

X'INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA
DE PÓS- GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -
AGRONOMIA

**SISTEMA INTELIGENTE DE FERTIRRIGAÇÃO SAFERT
NO CULTIVO DE TOMATE GRAPE: MANEJO HÍDRICO-
NUTRICIONAL**

Autor: Thiago Henrique de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares
Coorientador: Dr. Vitor Marques Vidal

RIO VERDE - GO
Julho – 2025

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA
DE PÓS- GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -
AGRONOMIA

**SISTEMA INTELIGENTE DE FERTIRRIGAÇÃO SAFERT
NO CULTIVO DE TOMATE GRAPE: MANEJO HÍDRICO-
NUTRICIONAL**

Autor: Thiago Henrique de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares
Coorientador: Dr. Vitor Marques Vidal

Tese apresentada como parte das
exigências para obtenção do título de
DOUTOR EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS AGRONOMIA no
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Agrárias - Agronomia do
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia Goiano –
Campus Rio Verde – Área de
Concentração em Produção Vegetal
Sustentável no Cerrado.

Rio Verde - GO
Julho – 2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

O48o Oliveira, Thiago Henrique de
SISTEMA INTELIGENTE DE FERTIRRIGAÇÃO SAFERT
NO CULTIVO DE TOMATE GRAPE: MANEJO
HÍDRICO-NUTRICIONAL / Thiago Henrique de Oliveira. Rio
Verde 2025.

59f. il.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares.
Coorientador: Prof. Dr. Vitor Marques Vidal.
Tese (Doutor) - Instituto Federal Goiano, curso de 0232014 -
Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia - Rio Verde
(Campus Rio Verde).

1. Eficiência hídrica. 2. Fertirrigação automatizada. 3. Qualidade
de frutos. 4. Sistemas IoT agrícolas. 5. Substrato de fibra de
coco. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS

NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO HENRIQUE DE OLIVEIRA**
Data: 23/08/2025 11:39:16-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Local

Data

Assinatura do autor



Documento assinado digitalmente

FREDERICO ANTONIO LOUREIRO SOARES
Data: 26/08/2025 15:37:31-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 37/2025 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

SISTEMA INTELIGENTE DE FERTIRRIGAÇÃO SAFERT NO CULTIVO DE TOMATE GRAPE: NO MANEJO HÍDRICO-NUTRICIONAL

Autor: Thiago Henrique de Oliveira

Orientador: Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares

TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia, Área de Concentração
em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 11 de julho de 2025.

Prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares (Presidente)

Prof. Dr. Vitor Marques Vidal (Avaliador interno)

Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno)

Prof^ª. Dra. Patrícia Costa Silva (Avaliadora externa)

Prof. Dr. Wilker Alves Moraes (Avaliador externo)

Prof. Dr. Antônio Evami Cavalcante Sousa (Avaliador externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Frederico Antonio Loureiro Soares, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 11/07/2025 11:27:52.
- **Wilker Alves Moraes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 11/07/2025 11:35:05.
- **Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC0001 - CCMDAGRO-R** , em 11/07/2025 11:36:57.
- **Antonio Evami Cavalcante Sousa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 11/07/2025 11:45:18.
- **PATRÍCIA COSTA SILVA, PATRÍCIA COSTA SILVA - Professor Avaliador de Banca - Ueg (01112580000171)** , em 18/07/2025 15:35:30.
- **Vitor Marques Vidal, Vitor Marques Vidal - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500)**, em 06/08/2025 10:16:35.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/07/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 723244

Código de Autenticação: 33761d88cd



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

DEDICO

A Deus,

Pela graça da vida, pela força e proteção em todos os momentos.

OFEREÇO

À minha família,

A minha esposa Maria Emília Nunes de Souza. Aos meus filhos João Alberto Nunes de Oliveira e Maria Tereza Ferreira de Souza. Aos meus pais, João Donizete de Oliveira e Maria José Ferreira Oliveira. Ao meu irmão, Matheus Timóteo de Oliveira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me fez trilhar pelos caminhos corretos, abriu portas e permitiu saúde para que mais essa etapa fosse concluída.

