	coeficiente de cultivo
K _{cb}	coeficiente da cultura basal
K _e	coeficiente de evaporação
K _L	coeficiente de localização
K _s	coeficiente de estresse hídrico
R _n	saldo de radiação incidente (W m ⁻²)
SSPA	sistema solo-planta-atmosfera
T _A	temperatura do ar (°C)
T _F	temperatura foliar (°C)
TIV	termômetro infravermelho
TRA	teor relativo de água (%)
WSN	rede de sensores sem fio
Δ	declividade da curva de pressão de vapor (kPa/°C)
ε	emissividade
θ	umidade do solo (cm ³ cm ⁻³)
σ	constante de Stefan-Boltzmann ($5.670 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$)
Ψ	potencial hídrico (kPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Comunicação e controle no sistema solo-planta-atmosfera.....	16
2.1.1 Comunicação no controle estomático	18
2.2 Comunicação no sistema de monitoramento do SSPA	20
2.3 Internet das Coisas	23
2.3.1 Inteligência Artificial das Coisas.....	25
2.4 Manejo da irrigação	27
2.4.1 Monitoramento das condições meteorológicas	28
2.4.2 Monitoramento da umidade do solo.....	29
2.4.3 Monitoramento das condições da planta	31
2.5 Monitoramento da temperatura foliar: princípios e aplicação na automação	32
2.6 Controle no manejo da irrigação.....	37
2.6.1 Controle de irrigação preditivo	38
2.6.2 Controle com retroalimentação	40
2.7 O papel das tecnologias de baixo custo na expansão da agricultura digital no Brasil	42
2.7.1 Desafios e oportunidades na confecção de protótipos de baixo custo	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Desenvolvimento do nó sensor	45
3.2 Comparação de temperaturas.....	47
3.3. Experimentos de campo.....	50
3.3.1 Experimento com o maracujazeiro.....	50
3.3.2 Experimento com rabanete.....	53
3.3.3 Métricas com a T_F	56
3.3.4 Variáveis de crescimento e rendimento	57
3.3.5 Análises bioquímicas.....	57
3.4 Conexão entre sensores e com a Internet.....	58
3.5 Análise estatística.....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1 Teste de acurácia e precisão	61
4.2 Experimentos de campo com o maracujazeiro	63
4.3 Experimento de campo com rabanete	66

4.4 Efeito do estresse hídrico em parâmetros bioquímicos e de crescimento.....	71
4.5 Transmissão, recepção e conexão	74
4.6 Considerações sobre o nó sensor de baixo custo	76
5 CONCLUSÕES	79
6 REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE A.....	94
ANEXO A	98

1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada tem papel importante na segurança alimentar, pois com uma área representando apenas 24% da área cultivada total, ela é responsável pela produção de 40% de todos os alimentos no mundo (Vollset et al., 2020). Entretanto, essa maior produtividade das áreas irrigadas demanda custos: a maior competição pela água, a salinização do solo e o esgotamento de recursos hídricos em regiões com secas prolongadas (Lucas et al., 2021), como as regiões áridas e semiáridas.

As regiões áridas e semiáridas concentram 52% da expansão da irrigação no mundo (Mehta et al., 2024). Nessas regiões, a água deve ser usada de forma mais racional para garantir a sustentabilidade hídrica local, com impactos econômicos, sociais e ambientais. Nesse contexto, a irrigação de precisão pode colaborar para o melhor uso dos recursos hídricos ao permitir o maior controle da irrigação.

A irrigação de precisão é definida como a aplicação criteriosa de quantidades de água, estimadas com base no que a planta consumiu em momentos e locais apropriados (Sishodia et al., 2020). A estimativa da demanda hídrica da cultura deve ser baseada nas relações hídricas das plantas no sistema solo-planta-atmosfera (SSPA). Assim, o monitoramento das relações hídricas pode ser realizado pela integração e modelagem de dados de sensores em tempo real (Damm et al., 2018; Bhatti et al., 2023).

O monitoramento e o controle da irrigação podem ser realizados com uma rede de dispositivos físicos embarcados com eletrônicos, software, sensores, atuadores e conectividade com outros dispositivos e com a Internet (Internet-das-Coisas [IoT]). As redes de sensores sem fio têm grande potencial em muitas aplicações agrícolas, relacionadas com o monitoramento e o controle, por conta de seu relativo baixo custo e grande flexibilidade (Jiménez-Buendía et al., 2021; Xu et al., 2022; Yousaf et al., 2023; Vallejo-Gomez et al., 2023). Essas redes de sensores podem ser conectadas com a Internet para possibilitar o uso dos recursos da computação na nuvem, expandindo a capacidade de processamento do sistema.

Os sensores, fundamentais no monitoramento e automatização da irrigação, são dispositivos, módulos ou sistemas que detectam uma mudança no ambiente e traduzem essa mudança de acordo com uma unidade de medida (Javaid et al., 2021). A escolha dos parâmetros monitorados pelos sensores é essencial para que as informações coletadas das plantas possam auxiliar na solução de problemas. No manejo de irrigação, os parâmetros

devem estar centrados no SSPA, como a umidade do solo, o fluxo de seiva, a condutância estomática, as variáveis climáticas e a temperatura foliar.

A temperatura foliar (T_F) pode servir para estimar o estresse hídrico e a condutância estomática das plantas (Jackson et al., 1977; Idso et al., 1981; Kibler et al., 2023). O potencial do uso da T_F para o manejo de irrigação começou a ser constatado no final dos anos 70 (Jackson et al., 1977; Idso et al., 1981). Todavia, o custo elevado das técnicas para mensurar a T_F , como o termômetro infravermelho (TIV) e a termografia, dificultou a disseminação e aplicação desse indicador na agricultura (Risso et al., 2022).

Nos últimos anos, a disponibilização de sensores e outros eletrônicos a preços mais acessíveis tem possibilitado o uso da T_F de forma mais ampla, especialmente quando integrada em redes de sensores sem fio (King e Shellie, 2023). Além disso, as medidas da T_F com TIVs podem ser automatizadas (Blonquist Jr., 2009), o que pode gerar um grande volume de dados para processamento e análise em plataformas de computação na nuvem com o objetivo de desenvolver sistemas de manejo inteligentes. Dessa maneira, a redução do custo de cada elemento de sensoriamento e a integração com recursos da Internet é fundamental para o desenvolvimento de sistemas inteligentes acessíveis para a maioria dos produtores rurais.

O monitoramento automático das relações hídricas das plantas por dispositivos de baixo custo que contém microprocessamento e conectividade sem fio abre as portas para várias aplicações no manejo da irrigação mais acessíveis para os produtores. A hipótese deste trabalho baseia-se na premissa de que um sensor infravermelho proximal de baixo custo relativo permite medir a temperatura foliar com qualidade comparável a um método dito padrão e detectar o estresse hídrico de plantas. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar um protótipo de dispositivo embarcado para monitorar a T_F e detectar o estresse hídrico de plantas de forma automática e remota.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Em 1948, Nobert Wiener publicou um livro chamado “Cibernética: controle e comunicação no animal e na máquina”. Esse livro trouxe conceitos e formulações matemáticas que previram as tecnologias que hoje fazem parte do nosso dia a dia, incluindo os computadores miniaturizados, a Internet, a robótica e a inteligência artificial. O tema central do livro é o conceito de retroalimentação (*feedback*). Trata-se de um mecanismo de ajuste onipresente em células, organismos e ecossistemas que serviu de inspiração para a criação de sistemas mecânicos e eletrônicos com a capacidade de se autoajustar.

Existe uma relação próxima entre a comunicação e o controle. A comunicação é o processo pelo qual informações são trocadas entre um sinalizador e um receptor, utilizando-se um sistema de sinais em comum (Baluska e Ninkovic, 2010). O controle refere-se às ações necessárias para que os resultados de um sistema sigam um ideal ao longo do tempo, modificando as entradas (*inputs*) do sistema para gerar os resultados (*output*) (Romero et al., 2012). Esse controle se dá pela retroalimentação (El-Samad, 2021).

Nesta revisão, aborda-se a comunicação e o controle em dois sistemas: o sistema solo-planta-atmosfera (SSPA) e o sistema de monitoramento sem fio. No fim, objetiva-se integrar o conhecimento disponível na literatura sobre esses dois sistemas na comunicação e no controle do sistema de irrigação e dar as bases necessárias para o melhor entendimento da parte experimental das próximas sessões.

2.1 Comunicação e controle no sistema solo-planta-atmosfera

Nas plantas, um exemplo de mecanismo de retroalimentação é o controle estomático. Os estômatos são pequenas válvulas formadas por células com formato de rim (células guardas) na superfície da folha. A mudança de turgor dessas células regulam as trocas gasosas entre a planta e o meio externo do sistema solo-planta-atmosfera (SSPA), de modo que, quando túrgidas, o poro estomático se abre; e, quando flácidas, o poro se fecha (Buckler et al., 2019).

O SSPA é um modelo útil baseado na teoria da tensão coesiva proposta, pela primeira vez, por Dixon e Joly (1894), os quais postularam que o gradiente de potencial

hídrico (Ψ) impulsiona o fluxo de água através das plantas, das raízes para as folhas. O Ψ é uma maneira de quantificar a mudança de energia livre da água por unidade de volume retido no meio em relação à energia livre da água pura como referência (Luo et al., 2022). A água evapora da superfície da folha, sendo imediatamente substituída por moléculas abaixo, o que “suga” a coluna contínua de água contra a resistência (R) do sistema vascular da planta, como expresso na equação 1 (Brodribb, 2009):

$$T = (\Psi_{\text{solo}} - \Psi_{\text{folha}}) / R \quad (1)$$

Em que T é a transpiração, Ψ_{solo} e Ψ_{folha} são os potenciais da água no solo e na folha, respectivamente, e R é a resistência hidráulica que incluem as propriedades físicas do solo, a arquitetura hidráulica e as mudanças na morfologia da raiz e do dossel das plantas à medida que elas crescem e se desenvolvem (García-Tejera et al., 2021).

Na equação 1, Ψ_{folha} é negativo (-MPa), então a redução de Ψ_{folha} , devido a uma atmosfera mais seca, aumentaria potencialmente a T para compensar a maior perda de água. Todavia, ocorre uma resposta de retroalimentação, a partir da qual o fechamento estomático aumenta a R para evitar a maior desidratação e a embolia (Buckler et al., 2019). Na Figura 1 está ilustrada as relações entre o gradiente de potencial hídrico, algumas variáveis climáticas e a regulação estomática no SSPA.

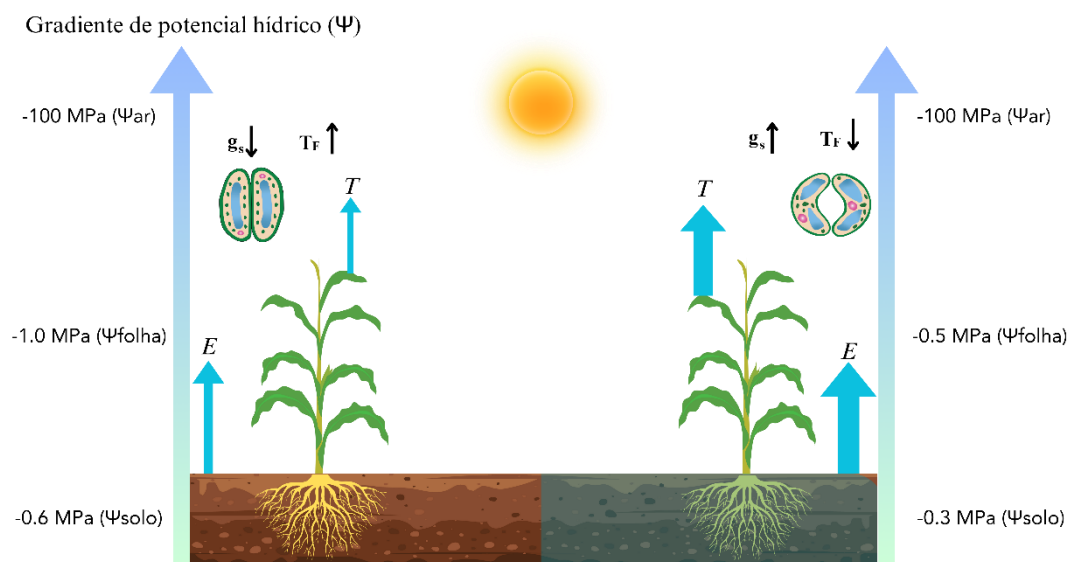


Figura 1. Ilustração demonstrando as relações entre o conteúdo de água no solo e alguns processos físicos e fisiológicos no sistema solo-planta-atmosfera. g_s : condutância

estomática; T_F : temperatura foliar; E : evaporação; T : transpiração. As setas azuis representam o fluxo hídrico.

No lado esquerdo da Figura 1, a planta tem menor disponibilidade de água no solo (menor Ψ_{solo}), o que resulta em menor evaporação (E), transpiração (T) e condutância estomática (g_s), os quais levam a uma maior temperatura foliar (T_F). Na planta da direita, com maior disponibilidade de água no solo, a E e a T são maiores (representadas pelas setas azuis mais largas); a g_s é maior, devido à maior abertura estomática; e a T_F é menor, devido ao maior resfriamento evaporativo.

Dessa maneira, o mecanismo de retroalimentação torna-se essencial para manter o status hídrico vegetal, pois cerca de 95-99% da água absorvida pelas raízes das plantas é transpirada, não sendo utilizada para os processos metabólicos e o crescimento (Nobel, 2009; Chavarria e Dos Santos, 2012). Dentre os fatores no SSPA que influenciam o comportamento dos estômatos, destacam-se a demanda evaporativa da atmosfera e o suprimento de água na zona radicular. Para balancear a demanda evaporativa com a umidade na zona radicular, as raízes comunicam a parte aérea com sinais hidráulicos e químicos (peptídeos e hormônios vegetais, como o ácido abscísico [ABA]), os quais desencadeiam uma resposta fisiológica para regular a abertura dos estômatos (Batool et al., 2024).

2.1.1 Comunicação no controle estomático

A ampla disponibilidade de água em toda a zona radicular é a condição ideal para evitar reduções significativas do Ψ_{folha} . De fato, a irrigação almeja repor a água na zona radicular das plantas, a qual é deixada para secar até o próximo evento de irrigação (Dodd et al., 2015). O secamento do solo não acontece de forma homogênea, mas de cima para baixo no perfil do solo. À medida que o solo vai secando, os “sinais” para a parte aérea vão se fortalecendo até o completo fechamento estomático (Dodd, 2015; Batool et al., 2024).

Portanto, a interação entre o secamento do solo e a resposta estomática abre a possibilidade de manipular a dinâmica de secamento radicular e, por consequência, a regulação estomática e o crescimento vegetativo. Isso se torna possível pela combinação de métodos de irrigação localizado, como o gotejamento, e o controle refinado do teor de umidade na zona radicular.

A manipulação deliberada da sinalização do sistema radicular para a parte aérea, seja por secamento localizado ou turnos de rega dinâmicos, pode aumentar a proporção de moléculas de carbono (C) fixadas pela H_2O perdida. Isso pode levar ao aumento da eficiência intrínseca do uso da água (iWUE) e, finalmente, na produtividade da água de irrigação sem penalidades na produtividade (Kang e Zhang, 2004). Isso acontece devido ao fato que a transpiração ocorre em uma taxa cerca de 100 vezes maior do que a absorção de CO_2 (Cotelle e Leonhardt, 2019; Deans et al., 2020).

Uma forma de manipular a dinâmica da água no solo é o secamento parcial do sistema radicular (PRD, do inglês, *partial rootzone drying*) (Dry et al., 1996; Stoll et al., 2000). Contrariamente ao secamento vertical, de cima para baixo, o secamento horizontal pode ser realizado ao irrigar apenas um lado do sistema radicular, enquanto o outro é deixado para secar (Saiz-Fernández et al., 2021). Isso acontece por conta da sinalização da parte radicular mais seca, que promove o fechamento parcial dos estômatos, enquanto a parte mais úmida da zona radicular fornece a água necessária para que as plantas mantenham a produtividade com a maior produtividade da água (Dodd et al., 2015; Santos et al., 2021; Slamini et al., 2022; Sonawane et al., 2022).

O PRD é um exemplo das estratégias que podem ser aplicadas na prática, devido ao maior entendimento das relações hídricas no SSPA. Além disso, outra estratégia, chamada irrigação com déficit controlado (RDI, do inglês, *regulated deficit irrigation*), baseia-se em reduzir a lâmina de irrigação em fases da cultura em que a planta é menos sensível ao estresse hídrico, possibilitando diminuir o uso de água sem afetar a produtividade (Chai et al., 2016; Yang et al., 2022).

Para ambas as estratégias, PRD e RDI, o manejo da água de irrigação com precisão é muito importante, principalmente com o uso de indicadores baseados nas respostas das plantas ao manejo de irrigação. Em particular para o RDI, o estresse controlado necessita do monitoramento refinado das respostas da planta ao déficit hídrico para extrair o máximo de benefício da técnica e evitar perdas em produtividade (Jones, 2004). Assim, um indicador baseado na planta seria o mais indicado para a aplicação do RDI do que indicadores baseados no solo ou na atmosfera (Casadesús et al., 2012).

No entanto, vale ressaltar que as estratégias de irrigação são um refino de manejo e, para isso, métodos criteriosos de manejo de irrigação devem ser adotados, almejando repor a água utilizada pelas plantas, com base em modelos que refletem o SSPA (Romero et al., 2012). Uma vez implementado, um sistema de controle da irrigação pode ser automatizado para diminuir a interferência humana.

2.2 Comunicação no sistema de monitoramento do SSPA

A comunicação entre máquinas (M2M, do inglês, *machine to machine communication*) envolve uma série de componentes e tecnologias que trabalham em conjunto para permitir a interação entre sistemas eletrônicos, computacionais e o mundo físico. Esses sistemas são fundamentais em diversas aplicações, em especial na automação de processos, como o manejo da irrigação (Tang et al., 2024).

As redes de sensores sem fio (WSNs, do inglês, *wireless sensor network*) têm grande potencial em muitas aplicações agrícolas relacionadas com o monitoramento e o controle por conta de seu baixo custo relativo e grande flexibilidade (Jiménez-Buendía et al., 2021). WSNs são sistemas distribuídos tipicamente formados por nós sensores (Figura 2), que são dispositivos embarcados, equipados com um ou mais elementos de sensoriamento, de processamento e comunicação sem fio (Mottola e Pico, 2011).

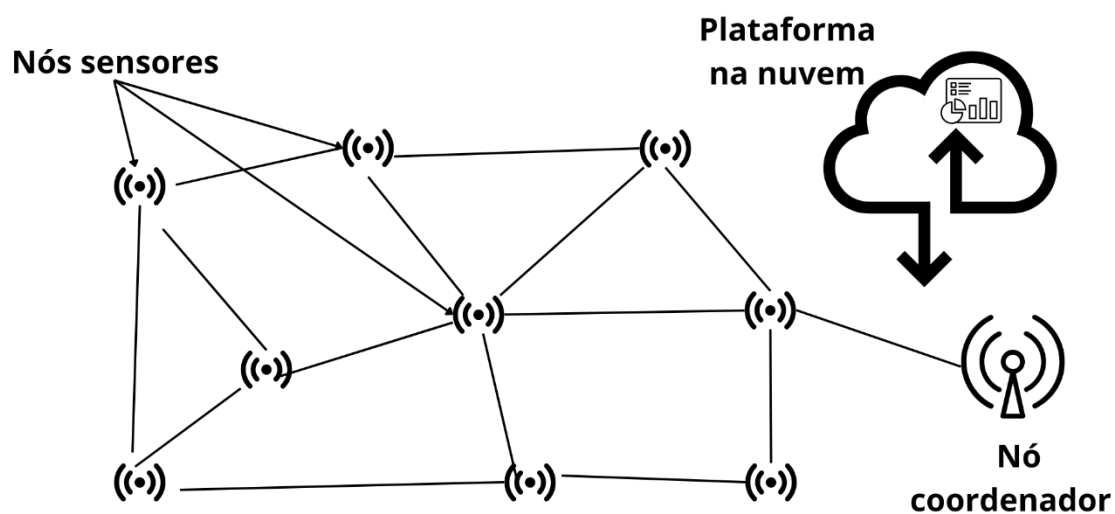


Figura 2. Arquitetura de uma rede de sensores sem fio composta por nós sensores interconectados, um nó coordenador (base de controle) que conecta a rede à plataforma na nuvem para processamento, análise e tomada de decisão.

Em questão de arquitetura, a rede é considerada apenas de monitoramento, quando formada apenas por nós sensores. Ao incluir nós atuadores, como um relê para ativar ou desativar uma válvula solenoide, a rede é chamada de monitoramento e ação (Mottola e Pico, 2011). De acordo com essa classificação, a primeira arquitetura é ideal para programas de fenotipagem e melhoramento vegetal, pois apenas monitora as plantas para fins comparativos. Já a segunda arquitetura é usada para o controle da irrigação, de modo

que os nós sensores são distribuídos no campo para coletar e transmitir dados para uma base de controle. Na base, os dados são processados e comparados com valores alvos (*setpoints*) para tomar uma decisão concernente à ativação ou desativação do fluxo de água nas tubulações (Hamani e Nassareddine, 2020).

Neste trabalho, os nós sensores são o foco. Como o nome sugere, todo nó sensor tem capacidade de sensoriamento. Os sensores são dispositivos, módulos ou sistemas que detectam uma mudança no ambiente e traduzem essa mudança de acordo com uma unidade de medida (Javaid et al., 2021). A medida, por si só, não informa até ser interpretada dentro de um contexto. No caso da irrigação, o sensor deve registrar a mudança de um parâmetro, que tem forte relação com o volume ou fluxo de água no solo, na planta e na atmosfera (Lemay et al., 2012), de modo que possa informar o usuário.

Além do sensor, o nó sensor possui um microcontrolador que funciona como o cérebro do dispositivo. O microcontrolador é um circuito integrado compacto, projetado para executar tarefas específicas dentro de sistemas embarcados. Ele combina um processador para efetuar tarefas, memória para registrar dados e periféricos de entrada/saída (I/O), tudo em um único chip. Essas capacidades permitem o controle de dispositivos eletrônicos de maneira eficiente e autônoma (Foster, 2016).

As redes de sensores sem fio (WSNs) têm uma grande flexibilidade de aplicação e têm sido amplamente estudadas em ambientes agrícolas. Saqib et al. (2020) desenvolveram uma solução eficiente para o monitoramento de grandes propriedades agrícolas, com ênfase na expansão da conectividade entre sensores via WSNs. O sistema propõe o uso do módulo de comunicação HC12, uma alternativa de baixo custo, baixo consumo de energia e alcance médio (200–1000 m), o que supera limitações comuns de outros protocolos de comunicação, como *ZigBee* e *Bluetooth*.

Para ampliar a cobertura de comunicação, Saqib et al. (2020) implementaram uma arquitetura em árvore com nós intermediários, onde cada sensor atua também como roteador, permitindo comunicações multi-hop, ou seja, os dados são transmitidos de nó sensor a nó sensor até a base de controle. Os testes em campo mostraram que a distância de transmissão aumentou de 250 m para 750 m com dois nós intermediários, mantendo uma taxa de perda de pacotes entre 2 e 5% e latência aceitável para aplicações agrícolas. Os autores concluem que, apesar de limitações, como baixa taxa de dados e maior latência, o sistema oferece uma alternativa altamente viável, econômica e adaptável para a transmissão confiável de dados em áreas rurais extensas, sendo ideal para o

monitoramento da umidade do solo e coleta de dados ambientais em agricultura de precisão.

Apesar dos resultados promissores do trabalho acima, a aplicação das redes sem fio no campo enfrenta várias barreiras. Bauer e Aschenbruck (2018) apresentaram um sistema de monitoramento agrícola voltado principalmente à medição contínua do índice de área foliar (LAI), um parâmetro-chave para o monitoramento do crescimento das culturas. No entanto, a implementação prática do sistema enfrentou diversos desafios, principalmente relacionados ao ambiente externo e à presença de animais. Dificuldades ambientais incluíram falhas na vedação dos sensores, condensação de água, curto-circuitos e degradação causada por poeira, lama e variações climáticas. Além disso, a fauna local, como roedores, aves e insetos, danificou equipamentos, roeu cabos e obstruiu sensores. Problemas com fornecimento de energia solar e conectividade em áreas remotas também comprometeram o funcionamento contínuo do sistema. Os autores destacam que, apesar de estratégias como proteção robusta, energia de *backup* e redundância de sensores, falhas ainda são inevitáveis. Portanto, a viabilidade econômica e a confiabilidade do sistema dependem de soluções de baixo custo e arquiteturas tolerantes a falhas.

Nas WSNs, os microcontroladores podem possuir uma antena embutida ou uma entrada para uma antena externa que permite transmitir e receber informações via ondas de rádio (Mottola e Pico, 2011). A comunicação entre os dispositivos depende do protocolo de comunicação, um sistema de regras que funciona como a linguagem que permite um dispositivo “falar” com o outro, com várias alternativas no mercado (*Zigbee*, *LoRa*, *Bluetooth* e *WiFi*).

Quando transmitido para a Internet, a WSN é tratada como uma plataforma de internet das coisas (IoT). A IoT expande a capacidade da WSN ao utilizar a computação na nuvem, limitado pela qualidade e velocidade da conexão. Manrique et al. (2016) identificaram as diferenças entre WSN e IoT e concluíram que WSN é um possibilitador da tecnologia IoT, ou seja, uma parte integral das plataformas IoT. Portanto, o termo IoT vem se popularizando em detrimento ao termo WSN nas publicações científicas e público em geral.

2.3 Internet das Coisas

A Internet das Coisas (IoT) é uma rede de dispositivos físicos, veículos, eletrodomésticos e outros objetos incorporados com eletrônicos, softwares, sensores, atuadores e conectividade. Essa interconexão permite que esses objetos troquem dados ou informações e aproveite recursos da Internet (Shafiq et al., 2022). A IoT pode promover a modernização e a inteligência no setor agrícola, pois conecta componentes físicos e virtuais para monitoramento, controle e gestão dinâmica dos processos agrícolas. Entretanto, apesar de amplamente estudada, suas aplicações práticas ainda estão em estágios experimentais (Xu et al., 2022).

Recentemente, o impacto da IoT na eficiência agrícola foi extensamente revisado por Duguma e Bai (2025). A obra explora como sensores conectados, análise de dados em tempo real e automação estão transformando a agricultura tradicional em um sistema inteligente e sustentável. Os autores analisam aplicações da IoT como irrigação precisa, monitoramento de solo, rastreamento de animais e uso de drones, destacando aumentos de produtividade, economia de água e redução de custos operacionais. Como desafios, são citados a escalabilidade, os custos iniciais, a interoperabilidade e as questões regulatórias.

Já no contexto experimental, Jayaraman et al. (2016) apresentaram o *SmartFarmNet*, uma plataforma baseada em IoT desenvolvida para otimizar o manejo agrícola por meio da coleta, análise e visualização de dados em tempo real. A plataforma permite a integração de qualquer dispositivo IoT (sensores, câmeras e estações meteorológicas) e fornece ferramentas intuitivas para agricultores e pesquisadores analisarem o desempenho das culturas sem necessidade de programação. A principal inovação está na capacidade de processar grandes volumes de dados com baixa latência, usando análise estatística em tempo real e ontologias semânticas para enriquecer os dados com contexto agronômico.

Considerando a automação da irrigação, o uso da IoT tem sido explorado por pesquisadores. Pramanik et al. (2022) desenvolveram e avaliaram um sistema de irrigação automatizado, baseado em sensores de umidade do solo e tecnologia IoT para melhorar a eficiência da aplicação de água na irrigação superficial. O sistema utilizou sensores capacitivos de umidade, instalados em diferentes profundidades e distâncias no campo, conectados a uma comporta automática alimentada por energia solar e controlada por redes sem fio. Usando o *software* Croplytics®, o sistema automatizou a irrigação com

base em dados em tempo real ao ajustar o fechamento da comporta, conforme a localização e a profundidade do sensor. Os testes, conduzidos sob diferentes níveis de déficit de umidade, identificaram que as posições ideais do sensor levam a uma eficiência média de aplicação de 86,6%, reduzindo o desperdício de água e a necessidade de mão de obra.

Quanto ao trabalho de King e Shellie (2023), os autores também utilizaram um índice termal foliar para coordenar um sistema de suporte à decisão, baseado em IoT para manejo de irrigação de precisão em vinhedos comerciais de pequeno porte nos Estados Unidos. O sistema utilizou sensores em campo para medir temperatura da copa, umidade do solo, dados climáticos e volume de irrigação, bem como modelos de rede neural para o cálculo dos índices termais. As informações eram disponibilizadas em tempo real para os viticultores, por meio de páginas *web* hospedadas localmente, acessíveis via celular ou computador. Durante quatro safras, o sistema foi adotado por dois gerentes de vinhedos para orientar decisões de irrigação. Os resultados demonstraram que o sistema pode ser uma ferramenta confiável e automatizada para manejo hídrico em regiões semiáridas.