A minha esposa Maria Emília Nunes de Souza e meus filhos João Alberto Nunes de Oliveira e Maria Tereza Ferreira de Souza;

Aos pais João Donizete de Oliveira e Maria José Ferreira Oliveira;

A meu irmão Matheus Timóteo de Oliveira;

Ao orientador Frederico Antônio Loureiro Soares;

Ao professor Marconi Batista Teixeira;

Ao amigo Wilker Alves Moraes, Vitor Marques Vidal e Jacyr Lora;

Agradeço a todos da família e amigos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento da tese;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes); Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde.

BIOGRAFIA DO AUTOR

THIAGO HENRIQUE DE OLIVEIRA, nascido no dia 17 de maio de 1989, na cidade de Inhumas, Goiás, filho de João Donizete de Oliveira e Maria José Ferreira de Oliveira, esposo de Maria Emília Nunes de Souza e pai de João Alberto Nunes de Oliveira e Maria Tereza Ferreira de Souza,

No segundo semestre de 2007 iniciou a graduação em Engenharia Agrícola na Universidade Estadual de Goiás – Campus Anápolis, GO, finalizando em junho de 2012.

Em fevereiro de 2019, ingressou no mestrado em produção vegetal da Universidade Estadual de Goiás – Campus São Luiz Montes Belos – GO, sob orientação do Professora Dr. Alliny das Graças Amaral, concluindo em junho de 2021.

Em abril de 2022, iniciou no curso de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde - GO, sob a orientação do Professor Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares, concluindo em julho de 2025.

Em maio de 2024, iniciou como professor efetivo da Universidade Estadual de Goiás Campus Quirinópolis Goiás no curso de Agronomia.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	9
RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
1 INTRODUÇÃO GERAL	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
1 OBJETIVOS.....	16
1.1 Objetivo Geral.....	16
1.2 Objetivos Específicos	16
3 CAPÍTULO I.....	19
3.1 INTRODUÇÃO	21
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.3 RESULTADOS.....	28
3.4 DISCUSSÃO	36
3.5 CONCLUSÃO	37
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
4 CAPÍTULO II	40
4.1 INTRODUÇÃO	42
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	43
4.3 RESULTADOS.....	47
4.4 DISCUSSÃO.....	55
4.5 CONCLUSÕES.....	57
4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
5. CONCLUSÃO GERAL.....	59

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO I - IMPACTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE DE FERTIRRIGAÇÃO NO CONTROLE HÍDRICO E NUTRICIONAL DO CULTIVO DO TOMATE GRAPE

Tabela 1.	Recomendação da mistura da solução nutritiva por fase do cultivo do tomate grape	25
Tabela 2.	Médias dos teores de macronutrientes e micronutrientes nas folhas do tomate grape cultivado sob os sistemas SAFERT e Convencional em 07/06/24 e 07/10/24	28
Tabela 3.	Médias dos teores de macronutrientes e micronutrientes dos substratos do tomate grape cultivado sob os sistemas SAFERT e Convencional em 07/06/24 e 07/10/24	29
Tabela 4.	Níveis nutricionais recomendados para cultura de tomate, segundo Silva (2009)	30
Tabela 5.	Médias e desvios padrão de umidade, CE e temperatura dos substratos nos sistemas SAFERT e Convencional para o tomate grape, medidos através de sensores	32

CAPÍTULO II - QUALIDADE DOS FRUTOS DE TOMATE SOB SISTEMAS DE FERTIRRIGAÇÃO COM CONTROLE POR SENSORES E CONVENCIONAL

Tabela 1.	Recomendação da mistura da solução nutritiva por fase do cultivo do tomate grape	45
Tabela 2.	Resultados do teste de normalidade para as variáveis analisadas, indicando estatística W e valores de p para cada variável	47
Tabela 3.	Resumo da análise de variância para as variáveis L, a e b, destacando os fatores significativos ($p < 0,05$) e as respectivas interações	49
Tabela 4.	Resultados da análise de variância para as variáveis comprimento, espessura e largura dos frutos, com os fatores e interações significativos indicados	51
Tabela 5.	Análise de variância para as variáveis brix, pH e peso, com destaque para os fatores e interações significativos	53

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I - IMPACTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE DE FERTIRRIGAÇÃO NO CONTROLE HÍDRICO E NUTRICIONAL DO CULTIVO DO TOMATE GRAPE