Apesar do grande potencial, uma dificuldade no uso de IoT na agricultura é a comunicação entre sensores. Dessa maneira, Jiménez-Buendía et al. (2021) demonstraram que, apesar do maior gasto energético, é viável usar a rede *Wi-Fi* para interconectar os nós sensores, desde que haja um manejo de energia eficiente. A rede de sensores desenvolvida monitorou variáveis do solo, da planta e da atmosfera, e aumentou a precisão no manejo com déficit de amendoeiras cultivadas numa região semiárida da Espanha. A integração direta com o *Wi-Fi* permite explorar o potencial das plataformas IoT sem restrições de protocolos de comunicação privados, visto que a incompatibilidade causada pelo uso de vários tipos de protocolos é um dos principais entraves no desenvolvimento de plataformas de IoT (Xu et al., 2022).

Ainda no contexto da comunicação, há várias formas criativas de superar as dificuldades. Por exemplo, Almalki et al. (2021) apresentaram uma solução integrada e de baixo custo para o monitoramento ambiental em fazendas inteligentes, combinando sensores de Internet das Coisas (IoT), drones (UAVs) e computação em nuvem. O sistema foi testado por um ano em uma fazenda na Tunísia, monitorando a temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a radiação solar, a chuva e a umidade do solo. Os sensores coletaram os dados a cada hora e transmitiram-nos para um *gateway* terrestre, a partir do qual um drone coletava os dados a cada 12 horas para envio à nuvem. O trabalho

demonstrou a eficiência e a aplicabilidade da interação entre IoT e drones, em especial em áreas rurais com infraestrutura limitada.

Os trabalhos citados até então demonstram como os sensores sem fio oferecem grande flexibilidade para o desenvolvimento de várias soluções na agricultura. Com a tendência de redução dos custos de *hardware* e de programação, graças à miniaturização dos circuitos e evolução da inteligência artificial, espera-se que novas soluções sejam amplamente desenvolvidas. Dessa maneira, não apenas grandes produtores, mas também os pequenos produtores rurais poderão usufruir de ferramentas digitais para o aumento da eficiência do sistema produtivo e, consequentemente, maior sustentabilidade.

2.3.1 Inteligência Artificial das Coisas

A inteligência artificial (IA) é definida como a capacidade de sistemas computacionais em simular processos inteligentes humanos, como aprendizado, percepção e tomada de decisões. A principal vantagem da IA no contexto da irrigação é sua habilidade de processar grandes volumes de dados ambientais em tempo real, possibilitando a previsão e interpretação de variáveis, como umidade do solo, necessidade hídrica das culturas e cronogramas de irrigação (Wei et al., 2024). Portanto, torna-se imprescindível a integração das redes IoT com modelos IA para formar a Inteligência Artificial das Coisas (AIoT, do inglês, *Artificial Intelligence of Things*).

Apesar da concepção de sofisticação e altos custos, a tecnologia atual permite a implantação de soluções baseadas em IoT e IA a um custo reduzido. Para alcançar esse objetivo, Dahane et al. (2022) propuseram uma plataforma inteligente de baixo custo que integra sensores IoT e inteligência artificial para otimizar o manejo da irrigação em pequenas propriedades rurais. O sistema coleta variáveis, como umidade do solo, temperatura e umidade do ar, fluxo e nível de água, e intensidade luminosa, graças ao uso de sensores com preços acessíveis e microcontroladores amplamente utilizados em prototipagem, como Arduino e *Raspberry Pi*. A inovação central está na aplicação de redes neurais recorrentes para prever variáveis ambientais, com base em dados históricos e previsões meteorológicas, possibilitando um planejamento de irrigação mais preciso e eficiente.

O trabalho de Dahane et al. (2022) supramencionado utilizou a técnica de aprendizagem de máquina de redes de neurônios artificiais com várias camadas (*deep learning*) para realizar as previsões das variáveis ambientais. Assim, entende-se que a

construção de um sistema de IA necessita de técnicas de aprendizagem de máquinas, como redes de neurônios artificiais (*artificial neuron network* - ANN), florestas aleatórias (*random forests* - RF) e máquina de suporte vetorial (*support vector machine* - SVM) (Alvin et al., 2022).

Os modelos gerados pela aprendizagem de máquina, embora sejam inteligentes (ou seja, adaptativos, sem a necessidade de uma programação explícita), a interpretação dos resultados pode não ser intuitiva, fornecendo uma interpretação binária (“preto e branco”) dos dados dos sensores. Enquanto nos computadores essa precisão é desejada, essa abordagem pode se mostrar ineficaz para o manejo de irrigação, visto que o SSPA é afetado por várias variáveis não-lineares, sujeitas a mudanças constantes (Neugebauer et al., 2023).

Em contraste à rigidez do controlador com lógica binária, surgiu-se a lógica difusa, uma abordagem baseada na maneira que humanos tomam decisões em situações de incerteza. A lógica difusa tem grande potencial no controle da irrigação, pois pode oferecer um manejo adaptativo às condições específicas (Hoque et al., 2023).

A lógica difusa é uma ferramenta de computação flexível que cria algoritmos baseados no conhecimento humano estruturado. Essa abordagem permite o desenvolvimento de sistemas inteligentes a partir de informações expressas em linguagem natural. Embora faça parte da IA, sua aplicação é mais recente do que os sistemas especialistas, baseados em IA. A lógica difusa é útil para resolver problemas com imprecisão, incerteza, aproximações e verdades parciais (Kambalimath e Deka, 2020), como é o caso do manejo da irrigação.

O interesse pela lógica difusa no manejo de irrigação tem aumentado nos últimos anos. Por exemplo, Jamroen et al. (2020) propuseram uma maneira de interpretar dados da temperatura foliar e umidade do solo utilizando esse novo paradigma. Os autores combinaram diferentes graus de pertencimento dos possíveis valores de umidade do solo e índice de estresse hídrico da planta (CWSI) para criar manejos de irrigação adaptativos com base na retroalimentação de sensores infravermelho e capacitivos.

Embora o sistema de manejo de irrigação baseado na lógica difusa possa economizar água e energia e reduzir contaminações do solo, seu desempenho depende de uma configuração cuidadosa e adaptada às condições locais. Essa conclusão foi apresentada por Neugebauer et al. (2023) ao apresentar o desenvolvimento de um modelo de irrigação controlado por lógica difusa e sua comparação com um sistema convencional temporizado. Os autores usaram três variáveis de entrada (temperatura ambiente, umidade

do solo e horário do dia) para determinar a intensidade da irrigação. O estudo demonstrou que o posicionamento do sensor de umidade do solo influencia significativamente o consumo de água e uma má definição das funções de pertinência das variáveis difusas pode elevar o consumo em até 38%.

Nesses exemplos, nota-se a necessidade básica de se obter grandes volumes de dados de qualidade e que reflitam os processos do SSPA. Dessa maneira, os nós sensores sem fio de baixo custo, que podem ser conectados entre si e com a Internet, tornam-se altamente relevantes para o desenvolvimento desses sistemas. Os nós sensores sem fio removem a necessidade de cabos, permitem uma flexibilidade que é essencial para aplicações agrícolas e possibilitam aproveitar os recursos computacionais na nuvem. A computação na nuvem, em particular, é o grande divisor de águas para levar a inteligência artificial para o sistema agrícola.

2.4 Manejo da irrigação

As redes de sensores sem fio (WSN) e a internet-das-coisas (IoT) podem aumentar a precisão do manejo de irrigação desde que haja dados de qualidade do sistema, ou seja, desde que reflitam as condições do solo, da planta e da atmosfera. Dessa maneira, um manejo criterioso deve ser baseado em algum indicador objetivo (critério), apoiado em alguma variável do sistema solo-planta-atmosfera (SSPA). O nível de sofisticação do indicador depende de vários fatores, principalmente o poder aquisitivo do irrigante e a disponibilidade de mão de obra especializada (Blanco-Cipollone et al., 2017).

O método indicador do manejo de irrigação depende de pelo menos um instrumento de medida. Tanto para o solo quanto para a planta, a forma mais precisa de saber o conteúdo de água é pelo método gravimétrico (Dixon et al., 2023). Nesse método, obtém-se a massa da amostra, seja o tecido vegetal ou amostra do solo. Em seguida, as amostras são secas em estufa e pesadas novamente. A diferença de massa entre a amostra fresca e seca é a quantidade de água na amostra. Nesse método, fica evidente que, apesar da precisão, trata-se de um processo destrutivo e oneroso, portanto, não é adequado para o manejo da irrigação de alta frequência. Assim, os métodos indiretos são preferíveis para o manejo da irrigação (Ihuoma e Madramootoo, 2017).

De acordo com Jones (2004), os métodos indiretos se baseiam em indicadores relacionados com (i) o monitoramento das condições meteorológicas, para estimar a demanda evaporativa da atmosfera; (ii) o monitoramento da umidade do solo, para

estimar o consumo de água pelas plantas e as perdas por evaporação; e (iii) o monitoramento das condições da planta, para estimar o status hídrico da planta. Esses três tipos de monitoramento são necessários para o manejo criterioso da irrigação.

2.4.1 Monitoramento das condições meteorológicas

O clima é o fator mais evidente que afeta o desenvolvimento e crescimento vegetal. As mudanças no tempo podem ser detectadas por diversos sensores que monitoram a temperatura (°C), a umidade relativa do ar (%), a velocidade do vento (m s^{-1}), a radiação solar (W/m^2) e a precipitação pluvial (mm). Com esses dados, é possível estimar a demanda evaporativa da atmosfera, comumente quantificada de forma indireta na forma de evapotranspiração de referência (ET_o).

Existem vários métodos para estimar a ET_o. O método padrão recomendado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) é o *Penman-Monteith* FAO 56 (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\frac{900U_2}{T + 273}\right)(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (2)$$

em que ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n é a radiação líquida à superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G é a densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); γ é a constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T é a temperatura média do ar (°C); U_2 é a velocidade média do ar a 2 metros de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de vapor saturado médio (kPa); e e_a é a pressão de vapor atual (kPa).

Na ausência dos dados de radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, a evapotranspiração, em mm dia^{-1} , pode ser estimada por uma equação mais simplificada (Hargreaves-Samani, 1985):

$$ET_o = 0,0023 \times 0,408 \times (T_{\text{med}} + 17,8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} R_a \quad (3)$$

em que T_{med} é a temperatura média do dia (°C), T_{max} é a temperatura máxima do dia (°C), T_{min} é a temperatura mínima do dia (°C) e R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

Ao estimar a ETo, podemos, com os devidos ajustes à cultura e ao ambiente, estimar a necessidade hídrica da cultura. No entanto, não há como saber o momento de irrigar, de modo que o turno de rega dependerá da capacidade de armazenamento de água na zona radicular da cultura, o que constitui o balanço de água no solo.

Além dos problemas citados acima, o uso da ETo e o Kc depende fortemente da acurácia das condições atmosféricas medidas. Embora métodos como a equação de *Penman-Monteith* sejam amplamente utilizados, sua aplicação direta ignora particularidades fisiológicas da planta e exige calibração contínua. Além disso, técnicas baseadas apenas em dados climáticos tendem a falhar sob estresses moderados ou severos, quando há desacoplamento entre clima e resposta da planta. Dessa forma, a integração de sensores ambientais com informações fisiológicas da planta é o caminho mais promissor para sistemas de irrigação sustentáveis e eficazes (Simbeye et al., 2023).

2.4.2 Monitoramento da umidade do solo

O solo atua como um reservatório do qual a planta absorve água e nutrientes por meio das raízes. Como argumentado anteriormente, os métodos indiretos são preferíveis, e, no caso do solo, esses métodos consistem em coletar uma propriedade do solo que está associada com o conteúdo de água no solo.

O tensiômetro é o sensor mais comum para monitorar o status hídrico do solo e sua preferência se dá por conta do seu baixo custo e sua simplicidade (Bahadur e Singh, 2021). O tensiômetro mede a tensão com que a água está retida no solo. O poder de sucção aumenta à medida que o solo seca e a relação entre o potencial hídrico do solo e o conteúdo de água no solo é chamada de curva de retenção de água no solo (Richards, 1931).

Com base na mesma lógica, os sensores que mensuram a permissividade relativa (ou constante dielétrica) do solo estimam o conteúdo de água no solo por meio de uma curva que relaciona as propriedades dielétricas com a umidade do solo (Abdulraheem et al., 2024), podendo-se citar as técnicas reflectometria no domínio do tempo (TDR, do inglês, *time domain reflectometry*) e reflectometria no domínio da frequência (FDR, do inglês, *frequency-domain reflectometry*). Essas técnicas baseiam-se na inserção de uma sonda no solo que envia uma onda eletromagnética para determinar o tempo (TDR) que o pulso elétrico leva para voltar à superfície; no caso da FDR, múltiplas frequências são utilizadas para melhorar a precisão da medida (Abdulraheem et al., 2024).

Para implementar o monitoramento da umidade do solo para fins de automação, é necessário definir um nível de água mínimo no solo, a partir do qual a irrigação é ativada até que o nível de água retorne para um nível pré-estabelecido. Esse nível é geralmente a capacidade de campo ou um nível um pouco abaixo no caso da irrigação com déficit controlado. De qualquer maneira, trata-se de um mecanismo de retroalimentação que ajusta a umidade do solo com base na umidade reportada pelos sensores.

Com base em sensores capacitivos, Domínguez-Niño et al. (2020) demonstraram a viabilidade da automação da irrigação em pomares com controle baseados no balanço hídrico, ajustados por retroalimentação dos sensores. Apesar da variabilidade entre os sensores, a normalização dos dados diários garante interpretações consistentes e decisões precisas. As doses de irrigação geradas corroboraram a ETc medida por lisímetros e foram superiores ao manejo realizado com base na experiência de irrigantes locais, além de exigir menor esforço. O algoritmo apresentado pelos autores adaptou-se a variações no vigor das árvores, tornando-se promissor para aplicações hortícolas em condições específicas.

De forma semelhante, De Melo et al. (2023) obtiveram resultados satisfatórios ao desenvolver um sistema alimentado por energia solar para medir o conteúdo de água no solo e automatizar a irrigação com o uso do Arduino, uma placa de desenvolvimento para prototipagem. A comparação entre os dados de umidade de solo, coletado com sensores resistivos, com o teor de água no solo, determinado pelo método gravimétrico, mostrou bom resultado, com R^2 de 0,98.

Os tensiômetros podem também ser adaptados para um sistema de irrigação automático. Sanches et al. (2021) adaptaram um transdutor, dispositivo que converte um tipo de energia em outra, em um tensiômetro para permitir o monitoramento do potencial mátrico do solo de forma contínua e automática. O tensiômetro pode ser conectado a um microcontrolador para programar a irrigação com base num valor de referência do tensiômetro.

Similarmente, Cormier et al. (2020) utilizaram tensiômetros conectados a redes sem fio para controlar o manejo automático de irrigação, com base num valor alvo de tensão fixo ou um valor alvo de tensão dinâmico, ajustado por dados de ETc. Os autores reportaram que a segunda opção teve a melhor performance, aumentando a eficiência no uso da água em até 44%, evidenciando o potencial do monitoramento automático e da conexão com modelos preditivos (ETc) de ajuste. Esses resultados corroboram outro estudo que mostrou que a irrigação com base na tensão de água do solo levou à maior

produtividade de frutos de tomate em comparação com a irrigação convencional com lâmina constante (Lemay et al., 2012).

Apesar de ser amplamente utilizada, a automação do manejo de irrigação via monitoramento da umidade do solo tem limitações. O processo de transpiração e a capacidade da planta de absorver água do solo, dependentes do crescimento e desenvolvimento da planta, tornam os métodos baseados no solo inerentemente imprecisos ao longo do tempo (Risso et al., 2022). Além disso, a instalação dos sensores geralmente envolve a abertura de trincheiras no campo e, assim, em caso de falhas nos sensores, a substituição pode ser onerosa.

Outra desvantagem é a grande variabilidade na umidade do solo. Datta et al. (2018) compararam cinco sensores eletromagnéticos que mensuram a permissividade relativa do solo. Os sensores foram comparados com a umidade do solo estimada pelo método gravimétrico. Os resultados demonstraram que nenhum dos sensores apresentaram performance satisfatória em solos com alta salinidade e alto teor de argila. Além disso, mesmo quando os sensores performam satisfatoriamente, como em solos mais arenosos e com baixa salinidade (Datta et al., 2018), outros fatores precisam ser levados em conta, como o crescimento da planta. Dessa forma, o monitoramento das condições da planta aparece como o mais próximo do ideal, visto que a planta é o componente principal no SSPA.

2.4.3 Monitoramento das condições da planta

Embora o manejo baseado no solo e na atmosfera sejam úteis e bastante estudados e utilizados, o manejo da irrigação baseado em respostas das plantas pode ser considerado como a opção mais próxima do ideal, pois integra o status hídrico do solo e da atmosfera, além das respostas fisiológicas das plantas à quantidade de água disponível (Fernández, 2017). O teor relativo de água (TRA), estimado pelo método gravimétrico, é a abordagem direta mais precisa do status hídrico da planta. De forma análoga aos métodos diretos feitos no solo, o método gravimétrico é laborioso, lento e destrutivo (Ihuoma e Madramootoo, 2017), sendo preferíveis os métodos indiretos.

O potencial hídrico da planta, como a TRA, é também dito como padrão e, da mesma maneira, tem dificuldades associadas com a medida: laborioso, lento e destrutivo. Entretanto, alguns artigos destacam os avanços recentes no monitoramento contínuo do potencial hídrico da planta com microtensiômetros (Blanco e Kalcsits, 2021; Lakso et al.,

2022). Dessa forma, a medida do potencial hídrico diretamente da planta, de forma contínua, permite a automação da irrigação com base no potencial hídrico da planta.

Há várias técnicas de medida baseada nas plantas. Noun et al. (2022) revisaram as abordagens utilizadas para estimar o status hídrico vegetal e as classificaram-nas em sete tipos de métodos: (i) condutância estomática, (ii) pressão de turgor, (iii) diâmetro do caule, (iv) largura da folha, (v) potencial hídrico, (vi) teor relativo de água e (vii) fluxo de seiva. Os autores apresentaram todas as vantagens e desvantagens de cada abordagem, seus usos no monitoramento contínuo e seus respectivos usos num sistema de irrigação automatizado. No entanto, os autores deixaram algumas técnicas sem revisar, como a emissão acústica e a temperatura foliar.

Quanto ao uso da emissão acústica (AE), Simbeye et al. (2023) propuseram um sistema de monitoramento do estresse hídrico em plantas, baseado em um sinal gerado por cavitações no xilema das plantas sob estresse. O estudo utilizou plantas de tomate em estufa, com sensores posicionados nos caules para captar AE em tempo real. A emissão acústica mostrou correlação com a transpiração, a temperatura e a umidade, permitindo a criação de um modelo matemático para irrigação de precisão. A principal inovação foi a aplicação de sensores AE integrados a instrumentos virtuais, possibilitando controle automatizado da irrigação de forma não destrutiva, sensível e contínua. A técnica visa capturar a resposta fisiológica real da planta à seca, superando limitações de indicadores indiretos, como a umidade do solo.

Por outro lado, Noun et al. (2022) destacaram a eficácia e a sensibilidade da condutância estomática ao estresse hídrico, embora haja limitações que incluem a natureza manual da técnica de medição (porometria), além da frequência na calibração e dificuldade na automação (Mcdermitt, 1990). Nesse contexto, a temperatura foliar (T_F) pode também ser utilizada como um indicador por ter uma forte dependência da abertura estomática. Como o principal foco do presente trabalho, o monitoramento da T_F para fins de manejo de irrigação é explorado com maior profundidade, desde os princípios físicos ao uso na automação do sistema de irrigação.

2.5 Monitoramento da temperatura foliar: princípios e aplicação na automação

A mudança de estado da água do líquido para o gasoso envolve uma troca de energia de um sistema para o outro. Essa troca de energia pode ser detectada na forma de

calor, sensível por termômetros de infravermelho e câmeras termais (Parihar et al., 2021). Portanto, a diferença entre a temperatura da superfície foliar e a do ar ao redor da folha proporciona uma informação relevante quanto ao status hídrico da planta, de acordo com o modelo de balanço energético de uma folha transpirando (Eq. 4):

$$R_n = H + \lambda E + A_n \quad 4$$

em que R_n é a radiação líquida da folha, H é o fluxo de calor sensível, λE é o fluxo de calor latente e A_n é a assimilação líquida, todos em $W\ m^{-2}$. As plantas, sob condições de boa disponibilidade de água, atingem a transpiração potencial máxima ou próxima da máxima, mantendo a folha mais fria que o ambiente. À medida que a água se torna limitante, as plantas começam a fechar os estômatos, λE diminui, tornando o H mais dominante e alterando a temperatura foliar (Blonquist Jr. et al., 2009).

No que se diz respeito à instrumentação para medir a temperatura da superfície da folha, destacam-se os termômetros infravermelhos (TIVs) e as câmeras termais (termografia). Os TIVs detectam a radiação termal dentro do seu campo de visão e reportam a temperatura do objeto como uma média da área de detecção. Por outro lado, as câmeras termais detectam a radiação em múltiplos pontos, limitado à resolução da câmera, o que gera imagens termais. Consequentemente, o valor das câmeras termais é muitas vezes maior que o dos TIVs (Valente et al., 2019).

O princípio que rege tanto os TIVs quanto as câmeras termais é que a energia térmica emitida por um objeto é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta da superfície do objeto (Eq. 5):

$$q = \sigma \varepsilon T^4 \quad 5$$

em que q é a radiação emitida, σ é a constante de Stefan Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$), ε é a emissividade e T é a temperatura absoluta da superfície do objeto (K). A radiação emitida pelo objeto é função da temperatura da superfície e da sua emissividade. A emissividade é a razão entre a emissividade de um objeto em relação à emissividade de um corpo negro, um objeto de referência que tem emissividade igual a 1,0.

Dessa maneira, a T_F tem forte correlação com a condutância estomática (g_s). Essa correlação foi explorada por Crapado et al. (2017) com *Coffea arabica*, cultivado sob diferentes sistemas de sombreamento. A técnica baseia-se na análise da T_F para estimar parâmetros estomáticos e compará-los com medições diretas da g_s . Os experimentos,

realizados em campo e em laboratório, mostraram correlação moderada ($r = 0,66$) entre os índices derivados da termografia e g_s , indicando que a abordagem é útil para análises comparativas e tendências, mas não para medições absolutas em alta resolução temporal.

Uma conclusão semelhante foi reportada por um estudo com videiras por Jones et al. (2002), o que dá mais suporte à noção de que termografia é mais útil para a comparação e seleção de várias plantas ao mesmo tempo, mas tem aplicação limitada para o manejo de irrigação. Por outro lado, medidas contínuas de T_F com TIVs podem ser usadas para detectar o estresse hídrico e estimar a g_s a partir de equações que escalam medidas pontuais para todo o dossel, com base no balanço de energia (Blonquist Jr. et al., 2009; Jones et al., 2017). Outra vantagem é a possibilidade de automatizar o monitoramento e, consequentemente, o manejo de irrigação.

Para aplicações na agricultura, um TIV de baixo custo é preferível para aumentar as chances de se ter um retorno sobre o investimento. Mahan e Yeater (2008) compararam, em condições de campo, o TIV de qualidade industrial, ou seja, com alta precisão, durabilidade e confiabilidade, com um TIV de qualidade para o consumidor, que custa uma fração do preço do TIV industrial. Os autores concluíram que sensores de baixo custo são adequados para aplicações agrícolas e ainda destacaram duas vantagens principais da utilização de sensores térmicos de baixo custo: (i) a possibilidade de utilizar mais sensores para permitir uma análise mais completa das variações espaciais e temporais em temperatura do dossel e (ii) a viabilidade de substituição e reparo de sensores do sistema de monitoramento sem fio. Com o uso de sensores de temperatura com o preço mais acessível, a automação do manejo de irrigação com base nesse indicador torna-se mais viável, desde que haja uma interpretação adequada desses dados.

Para realizar a automação com base na temperatura, é necessário um índice para que possamos automatizar a irrigação com base na temperatura foliar. A diferença ($T_F - T_A$) demonstrou, no entanto, ser influenciada por outros fatores ambientais, particularmente ao déficit de pressão de vapor (DPV). Isso levou ao desenvolvimento do índice de estresse hídrico das culturas (CWSI, do inglês *crop water stress index*) (Idso et al., 1981) para abordar a sensibilidade da T_F à variabilidade ambiental, normalizando o índice para o DPV (Ekinzog et al., 2022), conforme a Equação 6:

$$CWSI = \frac{(T_F - T_A) - (T_F - T_A)_{LI}}{(T_F - T_A)_{LS} - (T_F - T_A)_{LI}} \quad 6$$

em que os subscritos LI e LS significam limite inferior e limite superior, respectivamente, que são uma normalização da diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar.

Esses limites podem ser estimados empiricamente, medindo-se a temperatura foliar de uma planta bem irrigada e transpirando no seu máximo potencial (limite inferior), e a temperatura foliar de uma planta sob estresse hídrico severo. As medidas utilizadas para estabelecer o limite inferior devem ser realizadas nas condições climáticas nas quais o índice será utilizado e submetidas a regressão linear com o déficit de pressão de vapor (Idso et al., 1981), o que pode ser um desafio, especialmente na automação de irrigação com dados em tempo real (Katimbo et al., 2022).

Para contornar essas limitações, Osroosh et al. (2015) desenvolveram um algoritmo adaptativo com base no CWSI para irrigar macieiras automaticamente. O diferencial do algoritmo é que o valor alvo para ativar a irrigação é dinâmico e se adapta de acordo com as tendências do CWSI ao longo do ciclo da cultura. O estudo demonstrou a viabilidade do uso do CWSI para automatizar a irrigação de árvores frutíferas (macieira), com melhor performance que o uso de coletas periódicas da umidade do solo com uma sonda de nêutrons.

Todavia, um estudo avaliou o CWSI em seis culturas, simulando erros típicos em sensores de temperatura do ar, umidade relativa e temperatura foliar. Os resultados mostraram que os erros no CWSI são fortemente influenciados pela inclinação da linha na regressão para estimar o limite inferior, sendo mais graves em espécies como a laranja e mínimos em espécies como a abobrinha. As principais fontes de erro identificadas foram as imprecisões nas temperaturas do ar e da copa, com destaque para o impacto de até 90% no CWSI para a laranjeira, quando há erro de 1,0 °C (Gonzalez-Dugo e Zarco-Tejada, 2024).

O estudo de Gonzalez-Dugo e Zarco-Tejada (2024) também destaca as limitações do CWSI por depender da temperatura do ar, visto que os dados meteorológicos podem não representar bem o microclima real das culturas. A distância entre a estação meteorológica e a lavoura, além da topografia, pode aumentar significativamente os erros em variáveis, como temperatura do ar e umidade relativa, comprometendo a precisão do CWSI. Ainda que sensores automáticos locais possam reduzir esse problema, a falta de calibração adequada continua sendo um desafio.

Dessa maneira, o índice Graus Acima do Dossel Não-Estressado (DANS) é outra métrica baseada na T_F , porém mais simples que o CWSI. O cálculo do DANS requer apenas a subtração da T_F medida em plantas sem estresse hídrico (plantas de referência)

da T_F de plantas estressadas (Taghvaeian et al., 2014). O DANS pode ser calculado com a Eq. 7.

$$\text{DANS} = T_F - T_{FSE}$$

7

As plantas de referência e as plantas estressadas estão sob condições de crescimento semelhantes e, assumindo o mesmo DPV, o DANS pode ser usado como uma detecção de estresse hídrico em tempo real sem calcular os limites inferior e superior (Nakabuye et al., 2022). Isso faz com que o DANS tenha uma vantagem muito importante em relação ao CWSI, pois torna-se desnecessário o cálculo de limites e o uso da temperatura do ar e da umidade relativa do ar. Assim, se combinarmos o DANS com sensores interconectados, que coletam dados em tempo real, o manejo de irrigação pode ser realizado de forma mais simplificada.

Para isso, faz-se necessário avaliar o DANS em relação ao CWSI, visto que este é o índice termal mais estudado na literatura. Nesse contexto, Blaya-Ros et al. (2020) avaliaram a viabilidade de imagens térmicas de dispositivos de baixo custo para detectar estresse hídrico em cerejeiras, comparando três índices térmicos: graus acima do tratamento de controle (DAC), CWSI e DANS. Os autores mostraram que tanto o DANS quanto o CWSI estavam fortemente relacionados com o potencial hídrico do caule, entretanto, recomendaram o DANS, devido a sua maior facilidade de aplicação para a programação da irrigação em comparação ao CWSI.