Figura 1.	Mapa de geolocalização do município de Rio Verde - Go e identificação do local do experimento (casa de vegetação do Laboratório de Hidráulica e Irrigação)	22
Figura 2.	Variação temporal da umidade do solo e condutividade elétrica (CE) nos sistemas SAFERT (A e C) e Convencional (B e D)	34
Figura 3.	Variação temporal da temperatura do substrato nos sistemas SAFERT (A) e Convencional (B)	35

CAPÍTULO II - QUALIDADE DOS FRUTOS DE TOMATE SOB SISTEMAS DE FERTIRRIGAÇÃO COM CONTROLE POR SENSORES E CONVENCIONAL

Figura 1.	Mapa de geolocalização do município de Rio Verde - Go e identificação do local do experimento (casa de vegetação do Laboratório de Hidráulica e Irrigação)	43
Figura 2.	Diferença média das coordenadas de cor vermelho/verde (A), de frutos de tomates cultivados nos sistemas SAFERT e Convencional e teste de regressão das coordenadas vermelho/verde e amarelo/azul (B), avaliados em diferentes fases de desenvolvimento, independente do sistema	50
Figura 3.	Variação do comprimento e espessura dos frutos ao longo do tempo (A), ajuste das curvas de regressão para o comprimento dos frutos nos sistemas SAFERT e Convencional (B) e comparação das médias do comprimento dos frutos entre os sistemas SAFERT e Convencional ao longo das diferentes datas de avaliação (C)	52
Figura 4.	Variação do teor de sólidos solúveis (brix) ao longo do tempo, para os sistemas SAFERT e Convencional (A) e comparação das médias entre os sistemas SAFERT e Convencional em diferentes datas de avaliação (B)	54
Figura 5.	Variação do pH ao longo do tempo, para os sistemas SAFERT e Convencional (A) e comparação das médias entre os sistemas SAFERT e Convencional em diferentes datas de avaliação (B)	54

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo / Sigla	Significado
%	Percentual
°Brix	Grau Brix
A	Amper
B	Boro
C.O.	Carbono Orgânico
C N ⁻¹	Carbono / Nitrogênio
Ca	Cálcio
CC	Capacidade de Campo
CE	Condutividade Elétrica
cm	Centímetro
Cu	Cobre
CUD	Coefficiente de Uniformidade de Distribuição
dS m ⁻¹	DeciSiemens por Metro
Fe	Ferro
g	Grama
g kg ⁻¹	Gramas por Quilograma
g L ⁻¹	Gramas por litros
IoT	Internet das Coisas
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de Potássio
Kg	Quilograma
L	Litros
L h ⁻¹	Litros por Hora
LoRa	Long Range
MF	Massa Fresca
Mg	Magnésio
mg kg ⁻¹	Miligrama por Quilograma
Mm	Milímetro
Mn	Manganês
MS	Massa Seca
N	Nitrogênio
P	Fósforo
P	P-Value
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PWM	Pulse Width Modulation
R ²	Coefficiente de Determinação
S	Enxofre
SAFERT	Sistema Automático de Fertirrigação
V	Volts
W	Watts
W	W-Statistic
Zn	Zinco

RESUMO

OLIVEIRA, T. H. **Sistema Inteligente de Fertirrigação SAFERT no Cultivo de Tomate Grape: Impacto no Manejo Hídrico-Nutricional e na Qualidade dos Frutos**. 2025. 60p. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, Brasil).

Esta tese avaliou o desempenho de um novo método de fertirrigação, o Sistema Automatizado de Fertirrigação (SAFERT), comparando-o a um manejo convencional em duas abordagens complementares. No Capítulo I, foram investigados o controle hídrico e nutricional em tomate grape cultivado em substrato, em que o SAFERT, fundamentado em sensores de umidade e condutividade elétrica (CE) integrados a controladores lógicos via IoT, manteve condições mais estáveis de umidade, CE e temperatura e permitiu ajustes automáticos na aplicação de água e nutrientes. Esses ajustes resultaram em aumento da disponibilidade de macronutrientes (N, P, K) e micronutrientes (Fe, B e Zn) nas folhas e no substrato, sobretudo no início do ciclo (junho), sugerindo um ambiente radicular mais equilibrado para a absorção de elementos essenciais. No Capítulo II, um delineamento fatorial 2×6 foi empregado para avaliar parâmetros físico-químicos dos frutos de tomate Sweet Heaven ao longo de seis fases de desenvolvimento. O SAFERT mostrou ganho em intensidade de cor vermelha (a^*), teores de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) e estabilidade dimensional (comprimento), enquanto o manejo convencional destacou-se pela simplicidade operacional e robustez, atribuindo a ele menor demanda por infraestrutura tecnológica. Esses resultados indicam que o SAFERT é uma proposta promissora de automação em fertirrigação, ainda restrita a testes em casa de vegetação do IF Goiano, e apontam para a necessidade de validação em escala comercial antes de adoção ampla.