O DANS foi também testado para a programação da irrigação de milho cultivado em ambiente semiárido (Nakabuye et al., 2022). Os autores modelaram a T_F da planta referência (T_{FSE}), com R^2 de 0,94 em comparação com os dados observados no campo. Os autores demonstraram o potencial de se usar o DANS no lugar do CWSI e propuseram um limite de T_F de 0,5 °C para programar a irrigação de lavouras de milho cultivadas na região semiárida dos Estados Unidos.

Em adição, os termômetros infravermelhos (TIVs) se adaptam muito bem na automação de pivôs centrais. O pivô central pode fornecer a energia necessária para vários TIVs e o movimento circular do pivô permite escanear de forma integrada a T_F da cultura. Essas características permitem a automação do sistema de irrigação com aplicação de água à taxa variada e maior economia de água (Bhatti et al., 2023).

Nesse contexto, Bhatti et al. (2023) avaliaram dois sistemas de apoio à decisão para irrigação de precisão: o ISSCADA, que utiliza o índice integrado de estresse hídrico

da cultura (iCWSI) com sensores térmicos montados em pivôs centrais móveis; e o SETMI, que usa imagens de satélite e sensores de umidade do solo para modelar o balanço hídrico espacial. Ambos os métodos foram comparados com a prática convencional de irrigação em uma lavoura de milho e soja em Nebraska, durante os anos de 2020 e 2021. Os sistemas de irrigação foram testados em diferentes níveis (0%, 50%, 100% e 150% da irrigação plena). O ISSCADA com *feedback* da planta aplicou os menores volumes de água na maioria dos casos, enquanto o método convencional foi o que mais aplicou água. Mesmo com irrigação reduzida, os sistemas baseados em sensores térmicos mantiveram a produtividade das culturas. O iCWSI demonstrou ser eficaz para identificar estresse hídrico antes da perda de produtividade, especialmente em condições de estresse hídrico por limitação de energia.

Além da automação da irrigação convencional, o conhecimento da T_F permite a aplicação refinada do estresse hídrico regulado (Jones, 2004). Isso se deve pelo fato que a detecção do estresse hídrico, a nível foliar com TIVs, possibilita manter as plantas sob um estresse hídrico controlado sem que incorra em perda de rendimento das culturas (Bhatti et al., 2022). Essa característica pode ser outra vantagem do manejo de irrigação baseado no sensoriamento foliar em relação ao sensoriamento da umidade do solo. Dessa forma, o sensoriamento da temperatura foliar deve ser explorado à medida que as tecnologias de sensoriamento, de comunicação e de processamento avançam, com suporte de tecnologias de baixo custo e código aberto.

2.6 Controle no manejo da irrigação

Como discutido até o momento, o monitoramento das condições meteorológicas, da umidade do solo e/ou das condições das plantas é essencial para a automação do manejo de irrigação. No entanto, de modo geral, o relógio e o calendário são os instrumentos utilizados mais diretos para determinar o tempo de irrigação e o intervalo entre irrigações (turno de rega), respectivamente. Se o controle é feito exclusivamente pelo tempo, sem qualquer mecanismo de retroalimentação do sistema ou previsões de modelo teóricos, afirma-se que o controle é pouco criterioso e sujeito a vários erros. Isso pode induzir o irrigante a irrigar por mais tempo para garantir o suprimento de água às plantas. Contudo, o excesso de água no solo pode ser tão desastroso quanto a ausência dela, pois leva à falta de aeração, lixivia nutrientes, induz à maior evaporação e

salinização e propicia um microclima favorável ao desenvolvimento e disseminação de pragas e doenças (Albuquerque, 2010).

Dessa maneira, como argumentado até o momento, o controle centrado no SSPA é preferível, de modo que os estudos realizados para integrar as variáveis no controle da irrigação se tornam fundamentais (Damm et al., 2018). O controle da irrigação é geralmente dividido em dois tipos: preditivo (*feedforward*) e retroalimentação (*feedback*): o controle preditivo se dá com base no monitoramento das condições meteorológicas e o controle com retroalimentação baseia-se no monitoramento da umidade do solo ou nas condições hídricas da planta (Casadesús et al., 2012).

2.6.1 Controle de irrigação preditivo

O controle preditivo leva em consideração o balanço hídrico no solo. Nesse balanço, são contabilizadas as entradas e saídas de água na zona radicular da planta, também chamada de profundidade efetiva das raízes, de acordo com a representação gráfica do fenômeno (Figura 3):

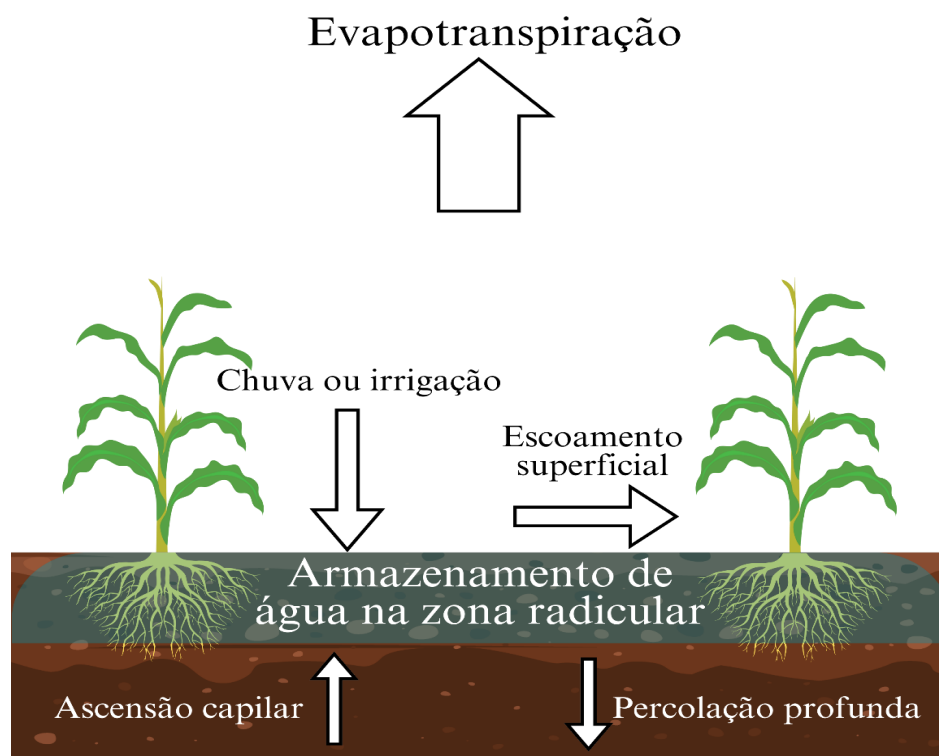


Figura 3. Ilustração do balanço de água no solo em culturas irrigadas, adaptado de Fereres et al. (1981).

A implementação de um controle de irrigação pressupõe a existência de um sistema hidráulico bem dimensionado, a fim de se minimizar o escoamento superficial e a percolação profunda, preferivelmente um sistema de irrigação localizada (gotejamento ou microaspersão). Dessa maneira, a principal perda de água do sistema é a evapotranspiração da cultura (ET_c).

O método recomendado pela FAO para estimar a ET_c envolve a multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o), a qual é calculada por equações empíricas, como o modelo de Penman-Monteith FAO 56 e o coeficiente da cultura (K_c) (Allen et al., 1998). A ET_o é definida como a evaporação e a transpiração combinada que ocorre numa cultura hipotética, cobrindo o solo, com altura fixada em 0,12 m, albedo de 23% e resistência estomática de 69 s m⁻¹, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrições hídricas (Smith, 1991). A informação da ET_c é utilizada em associação com o balanço hídrico do solo, onde é aplicada uma lâmina de água para repor a quantidade de água evapotranspirada.

Em busca de maior precisão, o coeficiente de cultivo (K_c) pode ser dividido em dois componentes: coeficiente da cultura basal (K_{cb}) e o coeficiente de evaporação (K_e) para representar a perda de água pela transpiração e a evaporação, respectivamente. Outros coeficientes podem ser incluídos na equação para ajustar a ET_c, como o coeficiente de estresse hídrico (K_s) e o coeficiente de localização (K_L) para irrigação localizada. O K_s é um fator de redução que ajusta a evapotranspiração potencial da cultura para refletir a disponibilidade real de água no solo, variando de 1 (sem estresse hídrico) até 0 (estresse hídrico máximo) (Allen et al., 1998). Já o K_L objetiva corrigir a lâmina de irrigação quando sistemas de irrigação localizados são utilizados. Isso é necessário, pois, nos sistemas localizados, uma pequena área da superfície do solo é molhada, o que causa uma menor evaporação em comparação à irrigação por aspersão (Mantovani et al., 2012).

Os cálculos para a estimativa da ET_c são geralmente complexos, o que precisa de recursos computacionais dedicados para a rotina de cálculos, tanto em *softwares* específicos (Silva et al., 2017; Ferreira et al., 2020; Santos et al., 2023), quanto instalado na própria estação meteorológica. Todavia, mesmo realizando os cálculos corretamente, percebe-se que planta é o fator-chave, pois o K_c é estimado de forma empírica, com base na relação entre a ET_c e a ET_o (Pereira et al., 2015). Dessa maneira, o K_c constitui uma fonte de incertezas, visto que vários fatores, além da fase fenológica, afetam esse coeficiente, incluindo o manejo, a variedade, o tamanho da planta, a quantidade de frutos e o estado nutricional (Casadesús et al., 2012).

2.6.2 Controle com retroalimentação

O mecanismo de retroalimentação é onipresente na natureza. No contexto do manejo de irrigação, um mecanismo de retroalimentação contém: (i) uma unidade de sensoriamento para medir a variável a ser regulada no sistema (input); (ii) um controlador para comparar o valor da variável medida com o valor desejado; e (iii) um atuador para realizar a ação necessária para controlar a variável, por exemplo, a abertura de uma válvula. Dessa maneira, a válvula permanece aberta até que a umidade do solo atinja a umidade desejável. Uma vez que a umidade é atingida, o atuador aciona o fechamento da válvula. A Figura 4 ilustra esse mecanismo de controle.

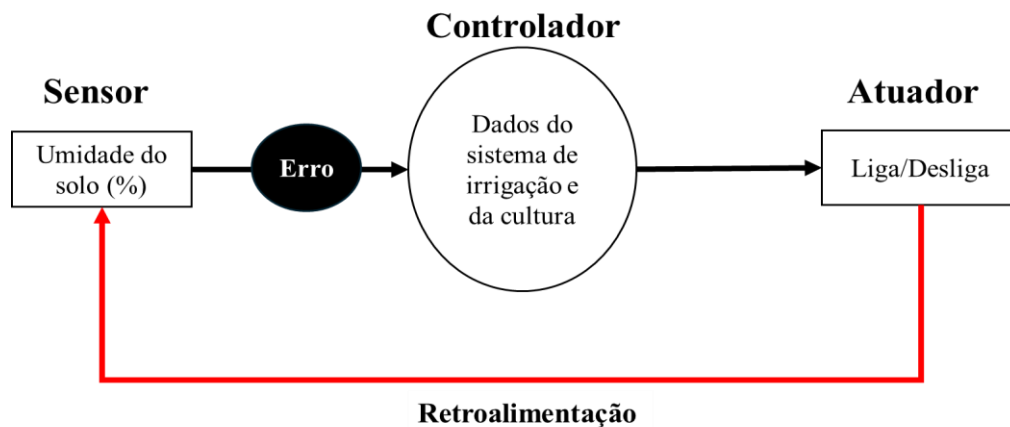


Figura 4. Esquema simplificado de um controle com retroalimentação no controle da umidade do solo.

A retroalimentação é um processo no qual o resultado de uma ação ou sistema é retornado ao seu ponto de origem para ajustar ou influenciar o comportamento futuro desse sistema. O mecanismo de retroalimentação não está presente em todos os tipos de controle, todavia é necessário para que haja ajuste do sistema.

Em tempos de comunicação de alta velocidade e microcomputação avançada, a implementação de sistemas de controle com retroalimentação e modelagem preditiva (Figura 5) tornou-se possível. Nesse sistema, o mecanismo de retroalimentação é utilizado para refinar o modelo teórico, como o balanço de água no solo ou as respostas fisiológicas da planta. Dessa maneira, é possível ter maior eficiência no manejo da irrigação (Casadesús et al., 2012).

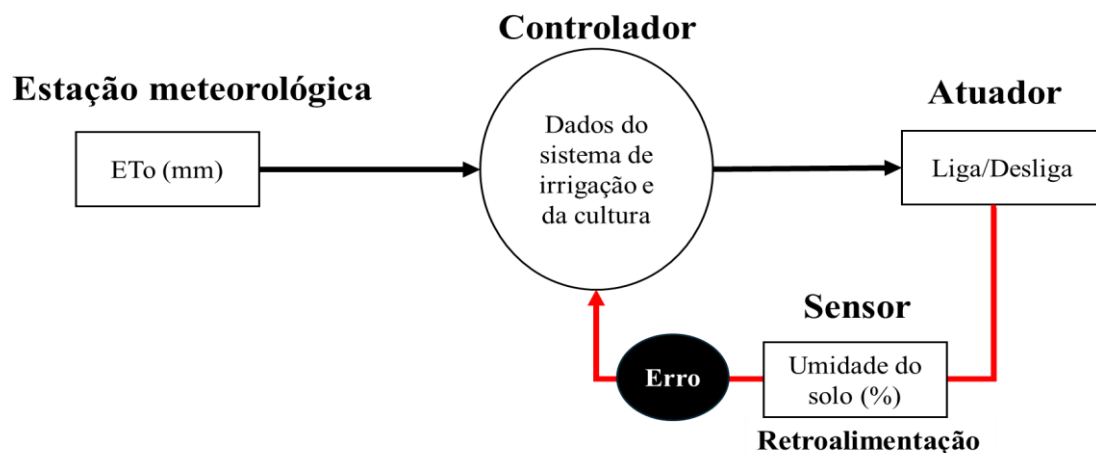


Figura 5. Controle com retroalimentação e modelagem preditiva.

Seguindo o modelo similar ao apresentado na Figura 5, Casadesús et al. (2012) desenvolveram um algoritmo geral para o manejo de irrigação de árvores seguindo sete passos automatizáveis: (1) estimativa das necessidades de irrigação, (2) adaptação a uma configuração de irrigação específica, (3) execução do manejo, (4) monitoramento do solo e/ou planta, (5) interpretação dos dados do sensor, (6) reação a eventos ocasionais e (7) ajuste do modelo de necessidades de irrigação. Dessa maneira, os autores ressaltam a importância de combinar o modelo preditivo com a retroalimentação.

Uma conclusão semelhante foi apresentada por Sui e Vories (2020), que fizeram uma comparação entre um método de manejo de irrigação baseados em sensores de umidade do solo e outro baseado no balanço hídrico em campos de soja e algodão. O estudo revelou que os dois métodos frequentemente divergem em relação ao número e ao momento dos eventos de irrigação recomendados, com variações acentuadas em solos arenosos e durante estágios iniciais ou finais de crescimento das culturas. O método baseado em sensores no solo demonstrou facilidade de uso, mas exigiu cuidado com a calibração e interpretações em condições específicas. Portanto, os autores sugerem o uso combinado de ambos os métodos, como abordagem complementar para melhorar a precisão e a eficiência no manejo da irrigação.

A implementação do sistema de controle com retroalimentação e modelagem preditiva necessita de uma maior variedade de sensores e uma comunicação coordenada entre esses sensores. O que foi discutido até então é como os sensores, as redes de sensores sem fio, a internet das coisas e a inteligência artificial são fatores-chave na criação e adoção de sistemas de irrigação inteligentes e outras soluções que constituem o

paradigma da agricultura digital. Isso justifica o interesse crescente dos pesquisadores, na academia e na indústria, nessas tecnologias.

2.7 O papel das tecnologias de baixo custo na expansão da agricultura digital no Brasil

A agricultura é o setor que menos aproveitou a revolução digital em comparação aos setores industriais e de serviços, em particular na América Latina (Puntel et al., 2023). O Brasil se consolidou como um dos líderes mundiais na produção e exportação de alimentos, no entanto, ainda há muito espaço para se desenvolver e consolidar essa posição do país no cenário mundial. Nesse contexto, as tecnologias digitais ampliam a inovação e a comunicação entre as várias partes que compõem a cadeia produtiva (Bolfé e Massruhá, 2020), o que pode contribuir para o aumento da produtividade agrícola de forma mais sustentável.

Em uma pesquisa *online* realizada com 753 produtores agrícolas (Bolfé et al., 2020), 95% dos respondentes demonstraram interesse em tecnologias de agricultura digital. No entanto, quase 75% dos entrevistados usam apenas as redes sociais como tecnologia digital. O uso da automação ou qualquer eletrônica embarcada são incipientes, com adoção de menos de 10 % dos entrevistados. Ainda, segundo a pesquisa, as barreiras que impedem a adoção dessas tecnologias são o valor alto de investimento em equipamentos (67,1 %) e prestadores de serviço (44%), problemas ou falta de conexão com a Internet (47,8 %) e falta de conhecimento sobre as tecnologias mais adequadas (40,9 %). Dessa maneira, com a exceção da parte de infraestrutura de rede, o desenvolvimento de tecnologias e soluções de menor custo junto ao produtor rural podem contribuir muito para a maior adoção dessas tecnologias.

A prototipagem com componentes de baixo custo abre a possibilidade da criação de soluções para fins de testes antes do refino com componentes mais robustos. Além disso, no contexto educacional, as plataformas de prototipagem são ferramentas de aprendizagem práticas que precisam ser mais exploradas para a formação de profissionais habilitados na agricultura digital (Pappas et al., 2022; Boca et al., 2023).

Nunca foi tão fácil ter acesso a ferramentas de prototipagem e de criação de sistemas IoT, o que inclui eletrônicos de baixo custo e ferramentas acessíveis ao público em geral. Ainda assim, apesar de todo potencial, a adoção de novas tecnologias enfrenta muitos desafios, incluindo a resistência à inovação por muitos agricultores, a falta de

integração entre sistemas, a baixa disponibilidade de infraestruturas de telecomunicações e gestão de dados e os custos mais elevados (Dhanaraju et al., 2022). Todavia, à medida que a tecnologia se torna mais acessível, soluções de alta tecnologia podem chegar às atividades agrícolas, o que exige uma melhor formação de profissionais para ajudar os agricultores e consultores (Puntel et al., 2023).

A coleta de dados automática é a parte fundamental de um sistema de monitoramento ou de controle de irrigação inteligente. De forma similar com o tema principal deste trabalho, Fisher e Kebede (2010) descreveram o desenvolvimento e teste de um sistema automatizado de baixo custo para monitoramento contínuo da temperatura foliar, do solo e do ar, além do status hídrico do solo em áreas agrícolas. O circuito foi projetado com foco em baixo consumo de energia, permitindo operação prolongada com baterias. Durante a safra de 2009, os dispositivos foram implantados em lavouras de milho sob condições irrigadas e não irrigadas, mostrando boa confiabilidade (91% de dados válidos) e sensibilidade para detectar estresse hídrico por meio de variações na temperatura foliar e umidade do solo. O estudo concluiu que a tecnologia é promissora para monitoramento agrícola de precisão, com potencial para auxiliar no manejo da irrigação e seleção de cultivares tolerantes à seca.

Um passo-chave no desenvolvimento de sistemas inteligentes acessíveis é integrar os sensores de baixo custo em um sistema de controle de irrigação. Goap et al. (2018) desenvolveram um sistema inteligente de irrigação que combina sensores de campo, dados meteorológicos e algoritmos de aprendizado de máquina para prever a umidade do solo e otimizar o uso da água. O sistema utiliza sensores para medir a temperatura do solo, a umidade do solo, a umidade do ar, a temperatura do ar e a radiação UV, além de incorporar previsões meteorológicas obtidas *online*. Com esses dados, o algoritmo de aprendizagem de máquina estima a diferença diária de umidade do solo e, a partir disso, gera previsões de umidade para os próximos dias.

De forma semelhante, Dahane et al. (2022) desenvolveram uma plataforma inteligente de baixo custo que integra sensores IoT e inteligência artificial para otimizar o manejo da irrigação em pequenas propriedades rurais. A plataforma mostrou-se promissora na redução do consumo de água e energia, com potencial de grande impacto para pequenos agricultores que enfrentam restrições financeiras e operacionais, oferecendo uma alternativa viável para implementar a agricultura de precisão.

Os exemplos acima demonstram como as plataformas de IoT, a um custo mais acessível, podem oferecer soluções viáveis ao serem facilmente implementados no

desenvolvimento de pesquisas e empreendimentos em regiões mais desfavorecidas do país. Essa iniciativa fomenta as ferramentas para a elaboração de protótipos a preço reduzido antes da aquisição de soluções mais robustas. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de soluções próximo do usuário final, seja o estudante, o profissional ou o produtor rural, a fim de acelerar a disseminação dessas tecnologias e a democratização da agricultura digital.

2.7.1 Desafios e oportunidades na confecção de protótipos de baixo custo

Segundo o relatório da Radar AgTech (2023), o Brasil já conta com 1.953 AgTechs, empresas voltadas para o fornecimento de soluções tecnológicas para os empreendimentos agrícolas. Apenas 5,2% dessas AgTechs estão na região Nordeste, enquanto o Sudeste (56,9%) e o Sul (26%) concentram quase 83% desse tipo de empreendimento. Isso revela a inequidade das iniciativas e dos investimentos em tecnologias voltadas à agricultura entre as regiões brasileiras.

Embora a concentração de capital nas regiões Sul e Sudeste expliquem essa discrepância, as pessoas que compõem as instituições públicas e privadas em cada região, incluindo a academia, têm um papel a cumprir. Espera-se que os pesquisadores busquem recursos para financiar seus projetos e, para isso, o uso de protótipos de baixo custo torna-se uma alternativa para verificar a viabilidade das ideias a um custo reduzido. No entanto, o desenvolvimento de soluções baseadas em componentes de menor valor enfrenta desafios técnicos e operacionais.

Dentre os desafios, destaca-se o fato que a calibração e precisão dos sensores de baixo custo são limitadas, exigindo ajustes frequentes e validação experimental para garantir medições confiáveis. Além disso, a durabilidade desses dispositivos em campo pode ser afetada por condições adversas, como umidade excessiva e exposição prolongada ao sol; e a conectividade sem fio também pode ser um obstáculo em áreas rurais com infraestrutura de rede limitada (Bauer e Aschenbruck, 2018; Jiménez-Buendía et al., 2021).

Apesar dos obstáculos, a prototipagem com componentes de baixo custo deve ser estimulada com a busca crescente por soluções inovadoras e acessíveis. O avanço da eletrônica embarcada e a crescente comunidade de desenvolvedores de código aberto tornam a idealização do manejo de irrigação inteligente mais acessível para diferentes realidades agrícolas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos relacionados com o desenvolvimento do protótipo foram conduzidos no Laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem (LHID) e na área experimental da Universidade Estadual Sudoeste da Bahia (UESB), em Vitória da Conquista, BA, situada a 14° 51' 53" de latitude Sul e 40° 50' 13" de longitude Oeste, numa altitude de 840 m.

Esta sessão foi dividida em quatro partes: (i) desenvolvimento do protótipo de nó sensor; (ii) comparação do protótipo com um instrumento de referência (método padrão) para avaliar a acurácia das medidas; (iii) teste do protótipo no campo com o maracujazeiro e o rabanete; (iv) e teste da capacidade de transmissão de dados dos nós sensores.

3.1 Desenvolvimento do nó sensor

O nó sensor foi composto de (i) um sensor de temperatura infravermelho para medir a temperatura do objeto, (ii) um sensor de temperatura e umidade relativa do ar, (iii) um relógio de tempo real para manejar o consumo de energia do protótipo, (iv) um microcontrolador para gerenciar os sensores, e (v) uma fonte de energia de 5 V.

A temperatura foliar (T_F) foi medida usando o sensor de temperatura infravermelho MLX90614xAC-ESF-BAA (Melexis, Bélgica). O sensor (referido apenas como MLX a partir de agora) tem uma faixa operacional entre -70 e 180 °C, precisão de $\pm 0,5$ °C, resolução de 0,02 °C e campo de visão de 90°. O sensor possui calibração de fábrica para uma emissividade do objeto igual a 1,0. No entanto, a emissividade foi configurada para 0,98, considerada a emissividade média da folha (Paulo et al., 2023).

O sensor MLX foi conectado a uma placa de desenvolvimento ESP32 (Espressif Systems, Xangai, China) que funciona como um microcontrolador. O ESP32 é um dispositivo custo-efetivo de baixo consumo de energia com conectividade *Wi-Fi* e *Bluetooth*® integrada. Ele possui 32 pinos de entrada/saída de uso geral (GPIO, do inglês *general purpose input/output*) programáveis e um microprocessador dual-core Tensilica Xtensa de 32 bits (Santa Clara, CA, EUA).

Para medir a temperatura e a umidade relativa do ar, usou-se o sensor AM2302 (Aosong Electronics, Co., Guangzhou, China). De acordo com o fabricante, o sensor tem acurácia de $\pm 2,0\%$ para a umidade relativa e $\pm 0,5$ °C para a temperatura do ar nas

faixas de 0-99,9% e -40~80°C para a umidade relativa e temperatura do ar, respectivamente (Site do fabricante, <http://www.aosong.com/en/products-22.html>).

O sensor MLX, AM2302 e o relógio de tempo real (RTC – do inglês, *real-time clock*) foram conectados no microcontrolador, de acordo com a Figura 6. Uma vez conectados, o microcontrolador foi programado com instruções para controlar o *hardware*, incluindo o intervalo entre leituras, o tempo de leitura, as variáveis coletadas, a conexão com a rede e outros dispositivos, manipulação dos dados de entrada, operações aritméticas, entre outras instruções.

As placas ESP32 foram programadas usando-se o Ambiente de Desenvolvimento Integrado do Arduino. O ambiente de desenvolvimento usa uma variante da linguagem de programação C++, com a adição de algumas funções específicas para sistemas embarcados, com o suporte de inúmeras bibliotecas de código aberto. O código foi carregado para a placa de desenvolvimento por meio de um cabo USB. Uma vez fornecida energia à placa (3,3 – 5,0 V), o algoritmo começa a ser executado. Os códigos completos estão no Anexo A desta tese.

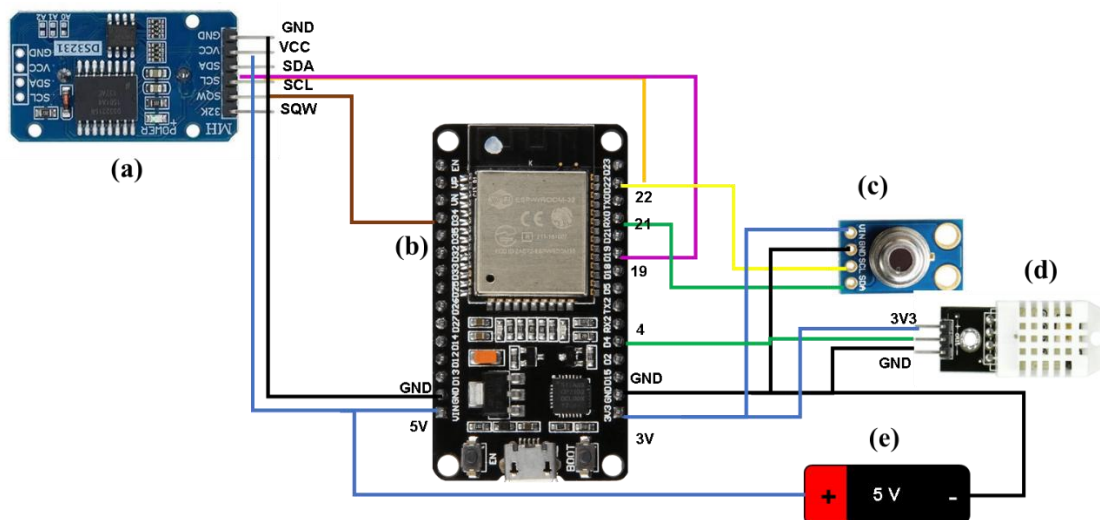


Figura 6. Conexão dos componentes do dispositivo de temperatura infravermelho embarcado, composto por um relógio de tempo real (a), um microcontrolador (b), um sensor de infravermelho (c), um sensor de temperatura e umidade (d), e uma fonte de energia (e). As linhas ilustram as conexões necessárias para o sistema funcionar adequadamente.

O preço, em reais e dólares, para construir cada protótipo encontra-se na Tabela 2. A construção da caixa para o circuito e bateria e o invólucro para o sensor MLX foi realizada numa impressora 3D (Pro Core H5, GTMAX3d, Brasil), localizada no Centro

de Inovação e Pesquisa em Educação e Computação da UESB (CIPEC/UESB). Usou-se o filamento de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), uma resina sintética termoplástica amplamente utilizada em impressão 3D.