Palavras-chave: Eficiência hídrica; Fertirrigação automatizada; Qualidade de frutos; Sistemas IoT agrícolas; Substrato de fibra de coco.

ABSTRACT

OLIVEIRA, T. H. **Intelligent Fertigation System SAFERT in Grape Tomato Cultivation: Impact on Hydro-Nutritional Management and Fruit Quality.** 2025. 60p. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, Brasil).

This research evaluated the performance of a novel fertigation approach, the Automated Fertigation System (SAFERT), against conventional scheduling in protected tomato cultivation through two complementary studies. In Chapter I, substrate-grown grape tomatoes were monitored for moisture, electrical conductivity (EC), and temperature using IoT-enabled moisture and EC sensors linked to programmable logic controllers. SAFERT maintained more consistent substrate conditions and enabled dynamic water-nutrient adjustments, leading to increased macro- (N, P, K) and micronutrient (Fe, B, Zn) availability in leaves and root medium, especially in the early cycle (June). In Chapter II, a 2×6 factorial design assessed Sweet Heaven tomato fruits over six phenological stages, measuring color coordinates (L^* , a^* , b^*), soluble solids (°Brix), pH, and dimensions. SAFERT significantly enhanced red color intensity (a^*), °Brix levels, and fruit length stability, whereas the conventional method offered low-tech simplicity and operational reliability. These findings position SAFERT as a promising automated fertigation method, currently validated only in the IF Goiano greenhouse—and underscore the imperative of subsequent commercial-scale trials to confirm its efficacy and economic viability in real-world production systems.

Keywords: Water-use efficiency; Automated fertigation; Fruit quality; Agricultural IoT systems; Coconut coir substrate.

1 INTRODUÇÃO GERAL

O tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) mantém-se como uma das hortaliças de maior relevância socioeconômica no Brasil, com estimativa de produção nacional de 4,8 milhões de toneladas, em maio de 2025, registrando crescimento de 2,5-% em relação a 2024. O estado de Goiás figura como principal produtor, com previsão de 1,7 milhão de toneladas (36,3-% do total nacional) em 2025. A crescente demanda por frutos de alta qualidade, em termos de aparência, sabor e valor nutricional, tem impulsionado aprimoramentos nas práticas de manejo, especialmente no que tange à irrigação e à adubação, buscando maior eficiência produtiva (Goiás, 2025).

Dentre os principais padrões na avaliação da qualidade dos frutos de tomate, destacam-se os teores de sólidos solúveis totais (°Brix) e ácidos tituláveis (KASIMATIS *et al.*, 2022).

A cultura do tomate é muito exigente em água e fertilizantes e, neste contexto pode-se empregar a técnica da fertirrigação otimizando as operações de irrigação e fertilização (Silva *et al.*, 2022). A fertirrigação é uma prática consolidada no cultivo protegido de tomate, proporcionando maior eficiência na utilização de água e nutrientes, além de permitir ajustes dinâmicos, conforme a fase de desenvolvimento da planta. Essa técnica tem sido recomendada como estratégia sustentável para aumento da produtividade e da qualidade dos frutos (Embrapa, 2023).

Diferentes estratégias de manejo da fertirrigação podem impactar diretamente a qualidade dos frutos. O controle da condutividade elétrica (CE) e a composição da solução nutritiva influenciam parâmetros como coloração, pH e °Brix, além de afetarem a disponibilidade de nutrientes no substrato (Resende *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2022). Quando mal manejada, a fertirrigação pode resultar em salinização do meio de cultivo e desequilíbrios nutricionais, comprometendo o rendimento e a qualidade final.