Tabela 2. Componentes do protótipo nó sensor funcional

Componente	Descrição	Preço (R\$)	Preço (USD)
ESP32	Microcontrolador	R\$ 60,00	US\$ 7,00
AM2302	Sensor de temperatura e umidade	R\$ 30,00	US\$ 5,00
RTC DS3231	Módulo RTC	R\$ 25,00	US\$ 4,50
MLX90614	Sensor de temperatura infravermelho	R\$ 90,00	US\$ 15,00
Bateria Recarregável	Mini power bank	R\$ 45,00	US\$ 8,00
Outros	Cabos, resistores, protoboard, resina para impressão 3D e solda	R\$ 10,00	US\$ 2,00
Total		R\$ 280,00	US\$ 46,00^a

^aCotado em 05 de fevereiro de 2025 (R\$ 5,85/ US\$ 1,00).

3.2 Comparação de temperaturas

De acordo com Walther e Moore (2005), a precisão é o oposto do erro aleatório ou variância, ou seja, está associada com a variabilidade produzida pelo instrumento ou procedimento, portanto, não tem associação com o valor verdadeiro ou correto. Já a acurácia é definida como a distância entre o valor medido e o valor real (Walther e Moore, 2005). Dessa maneira, a acurácia do protótipo de nó sensor foi testada comparando-o com um instrumento de referência, SI-111-SS (Apogee Instruments, Inc., Logan, Utah, EUA), enquanto a precisão do nó sensor foi testada comparando vários nós sensores entre si. As características principais de ambos os sensores estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Especificações dos sensores de infravermelho MLX90614BAA e SI-111-SS

Especificação	MLX90614BAA (Melexis)	SI-111-SS (Apogee)
Campo de Visão	90°	44°
Precisão	±0,5°C	±0,2°C
Resposta Espectral	5,5 – 14 µm	8 – 14 µm
Tensão de Operação	3,3V / 5V	5–24V
Consumo de Energia	~25mA	~1mA
Tempo de Resposta	0,5 s	0,6 s
Interface	I ₂ C (0x5A padrão) / PWM	Analógica
Custo (apenas sensor)	R\$90,00 ^a	R\$6.500,00 ^a / US\$729,00 ^b
Custo (sensor + e datalogger)	R\$315,00	R\$ 10.100,00 (CR350 – 3.600,00)

V: volts; ^aPreço médio de revenda em fevereiro de 2025. ^bPreço de fábrica. ^cO data logger adicionado consistiu em um módulo de cartão microSD e um cartão microSD de 2 Gb pelo custo de R\$ 60,00.

Os sensores foram posicionados a 5 cm de distância de um recipiente metálico de cor preta fosca cuja emissividade foi considerada 0,99. A distância foi escolhida para minimizar a área de medida, pois o MLX tem campo de visão de 90° enquanto o SI-111-SS de 44°. Assim, a área de detecção pode ser estimada com as equações 8 e 9:

$$D = 2 \times (d \times \tan(\frac{\theta}{2})) \quad 8$$

$$A = \pi \times (\frac{D}{2})^2 \quad 9$$

em que D é o diâmetro da área medida (cm), d é a distância do sensor (cm) e θ é o campo de visão total do sensor em graus, e A é a área cuja temperatura foi detectada (cm²). Os sensores registram a média da temperatura dentro de seu respectivo campo de visão.

As áreas encontradas foram de 78,54 cm² e 12,88 cm² para o MLX e o SI-111-SS, respectivamente. No entanto, considerando que o objeto mensurado está dentro do campo de visão do sensor, o ângulo do campo de visão torna-se pouco relevante (Valente et al., 2019). Logo, consideramos que o campo de visão distintos dos dois sensores não prejudicou as comparações.

Dois sensores MLX e um SI-111-SS foram posicionados para medir a temperatura de um recipiente metálico com 15 cm de altura por 12 cm de largura (Figura 3A em Apêndice A). Todos os sensores foram configurados para coletar a temperatura na frequência de uma medida a cada 5 s, então a média de 12 medidas foi armazenada, ou seja, uma média armazenada por minuto. No caso do MLX, a configuração foi programada no *firmware* do microcontrolador, seguindo um algoritmo (Figura 7). No sensor SI-111-SS, a configuração foi programada no *data logger* CR350 (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA).

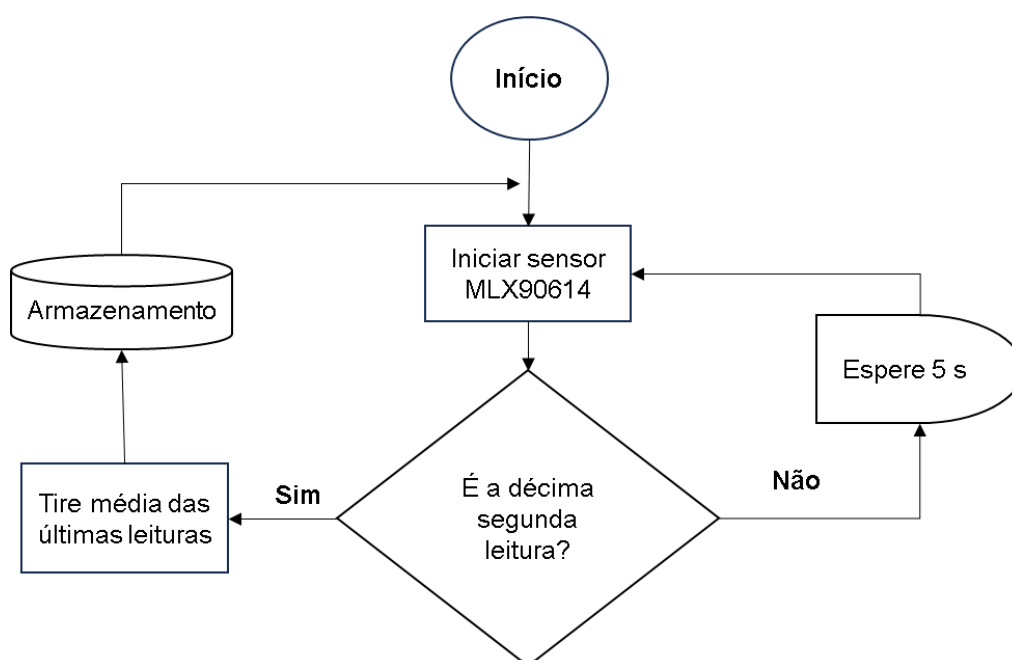


Figura 7. Algoritmo para realizar as medidas de temperatura no protótipo nó sensor.

Uma vez que os dois sensores estavam sincronizados, foi adicionando água aquecida a 40 °C (medida com outro sensor SI-111-SS) no recipiente. Os sensores permaneceram coletando dados de temperatura do objeto por cerca de 70 min e, então, água fria foi adicionada no recipiente lentamente para verificar a resposta dos dois sensores. Os sensores permaneceram fazendo as leituras até a temperatura se estabilizar em ~26 °C.

Adicionalmente, dois sensores de referência foram montados em duas plantas de rabanete, uma de cada tratamento, para mensurar a mesma folha monitorada pelo protótipo de baixo custo. Os sensores de referência foram instalados a cerca de 8,4 cm da superfície da folha a um ângulo de 45 ° (cerca de 6,0 cm de altura vertical), de modo que a área monitorada foi de cerca de 36 cm², considerando o campo de visão de 44° do sensor.

Em contraste, o sensor MLX, com ângulo de visão de 90°, foi instalado a cerca de 3 cm da superfície da folha, em posição nadir (com o sensor posicionado diretamente para baixo). Dessa maneira, os dados de temperatura da mesma folha e dos dois tratamentos, com e sem estresse hídrico, foram utilizados para comparação nas plantas de rabanete. Mais informações sobre os tratamentos e manutenção dos sensores estão na subseção Experimento com rabanete (subseção 3.3.2)

Por fim, seis sensores MLX foram comparados entre si, seguindo a metodologia apresentada acima. Os seis sensores coletaram a temperatura da superfície do recipiente metálico dentro do qual água a 50 °C foi adicionada por 24 h. O objetivo desse teste foi avaliar a precisão dos sensores.

3.3 Experimentos de campo

O protótipo foi testado em experimentos com as culturas do maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) e do rabanete (*Raphanus nativus*). A escolha do maracujazeiro se deu pelas poucas informações na literatura sobre sensoriamento remoto e irrigação de precisão. Já para o rabanete, o ciclo curto e a facilidade de manejo foram os principais motivos da escolha.

3.3.1 Experimento com o maracujazeiro

A cultura do maracujazeiro foi cultivada dentro de uma casa de vegetação da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), em vasos de 20 L, entre junho e setembro de 2022. A casa de vegetação consiste em um telhado de plástico transparente e uma rede de tela antiafídeo nas paredes.

O solo usado no experimento foi coletado no horizonte B em um terreno localizado no *campus*. Amostras de solo foram enviadas para análise física (Tabela 3) e química (Tabela 4) e, de acordo com o resultado da análise química, foi adubado com superfosfato simples (300 mg dm⁻³ de P₂O₅), nitrato de potássio (150 mg dm⁻³ de K₂O) e calcário dolomítico para aumentar a saturação por bases para 85%. O solo foi umedecido e coberto com lona plástica por 30 dias, posteriormente deixado para secar ao ar por mais 30 dias.

Tabela 3. Caracterização física do solo utilizado no estudo

Comp. Granulométrica TFSA				Classe Textural
g kg ⁻¹				-
Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	-
575	135	30	260	Franco Argilo Arenosa
Curva de retenção				
-10 kPa	-30 kPa	-100 kPa	-300 kPa	-1500 kPa
0,118	0,081	0,073	0,061	0,043

TFSA: terra fina seca ao ar; areia grossa: 2-0,2 mm; areia fina: 0,20-0,05 mm; silte: 0,05-0,002 mm; argila: <0,002 mm.

Tabela 4. Análise química do solo antes e depois da correção

Antes da correção											
pH	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³					%			
H ₂ O	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	SB	CTC	CTCe	V	m
5,0	2,0	0,14	0,5	0,5	0,3	2,5	1,1	1,4	3,9	29%	21%
60 dias após a correção											
6,9	26,0	0,21	3,5	2,0	0,0	1,1	6,1	6,1	7,2	85%	0%

P e K – fósforo e potássio (Mehlich-1); Ca²⁺ e Mg²⁺ – cálcio e magnésio trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹); CTC – capacidade de troca catiônica; CTCe – CTC efetiva; V – saturação por bases; m – acidez trocável.

Dois tratamentos de irrigação foram testados, um para repor 100% da evapotranspiração potencial (100% ET) e outro com aplicação da metade desse volume (50% ET). O experimento teve 10 repetições e seguiu um delineamento inteiramente casualizado. A irrigação foi manejada usando-se uma balança com capacidade de 50 kg e resolução de 0,01 kg. O solo usado para preencher os vasos (volume: 20 L) foi peneirado, adubado e seco na casa de vegetação por 30 dias. Todos os vasos preenchidos com solo foram pesados (massa média: 22 kg) e saturados com água, condição atingida quando a água começou a drenar pelos furos no fundo dos vasos. Então, três vasos com solo saturado foram escolhidos aleatoriamente, pesados e cobertos com lona plástica para evitar a evaporação. Após 72 h, os vasos foram pesados novamente (massa média: 24,5 kg) e continuaram sendo pesados após o transplante das mudas para servir de referência para calcular a lâmina de irrigação dos demais vasos diariamente.

Em cada vaso, foi transplantada uma muda de maracujazeiro ('Catarina', Isla sementes, Brasil) com 30 dias de idade. Após o transplante, as plantas foram cultivadas por 50 dias em espaldeiras (Figura 1A do Apêndice A). Os dados meteorológicos foram

monitorados durante o experimento por meio de uma estação meteorológica automática dentro da casa de vegetação (Davis Vantage Pro2, EUA) (Figura 8).

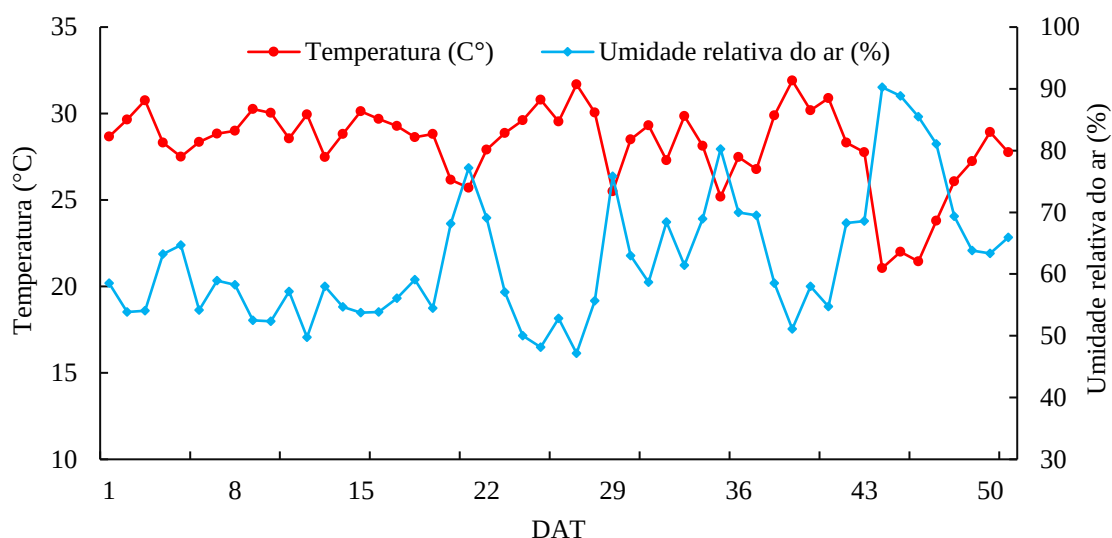


Figura 8. Médias diárias temperatura do ar (C°) e umidade relativa do ar (%) no interior da casa de vegetação durante o período experimental. DAT: dia após o transplante.

Aos 40 dias após o transplante (DAT), os tratamentos de irrigação foram iniciados e duraram até os 51 DAT (data do desmonte do experimento). Aos 50 DAT (9 dias de tratamento), algumas plantas apresentaram sintomas associados ao CABMV (*Cowpea aphid-borne mosaic virus*), causador do endurecimento dos frutos, como bolhosidades, distorção do limbo e alternância de coloração entre o verde e o amarelo (mosaico). Assim, como essa doença poderia comprometer os resultados se as plantas fossem conduzidas por mais tempo, decidiu-se selecionar duas plantas sem sintomas de cada tratamento para realizar as medidas, que duraram cerca de 90 minutos, entre 11h30 e 13h.

No dia seguinte às medidas (51 DAT), as plantas foram submetidas a análises destrutivas para verificar se o tratamento de irrigação deficitário (50% do ETc) causou efeitos relacionados ao estresse hídrico por falta de água. Para isso, foi usado apenas duas métricas: o acúmulo de massa seca (MS) na planta e o teor relativo de água nas folhas (TRA).

Na antemã (~5:00) do dia seguinte à coleta de dados de T_F , 10 discos (7 mm de diâmetro) foram coletados de folhas de plantas ao acaso com um perfurador, identificadas e levadas logo em seguida para serem pesadas numa balança com 0,0001 g de precisão para determinar a massa fresca (MF). Após a pesagem, os discos foram

colocados em tubos contendo água deionizada. Após 24 h submergidos em água deionizada, a massa túrgida (MT) foi determinada pesando-se os discos. A massa seca (MS) foi determinada após a secagem dos discos em estufa de circulação forçada de ar a $65\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$, até atingir massa constante, em torno de 72 h. As massas foram determinadas usando-se a mesma balança. O teor relativo de água (TRA) foi calculado com base na Equação 10 (Weatherley, 1950).

$$\text{TRA (\%)} = [(MF-MS) / (MT-MS)] \times 100 \quad 10$$

Já a massa seca das plantas (MS) foi calculada com as plantas colhidas e secas em estufa de circulação forçada de ar, a $65\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, até atingir massa constante. A massa constante ocorreu após aproximadamente 3 dias.

3.3.2 Experimento com rabanete

A cultura do rabanete foi escolhida por ser uma planta de ciclo rápido (25-30 dias), o que permite obter dados de produtividade, apresenta fácil manejo e suas folhas são relativamente grandes para as mensurações de T_F . As plantas foram cultivadas em março de 2023, cujo ciclo (da semeadura a colheita) durou 29 dias.

O principal objetivo do protótipo do nó sensor é medir as variáveis da planta e do ambiente de forma automática e contínua, e ser compatível com a Internet das Coisas (IoT). Para isso, montou-se um experimento em vasos com dois tratamentos, sendo um com plantas bem irrigadas (irrigadas para repor 100% da ET_c) e plantas com estresse hídrico (irrigadas para repor 65% da ET_c das plantas bem irrigadas), com 12 repetições, totalizando 24 plantas. Seis plantas sobressalentes foram cultivadas no mesmo local para serem colhidas e pesadas a cada 3 dias, após o início dos tratamentos, para corrigir o cálculo da ET_c .

A princípio, os nós sensores foram programados para transmitir os dados por rede sem fio para armazenamento em um servidor remoto. No entanto, por conta das instabilidades da rede de Wi-Fi do *campus*, optou-se por salvar os dados em cartões de memória microSD para análise posterior.

O solo utilizado para preencher os vasos foi o mesmo utilizado no experimento com o maracujazeiro. O manejo hídrico também foi similar ao usado no experimento com o maracujazeiro, com algumas modificações. Os vasos (volume: 2 L; 13 cm de altura, 16

cm de largura e 16 cm de comprimento) foram preenchidos com 2.200 g do solo seco ao ar, considerada a massa de solo seco (MV_{SS}). Antes da semeadura, os vasos foram saturados e colocados para drenar livremente pelos furos no seu fundo. Eles foram cobertos com plástico para evitar evaporação e, após 48 h, quando a massa dos vasos não se alterou em relação ao dia anterior, eles foram pesados para determinar a massa do vaso na capacidade de campo (MV_{CC}). Assim, considerou-se M_{SS} , que foi registrado antes, como o menor conteúdo de água total (CAT) no solo (CAT a 0%) e M_{CC} como o maior CAT (100%), de modo que $MV_{CC} - MV_{SS} = 100\% \text{ CAT}$.

Três sementes da cultivar de rabanete ‘Apolo’ (Isla sementes) foram semeadas em cada vaso com solo úmido. Todas as sementes emergiram três dias após a semeadura e o desbaste foi realizado três dias após a emergência para manter uma planta por vaso. Antes da introdução do tratamento de 65% da ET_c , plantas sobressalentes foram colhidas para corrigir a MV_{CC} . Dessa maneira, a ET_c foi determinada usando-se o método do balanço hídrico, que é baseado no princípio da conservação de massa. Como os vasos estavam sob um ambiente protegido, assumiu-se que não houve nem escoamento, nem precipitação e que 1 g equivale a 1 mL de água, resultando na equação 11 (Allen et al., 1998):

$$ET_c = (I \pm (MV_1 - MV_0) - D_r) \quad 11$$

em que ET_c é a evapotranspiração real da cultura (mL), I é irrigação (g), D_r é drenagem (g), MV_0 e MV_1 são as massas dos vasos antes e depois da irrigação, respectivamente (g). Considerou-se que cada g equivale a 1 mL de água.

Os tratamentos (100% e 65% da ET_c) foram arranjos em delineamento inteiramente casualizado, com 12 repetições (Figura 2A, no Apêndice A). Cada repetição constou de uma planta e a posição dos vasos foi modificada diariamente na casa de vegetação, para minimizar os efeitos de sombreamento.

Aos 17 dias após a emergência das plantas (DAE), seis nós sensores desenvolvidos e dois sensores de referência foram montados nas plantas. Essa data foi escolhida, pois as folhas estavam com um tamanho suficiente (mais de 36 cm²) para que os sensores detectassem a radiação termal apenas da folha monitorada. Os sensores foram presos em tubos plásticos flexíveis dentro do qual se encontrava um arame de cobre. Isso permitiu o posicionamento e a manutenção do sensor em várias posições. Dessa maneira, os

sensores MLX foram posicionados acima das plantas (nadir), a cerca de 3 cm da superfície da folha, de modo que apenas a folha a ser monitorada estivesse dentro do campo de visão do sensor enquanto os sensores de referência foram montados a um ângulo de 45°, a cerca de 8,5 cm de distância da superfície da folha (cerca de 6,0 cm de altura vertical), de modo que o sensor MLX não se encontrava no campo de visão do sensor de referência. A distância da superfície da folha teve pequenas variações, de acordo com o grau de turgidez da folha ao longo do dia (Figura 9).

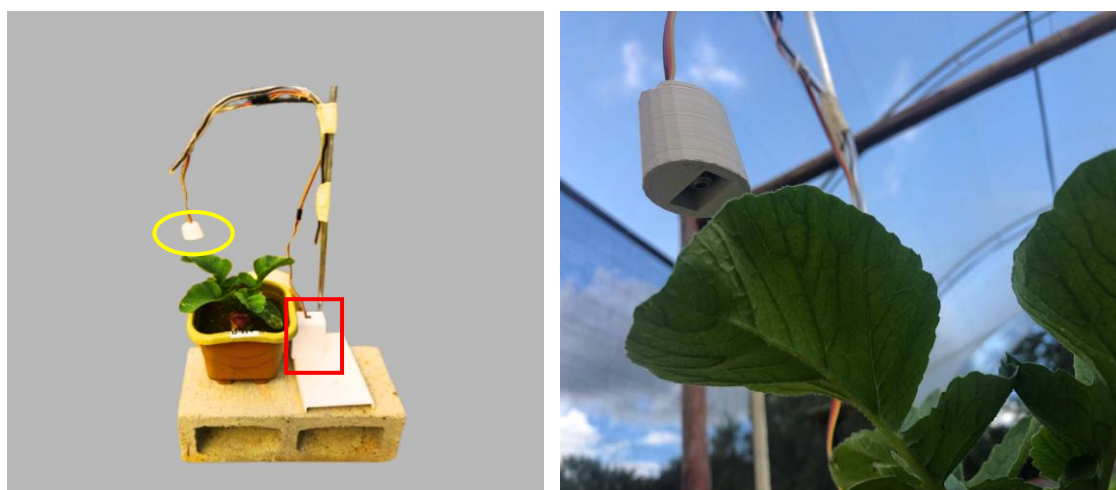


Figura 9. Protótipo do nó sensor infravermelho de baixo custo na esquerda, com microcontrolador e sensor de temperatura e umidade do ar na caixa (dentro do retângulo vermelho) e sensor MLX90614 no abrigo de ABA (na elipse amarela). Na direita, detalhe no sensor MLX dentro do abrigo.

O tratamento sob restrição hídrica foi introduzido nas plantas aos 18 DAE e durou sete dias. No momento da irrigação, diariamente às 8h da manhã, todos os vasos foram pesados em sequência, utilizando-se uma balança com resolução de 0,01 g. A água foi adicionada com o vaso em cima da balança, utilizando-se um cilindro graduado até atingir o peso alvo, calculado com a Equação 11. Durante a irrigação, os nós sensores foram pausados por cerca de 15 minutos, e reposicionados para que os sensores pudessem reestabelecer as leituras. As médias diárias da temperatura do ar, umidade relativa do ar, evapotranspiração e radiação solar diárias estão apresentadas na Figura 10.

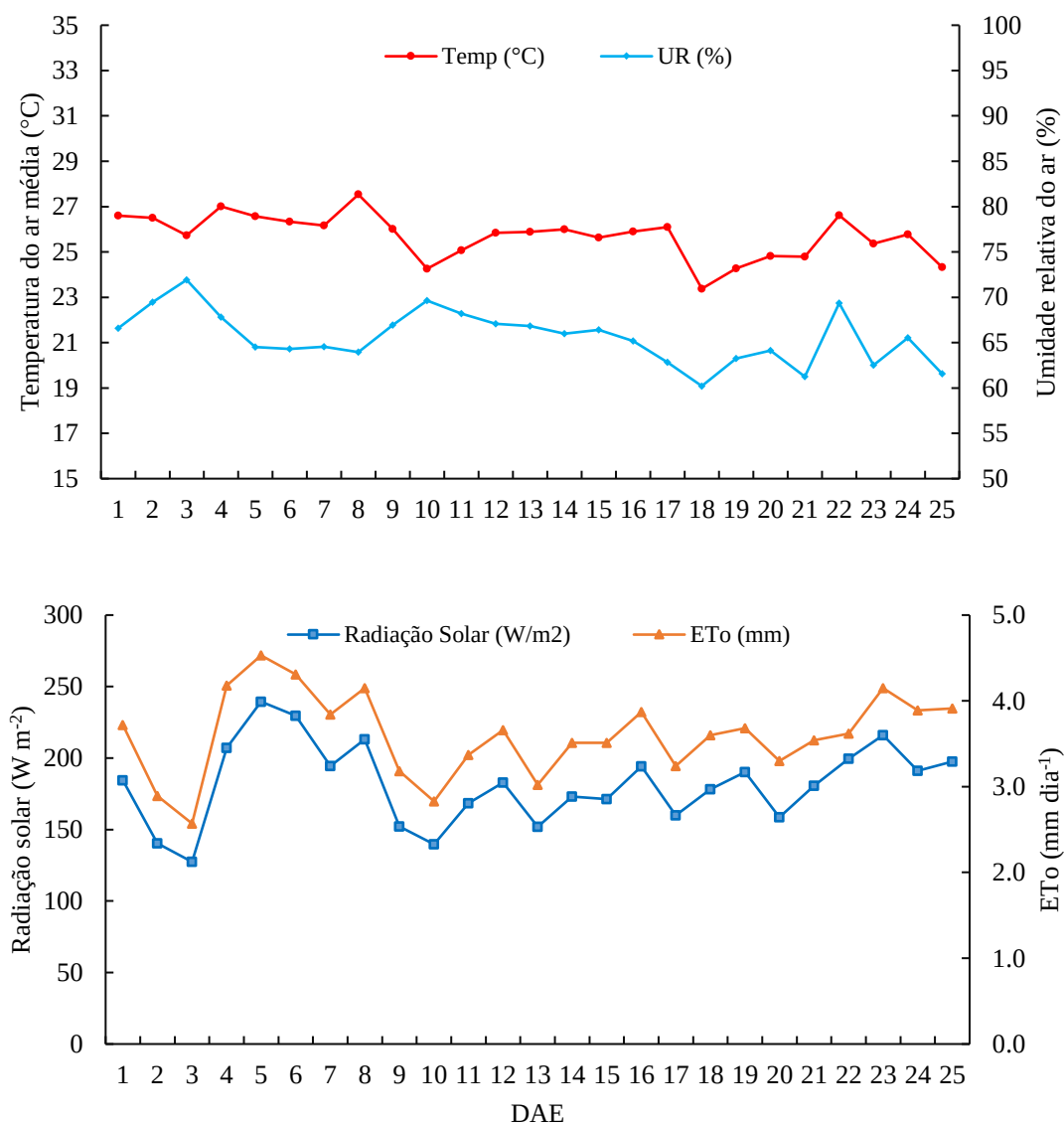


Figura 10. Médias da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar (W m^{-2}) e evapotranspiração de referência ($\text{ET}_o - \text{mm dia}^{-1}$), durante o ciclo do rabanete, medido em dias após a emergência (DAE).

3.3.3 Métricas com a T_F

O índice Graus Acima do Dossel Sem Estresse (DANS, do inglês, *Degrees above non-stressed canopy*) foi calculada para verificar e interpretar os dados de T_F . O DANS compara o T_F da cultura monitorada com o T_F de uma planta de referência bem irrigada (Eq. 7) (Taghvaeian et al., 2014) e, portanto, torna-se pertinente os testes com apenas dois

tratamentos. Além disso, a diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar ($T_F - T_A$) foi também utilizada para fins de visualização.

3.3.4 Variáveis de crescimento e rendimento

Aos 26 DAE, todas as plantas foram colhidas. A área foliar foi mensurada usando-se um medidor de área foliar (LI-3100, LI-COR Biosciences, Nebraska, EUA). A massa do tubérculo (g planta^{-1}) foi medida em uma balança com precisão de 0,01 g. A parte aérea foi pesada para obter a massa fresca da parte aérea (g). Em seguida, as plantas foram secas em estufa por 48 h, até a massa constante, e pesadas novamente na balança para determinar a massa seca (g).

3.3.5 Análises bioquímicas

Foram realizadas quatro análises bioquímicas: açúcares redutores, açúcares solúveis totais, teor de amido e teor de prolina. Essas variáveis, comumente associadas ao ajuste osmótico e indicadoras do estresse hídrico nas plantas (Turner, 2018), foram realizadas para avaliar bioquimicamente as plantas afetadas pelos tratamentos.

Os açúcares redutores e solúveis foram quantificados em extratos obtidos de 0,2 g de folhas secas trituradas, que foram submetidos a duas centrifugações de 45 minutos a 4.000 rpm, utilizando 10 mL de solução tampão fosfato de potássio (0,1 M) como extrator, em cada centrifugação. O sobrenadante foi coletado como um extrato.

A quantificação dos açúcares redutores foi realizada pelo método do ácido dinitrosalicílico (DNS) (Miller, 1959). Uma alíquota de 0,8 mL do extrato foi adicionada a 0,5 mL de uma solução de DNS (NaOH 0,4 M, DNS 0,04 M e tartarato de sódio e potássio 1 M) e 0,45 mL de água deionizada, totalizando um volume de reação de 1,25 mL, que foi submetido a banho-maria a 100 °C, por cinco minutos. Após resfriamento à temperatura ambiente, foram adicionados 3,75 mL de água deionizada e as leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 540 nm.

A quantificação dos teores de sólidos solúveis foi baseada no método proposto por Yemm e Willis (1954). Uma alíquota de 0,02 mL do extrato foi adicionada a 2 mL de antrona a 0,2% (p/v) e 0,98 mL de água deionizada, em recipiente mantido sob resfriamento, totalizando um volume de reação de 3 mL. O volume de reação foi colocado

em banho-maria, a 100 °C, por 3 min, com posterior resfriamento, para realização de leituras espectrofotométricas em 620 nm.

A determinação do teor de prolina foi realizada conforme método proposto por Bates et al. (1973). Nesse método, 10 mL de água deionizada foram adicionados a 0,02 g de folhas secas e trituradas. Em seguida, a solução foi submetida a banho-maria, a 100 °C, por 1 h, seguido de centrifugação a 9.500 rpm por 10 min, para posterior coleta do sobrenadante, que foi considerado como o extrato. Uma alíquota de 0,2 mL do extrato foi adicionada ao meio reacional contendo 0,8 mL de água deionizada, 1 mL de solução ácida de ninidrina (1,25 g de ninidrina, 30 mL de ácido acético glacial, 20 mL de ácido fosfórico (6 M)) e 1 mL de ácido acético glacial. A solução foi aquecida a 100°C, durante 1 h, seguida de resfriamento com gelo. Em seguida, foram adicionados 2 mL de tolueno ao meio reacional, com posterior agitação em vórtex e coleta do sobrenadante para leitura em espectrofotômetro a 520 nm.

O teor de amido foi determinado conforme Instrução Normativa nº 20 (Brasil, 1999), com algumas modificações. Uma amostra de 0,25 g de folhas secas, previamente desengorduradas em hexano, foi adicionada a 5 mL de H₂SO₄ 0,5 M e aquecida a 100 °C, por 1 h. Após este período, adicionou-se água, completando o volume para 250 mL. Em seguida, coletou-se 1 mL dessa solução, para resfriamento a 0 °C, juntamente com 5 mL de solução de antrona 0,005 M. Após esse procedimento, a mistura foi aquecida a 100 °C, por 11 min, seguida de resfriamento sob temperatura ambiente e leituras espectrofotométricas realizadas a 620 nm.

3.4 Conexão entre sensores e com a Internet

Adicionalmente, testou-se as duas principais capacidades que um nó sensor deve possuir para construir um sistema de irrigação inteligente: (i) comunicação entre os nós sensores e (ii) conexão dos nós sensores com a Internet. Portanto, realizou-se um teste para testar essas duas capacidades. O primeiro objetivo foi avaliar a transmissão e recepção de dados entre os nós sensores por meio do protocolo de comunicação nativo do ESP32, chamado de ESP-NOW. O segundo objetivo foi testar a retransmissão dos dados para um servidor externo, com capacidade de armazenamento e processamento de dados (ThingSpeakTM, The MathWorks Inc., Massachusetts, EUA).

Para testar a conexão entre os nós sensores no campo, os protótipos foram programados para enviar 60 pacotes de dados via rádio (um envio a cada 30 s por 30 min)

entre dois nós sensores, nas distâncias de 5, 10, 25, 50, e 100 m, conforme recomendações de O'Shaughnessy et al. (2011), com modificações. Avaliou-se a porcentagem de pacotes recebidos em relação aos enviados.

Para isso, seguiu-se a seguinte metodologia: um nó sensor (nó receptor) foi conectado à Internet via *Wi-Fi* e outros três nós sensores foram instalados a uma distância de 5 m do nó receptor (base). Os nós sensores no campo foram instalados a uma altura de 30 cm do solo, com o sensor infravermelho posicionado sobre um gramado (espécie não identificada). Passado o tempo de transmissão de 30 min, os três nós sensores foram movidos para a próxima distância (10 m) e repetiu-se o procedimento até concluir as cinco distâncias.

O nó receptor, conectado na rede *Wi-Fi*, retransmitiu os dados para o *website ThingsSpeak™*, que é uma plataforma que permite o armazenamento e processamento de dados coletados em tempo real. Assim, avaliou-se também quanto dos dados recebidos foram retransmitidos para o servidor externo da *ThingSpeak™*.

3.5 Análise estatística

As leituras armazenadas durante a comparação dos sensores foram avaliadas por meio da análise de regressão linear, do erro médio absoluto (MAE) e da raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Eq. 12 e 13) (Mahan e Yeater, 2008; O'Shaughnessy et al., 2011).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (13)$$

em que x_i e y_i são os valores absolutos das leituras do sensor testado e do sensor referência na i -ésima medida, respectivamente, e n é o número de medidas

Os dados de crescimento do maracujazeiro e do rabanete foram submetidos ao teste F da análise de variância, a 5% de probabilidade. Como só foram dois tratamentos, a aplicação de um teste de médias não foi necessária, pois o teste F é conclusivo. A análise de regressão foi realizada para verificar se a diferença entre temperaturas foliares tem relação com o consumo de água. As médias das temperaturas horárias para cada dia foram comparadas utilizando-se o teste t ($p < 0,05$) para amostras independentes com variâncias

iguais e, posteriormente, foi realizado o mesmo teste t, o que foi verificado com o teste F ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo desenvolvido coletou, armazenou e transmitiu dados da temperatura do objeto, da temperatura do ar e da umidade relativa do ar de forma automática e remota. Com base na comparação com o instrumento de referência, as leituras foram precisas, o que torna o protótipo apto a compor uma rede de sensores sem fio para monitorar a temperatura foliar remotamente.

4.1 Teste de acurácia e precisão

No teste de acurácia no laboratório, o sensor de referência (SI-111-SS) e o sensor MLX (MLX90614) mediram a temperatura de um recipiente metálico dentro do qual água quente e depois fria foram adicionadas para verificar a resposta dos dois sensores. A resposta dos sensores às mudanças das temperaturas, causadas pela adição de água em diferentes temperaturas no recipiente, foi comparável, embora tenha havido diferenças no valor lido (Figura 11A). No entanto, ao fazer a análise de regressão, verificou-se que a temperatura registrada pelo sensor MLX teve alta correlação com os dados de temperatura do sensor de referência, com $R^2 > 0,99$ (Figura 11B).

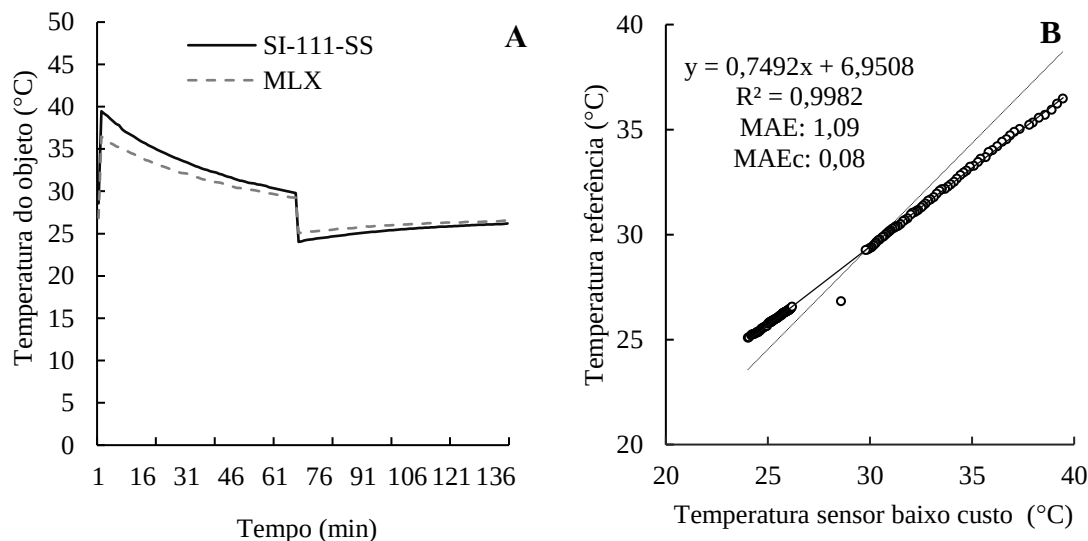


Figura 11. Comportamento das medidas do sensor de baixo custo (MLX) e o sensor referência (SI-111-SS) mensurando a superfície de um recipiente metálico dentro do qual água quente e fria foram adicionadas (A) e análise de regressão linear da comparação. Cada leitura é a média de 12 leituras, realizadas a cada 5 segundos, ou seja, uma leitura

média a cada minuto. MAE: erro médio absoluto; MAEc: erro médio absoluto após a calibração.

O sensor de baixo custo apresenta a facilidade de ser calibrado diretamente no *firmware* do microcontrolador. Assim, o sensor MLX já foi utilizado para o desenvolvimento de dispositivos de monitoramento da temperatura foliar (O'Shaughnessy et al., 2011; Noguera et al., 2020), incluindo aplicações que exigem precisão, como a fenotipagem (Jones et al., 2018) e aplicações via drone (Valente et al., 2019).

Para que os sensores possam melhorar a sua precisão após a calibração, há a necessidade de se utilizar uma metodologia com temperatura constante ou corpo negro (Blonquist Jr. et al., 2009; O'Shaughnessy et al., 2011), o que não foi o caso do presente estudo. Todavia, o método utilizado neste estudo mostrou-se adequado para calibrar o sensor MLX com o SI-111-SS. Assim, com um sensor MLX calibrado em relação ao SI-111-SS, realizou-se a comparação de seis sensores simultaneamente, o que revelou um MAE variando entre 0,17 e 0,37 °C, dentro da precisão garantida pelo fabricante de $\pm 0,5$ °C.

Embora a precisão e a acurácia sejam duas métricas essenciais em aplicações científicas e de engenharia, a acurácia (precisão em relação ao valor verdadeiro) é menos relevante em certas ocasiões, de modo que os sensores podem ser apenas precisos, ou seja, consistentes nas suas medidas. Ainda assim, a calibração mostrou-se eficiente.

No campo, a comparação do sensor de baixo custo com o sensor de referência em duas plantas de cada tratamento apresentou resultados semelhantes. Na condição de irrigação, para repor 100% da ET_c, o MAE e o RMSE foram de 0,71 e 0,84°C, enquanto nas plantas com irrigação com déficit (65% da ET_c), o MAE e o RMSE foram 0,67 e 0,83 °C, respectivamente. Isso corrobora a comparação realizada no laboratório, que apresentou coeficiente de determinação igual a 0,99, o que está relacionado com a precisão do sensor.

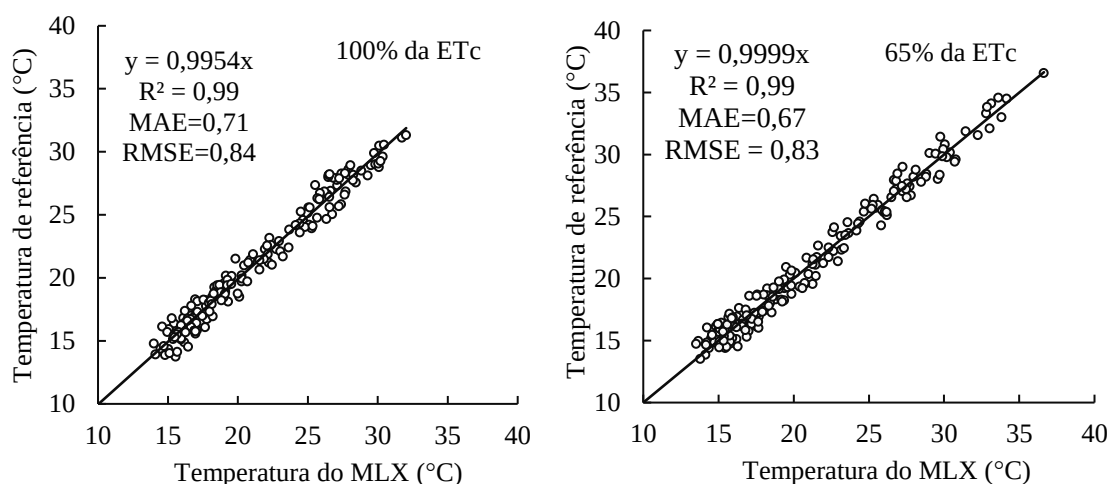


Figure 12. Gráfico de dispersão entre a temperatura (°C) medida com o instrumento de referência (temperatura de referência) e com o sensor de baixo custo (temperatura do MLX) em uma planta de rabanete irrigada com 100% ou 65% da evapotranspiração da cultura (100% da ETc e 65% da ETc, respectivamente). Cada ponto de dados representa uma média horária de 12 médias de cinco minutos.

A funcionalidade dos nós sensores de se sincronizar para coletar dados simultaneamente de duas ou mais plantas permite considerar que os dados das plantas foram coletados sob as mesmas condições climáticas. Dessa maneira, não há necessidade de normalizar as leituras com o déficit de pressão de vapor, como é realizado no cálculo do CWSI, pois a diferença de leitura entre as duas plantas, uma delas de referência, já fornece um critério direto (Taghvaeian et al., 2014).

Além disso, a precisão dos sensores, constatada pelo alto coeficiente de determinação na comparação com o sensor de referência (Figura 11 e Figura 12), ressalta o fato de que os erros em acurácia se tornam menos relevantes, quando se usa o DANS, visto que a diferença entre as leituras independe do valor verdadeiro. Em outras palavras, dentro da precisão esperada dos sensores de baixo custo testados ($\pm 0,5$ °C), a calibração entre os sensores é suficiente para o uso do DANS, sem necessidade de um corpo negro ou instrumento de referência, e permite uma maior flexibilidade dentro do contexto de incerteza do meio agrícola.

4.2 Experimentos de campo com o maracujazeiro

O uso de técnicas de sensoriamento remoto ou proximal para manejar a irrigação no maracujazeiro é escasso ou pouco utilizado, porém necessário para essa cultura

comumente produzida na região semiárida (Khuwijitjaru e Klinchongkon, 2020; Andrade et al., 2021). A T_F média ($n = 90$) do maracujazeiro foi de $30,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de $32,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($DANS = 1,95\text{ }^{\circ}\text{C}$) e a média de $T_F - T_A$ foi de $-1,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ para as plantas sob 100% ETc e 50% ETc, respectivamente (Figura 13).

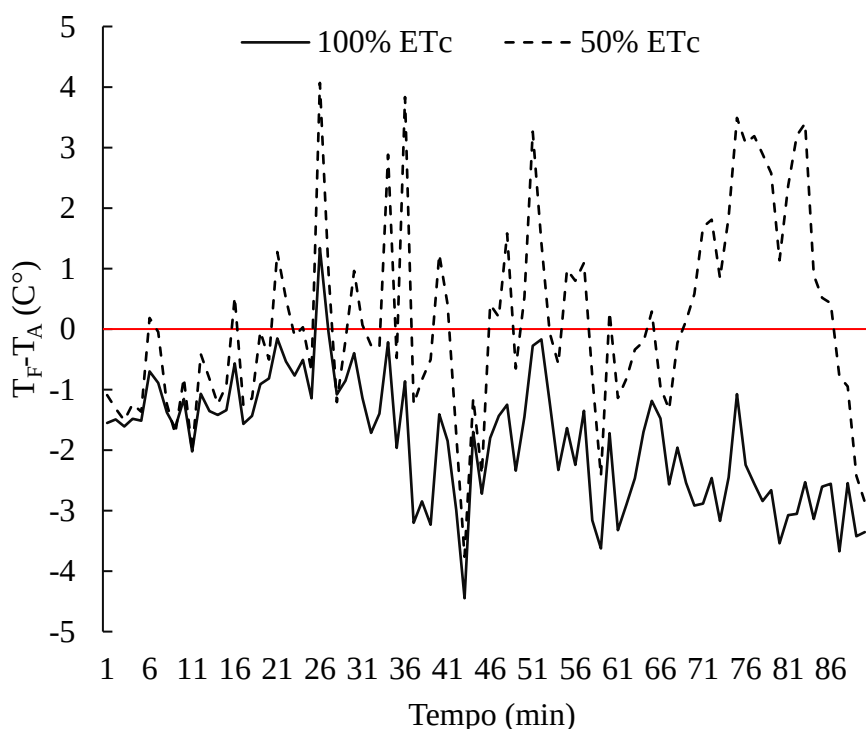


Figura 13. Temperatura foliar do maracujazeiro amarelo sob irrigação plena (100% ETc) e com redução de 50% em relação à irrigação plena (50% ETc).

O uso da T_F como uma métrica na cultura do maracujazeiro não é difundido e não foram encontradas abordagens na literatura consultada. No entanto, o fechamento estomático, associado com a T_F (Blonquist Jr. et al., 2009) no maracujazeiro amarelo, ocorre rapidamente para reter água em condições de suprimento de água limitado (Souza et al., 2018), o que explica os resultados obtidos.

A variação na T_F ao longo dos 90 minutos, sendo que cada medida é a média de 12 leituras, sugere que as medições de T_F estão sujeitas a várias fontes de erro, principalmente se forem pontuais. Muitos estudos usaram o valor médio de algumas medidas pontuais com instrumentos manuais por volta do meio-dia para determinar a T_F (Silva et al., 2018; Boyaci et al., 2024; Gültas, 2024). Embora essa abordagem seja mais simples e exija menos estrutura, ela está sujeita a erros do que as medidas de alta resolução temporal, como as obtidas no presente estudo. Dessa forma, medidas da T_F com alta

frequência temporal, mesmo por um intervalo de tempo reduzido, são importantes não apenas para fins de automação (Bhati et al., 2023), mas também para compensar a variação da T_F .

Assim, recomenda-se fazer as medidas, quando o céu está claro e sem nuvens, devido à grande influência da presença das mesmas na T_F (Correia et al., 2020). Durante a avaliação na cultura do maracujá, observou-se a passagem de nuvens no momento da mensuração, o que pode explicar essa variação na T_F . Entretanto, essa condição reforça a importância de medidas em alta frequência para conhecer e possivelmente mitigar o ruído nas mensurações.

O estresse hídrico empregado provocou reduções significativas na produção de matéria seca e teor relativo de água do maracujazeiro (Figura 14). A maior T_F é, em parte, explicada pelo fechamento estomático para reter a água nos tecidos vegetais (Souza et al., 2018). No entanto, nessa condição, a absorção de gás carbônico para a fotossíntese, que ocorre também pelo poro estomático, se reduz, o que explica o menor acúmulo de matéria seca (Figura 14-A) em plantas sob restrição hídrica. Além disso, a regulação estomática está diretamente associada com o conteúdo de água folha (Correia et al., 2020) (Figura 14-B).

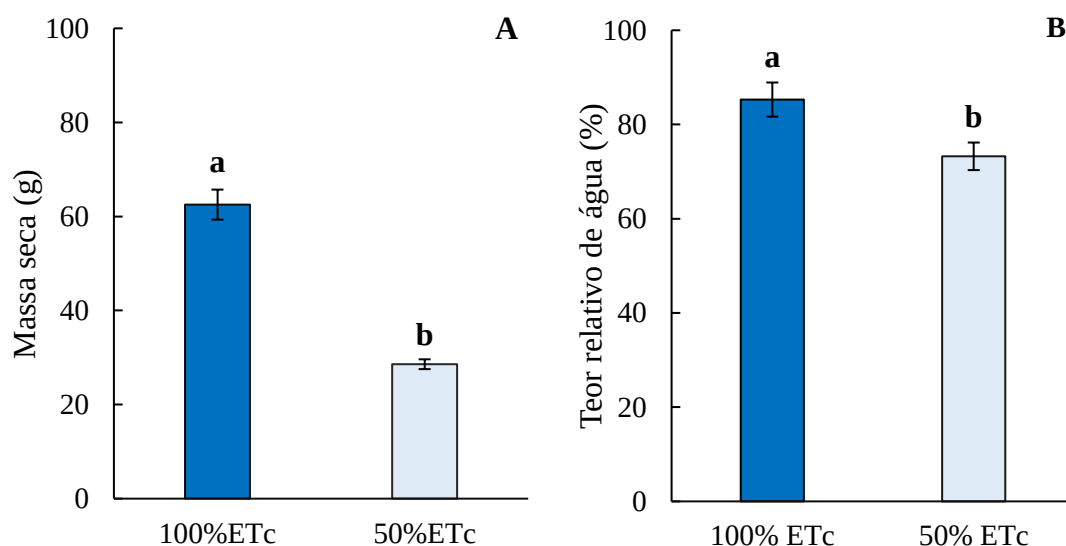
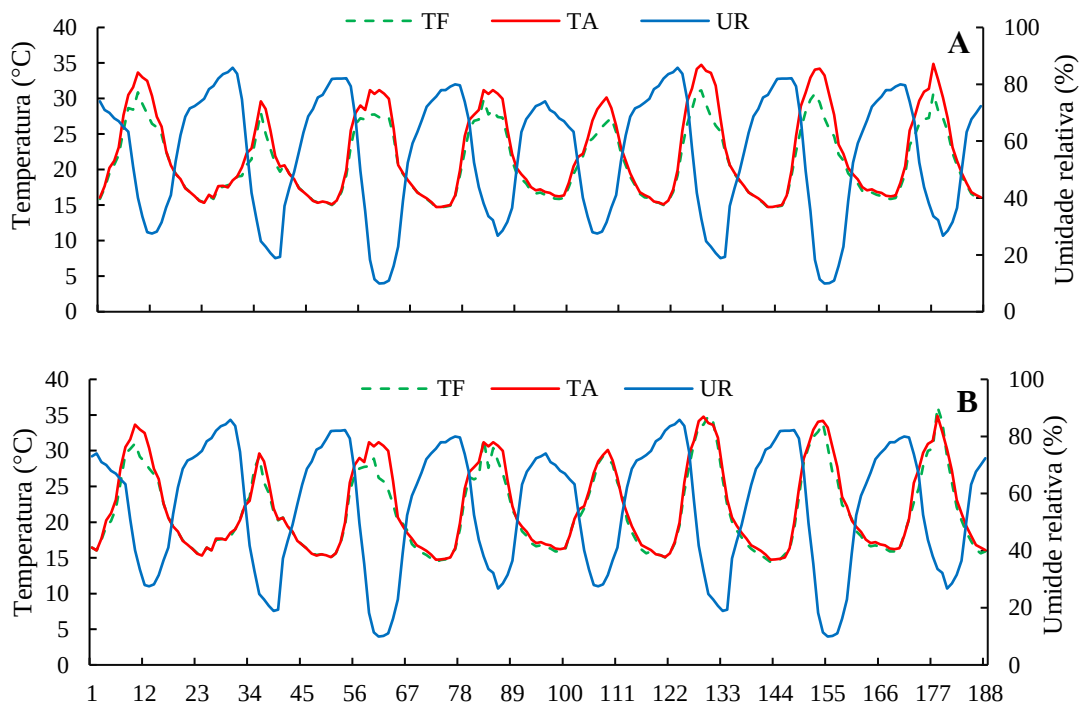


Figura 14. Massa seca (% A) e teor relativo de água (% B) do maracujazeiro submetido a dois tipos de irrigação: irrigação plena, para repor 100% da evapotranspiração (100% ETc) e irrigação com déficit para repor 50% da lâmina de 100% ETc (50% ETc). As barras verticais são o erro padrão da média. Letras diferentes indicam médias significantemente diferentes pelo teste F ($p < 0,05$).

4.3 Experimento de campo com rabanete

O protótipo de nó sensor desenvolvido coleta, armazena e transmite dados dos sensores de forma automática e remota. Os seis nós sensores testados no laboratório e, posteriormente, instalados no campo, leram e transmitiram dados de temperatura foliar (T_F), temperatura do ar (T_A) e umidade relativa do ar (UR) por aproximadamente oito dias consecutivos no teste de campo. O sensor de T_A e UR (AM2302) mostrou pouca robustez e três dos seis sensores apresentaram defeito, provavelmente por falta de um abrigo adequado. No entanto, o abrigo dos sensores MLX90614 mostrou-se efetivo pela consistência das suas medidas. Na Figura 15, encontra-se a representação gráfica do período de coleta, consistindo na média das leituras dos três sensores infravermelhos em cada tratamento e a média dos três sensores T_A e UR.



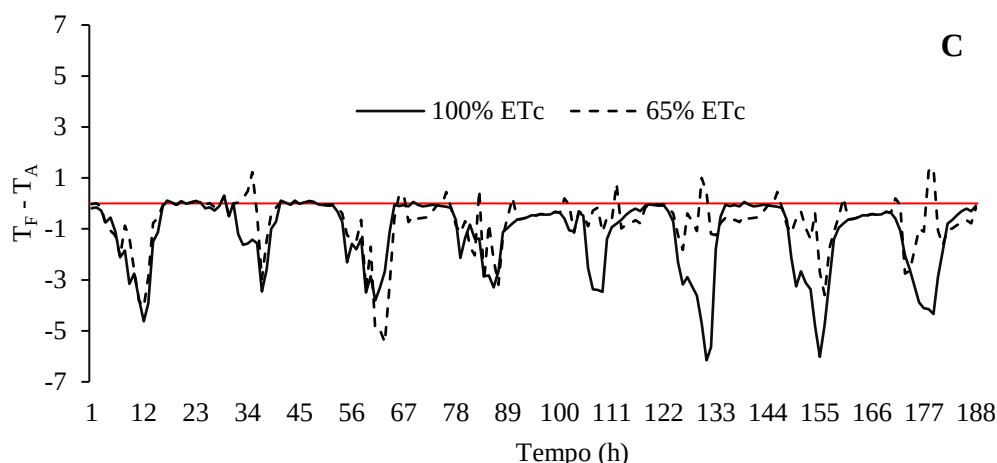


Figura 15. Curso de oito dias da temperatura foliar (T_F), temperatura (T_A) e umidade relativa do ar (UR - %) de plantas de rabanete bem irrigadas (100%ETc - A) e com restrição hídrica (65%ETc – B) e a diferença entre T_F e T_A nas duas condições de irrigação (C). As barras do erro padrão da média não foram adicionadas para melhorar a visualização.

Na Figura 15-C, percebe-se que apenas o tratamento com 65% da ETc (linha pontilhada) ultrapassa, ocasionalmente, a linha de 0,0 °C na diferença $T_F - T_A$, indicando que a g_s da planta está menor que o da planta com 100% da ETc. Em outras palavras, o suprimento de água no solo não atende à demanda evaporativa da atmosfera, o que faz com que a planta fique sob estresse hídrico por falta de água (Kibler et al., 2023).

Essa diferença de T_F , ocasionada pelo suprimento de água no solo, é explicada pelo resfriamento evaporativo. O calor é dividido em calor latente e calor sensível, sendo que o calor latente está associado com a transferência de massa, ou seja, a mudança do estado da água a nível da folha; e o calor sensível é aquele mensurado por termômetros (Muller et al., 2023), ele representa a energia usada para aumentar a temperatura percebida pela sensibilidade. Como a transferência de calor sensível é da folha para o ar, a diferença entre T_F e T_A torna-se um indicativo desse fluxo de calor sensível.

Ao perceber que a $T_F - T_A$ está diretamente relacionada com o déficit de pressão de vapor (DPV), Idso et al. (1981) propuseram a normalização desse parâmetro e o chamaram de índice de estresse hídrico da cultura (CWSI). Desde então, esse índice tem se tornado a principal maneira de interpretar a T_F para fins de manejo de irrigação e fenotipagem. No entanto, o cálculo do CWSI, que pode assumir duas abordagens, uma empírica e outra teórica, é relativamente trabalhosa, precisa de calibrações a cada uso e necessita de medidas precisas da temperatura do ar e da umidade relativa do ar (para o

cálculo do DPV) para estimar os limites inferiores e superiores do índice (Katimbo et al., 2022). Isso justifica o uso de uma métrica mais simples para indicar o estresse vegetal (Blaya-Ros et al., 2020; Nakabuye et al., 2022).

A diferença entre a T_F de plantas bem irrigadas (ET_c 100%) e a T_F das plantas sob estresse (DANS) indica o estresse hídrico relativo da planta. Isso se tornou evidente ao longo do período de monitoramento do rabanete, com a diferença entre a T_F dos dois tratamentos ficando significativamente maior a partir do quarto dia de tratamento e a partir do meio-dia (Figura 16 e Tabela 5). Esse resultado corrobora a premissa de que o horário indicado para interpretar dados de T_F deve ser por volta do meio-dia (Correia et al., 2020).