Com o avanço da agricultura digital e da Internet das Coisas (IoT), surgiram sistemas de fertirrigação automatizada, baseado em sensores, capazes de monitorar variáveis como umidade do solo, temperatura e condutividade elétrica em tempo real. Esses sistemas, ao processarem os dados coletados, ajustam automaticamente os volumes de água e nutrientes aplicados, promovendo uma resposta mais precisa às necessidades da cultura (Bonfante *et al.*, 2019; Molin *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, o avanço das tecnologias de automação e sensoriamento remoto tem possibilitado o desenvolvimento de sistemas de fertirrigação cada vez mais

eficientes e precisos. O sistema SAFERT (software) desenvolvido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação do IF Goiano Rio Verde, surge nesse contexto como uma solução inovadora, integrando sensores de umidade, condutividade elétrica e temperatura para regular automaticamente a irrigação e a aplicação de nutrientes em cultivos como o tomateiro.

Pesquisas de diversos autores reforçam os benefícios da fertirrigação automatizada. Wamser *et al.* (2022) demonstraram que o uso de sensores Irrigás® em tomateiro cultivado em substrato melhorou o controle da CE e aumentou a eficiência na utilização dos fertilizantes. Marçal *et al.* (2020) destacam que sistemas com sensores gerais evitam tanto a sub- quanto a superfertilização, ajustando dinamicamente a oferta de insumos, conforme a necessidade das plantas.

A literatura também aponta que a automação reduz custos operacionais, promove maior sustentabilidade e minimiza impactos ambientais, ao evitar o desperdício de recursos como água e fertilizantes (Gramasco, 2021). Esses sistemas são projetados para atuar continuamente, mantendo a solução nutritiva dentro de parâmetros ideais de pH e condutividade elétrica, favorecendo o crescimento saudável da planta e a qualidade final dos frutos de tomate.

O tomate (*Solanum lycopersicum* L.) é uma cultura de elevada exigência hídrica e nutricional, demandando suprimento contínuo e balanceado de macro e micronutrientes aliado a um manejo de irrigação que evite tanto déficit quanto excesso de água, sob pena de comprometer o crescimento, a produtividade e a qualidade dos frutos. Evidências recentes indicam que ajustes integrados no manejo podem elevar a eficiência no uso de recursos: a irrigação deficitária associada à adubação orgânica alcançou desempenho semelhante ao da irrigação plena com adubação mineral em termos de rendimento e produtividade da água, reforçando que estratégias combinadas de água e nutrientes podem sustentar a produção sem perdas agrônomicas (AMANKWAA-YEBOAH *et al.*, 2023).

No cenário da agricultura 5.0, tecnologias como o SAFERT representam como proposta para um avanço fundamental. De acordo com Molin *et al.* (2020), a integração entre sensores, análise de dados e controle remoto formam a base da agricultura digital moderna, permitindo maior precisão na tomada de decisão. Bonfante *et al.* (2019) complementam que essa abordagem orientada por dados contribui para a eficiência da produção e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Sistema Automatizado de Fertirrigação (SAFERT) constitui-se como uma solução de agricultura digital que alia sensoriamento *in situ* e controle remoto para promover aplicações pontuais de água e nutrientes em cultivos protegidos. O SAFERT baseia-se na integração de sondas capacitivas de umidade do solo, eletrodos de condutividade elétrica (CE) e termistores, conectados a um controlador lógico programável (CLP). As leituras dos sensores são transmitidas por meio de redes IoT até o CLP, em que algoritmos fundamentados processam os dados e acionam válvulas solenoides para ajustar automaticamente o regime de irrigação e adubação. Essa proposta, trata-se de uma arquitetura que possibilita o monitoramento contínuo do ambiente radicular e a adoção de estratégias de fertirrigação adaptativas, sem depender de intervenções manuais ou cronogramas fixos.

A principal proposta do SAFERT foi de assegurar que as condições de umidade e CE permaneçam nas faixas ideais para o desenvolvimento saudável das raízes e a absorção equilibrada de nutrientes. Por meio dessa manutenção dinâmica, o sistema busca evitar os desequilíbrios nutricionais e os picos de estresse hídrico comuns em manejos convencionais, que utilizam programações estáticas de fertirrigação e são pouco sensíveis às variações ambientais.