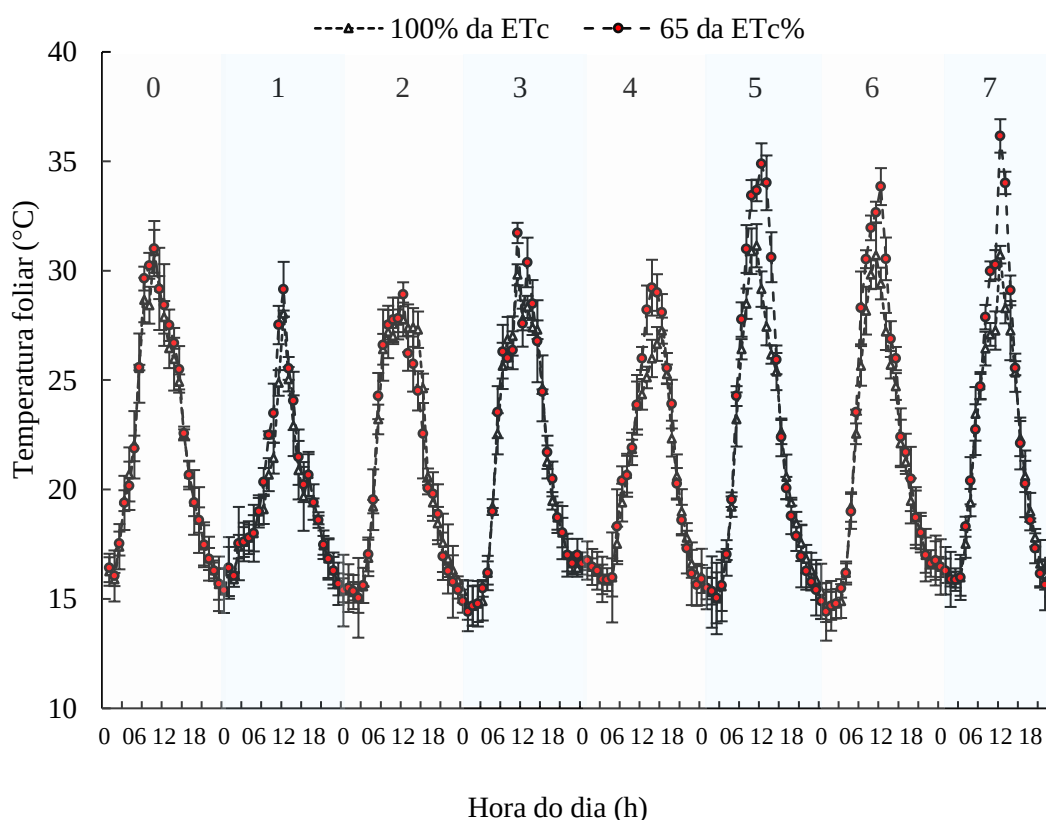


Figura 16. Temperatura foliar média horária (°C) coletada com os protótipos instalados em seis plantas de rabanete, irrigadas para repor ou 100% da evapotranspiração (ET_c) ou 65% da ET_c ao longo de oito dias (0-7). Barras são o desvio padrão da média ($n = 3$).

De acordo com os resultados, fica evidente que os dados de T_F devem ser coletados e transmitidos durante uma faixa de tempo ao redor do meio-dia para economizar energia e ser mais assertivo. Para dar suporte ao gráfico, na Tabela 5 estão apresentados os valores do índice Graus acima do dossel não estressado (DANS),

demonstrando que as diferenças em T_F das plantas de rabanete irrigadas para repor 65% da ET_c em comparação com as plantas irrigadas para repor 100% da ET_c se tornam significativas ($p < 0,05$) a partir do dia 4, após o início dos tratamentos, depois das 11h00. Ao tirar a média das medidas dentro do intervalo de tempo de 11h00-13h00, o resultado do teste t ($p < 0,01$) sugere que a diferença de T_F , ou seja, o DANS, dentro desse intervalo, pode ser utilizada para indicar o momento em que as plantas irrigadas com 65% da ET_c estão sob estresse hídrico (Figura 17), o que pode servir como um indicativo para o acionamento da irrigação.

Tabela 5. Graus acima do dossel não estressado (DANS) de plantas de rabanete irrigadas para repor 65% da evapotranspiração da cultura (ET_c) em comparação com plantas irrigadas para repor 100% da ET_c . As médias utilizadas na subtração representam 12 leituras realizadas a cada 5 minutos por seis protótipos instalados em três plantas de cada tratamento

Horário	Dia após início dos tratamentos							
	0	1	2	3	4	5	6	7
08:00 – 09:00	1,08	1,81*	0,33	-0,87	-0,05	2,50*	2,35*	1,44
09:00 – 10:00	0,12	2,05	0,74	-0,65	0,05	2,55*	2,14*	2,89**
10:00 – 11:00	-0,06	2,65*	0,10	1,91**	0,03	2,53*	1,97	3,01**
11:00 – 12:00	0,56	1,12	1,15	-0,18	1,64*	5,72**	4,43**	5,43***
12:00 – 13:00	1,05	0,49	-1,15	2,03*	3,09*	6,58**	3,32*	5,73***
13:00 – 14:00	0,73	1,13	-1,67	1,08	3,24*	4,45**	1,17	1,84
14:00 – 15:00	0,57	0,57	-1,25	-0,53	2,35*	0,54	1,28	0,21

Dia 0 e 1: sem tratamento e início dos tratamentos, respectivamente. Médias seguidas por *, ** ou *** são significativas a 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste t para amostras independentes com variâncias iguais, enquanto as médias sem asteriscos não diferem entre si significativamente ($p \geq 0,05$)

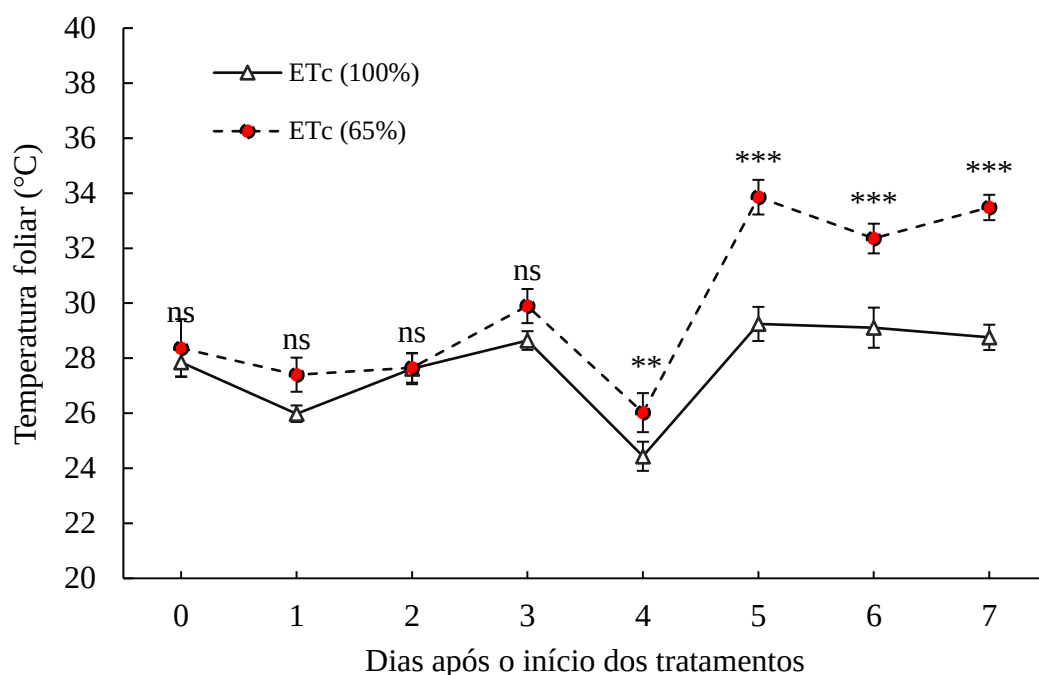


Figura 17. Temperatura foliar (°C) referente à média de três médias horárias (11h-13h) coletadas em plantas de rabanete irrigadas para repor 100% ou 65% da evapotranspiração da cultura (ETc). ns, *, ** e *** representam sem significância e significante a 5, 1 e 0,1%, respectivamente, pelo teste t.

Na Tabela 5, nota-se a relevância de um teste estatístico, preferencialmente realizado em tempo real, para avaliar as diferenças de T_F ao longo do dia. Por exemplo, o DANS de 1,97 °C registrado no dia 6 e no intervalo das 10h–11h e o DANS de 2,05 °C no dia 1 e no intervalo 9h–10h não foram significativos, embora sejam numericamente maiores que o DANS estatisticamente significativo de 1,64 °C, registrado no intervalo de 11h–12h do dia 4 ($p < 0,05$; Tabela 5). Isso indica a dependência desses valores com as condições específicas da planta e microclima (Gonzalez-Dugo e Zarco-Tejada, 2024). Essa condição também explica os valores negativos e ressalta a importância de se fazer análises com dados coletados com alta resolução temporal.

O DANS teve correlação razoável ($R^2 < 0,68$) com a ETc medida das plantas bem irrigadas, enquanto a correlação com a ETc das plantas com restrição hídrica foi muito fraca, com R^2 de 0,13 (Figura 18). Esse resultado é explicado pelo fato de que a evapotranspiração reduz a T_F ao consumir a energia na superfície da folha (Kibler et al., 2023). Portanto, considerando que a ETc de plantas bem irrigadas representa a evapotranspiração potencial, quanto maior a evapotranspiração, maior será o DANS, ou seja, diferença entre a T_F da planta de referência e da planta com déficit hídrico. Esse

resultado sugere o potencial no uso do DANS para a correção de dados de ETc e delineamento de zonas de manejo de irrigação, como recentemente constatado com o uso de índice de estresse hídrico da cultura (CWSI) na Califórnia (Sapkota et al., 2025).

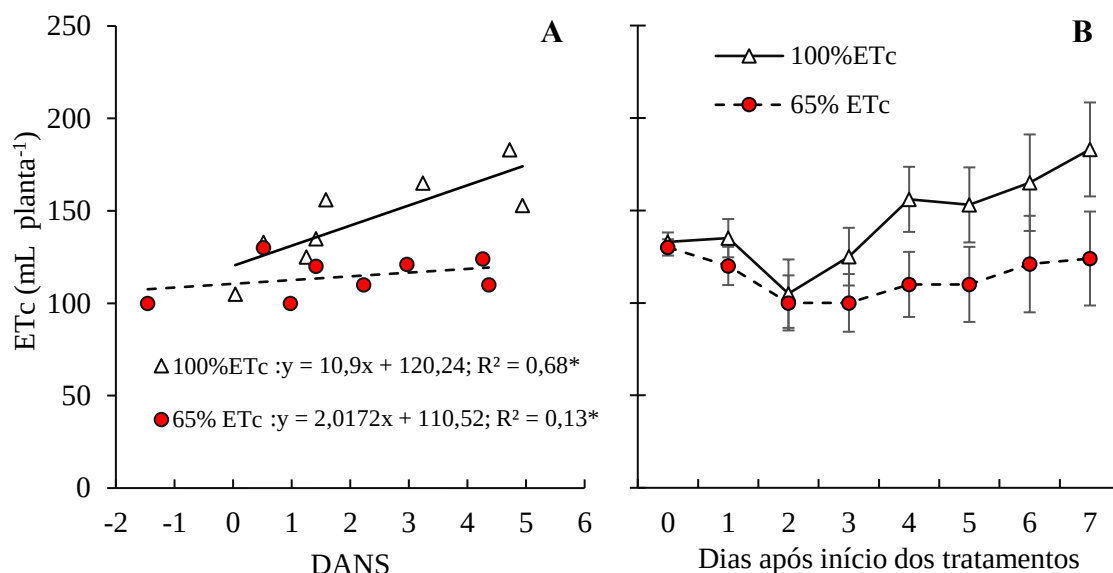


Figura 18. Relação entre a evapotranspiração da cultura (ETc) da planta sob irrigação plena (100% da ETc) e com restrição hídrica (65% da ETc) e os Graus Acima da Planta sem Estresse (DANS) referente ao intervalo entre 11h-13h (A). ETc das plantas de rabanete sob irrigação para repor 100% e 65% da ETc em função dos dias após o início dos tratamentos (B). Barras verticais no gráfico é o erro padrão da média (n = 3). *Significante estatisticamente pela análise de regressão ($p < 0,05$).

A ETc das plantas com irrigação deficitária se estabilizou entre 100 e 125 g água planta⁻¹, enquanto as plantas irrigadas passaram dessa marca no terceiro dia após o início dos tratamentos e alcançou 186 g de água por planta no sétimo dia de tratamento (Figura 18-B). A redução da área foliar (Figura 20-D) explica a menor transpiração nas plantas com o menor suprimento de água, sendo uma das estratégias para diminuir a perda de água, quando as plantas não têm um suprimento de água adequado para atender à demanda evaporativa da atmosfera (Seleiman et al., 2021).

4.4 Efeito do estresse hídrico em parâmetros bioquímicos e de crescimento

As respostas bioquímicas e de crescimento do rabanete, submetido a dois níveis de irrigação, foram avaliadas. A análise de variância revelou que a redução da lâmina de

irrigação em 35% em relação ao controle afetou, com exceção do teor de amido, todas as variáveis bioquímicas avaliadas ($p < 0,05$; Tabela 1A, no Apêndice A). As plantas irrigadas com 65% da ETc mostraram maior conteúdo de prolina, sólidos solúveis e açúcares redutores, com aumento de 56, 23,4 e 834% em relação ao tratamento com 100% da ETc, respectivamente (Figura 19-B-D). Por outro lado, embora não significativo ($p > 0,05$), as plantas irrigadas com a menor lâmina apresentaram menor teor de amido, com redução de 21% em relação às plantas com a maior lâmina (Figura 19-A).

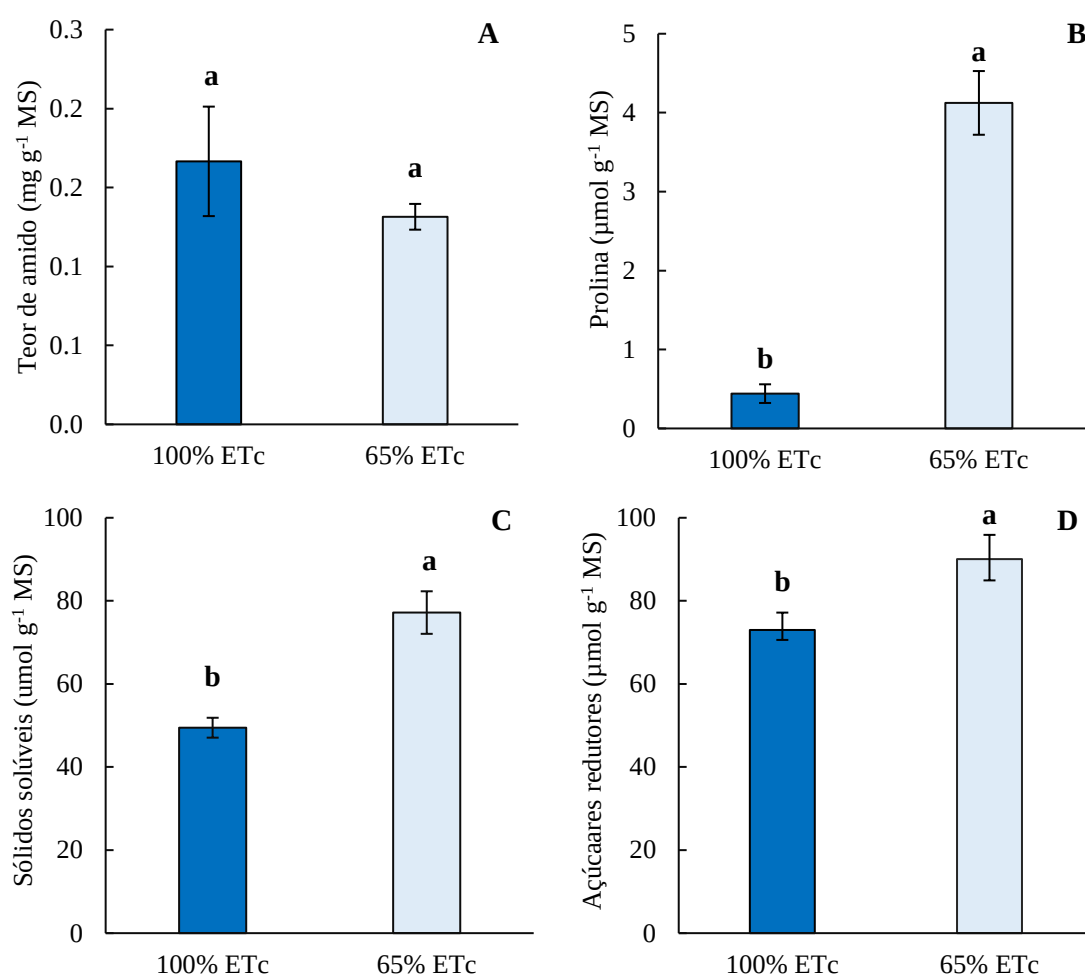
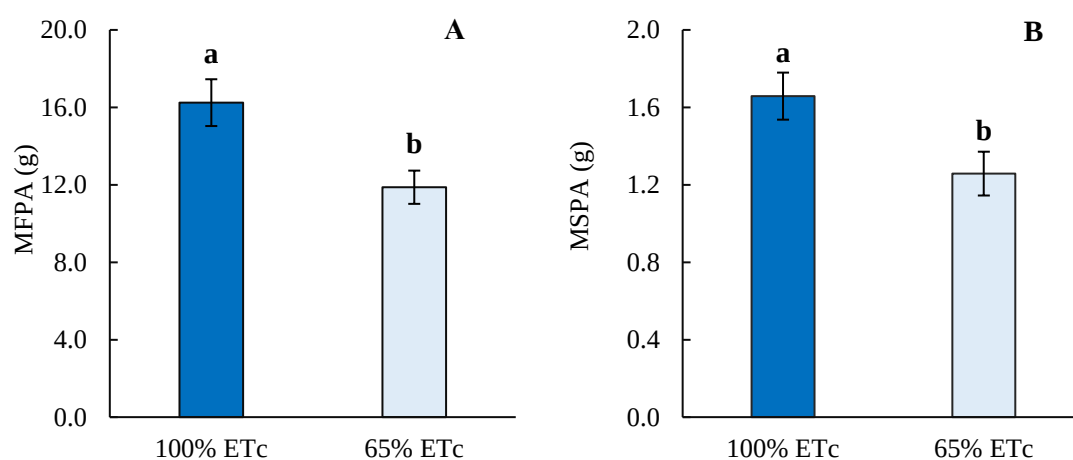


Figura 19. Teores de amido (A), prolina (B), sólidos solúveis (C) e açúcares redutores (D) nas folhas de plantas de rabanete irrigadas com lâminas para repor 100% e 65% da evapotranspiração da cultura (ETc). Letras diferentes sobre as barras indicam significância pelo teste F ($p < 0,05$). Barras verticais indicam o erro padrão da média.

O rabanete é uma planta sensível à seca, o que leva à diminuição do crescimento e ao aumento do teor de prolina nestas plantas (Tuver et al., 2022), corroborando os resultados encontrados neste estudo (Figura 19). O aumento do teor de prolina e de

açúcares solúveis nos tecidos vegetais, em resposta à diminuição do teor relativo de água, incluindo o rabanete, é bem estabelecido na literatura (Neggaz and Yassaad, 2019). Isso acontece para diminuir o potencial hídrico da folha em relação ao potencial hídrico do solo e, dessa maneira, aumentar a capacidade da planta de extrair água do solo, enquanto retém água nos tecidos foliares. Já a redução no teor de amido na folha é uma resposta ao estresse para realocar a energia necessária para a produção de osmoprotetores, como os açúcares redutores e a prolina (Thalmann e Santelia, 2017).

A análise de variância também revelou diferença significativa em todas as variáveis de crescimento e produção analisadas ($p < 0,05$; Tabela 1A). A redução da lâmina de irrigação em 35% causou redução na massa fresca e seca da parte aérea, área foliar e produtividade das plantas, alcançando redução de cerca de 30% em relação às plantas bem irrigadas (Figura 20). Trata-se de um resultado esperado e reportado por outros autores para a cultura do rabanete (Stagnari et al., 2017; Correia et al., 2020), demonstrando que a redução de 35% da lâmina de irrigação é o suficiente para causar danos significativos no crescimento e produção desta cultura.



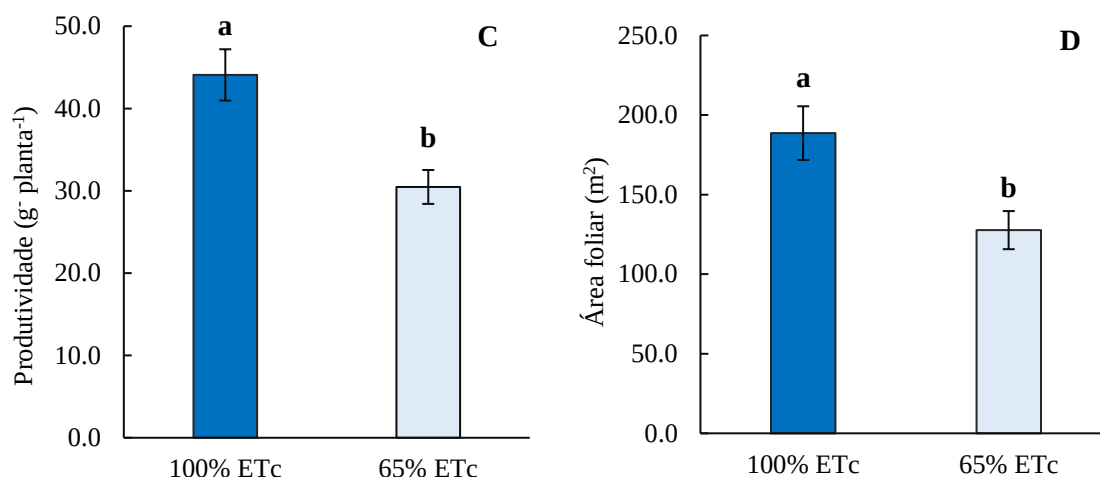


Figura 20. Médias da massa fresca (MFPA - A) e seca da parte aérea (MSPA - B), produtividade de raízes (C) e área foliar (AF - D) de plantas de rabanete irrigadas com lâminas para repor 100% e 65% da evapotranspiração da cultura (ETc). Barras verticais representam o erro padrão da média. Letras diferentes acima das barras indicam significância pelo teste F ($p < 0,05$).

Embora nenhuma medida direta de atividade fotossintética tenha sido realizada neste trabalho, é possível inferir que o aumento da T_F tem relação direta com a diminuição das taxas fotossintéticas pela diminuição da g_s e absorção de gás carbônico (Khan et al., 2021). As plantas de rabanete acumularam solutos para combater a perda de água (Figura 19), além de uma redução no acúmulo de biomassa na parte aérea e órgão de reserva (Figura 20). Diante desses resultados, constata-se que o protótipo proposto é adequado para a detecção automática do estresse hídrico em plantas, tendo como base a temperatura foliar, com possíveis aplicações em sistemas de monitoramento do estresse hídrico e controle da irrigação.

4.5 Transmissão, recepção e conexão

A transmissão e a recepção de dados via ondas de rádio frequência são essenciais para o estabelecimento de redes de sensores sem fio, enquanto a retransmissão desses dados para um servidor externo, via Internet, constitui-se a base da plataforma IoT. Assim, os resultados apresentados servem como base para testes mais refinados para o possível estabelecimento de uma rede de IoT robusta e bem planejada.

O teste de transmissão de dados mostrou que o ESP32 consegue enviar dados até 50 m de distância com sua antena embutida. Mesmo assim, apenas a metade (50,3%) dos pacotes de dados enviados foram recebidos (Figura 21).

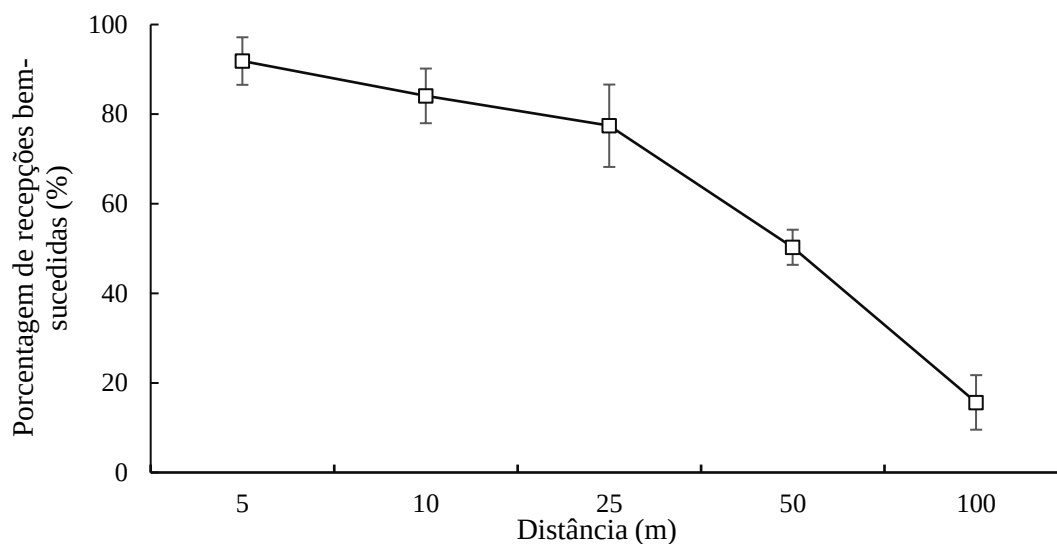


Figura 21. Recepção de sinal entre dois nós sensores instalados a um metro acima do solo e separados nas distâncias de 5, 10, 25, 50 e 100 m. Cada ponto de dado representa uma média de três nós sensores e as barras verticais representa o erro padrão da média.

A transmissão e a recepção de dados podem ser afetadas por vários fatores, incluindo as condições climáticas, as flutuações no fornecimento de energia, a força do sinal da antena e congestionamento no tráfego (Hamami e Nassereddine, 2019). Em um teste reportado no site do fabricante do microcontrolador, os autores relatam uma taxa de sucesso de recepção acima de 80% até os 150 m, caindo drasticamente a partir desse ponto, porém, cerca de 20% dos pacotes de dados ainda foram recebidos aos 300 m de distância do emissor (Gancarcik et al., 2024). No entanto, vale ressaltar que os autores utilizaram uma versão mais potente do ESP32 (ESP32-C6-DevKitM-1), desenvolvido especificamente para transmissões de médio alcance.

A capacidade de enviar e receber dados pode ser melhorada com a instalação de uma antena externa (O'Shaughnessy et al., 2011). Com o uso de antena dedicada para a transmissão de dados, a qualidade e a eficiência da transmissão de dados podem ser aumentadas consideravelmente em 100 a 200 m com o uso de antenas dipolo de baixo custo ou até 1000 m com antenas mais potentes (Mahan et al., 2010; Qing e Chen, 2015).

A conexão com plataformas externas de análises de dados é o principal diferencial de uma rede de sensores IoT, quando comparada com uma rede de sensores sem fio (WSN) convencional. Nesta, a capacidade de processamento fica restrita à capacidade do *hardware*, o que dificulta a condução de análises mais complexas, como a aprendizagem de máquina e implementação de modelos de inteligência artificial. Dessa forma, para aproveitar melhor os recursos crescentes das redes de computadores mundial, essa conexão com a Internet torna-se essencial, sobretudo com os avanços das conexões via satélite que poderão permitir o acesso à Internet de qualidade em lugares remotos, o que é fundamental para o uso dessa tecnologia em propriedades rurais.

4.6 Considerações sobre o nó sensor de baixo custo

Com base nos resultados e nas descobertas apresentadas e discutidas, idealiza-se um sistema de controle de irrigação inteligente, tendo como base a comunicação entre sensores instalados próximos às plantas. O monitoramento da T_F de plantas bem irrigadas fornece uma referência para ativar a irrigação. Portanto, o sistema está baseado em quatro passos:

- I. Um nó sensor coleta a T_F de plantas de referência (PR) enquanto outros sensores coletam a temperatura de outras plantas no talhão, as plantas monitoradas (PM);
- II. Em várias ocasiões durante o dia, a T_F das PRs é comparada com a T_F dos PMs, extraindo-se o DANS;
- III. O DANS e a ET_c , esta calculada de estações meteorológicas instaladas ou no local ou coletada da internet da estação mais próxima, são utilizados para alimentar um modelo para determinar quando ativar a bomba ou válvula eletromecânica e o tempo de irrigação, respectivamente;
- IV. O sistema é retroalimentado em busca de um balanço entre a ET_c e o DANS.