Os benefícios dessa proposta incluíram maior eficiência no uso de recursos, uma vez que a aplicação de insumos ocorre somente quando a planta de fato necessita, otimização do balanço nutricional ao prevenir tanto deficiências quanto excessos, e redução do impacto ambiental decorrente de efluentes salinos e nutrientes não absorvidos (Shewangizaw *et al.*, 2024). Ao mesmo tempo, é imprescindível considerar os desafios operacionais associados: o investimento inicial em sensores de alta precisão, controladores e infraestrutura de comunicação pode representar barreira para pequenos produtores; a acurácia do sistema depende de calibrações e manutenções periódicas; e a robustez da solução requer estratégias de redundância para contornar eventuais falhas de conectividade em regiões remotas.

A escolha do tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) como cultura-modelo para a validação do SAFERT justifica-se sobretudo pela elevada relevância econômico-social e pela sensibilidade demonstrada às variações de água e nutrientes. Diferentemente de muitas hortaliças, o tomateiro apresenta respostas rápidas a ajustes de manejo, refletindo em atributos de qualidade como textura, coloração e teor de sólidos solúveis, parâmetros

fundamentais para atender às exigências do mercado e prolongar a vida de prateleira (Beckles, 2012). Em sistemas convencionais, a adoção de horários e doses pré-definidos costuma ocasionar flutuações de umidade e salinidade no substrato, comprometendo a uniformidade do desenvolvimento das plantas e a qualidade final dos frutos (Wolfert *et al.*, 2017). Desse modo, o SAFERT apresenta-se como alternativa promissora para elevar a sustentabilidade e a competitividade na horticultura protegida.

A robustez da comunicação entre sensores e controladores é fundamental para o desempenho do SAFERT. Redes de baixa potência e longa distância, como LoRaWAN, têm se destacado em aplicações agrícolas por oferecerem cobertura ampla e consumo energético reduzido, permitindo que estações de sensoriamento operem por longos períodos sem manutenção frequente de baterias (Augustin *et al.*, 2016). A adoção de tais redes IoT no SAFERT assegura transmissão confiável de dados, mesmo em áreas extensas, enquanto protocolos padrão facilitam a integração de novos módulos de sensoriamento ao sistema.

No contexto da chamada Agricultura 5.0, soluções como o SAFERT rompem com o paradigma da mera automação para incorporar análise de dados e inteligência artificial. Plataformas modernas permitem não apenas o controle reativo, mas também previsões de demanda de água e nutrientes com base em séries temporais e aprendizado de máquina, abrindo caminho para praticar a fertirrigação preditiva e antecipar estresses antes que se manifestem (Wolfert *et al.*, 2017).

O uso do SAFERT também viabiliza o acúmulo de grandes volumes de dados agrônômicos, que podem ser explorados em análises de Big Data para identificar padrões de resposta (Liakos *et al.*, 2018). Essa abordagem potencializa pesquisas correlacionando variáveis climáticas, nutricionais e de rendimento, contribuindo para o desenvolvimento de recomendações localmente calibradas e estratégias de manejo mais precisas.

Do ponto de vista econômico, o retorno sobre investimento em sistemas como o SAFERT depende do balanço entre custos iniciais e ganhos de produtividade, qualidade e redução de insumos. Modelos de negócio baseados em serviços (“Irrigation-as-a-Service”) têm se mostrado uma alternativa para viabilizar a adoção por pequenos e médios produtores, transferindo o ônus do capital inicial para fornecedores de tecnologia que faturam conforme a área cultivada monitorada (Vallejo-Gómez *et al.*, 2023).

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Avaliar comparativamente o desempenho do Sistema Automatizado de Fertirrigação (SAFERT) e de um manejo convencional de fertirrigação em tomateiro protegido, considerando aspectos de manejo hídrico-nutricional e qualidade dos frutos, a fim de verificar o potencial de automação para aumento de eficiência e sustentabilidade.

1.2 Objetivos Específicos

Comparar a uniformidade e estabilidade de umidade, condutividade elétrica e temperatura do substrato entre SAFERT e manejo convencional (Cap. I);

Quantificar teores de macronutrientes e micronutrientes nas folhas e no substrato ao longo do ciclo de cultivo em ambos os sistemas (Cap. I);

Avaliar parâmetros de cor (L^* , a^* , b^*), sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$), pH e dimensões dos frutos de tomate Sweet Heaven sob SAFERT e manejo convencional (Cap. II);

Analisar a interação entre sistema de fertirrigação e fases fenológicas na determinação das variáveis de qualidade de frutos, utilizando delineamento fatorial 2×6 (Cap. II).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANKWAA-YEBOAH, P.; AKORIKO, F. A.; AMPONSAH, W.; YEBOAH, S.; BREPONG, M. B.; KETEKU, A. K. Combining deficit irrigation and nutrient amendment enhances the water productivity of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in the tropics. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 1199386, 2023.

AUGUSTIN, A.; YI, J.; CLAUSEN, T.; TOWNSLEY, W. A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things. **Sensors**, v. 16, n. 9, art. 1466, 2016.

BECKLES, D. M. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 63, n. 1, p. 129–140, 2012.

BONFANTE, A.; BASEGGIO, M.; ALBUQUERQUE, M. P.; MARTINS, R. A decision support system for irrigation and fertigation management of vegetable crops. **Agricultural Systems**, v. 176, p. 102652, 2019.

EMBRAPA. **Sistema de cultivo protegido do tomate em substrato com reuso da solução nutritiva**. Comunicado Técnico n. 292, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2023.

GRAMASCO, G. A. P. **Fertirrigação: técnicas e práticas de manejo**. Monografia (Engenharia Agrônoma) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2021.

LIAKOS, K. G.; BUSATO, P.; MATTEULLI, C.; PASSALACQUA, A.; REGGIANI, A. Machine learning in agriculture: A review. **Sensors**, v. 18, n. 8, art. 2674, 2018.

QUEIROZ, M. P. R. et al. Ajustes dinâmicos na fertirrigação de tomateiro protegido via sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 42, n. 2, p. 123–130, 2020.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. A. **Agricultura digital: fundamentos e aplicações em fertirrigação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

RESENDE, G. M. et al. **Desempenho agrônômico e de qualidade de frutos de híbridos de tomate para processamento industrial sob irrigação subterrânea.** Embrapa, Documentos 160, 2020.

SILVA, L. S.; OLIVEIRA, R. T.; FONSECA, M. J.; FERNANDES, E. G. Qualidade de frutos de tomate cultivado sob diferentes sistemas de irrigação e qualidade de água. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 16, n. 3, p. 476–485, 2022.

VALLEJO-GÓMEZ, D.; OSORIO, M.; HINCAPIÉ, C. A. Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review. *Agronomy*, v. 13, n. 2, art. 342, 2023.

SHEWANGIZAW, B.; et al. Tomato yield and water use efficiency as affected by nitrogen rate and irrigation regime in the central lowlands of Ethiopia. *Scientific Reports*, v. 14, art. 13307, 2024.

WAMSER, A. F. et al. Manejo autônomo da fertirrigação do tomate grape cultivado em substrato utilizando sensores Irrigás®. *Irriga*, v. 27, n. 3, p. 452–464, 2022.

WOLFERT, S.; GE, L.; VERDOUW, C.; BOGAARDT, M.-J. Big Data in Smart Farming – a review. *Agricultural Systems*, v. 153, p. 69–80, 2017.

3 CAPÍTULO I

IMPACTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE DE FERTIRRIGAÇÃO NO CONTROLE HÍDRICO E NUTRICIONAL DO CULTIVO DO TOMATE GRAPE

Resumo: Este trabalho comparou um Sistema Automatizado de Fertirrigação (SAFERT) a um manejo convencional em cultivo protegido de tomate grape. Em ambas as condições, foram avaliados parâmetros de umidade, condutividade elétrica e concentração de macronutrientes e micronutrientes em folhas e substrato, ao longo de um ciclo produtivo. O SAFERT, baseado em sensores de umidade e condutividade elétrica e controladores lógicos programáveis, demonstrou comportamento mais uniforme na manutenção das condições do meio de cultivo, enquanto o sistema convencional seguiu um cronograma fixo de aplicações. Ambos os modelos mantiveram os níveis nutricionais nas faixas adequadas à cultura, porém o SAFERT permitiu ajustes dinâmicos e monitoramento contínuo, ao passo que o manejo convencional exigiu programação estática e maior intervenção manual. Os resultados indicam que a automação pode oferecer maior previsibilidade e eficiência no uso de água e fertilizantes, ao custo de infraestrutura tecnológica e calibrações periódicas, enquanto a abordagem convencional permanece viável para operações com menor disponibilidade de recursos tecnológicos.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão, Sensores Inteligentes, Manejo Hídrico, Manejo Nutricional, Sustentabilidade Agrícola.