Não se teve pretensão de desenvolver nem testar um algoritmo para reger o sistema de controle proposto. No entanto, no que se diz respeito à parte física do sistema de monitoramento (*hardware*), os nós sensores devem ter duas funcionalidades básicas:

- i. Coletar e transmitir dados ou informações e acionar componentes (nós atuadores) a qualquer momento;
- ii. Interconectar (envio e recebimento de dados e instruções) entre os nós sensores, os nós atuadores e os nós conectados com a Internet para coordenar os demais nós e utilizar de recursos remotos.

Na Figura 22 encontra-se uma ilustração do sistema proposto.

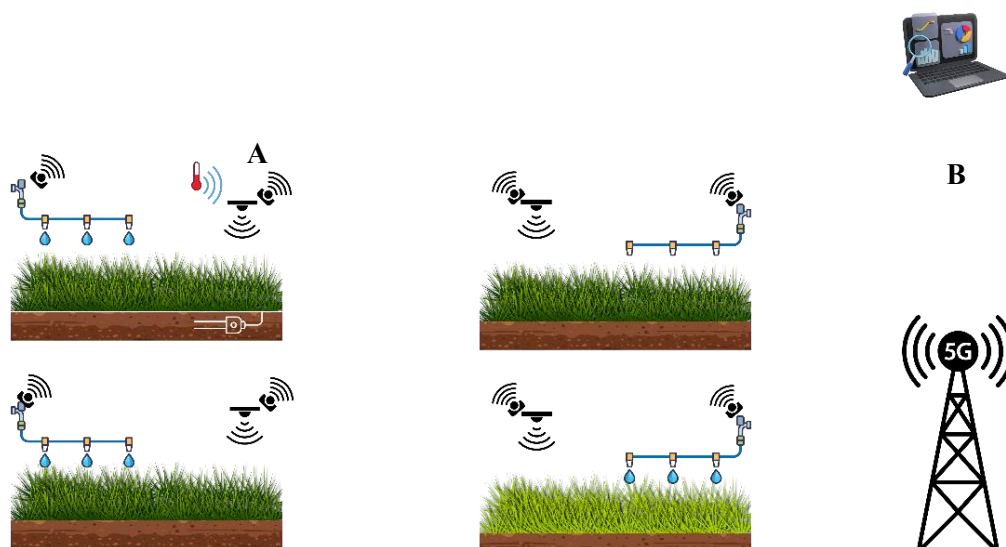


Figura 22. Ilustração do sistema proposto. Um sensor infravermelho coleta a temperatura foliar de uma planta que é monitorada e irrigada com atenção, incluindo outros sensores, como o de umidade do solo (A). A comunicação dessa planta com as demais plantas monitoradas governa a tomada de decisão de irrigação por meio de nós atuadores com base em lógica difusa, realizada por um servidor na Internet (B).

A coleta de dados de qualidade, que refletem as condições das plantas no campo, é fundamental para o desenvolvimento do sistema de irrigação. Nesse contexto, as principais dificuldades de se implementar o sistema de monitoramento para manter sistema de manejo de irrigação proposto, ou qualquer outro sistema, ou é o alto custo dos nós sensores de alta qualidade ou a fragilidade dos nós sensores de preço mais acessível (Jayaraman et al., 2016; Jiménez-Buendía et al., 2021). No presente trabalho, o foco foi em uma alternativa mais acessível, mesmo sabendo que as falhas são esperadas, visto que o ambiente agrícola pode ser bastante severo.

No presente trabalho, o sensor AM2302, também conhecido como DHT22, mostrou-se pouco resistente às condições da casa de vegetação. No entanto, vale ressaltar que a parte de design do abrigo e construção dos circuitos foram insuficientes por falta de experiência por parte dos envolvidos no trabalho. Além disso, o microcontrolador é compatível com uma grande variedade de sensores disponíveis no mercado, o que permite uma grande flexibilidade para a construção do sistema de monitoramento.

Por outro lado, ficou evidente a facilidade de se construir essas alternativas sem precisar de instalações muito sofisticadas e possibilidade de criação de protótipos

específicos para o usuário final a um preço acessível. Dessa maneira, a tendência é que a qualidade desses dispositivos aumente à medida que o preço diminui ao longo do tempo.

Por fim, os avanços tecnológicos abrirão muitas oportunidades, desde que os profissionais formados na academia estejam preparados para a agricultura 4.0 e que os produtores estejam abertos para a adoção dessas tecnologias, o que será a tendência. Portanto, a colaboração entre os envolvidos é essencial para explorar essas tecnologias para não só idealizar, mas também pôr em prática soluções em busca de maior eficiência, sustentabilidade e transparência com o consumidor, principalmente se combinado com outras práticas sustentáveis.

5 CONCLUSÕES

O nó sensor sem fio de baixo custo mostrou-se funcional na coleta, armazenagem e transmissão da temperatura foliar, bem como das variáveis climáticas temperatura e umidade relativa do ar.

O sensor MLX90614, após sua calibração com o de referência, SI-111-SS, apresentou desempenho satisfatório no campo, na medição da temperatura foliar do rabanete. Esse resultado justifica o uso do DANS combinado com redes de sensores sem fio para a detecção do estresse hídrico, com potencial para aplicações no manejo de irrigação.

As avaliações de crescimento revelaram que as culturas do maracujazeiro e do rabanete foram afetadas pela restrição hídrica de 50% e 35% da ET_c, respectivamente, sendo que, para o rabanete, as análises bioquímicas corroboraram as análises de crescimento.

As leituras dos sensores em alta resolução temporal da temperatura foliar é um método eficiente na identificação do estresse hídrico, sendo comprovadas com as análises bioquímicas, além de poder diminuir as incertezas causadas por leituras pontuais.

São necessários mais estudos de campo para testar a viabilidade econômica de um sistema de redes sem fio que inclua testes de eficiência e manejo de energia e compará-las com manejos de irrigação tradicionais. Além disso, faz-se necessária a avaliação de outras opções de sensores e de plataformas disponíveis no mercado dentro de um contexto agrícola comercial.

6 REFERÊNCIAS

- Abdulraheem, M.I.; Chen, H.; Li, L.; Moshood, A.Y.; Zhang, W.; Xiong, Y.; Zhang, Y.; Taiwo, L.B.; Farooque, A.A.; Hu, J. Recent Advances in Dielectric Properties-Based Soil Water Content Measurements. **Remote Sensing**, v. 16, 1328, 2024.
<https://doi.org/10.3390/rs1608132>
- Almalki, F. A.; Soufiene, B. O.; Alsamhi, S. H.; Sakli, H. A Low-Cost Platform for Environmental Smart Farming Monitoring System Based on IoT and UAVs. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 5908, 2021.
<https://doi.org/10.3390/su13115908>.
- AM2302. Datasheet. Disponível em: <http://www.aosong.com/en/products-22.html>. Acesso em: janeiro de 2025.
- Andrade, A.R.S.; Silva, E.G.; Silva, E.T.; Pereira, R.G.; Silva, J.S.; Costa, C.M.; Zamora, V.R.O.; Cruzb, A.F.S.; Ferreira, M.E.S.; Silva, M.G.S.; Noronha, D.A. Avaliação do desempenho de sistema de irrigação por gotejamento em cultivo de maracujá. **Research Society and Development**, v. 10, n. 4, e21710414034, 2021.
<https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14034>
- Anjum, M. N.; Cheema, M. J. M.; Hussain, F., Wu, R. S. Precision irrigation: challenges and opportunities, **Precision Agriculture**, v. 6, p. 85-101, 2023.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18953-1.00007-6>
- Albuquerque, P. E. P. Estratégias de manejo de irrigação: exemplos e cálculos. Circular técnica, 136. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 25 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/865592/1/Circ136.pdf>. Acesso em: janeiro de 2025.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. FAO, Rome, p. 300 (Irrigation and Drainage Paper, 56), 1998.
- Alvim, S.J.T.; Guimarães, C.M.; de Sousa, E.F.; Garcia, R.F.; Marciano, C.R. Application of artificial intelligence for irrigation management: a systematic review. **Engenharia Agrícola**, v. 42, e20210159, 2022.
<https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42nepe20210159/2022>
- Bahadur, A.; Singh, J. Optimization of Tensiometer-Based Drip Irrigation Scheduling and Its Effect on Growth, Yield and Water Use Efficiency in Tomato (*Solanum lycopersicum*). **Agricultural Research**, v. 10, p. 675–681, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s40003-020-00529-5>
- Bauer, J.; Aschenbruck, N. Design and Implementation of an Agricultural Monitoring System for Smart Farming. **IEEE**, 2018.
<https://doi.org/10.1109/IOT-TUSCANY.2018.8373022>.
- Bates, L.S.; Waldren, R.P.; Teare, I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, n. 1, p. 205–207, 1973.
<https://doi.org/10.1007/BF00018060>

Batool, A.; Li, S. S.; Yue, D. X.; Ullah, F.; Cheng, Z.G.; Wang, C.; Duan, H. X.; Lv, G. C.; Haq, Z.; Ahmed, K.; Gui, Y. W.; Zhu, L.; Xiao, Y. L.; Xiong, Y. C. Root-to-shoot signaling positively mediates source-sink relation in late growth stages in diploid and tetraploid wheat. **BMC Plant Biology**, v. 24, 492, 2024.

<https://doi.org/10.1186/s12870-024-05046-z>

Bhatti, S.; Heeren, D.M.; Evett, S.R.; O'Shaughnessy, S.A.; Rudnick, D.R.; Franz, T.E.; Ge, Y.; Neale, C.M.U. Crop response to thermal stress without yield loss in irrigated maize and soybean in Nebraska. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107946, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107946>

Bhatti, S.; Heeren, D.M.; O'Shaughnessy, S.A.; Neale, C.M.U.; LaRue, J.; Melvin, S., Wilkening, E.; Bai, G. Toward automated irrigation management with integrated crop water stress index and spatial soil water balance. **Precision Agriculture**, v. 24, p. 2223–2247, 2023.

<https://doi.org/10.1007/s11119-023-10038-4>

Blanco, V.; Kalcsits, L. Microtensiometers Accurately Measure Stem Water Potential in Woody Perennials. **Plants**, v. 10, 2780, 2021.

<https://doi.org/10.3390/plants10122780>

Blaya-Ros, P.J.; Blanco, V.; Domingo, R.; Soto-Valles, F.; Torres-Sánchez, R. Feasibility of low-cost thermal imaging for monitoring water stress in young and mature sweet cherry trees. **Applied Sciences**, v. 10, n. 16, 5461, 2020.

<https://doi.org/10.3390/app10165461>

Blonquist Jr., J.M.; Norman, J.M.; Bugbee, B. Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 2183–2197, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.10.003>

Boca, L.L.; Ciortea, E.M.; Boghean, C.; Begov-Ungur, A.; Boghean, F.; Dădârlat, V.T. An IoT system proposed for higher education: approaches and challenges in economics, computational linguistics, and engineering. **Sensors**, v. 23, p. 6271, 2023.

<https://doi.org/10.3390/s23146272>

Bolfe, E.; Massruhá, S. A transformação digital e a sustentabilidade agrícola. **Agroanalysis**, v. 40, p. 32-34, 2020.

Bolfe, E. L.; Jorge, L. A. C.; Sanches, I.; Costa, C. C. Da; Luchiari Jr., A.; Victória, D.; Inamasu, R.; Grego, C.; Ferreira, V.; Ramirez, A. **Agricultura digital no Brasil: tendências, desafios e oportunidades: resultados de pesquisa online**. Campinas: Embrapa, 2020. 44 p.

Boyaci, S.; Kocięcka, J.; Atilgan, A.; Liberacki, D.; Rolbiecki, R.; Saltuk, B.; Stachowski, P. Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for High Tunnel Greenhouse Tomatoes under Different Irrigation Levels. **Atmosphere**, v. 15, 205, 2024.

<https://doi.org/10.3390/atmos15020205>

Buckley, T. How do stomata respond to water status? **New Phytologist**, v. 224, p. 21–36, 2019.

<https://doi.org/10.1111/nph.15899>

Brasil. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade da Farinha de Mandioca**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 set. 1999

Brodribb, T. J. Xylem hydraulic physiology: the functional backbone of terrestrial plant productivity. **Plant Science**, v. 177, p. 245–251, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.06.001>

Casadesús, J.; Mata, M.; Marsal, J.; Girona, J. A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 83, p. 11–20, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.01.005>

Chai, Q.; Gan, Y.; Zhao, C.; Xu, H.; Waskom, R.M.; Niu, Y.; Siddique, K.H.M. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review.

Agronomy for Sustainable Development, v. 36, n. 3, 2016.

<https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>

Chavarria, G.; dos Santos, H.P. Plant water relations: absorption, transport, and control mechanisms. **InTech**, 2012.

<http://dx.doi.org/10.5772/33478>

Cormier, J.; Depardieu, C.; Letourneau, G.; Boily, C.; Gallichand, J.; Caron, J. Tensiometer-based irrigation scheduling and water use efficiency of field-grown strawberries. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 4, p. 2581-2597, 2020.

<https://doi.org/10.1002/agj2.20205>

Correia, C. C. S. A.; Cunha, F. F.; Mantovani, E. C.; Da Silva, D. J. H.; Dias, S. H. B. Irrigation of radish cultivars in the region of Viçosa, Minas Gerais, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 1, e20175643, 2020.

<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200011>

Cotelle, V.; Leonhardt, N. ABA signaling in guard cells. **Advances in Botanical Research**, v. 92, p. 115-170, 2019.

<https://doi.org/10.1016/bs.abr.2019.10.001>

Craparo, A. C. W.; Steppe, K.; Van Asten, P. J. A.; Läderach, P.; Jassogne, L. T. P.; Grab, S. W. 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.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.158>

Dahane, A.; Benameur, R.; Kechar, B. An IoT low-cost smart farming for enhancing irrigation efficiency of smallholders farmers. **Wireless Personal Communications**, v. 127, p. 3173–3210, 2022.

<https://doi.org/10.1007/s11277-022-09915-4>

Datta, S.; Taghvaeian, S.; Ochsner, T.E.; Moriasi, D.; Gowda, P.; Steiner, J.L. Performance Assessment of Five Different Soil Moisture Sensors under Irrigated Field Conditions in Oklahoma. **Sensors**, v. 18, 3786, 2018.

<https://doi.org/10.3390/s18113786>

Damm, A.; Paul-Limoges, E.; Haghighi, E.; Simmer, C.; Morsdorf, F.; Scheneider, F. D.; Van der Tol, V.; Migliavacca, M.; Rascher, U. Remote sensing of plant-water

relations: An overview and future perspectives, **Journal of Plant Physiology**, v, 227, p. 3-19, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.04.012>

Da Silva, C.J.; Da Silva, C.A.; De Freitas, C.A.; Golynski, A.; Da Silva, L.F.M.; Frizzone, J.A. Tomato water stress index as a function of water depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 95-100, 2018.

<http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p95-100>

Davies, W.L.; Wilkinson, S.; Loveys, B. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water-use efficiency in agriculture. **New Phytologist**, v. 153, p. 449-460, 2002.

<https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00345.x>

Deans, R.M.; Brodribb, T.J.; Busch, F.A. et al. Optimization can provide the fundamental link between leaf photosynthesis, gas exchange and water relations. **Nature Plants**, v. 6, p.1116–1125, 2020.

<https://doi.org/10.1038/s41477-020-00760-6>

Dejonge, K.C.; Taghvaeian, S.; Trout, T.J.; Comas, L.H. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. **Agricultural Water Management**, v. 156, p. 51–62, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.023>

De Melo, D.A.; Silva, P.C.; da Costa, A.R.; Delmond, J.G.; Ferreira, A.F.A.; de Souza, J.A.; de Oliveira-Júnior, J.F.; da Silva, J.L.B.; da Rosa Ferraz Jardim, A.M.; Giongo, P.R.; et al. Development and Automation of a Photovoltaic-Powered Soil Moisture Sensor for Water Management. **Hydrology**, v. 10, 166, 2023.

<https://doi.org/10.3390/hydrology10080166>

Dhanaraju, M.; Chenniappan, P.; Ramalingam, K.; Pazhanivelan, S.; Kaliaperumal, R. Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture. **Agriculture**, v. 12, 1745, 2022.

<https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>

Dixon, H. H.; Joly, J. On the ascent of sap. **Philos. Trans. R. Soc London Ser.** v. 186, p. 563–76, 1984.

Dixon, L.; Bellinger, B.; Carter, A. H. A gravimetric method to monitor transpiration under water stress conditions in wheat. **The plant phenome journal**, v. 6, n. 1, e.20078, 2023.

<https://doi.org/10.1002/ppj2.20078>

Dodd, I.C.; Puértolas, J.; Huber, K.; Pérez-Pérez, J. G.; Write, H. R.; Blackwell, M. S. A. The importance of soil drying and re-wetting in crop phytohormonal and nutritional responses to deficit irrigation. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n.8, p. 2239–2252, 2015.

<https://doi.org/10.1093/jxb/eru532>

Domínguez-Niño, J. M.; Oliver-Manera, J.; Girona, J.; Casadesús, J. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, v. 228, 105880, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105880>

- Duguma, A. L.; Bai, X. How the internet of things technology improves agricultural efficiency. **Artificial Intelligence Review**, v. 58, 63, 2025.
<https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0>
- Dry, P. R.; Loveys, B.R.; Botting, D.; During, H. Effects of partial root-zone drying on grapevine vigour, yield, composition of fruit and use of water. **Proceedings of the 9th Australian Wine Industry Technical Conference**, p.126–131, 1996.
- Ekinzog, E.K.; Schlerf, M.; Kraft, M.; Werner, F.; Riedel, A.; Rock, G.; Mallika, K. Revisiting crop water stress index based on potato field experiments in Northern Germany. **Agricultural Water Management**, v. 269, 107664, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107664>
- El-Samad, H. Biological feedback loop – respect the loops. **Cell Systems**, v. 12, n. 6, p. 477-487, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.cels.2021.05.004>
- Fereres, E.; Kitlas, P.M.; Goldfien, R.E.; Pruitt, W.O.; Hagan, R.M. Simplified but scientific- irrigation scheduling. **California Agriculture**, p.19-21, 1981.
- Fereres, E.; Soriano, M. A. Deficit irrigation for reduction agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v. 52, n. 2, p.147–159, 2007.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Ferreira, L.B.; Cunha, F.F. da; Oliveira, R.A. de; Rodrigues, T.F. A smartphone APP for weather-based irrigation scheduling using artificial neural networks. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.55, e01839, 2020.
[10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01839](https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01839).
- Fisher, D. K.; Kebede, H. A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 74, p. 168-173, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.07.006>
- Forster, A. Anatomy of a Sensor Node (Eds). **Introduction to Wireless Sensor Networks**, New Jersey, Wiley-IEEE press, 2016, p.11-31.
<https://doi.org/10.1002/9781119345343.ch2>.
- Gancarcik, S.; Sumsy, J.; Kubascik, M. Exploring wireless communication protocols on ESP32 platform for outdoor applications. Disponível em:
<https://developer.espressif.com/blog/esp-now-for-outdoor-applications>. Acesso em janeiro de 2025.
- García-Tejera, O.; López-Bernal, A.; Orgaz, F.; Test, L.; Villalobos, F. J. The pitfalls of water potential for irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**, v. 243, 106522, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106522>
- Gonzalez-Dugo, V.; Zarco-Tejada, P. J. Assessing the impact of measurement errors in the calculation of CWSI for characterizing the water status of several crop species. **Irrigation Science**, v. 42, p.431–443, 2024.
<https://doi.org/10.1007/s00271-022-00819-6>
- Gültas, H. T. Crop water stress index assessment of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under limited water conditions. **Scientia Agricola**, v. 82, 20230285, 2025.

<https://doi.org/10.1590/1678-992X-2023-0285>

Hamani, L.; Nassereddine, B. Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, 105782, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105782>

Hargreaves, G. H.; Samani, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, v.1, n. 2, p. 96-99, 1985.
<https://doi.org/10.13031/2013.26773>

Hercog, D.; Lerher, T.; Truntiĉ, M.; Težak, O. Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. **Sensors**, v. 23, 6739, 2023.
<https://doi.org/10.3390/s23156739>

Hoque, M.J.; Islam, M.S.; Khaliluzzaman, M. A Fuzzy Logic- and Internet of Things-Based Smart Irrigation System. **Engineering. Proceedings.**, v. 58, 93, 2023.
<https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16243>

Idso, S.B.; Jackson, R.D.; Pinter, P. J.; Reginato, R. J.; Hatfield, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v.24, p. 45-55, 1981.
[https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)

Ihuoma, S. O.; Madramootoo, C. A. Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 141, p. 257-265, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.026>

Ihuoma, S. O.; Madramootoo, C. A. Sensitivity of spectral radiation indices for monitoring water stress in tomato plants. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 167, 104860, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104860>

Jackson, R. D.; Reginato, R. J.; Idso, S. B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. **Water Resources Research**, v. 13, n.3, p. 651-658, 1977.
<https://doi.org/10.1029/WR013i003p00651>

Jamroen, C.; Komkum, P.; Fongkerd, C.; Krongpha, W. An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture, **IEEE**, v. 8, p.172756-172769, 2020.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025590>

Javaid, M.; Haleem, A.; Rab, S.; Singh, R.P.; Suman, R. Sensors for daily life: a review. **Sensors International**, v. 2, 100121, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100121>

Jayaraman, P. P.; Yavari, A.; Georgakopoulos, D.; Morshed, A.; Zaslavsky, A. Internet of Things Platform for Smart Farming: Experiences and Lessons Learnt. **Sensors**, v. 16, n. 11, p. 1884, 2016.
<https://doi.org/10.3390/s16111884>

Jiménez-Buendía, M.; Soto-Valles, F.; Blaya-Ros, P.J.; Toledo-Moreo, A.; Domingo-Miguel, R.; Torres-Sánchez, R. High-Density Wi-Fi Based Sensor Network for Efficient Irrigation Management in Precision Agriculture. **Applied. Sciences**, v. 11, 1628, 2021.
<https://doi.org/10.3390/app11041628>

Jones, H. G. Irrigation Scheduling: Advantages and Pitfalls of Plant-Based Methods. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 407, p. 2427–2436, 2004.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>

Jones, H. G.; Hutchinson, P.; May, T.; Jamali, H.; Deery, D. M. A practical method using a network of fixed infrared sensors for estimating crop canopy conductance and evaporation rate. **Biosystems Engineering**, v. 165, p. 59-69, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.012>

Jones, H.G.; Stoll, M.; Santos, T.; De Sousa, C.; Chaves, M. M.; Grant, O. M. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine, **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 378, p. 2249–2260, 2002.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erf083>

Kambalimath, S.; Deka, P.C. A basic review of fuzzy logic applications in hydrology and water resources. **Applied Water Science**, v. 10, 191, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s13201-020-01276-2>

Kang, S.; Zhang, J. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 407, p.2437-2446, 2004.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erh249>

Katimbo, A.; Rudnick, D. R.; Dejonge, K. C.; Lo, T. H.; qiao, X.; Franz, T. E.; Nakabuye, H. N.; Duan, J. Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics. **Agricultural Water Management**, v. 266, 107576, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107575>

Khan, H. A.; Nakamura, Y.; Furbank, R. T.; Evans, J. R. Effect of leaf temperature on the estimation of photosynthetic and other traits of wheat leaves from hyperspectral reflectance. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 4, p. 1271-1281, 2021.
<https://doi.org/10.1093/jxb/eraa514>

Khuwijitjaru, P.; Klinchongkon, K. Passion fruit. In: Galanakis, C. M. (Eds.). **Valorization of Fruit Processing By-products**. Cambridge, Academic Press, 2020, p.183-201.
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-817106-6.00009-5>.

Kibler, C. L.; Trugman, A. T.; Roberts, D.A.; Still, C. J.; Scott, R. L.; Caylor, K. K.; Stella, J. C.; Singer, M. B. Evapotranspiration regulates leaf temperature and respiration in dryland vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 339, 109510, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109560>

King, B. A.; Shellie, K. C. A crop water stress index based internet of things decision support system for precision irrigation of wine grape, **Smart Agricultural Technology**, v. 4, 100202, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100202>

Kumari, A.; Singh, D. K.; Sarangi, A.; Hasan, M.; Sehgal, V. K. Optimizing wheat supplementary irrigation: Integrating soil stress and crop water stress index for smart scheduling, **Agricultural Water Management**, v. 305, 109104, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109104>

- Lakso, A.N.; Santiago, M.; Stroock, A.D. Monitoring Stem Water Potential with an Embedded Microtensiometer to Inform Irrigation Scheduling in Fruit Crops. **Horticulturae**, v. 8, 1207, 2022.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae8121207>
- Lemay, I.; Caron, J.; Dorais, M.; Pepin, S. Defining irrigation set points based on substrate properties for variable irrigation and constant matric potential devices in greenhouse tomato. **HortScience**, v. 47, n. 8, p. 1141–1152, 2012.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.8.1141>
- Lucas, M.C.; Kublik, N.; Rodrigues, D.B.B.; Meira Neto, A.A.; Almagro, A.; Melo, D.d.C.D.; Zipper, S.C.; Oliveira, P.T.S. Significant Baseflow Reduction in the Sao Francisco River Basin. **Water**, v. 13, n.2, 2021.
<https://doi.org/10.3390/w13010002>
- Luo, S.; Lu, N.; Zhang, C.; Likos, W. Soil water potential: A historical perspective and recent breakthroughs, **Vadose Zone Journal**, v. 21, n. 4, e. 2023.
<https://doi.org/10.1002/vzj2.20203>
- Mahan, J. R.; Conaty, W.; Neilsen, J.; Payton, P.; Cox, S. B. Field performance in agricultural settings of a wireless temperature monitoring system on a low-cost infrared sensor. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, p. 176-181, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.01.005>
- Mahan, J. R.; Yeater, K. Agricultural application of a low-cost infrared thermometer. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 64, p. 262-267, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.017>
- Maier, A.; Sharp, A.; Vagapov, Y. Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. Conference paper. **Internet Technologies and Applications (ITA)**, p. 143-148, 2017.
<https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926>
- Maguire, M. S.; Neale, C. M. U.; Woldt, W. E. Improving accuracy of unmanned aerial system thermal infrared remote sensing for use in energy balance models in agriculture applications. **Remote Sensing**, v. 13, n. 9, 1635, 2021.
<https://doi.org/10.3390/rs13091635>
- Manrique, J. A.; Rueda-Rueda, J. S.; Portocarrero, J. M. T. Contrasting Internet of Things and Wireless Sensor Network from a Conceptual Overview. **IEEE**, p. 252-257 2016.
<https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCoM-SmartData.2016.66>
- Mantovani, E. C.; Bernardo, S.; Palaretti, L. S. **Irrigação – Princípios e Métodos**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2012. v. 1. 355p.
- McCauley, D.; Keller, S.; Transue, K.; Wiman, N.; Nackley, L. A Crop Water Stress Index for Hazelnuts Using Low-Cost Infrared Thermometers. **Sensors**, v. 24, p. 7764, 2024.
<https://doi.org/10.3390/s24237764>
- Mcdermitt, D. Sources of Error in the Estimation of Stomatal Conductance and Transpiration from Porometer Data, **HortScience**, v. 25, n. 12, p.1538-1548, 1990.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.25.12.1538>

- Mehta, P.; Siebert, S.; Kumm, M.; Deng, Q.; Ali, T.; Marston, L.; Xie, W.; Davis, K.F. Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions. **Nature Water**, v. 2, p. 254–261, 2024.
<https://doi.org/10.1038/s44221-024-00206-9>
- Miller, G.L. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, v. 3, n. 3, p.426–428, 1959.
<https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Mottola, L.; Picco, G. P. Programming wireless sensor networks: Fundamental concepts and state of the art. **ACM Computing Surveys**, v. 43, n. 3, p.1–51, 2011.
- Muller, J.D.; Rotenberg, E.; Tatarinov, F.; Oz, I.; Yakir, D. Detailed in situ leaf energy budget permits the assessment of leaf aerodynamic resistance as a key to enhance non-evaporative cooling under drought. **Plant Cell & Environment**, v.46, p.3128–3143, 2023. <https://doi.org/10.1111/pce.14571>
- Nakabuye, H. N.; Rudnick, D.; Dejonge, K. C.; Lo, T. H.; Heeren, D.; Qiao, X.; Franz, T. E.; Katimbo, A.; Duan, J. Real-time irrigation scheduling of maize using Degrees Above Non-Stressed (DANS) index in semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 274, 107957, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107957>
- Neggaz, N. E.; Yssaad, H. A. R. Effect of copper-salinity interaction on proline and soluble sugars contents in radish (*Raphanus sativus* L.). **Plant Archives**, v. 19, n. 2, p. 2158-2162, 2019.
- Neugebauer, M., Akdeniz, C., Demir, V., Yurden, H. Fuzzy logic control for watering system. **Scientific Reports**, v. 13, 18485, 2023.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-45203-2>
- Nobel, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**, 4^o ed. Cambridge, Academic Press, 2009. 604 p.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374143-1.X0001-4>
- Noun, G.; Lo Cascio, M.; Spano, D.; Marras, S.; Sirca, C. Plant-Based Methodologies and Approaches for Estimating Plant Water Status of Mediterranean Tree Species: A Semi-Systematic Review. **Agronomy**, v. 12, 2127, 2022.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12092127>
- Noguera, M.; Millán, B.; Pérez-Paredes, J.J.; Ponce, J.M.; Aquino, A.; Andújar, J.M. A New Low-Cost Device Based on Thermal Infrared Sensors for Olive Tree Canopy Temperature Measurement and Water Status Monitoring. **Remote Sensing**, v. 12, 723, 2020.
<https://doi.org/10.3390/rs12040723>
- Obaideen, K.; Yousef, B. A.A.; AlMallahi, M.N.; Tan, Y.C.; Mahmoud, M.; Jaber, H.; Ramadan, M. An overview of smart irrigation systems using IoT, **Energy Nexus**, v. 7, 100124, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>.
- O'Shaughnessy, S. A.; Evett, S. R.; Colaizzi, P. D.; Howell, T. A. A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 122-132, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.018>

O'Shaughnessy, S. A.; Hebel, M. A.; Evett, S. R.; Colaizzi, P. D. Evaluation of a wireless infrared thermometer with a narrow field of view. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 76, p. 59-68, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.017>

Osroosh, Y.; Peters, R. T.; Campbell, C. S. Daylight crop water stress index for continuous monitoring of water status in apple trees. **Irrigation Science**, v. 34, p. 209-219, 2016.

10.1007/s00271-016-0499-3

Pappas, G.; Siegel, J.; Vogiatzakis, I.N.; Politopoulos, K. **Gamification and the Internet of Things in Education**. In Handbook on Intelligent Techniques in the Educational Process: Recent Advances and Case Studies, v.1, p. 317–339, 2022.

<https://doi.org/10.1007/978-3-031-04662-915>

Paulo, R. L.; Garcia, A. P.; Umezu, C. K.; Camargo, A. P.; Soares, F. T.; Abiero, D. Water stress index detection using a low-cost infrared sensor and excess green image processing. **Sensors**, v.23, 1318, 2023.

<https://doi.org/10.3390/s23031318>

Parihar, G.; Saha, S.; Giri, L. I. Application of infrared thermography for irrigation scheduling of horticulture plants. **Smart Agricultural Technology**, v. 1, 100021, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100021>

Pereira, L. S.; Allen, R. G.; Smith, M.; Raes, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, n. 2, p. 4-20, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>

Pramanik, M.; Khanna, M.; Singh, M.; Singh, D. K.; Sudhishri, S.; Bhatia, A.; Ranjan, R. Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. **Smart Agricultural Technology**, v. 2, 100032, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100032>

Puntel, L. A.; Bolfe, E. L.; Melchiori, R. J. M.; Ortega, R.; Tiscornia, G.; Roel, H.; Scaramuzza, F.; Best, S.; Berger, A. G.; Hansel, D. S. S.; Durán, D. P.; Balboa, G. R. How digital is agriculture in a subset of countries from South America? Adoption and limitations. **Crop and Pasture Science**, v. 74, p. 555-572, 2023.

<https://doi.org/10.1071/CP21759>

Radar AgTech. Relatório Radar AgTech Brasil 2023. Disponível em:

<https://radaragtech.com.br/download-do-radar-agtech-brasil-2023>. Acesso em: fevereiro de 2025.

Richards, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics** v.1, p. 318–333, 1931.

<https://doi.org/10.1063/1.1745010>

Risso, A.; Rajaram, V.; Kang, S.; Caliskan, S. D.; Pavese, M. M.; Qian, Z.; Rinaldi, M. Zero standby power crop water-stress detector leading to the optimization of water usage and yield. **Scientific Reports**, v. 12, 12603, 2022.

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-16419-5>

Romero, R.; Muriel, J. L.; García, I.; De la Peña, D. N. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. **Agricultural Water Management**, v. 114, p. 59-66, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.026>

Saiz-Fernández, I.; Cerny, M.; Skalák, J.; Brzobohatý, B. Split-root systems: detailed methodology, alternative applications, and implications at leaf proteome level. **Plant methods**, v. 17, n. 1, 7, 2021.

<https://doi.org/10.1186/s13007020007061>

Sanches, A. C.; Alves, C. O.; Jesus, F. L. F.; Theodoro, F. L.; Cruz, T. A. C.; Gomes, E. P. Low-cost and high-efficiency automated tensiometer for real-time irrigation monitoring. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.26, n.5, p.390-395, 2022.

<http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p390-395>

Santos, M. R.; Silveira, B. C. Da; Sepulveda Neto, C. da S.; Pereira, L. B.; Ferreira, N. C. S. QIrriga: Aplicativo para manejo de irrigação via clima. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 44, n. 5, p.1789–1804, 2023.

<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2023v44n5p1789>

Santos, D.L.; Coelho, E.F.; de Oliveira, R.A. *et al.* Impact of soil water regimes and partial root-zone drying in field-grown papaya in semi-arid conditions. **Scientific Reports**, v. 11, 10638, 2021.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-90078-w>

Sapkota, A.; Roby, M.; Peddinti, S. R.; Fulton, A.; Kisekka, I. Comparative analysis of evapotranspiration (ET), crop water stress index (CWSI), and normalized difference vegetation index (NDVI) to delineate site-specific irrigation management zones in almond orchards. **Scientia Horticulturae**, v. 339, 113960, 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113860>

Saqib, M.; Almohamad, T. A.; Mehmood, R. M. A low-cost information monitoring system for smart farming applications. **Sensors**, v. 20, n. 8, p. 2367, 2020

<https://doi.org/10.3390/s20082367>.

Seleiman, M.F.; Al-Suhaibani, N.; Ali, N.; Akmal, M.; Alotaibi, M.; Refay, Y.; Dindaroglu, T.; Abdul-Wajid, H.H.; Battaglia, M.L. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. **Plants (Basel)**, v. 28, n. 10, n. 2, 259, 2021.

<https://doi.org/10.3390/plants10020259>

Shafiq, M.; Gu, Z.; Cheikkhouhou, O.; Alhakami, W.; Hamam, A. The Rise of “Internet of Things”: Review and Open Research Issues Related to Detection and Prevention of IoT-Based Security Attacks, **Wireless communication and mobile computing**, v. 2022, 669348, 2022.

<https://doi.org/10.1155/2022/8669348>

Silva, B. L. da; Santos, M. R. dos; Mesquita, N. L. S.; Soares, P. P. de S. Software for managing localized irrigation systems in fruit trees. **Revista brasileira de agricultura irrigada**, v.11, p. 1693-1699, 2017.

<https://doi.org/10.7127/rbai.v11n500750>

- Silva, C. J.; Silva, C. A.; Freitas, C. A.; Golynsky, A.; Silva, L. F. M.; Frizzzone, J. A. Tomato water stress index as a function of water stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.2, p.95-100, 2018.
<http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p95-100>
- Simbeye, D. S.; Mkiramweni, M. E.; Karaman, B.; Taskin, S. Plant water stress monitoring and control system. **Smart Agricultural Technology**, v. 3, 100066, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100066>
- Sishodia, R.P.; Ray, L.R.; Singh, S.K. Applications of remote sensing in precision agriculture: a review. **Remote Sensing**, v. 12, 3136, p. 1-31, 2020.
<https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Slamini, M.; Sbaa, M.; Arabi, M.; Darmous, A. Review on partial root-zone drying irrigation: impact on crop yield, soil and water pollution. **Agricultural Water Management**, v. 271, 107807, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107807>
- Sonawane, A.V.; Shrivastava, P.K. Partial root zone drying method of irrigation: a review. **Irrigation and Drainage**, v. 71, n. 3, p. 574-588, 2022.
<https://doi.org/10.1002/ird.2686>
- Souza, P. U.; Lima, L. K. S.; Soares, T. L.; Jesus, O. N. de; Coelho Filho, M. A.; Girardi, E. A. Biometric, physiological and anatomical responses of *Passiflora* spp. to controlled water deficit. *Scientia Horticulturae*. **Scientia Horticulturae**, v. 229, p. 77-90, 2018.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.019>.
- Smith, M. **Report on expert consultation on procedures for revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Land and Water Development Division of Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1991. 21 p.
- Stagnari, F.; Galieni, A.; D'Egidio, S.; Pagnani, J.; Pisante, M. Responses of radish (*Raphanus sativus*) to drought stress. **Annals of Applied Biology**, v. 172, n. 2, p. 170-186, 2017.
<https://doi.org/10.1111/aab.12409>
- Stoll, M.; Loveys, B.; Dry, P. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 350, p. 627-1634, 2000.
<https://doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1627>
- Sui, R.; Vories, E. Comparison of Sensor-Based and Weather-Based Irrigation Scheduling. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 36, n. 3, p. 375-386, 2020.
<https://doi.org/10.13031/aea.13678>
- Swaef, T.; Pieters, O.; Appeltans, S.; Borra-Serrano, I.; Coudron, W.; Couvreur, V.; Garré, S.; Lootens, P.; Nicolaï, B.; Pols, L.; Cast, C. S.; Šalagovič, J.; Haeverbeke, M. V.; Stock, M.; Wyffels, F. On the pivotal role of water potential to model plant physiological processes, **In silico Plants**, v 4, n. 1, 2022,
<https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab038>
- Qing, X.; Chen, Z.N. Omnidirectional Antennas. In: Chen, Z. (Eds.). **Handbook of Antenna Technologies**. Singapura, Springer, 2015, p. 1-51.
https://doi.org/10.1007/978-981-4560-75-7_52-1

- Taghvaeian, S.; Comas, L.H.; DeJonge, K.C.; Trout, T.J. Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower. **Agricultural Water Management**, v. 144, p. 69-80, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.06.003>
- Tang, P.; Liang, Q.; Li, H.; Pang, Y. Application of Internet-of-Things Wireless Communication Technology in Agricultural Irrigation Management: A Review. **Sustainability**, v. 16, 3575, 2024.
<https://doi.org/10.3390/su16093575>
- Thalmann, M.; Santelia, D. Starch as a determinant of plant fitness under abiotic stress. **New Phytologist**, v. 214, p. 943-951, 2017.
<https://doi.org/10.1111/nph.14491>
- Turner, N. C. Turgor maintenance by osmotic adjustment: 40 years of progress. **Journal of Experimental Botany**, v 69, n. 13, p. 3223-3233, 2018.
<https://doi.org/10.1093/jxb/ery181>
- Tuver, J. Y.; Ekinici, M.; Yildirim, E. Morphological, physiological and biochemical responses to combined cadmium and drought stress in radish (*Raphanus sativus* L.). **Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali**, v. 33, p. 419-429, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s12210-022-01062-z>
- Valente, J.; Roldán, J.J.; Garzón, M.; Barrientos, A. Towards Airborne Thermography via Low-Cost Thermopile Infrared Sensors. **Drones**, v. 3, n. 30, 2019.
<https://doi.org/10.3390/drones3010030>
- Vallejo-Gómez, D.; Osorio, M.; Hincapié, C. A. Smart Irrigation Systems in agriculture: a systematic review. **Agronomy**, v. 13, n.2, p. 342-367, 2023.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13020342>
- Vollset, S.E.; Goren, E.; Yuan, C. W.; Cao, J.; Smith, A. E.; Hsiao, T.; Bisignano, C.; Azhar, G. S.; Castro, E.; Chalek, J.; Dolgert, A. J.; Frank, T.; Fukutaki, K.; Hay, S. I.; Lozano, R.; Mokdad, A. H.; Nandakumar, V.; Pierce, M.; Pletcher, M.; Robalik, T.; Steuben, K. M.; Wunrow, H. Y.; Zlavog, B. S.; Murray, C. J. L. Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study. **Lancet.**, v.17, p. 1285-1306, 2020.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30677-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30677-2)
- Walther, B. A.; Moore, J. L. The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing performance of species richness estimator, with a literature review of estimator performance. **Ecography**, v. 28, p. 815-819, 2005.
<https://doi.org/10.1111/j.2005.0906-7590.04112.x>
- Weatherley, P.E. Studies in the Water Relations of the Cotton Plant I. The Field Measurement of Water Deficits in Leaves. **New Phytologist**, v. 49, n.1, p. 81-97, 1950.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1950.tb05146.x>
- Wei, H.; Xu, W.; Kang, B.; Eisner, R.; Muleke, A.; Rodriguez, D.; deVoil, P.; Sadras, V.; Monjardino, M.; Harrison, M. T. Irrigation with artificial intelligence: Problems, premises, promises. **Human-Centric Intelligent Systems**, v. 4, p. 187-205, 2024.
<https://doi.org/10.1007/s44230-024-00072-4>

Xu, J.; Gu, B.; Tian, G. Review of Agricultural IoT Technology. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 6, p. 10-22, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001>

Yang, B.; Fu, P.; Lu, J. Ma, F.; Sun, X.; Fang, Y. Regulated deficit irrigation: an effective way to solve the shortage of agricultural water for horticulture. **Stress Biology**, v. 2, n. 28, 2022.

<https://doi.org/10.1007/s44154-022-00050-5>

Yemm, E.W.; Willis, A.J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, v. 57, n. 3, p.508–514, 1954.

<https://doi.org/10.1042/bj0570508>

Yousaf, A.; Kayvanfar, V.; Mazzoni, A.; Elomri, A. Artificial Intelligence-based decision support system in smart agriculture: bibliometric analysis for operational insights and future directions. **Frontier in Sustainability and Food Systems.**, v. 6, 1053921, 2023.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1053921>

Zhai, Z.; Martínez, J. F.; Beltran, V.; Martínez, N. L. Decision support systems for agriculture 4.0: surveys and challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, 105256, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>

APÊNDICE A



Figura 1A. Experimento com maracujazeiro em casa de vegetação.



Figura 2A. Experimento com rabanete aos 22 dias após a emergência.

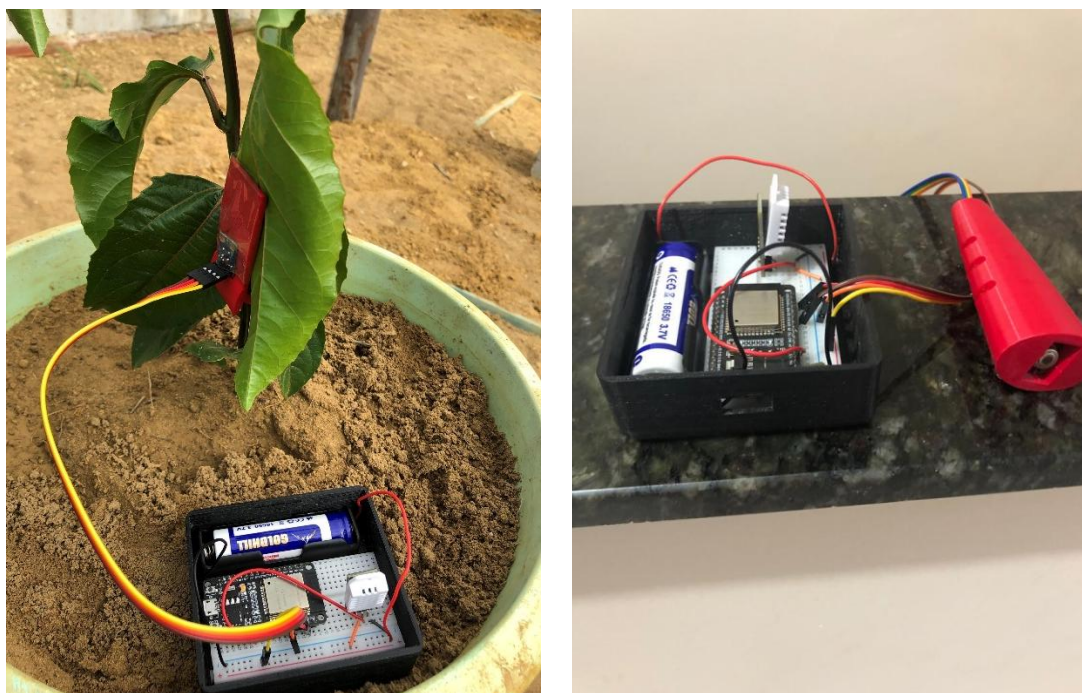


Figura 3A. Algumas versões preliminares do nó sensor. Na direita, a ideia de um clipe para prender na folha mostrou-se inviável e perturbava muito a amostra. Na esquerda, a primeira versão do nó, inspirado nos sensores disponíveis no mercado.

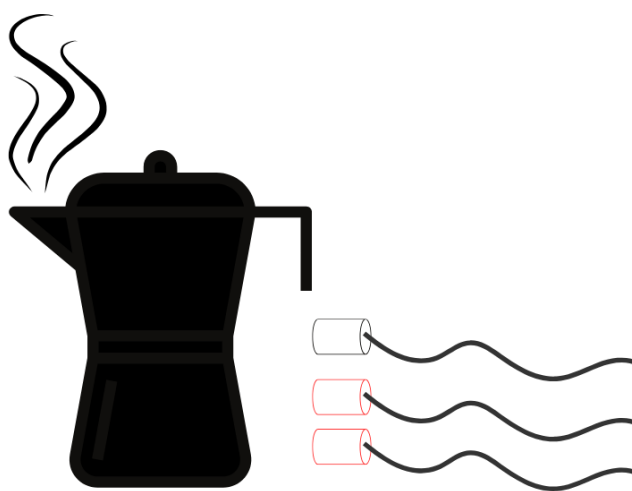


Figura 4A. Ilustração do teste de comparação entre o instrumento de referência (branco) e os sensores de baixo custo (vermelho). Os sensores foram posicionados na mesma distância do recipiente metálico pintado de preto e água com diferentes temperaturas foi adicionada para verificar a resposta dos sensores em relação às mudanças de temperatura de superfície.

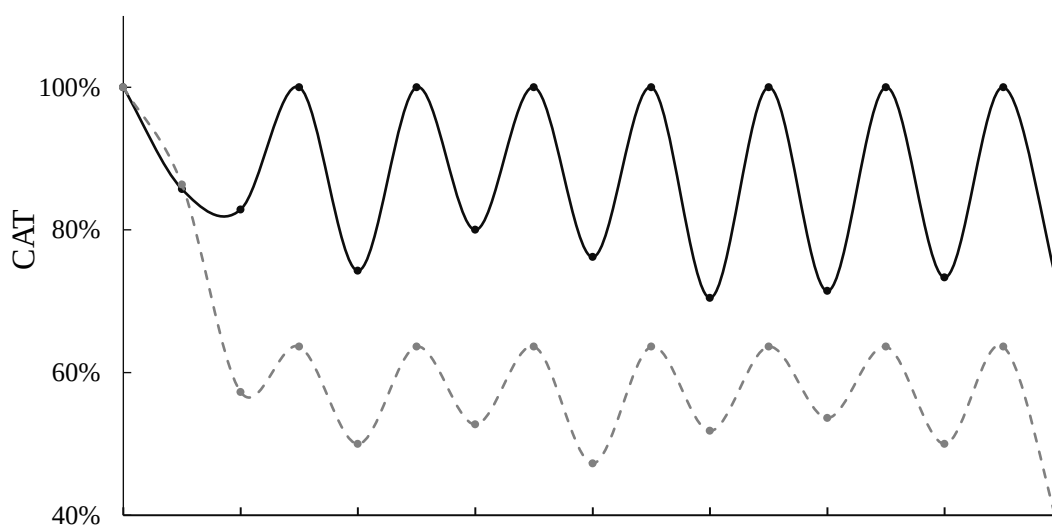


Figura 5A. Variação no conteúdo de água total (CAT) dos tratamentos com reposição de 100% da ETc (linha contínua) e 65% da ETc (linha pontilhada).

Tabela 1A. Análise de variância para as variáveis de crescimento e bioquímica do rabanete submetido a duas lâminas de irrigação, para repor 100% e 65% da ETc

Variável de crescimento	Soma de quadrados	Quadrados médio	F calculado
MFPA	114,57	114,57	9,48*
	265,88	12,08	
	380,45		
MSPA	0,96	0,96	6,34*
	3,33	0,15	
	4,30		
AF	22296,97	22296,97	9,48*
	51741,14	2351,87	
	74038,12		
MRP	1111,72	1111,72	14,48*
	1689,32	76,78	
	2801,04		
Variável bioquímica	Soma de quadrados	Quadrados médio	F calculado
SS	3074,18	3074,18	27,46*
	1567,12	111,94	
	4641,30	4641,30	
AR	1163,00	1163,00	6,44*
	2527,84	180,56	
	3690,83		
TA	0,010	0,0049	1,11ns
	0,061	0,0044	

	0,067		
Prol.	54,25	54,25	68,23*
	11,13	0,79	
	65,38		

* Significante a 5% de probabilidade pelo teste F. ns: sem significância. MFPA: massa fresca da parte aérea (g); MSPA: massa seca da parte aérea (g); AF: área foliar (cm²); Prod.: massa média das raízes por planta (g planta⁻¹). SS: sólidos solúveis (μmol g⁻¹ MS); AR: açúcares redutores (μmol g⁻¹ MS); TA: teor de amido (mg g MS); Prol.: prolina (μmol g⁻¹ MS).

ANEXO A

1. Código para conectar no ThingSpeak

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>
#include <DHT.h>
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
// WiFi Credentials
const char* ssid = "xxxx";
const char* password = "xxxxxxx";
// ThingSpeak API
String apiKey = "xxxxxxxxxxxx";
const char* server = "http://api.thingspeak.com/update";
// Sensors
Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  WiFi.begin(ssid, password);

  Serial.print("Connecting to WiFi...");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println(" Connected!");

  mlx.begin();
  dht.begin();
}
```

```

void loop() {
    float leafTemp = mlx.readObjectTempC();
    float airTemp = dht.readTemperature();
    float humidity = dht.readHumidity();
    if (isnan(airTemp) || isnan(humidity)) {
        Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
        return;
    }
    Serial.print("Leaf Temp: "); Serial.print(leafTemp); Serial.println("°C");
    Serial.print("Air Temp: "); Serial.print(airTemp); Serial.println("°C");
    Serial.print("Humidity: "); Serial.print(humidity); Serial.println("%");

    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        HTTPClient http;
        String url = server;
        url += "?api_key=" + apiKey;
        url += "&field4=" + String(leafTemp);
        url += "&field2=" + String(airTemp);
        url += "&field3=" + String(humidity);

        http.begin(url);
        int httpResponseCode = http.GET();
        Serial.print("ThingSpeak Response: ");
        Serial.println(httpResponseCode);
        http.end();
    } else {
        Serial.println("WiFi Disconnected!");
    }
    delay(30000); // Send data every 30 seconds
}

```

2. Código para coletar dados no cartão de memória

```
#include "FS.h"
#include "SD.h"
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>
Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
#define SD_CS 5
String dataMessage;
float leaf;
float temp;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  if (!mlx.begin()) {
    Serial.println("MLX90614 initialization failed. Check wiring!");
    while (1);
  }
  Serial.println("Initializing SD card...");
  if (!SD.begin(SD_CS)) {
    Serial.println("ERROR - SD card initialization failed!");
    return;
  }
  // Check if the file exists, create if it doesn't
  if (!SD.exists("/test.txt")) {
    Serial.println("File doesn't exist. Creating file...");
    writeFile(SD, "/test.txt", "Tc, \r\n");
  } else {
    Serial.println("File already exists");
  }
}
void loop() {
  Read_TempHum();
  logSDCard();
}
```

```

    delay(5000); // Wait 3 seconds before writing the next data
}

// Function to get temperature
void Read_TempHum() {
    leaf = mlx.readObjectTempC();
    temp = mlx.readAmbientTempC();
    Serial.print("Leaf temperature = ");
    Serial.print(leaf);
    Serial.print(" °C, Ambient temperature = ");
    Serial.println(temp);
}

// Write the sensor readings on the SD card
void logSDCard() {
    dataMessage = String(leaf) + "," + String(temp) + "\r\n";
    Serial.print("Save data: ");
    Serial.println(dataMessage);
    if (!appendFile(SD, "/test.txt", dataMessage.c_str())) {
        Serial.println("Failed to save data to SD card!");
    }
}

// Write to the SD card
bool writeFile(fs::FS &fs, const char *path, const char *message) {
    Serial.printf("Writing file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if (!file) {
        Serial.println("Failed to open file for writing");
        return false;
    }
    if (file.print(message)) {
        Serial.println("File written");
    } else {
        Serial.println("Write failed");
        file.close();
    }
}

```

```

    return false;
}
file.close();
return true;
}
// Append data to the SD card
bool appendFile(fs::FS &fs, const char *path, const char *message) {
    Serial.printf("Appending to file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if (!file) {
        Serial.println("Failed to open file for appending");
        return false;
    }
    if (file.print(message)) {
        Serial.println("Message appended");
    } else {
        Serial.println("Append failed");
        file.close();
        return false;
    }
    file.close();
    return true;
}

```

3. Código para conexão via ESP-NOW

```

#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include <Arduino_JSON.h>
#include "SD.h"
#include <SPI.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include "FS.h"

```

```

// Dados da rede (STATION)
#define SD_CS 5 // Replace with your SD card chip select pin
String dataMessage;
float lf = 0.0;
float t = 0.0;
float h = 0.0;
//wifi channel for the access point
// Structure example to receive data
// Must match the sender structure
typedef struct struct_message {
    int id;
    float leaf;
    float temp;
    float hum;
    unsigned int readingId;
} struct_message;
struct_message incomingReadings;
JSONVar board;
// callback function that will be executed when data is received
void OnDataRecv(const uint8_t * mac_addr, const uint8_t *incomingData, int len) {
    // Copies the sender mac address to a string
    char macStr[18];
    Serial.print("Packet received from: ");
    snprintf(macStr, sizeof(macStr), "%02x:%02x:%02x:%02x:%02x:%02x",
             mac_addr[0], mac_addr[1], mac_addr[2], mac_addr[3], mac_addr[4],
mac_addr[5]);
    Serial.println(macStr);
    memcpy(&incomingReadings, incomingData, sizeof(incomingReadings));
    board["id"] = incomingReadings.id;
    board["leaftemp"] = incomingReadings.leaf;
    board["temperature"] = incomingReadings.temp;
    board["humidity"] = incomingReadings.hum;
    board["readingId"] = String(incomingReadings.readingId);
    String jsonString = JSON.stringify(board);

```

```

Serial.printf("Board ID %u: %u bytes\n", incomingReadings.id, len);
Serial.printf("lf value: %4.2f\n", incomingReadings.lf);
Serial.printf("t value: %4.2f\n", incomingReadings.temp);
Serial.printf("h value: %4.2f\n", incomingReadings.hum);
Serial.printf("readingID value: %d\n", incomingReadings.readingId);
Serial.println();
}

// Guardar dados no cartão de memória
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    Serial.printf("Writing file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if(!file) {
        Serial.println("Failed to open file for writing");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        Serial.println("File written");
    } else {
        Serial.println("Write failed");
    }
    file.close();
}

// Organizar os dados no cartão de memória
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    Serial.printf("Appending to file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if(!file) {
        Serial.println("Failed to open file for appending");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        Serial.println("Message appended");
    } else {
        Serial.println("Append failed");
    }
}

```

```

    }
    file.close();
}

void setup() {
    // Initialize Serial Monitor
    Serial.begin(115200);

    // Set the device as a Station and Soft Access Point simultaneously
    WiFi.mode(WIFI_AP_STA);

    //Cartão de memória
    SD.begin(SD_CS);
    if(!SD.begin(SD_CS)) {
        Serial.println("Card Mount Failed");
        return;
    }

    Serial.println("Initializing SD card...");
    if (!SD.begin(SD_CS)) {
        Serial.println("ERROR - SD card initialization failed!");
        return; // init failed
    }
    File file = SD.open("/test.txt");
    if(!file) {
        Serial.println("File doesn't exist");
        Serial.println("Creating file...");
        writeFile(SD, "/test.txt", "Leaf temperature, temperature, humidity \r\n");
    }
    else {
        Serial.println("File already exists");
    }
    file.close();

    // Inicializar o ESP-NOW

```

```

if (esp_now_init() != ESP_OK) {
    Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
    return;
}
// Once ESPNow is successfully Init, we will register for recv CB to
// get recv packer info
esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
Serial.println("SD card initialized.");
}

void logSDCard() {
    dataMessage = String(incomingReadings.id) + "," + (incomingReadings.leaf) + "," +
String(incomingReadings.temp)+ "," + String(incomingReadings.hum) + "\r\n";
    Serial.print("Save data ");
    Serial.println(dataMessage);
    appendFile(SD, "/test.txt", dataMessage.c_str());
}

void loop() {
    logSDCard();
    delay(3000);
}

```