IMPACT OF AN INTELLIGENT FERTIGATION SYSTEM ON WATER AND NUTRITIONAL CONTROL IN GRAPE TOMATO CULTIVATION

Abstract: This study evaluated an Automated Fertigation System (SAFERT) against a conventional scheduling approach in protected tomato grape cultivation. Both systems were assessed for substrate moisture, electrical conductivity, and macro- and micronutrient levels in leaves and growing medium throughout a production cycle. SAFERT, which employs moisture and electrical conductivity sensors coupled with programmable logic controllers, exhibited more consistent environmental control, whereas the conventional system followed a fixed application timetable. Nutrient concentrations in both setups remained within recommended ranges; however, SAFERT enabled dynamic adjustments and real-time monitoring, while the conventional method relied on static programming and manual interventions. Findings suggest that automation enhances predictability and resource-use efficiency, particularly water and fertilizer—albeit requiring investment in technology and regular calibrations. Conversely, conventional management remains a practical option for producers with limited access to advanced technological infrastructure.

Keywords: Precision Agriculture, Smart Sensors, Water Management, Nutrient Management, Agricultural Sustainability.

3.1 INTRODUÇÃO

O tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) mantém-se como uma das principais culturas da agricultura brasileira, tanto pela quantidade produzida quanto pelo impacto econômico ao longo de toda a cadeia produtiva. De acordo com a Embrapa (2023), o cultivo protegido de tomate emprega práticas de manejo avançadas que asseguram elevados rendimentos e frutos de alta qualidade, fatores essenciais para a competitividade no mercado interno e nas exportações. Para 2025, as estimativas de safra do IBGE projetam uma colheita de aproximadamente 4,7 milhões de toneladas de tomate em 60.000 hectares (IBGE, 2025). Esses números reafirmam a relevância estratégica do tomate para a economia nacional e evidenciam a necessidade de inovações que garantam maior eficiência e sustentabilidade no manejo hídrico e nutricional.

A gestão da água constitui um dos maiores desafios ao cultivo do tomate, pois tanto a escassez quanto o excesso de irrigação podem comprometer o rendimento e as características sensoriais dos frutos. Shewangizaw *et al.* (2024) demonstraram que diferentes regimes de irrigação e níveis de adubação nitrogenada influenciam significativamente a produtividade e a eficiência no uso da água, indicando a importância de estratégias dinâmicas de manejo para minimizar desperdícios.

Para auxiliar no manejo agrônômico de diversas culturas, as tecnologias digitais e a Internet das Coisas (IoT) têm ampliado as fronteiras. Wolfert *et al.* (2017) salientam que o emprego de Big Data e algoritmos de aprendizado de máquina permite prever com maior precisão as necessidades hídricas e nutricionais das plantas, viabilizando práticas de fertirrigação preditiva e reduzindo oscilações no substrato. Complementarmente, Wamser *et al.* (2022) relataram que a incorporação de sensores em tempo real estabiliza a condutividade elétrica e o pH da solução nutritiva em tomate grape, conferindo uniformidade ao aporte de nutrientes e favorecendo o desenvolvimento radicular.

A fertirrigação, quando corretamente manejada, possibilita a aplicação segmentada de macronutrientes e micronutrientes, mas depende de monitoramento contínuo das variáveis do sistema para evitar salinização e deficiências. Essas exigências realçam a necessidade de soluções de automação que integrem coleta de dados de solo, processamento em nuvem e atuação remota em tempo real.

Em face dessas demandas, propõe-se o desenvolvimento de um Sistema Automatizado de Fertirrigação (SAFERT), que reúne sondas de umidade e condutividade elétrica, controladores lógicos programáveis e rede IoT conectada a plataformas de

análise de dados. O SAFERT visa otimizar o uso de água e fertilizantes, reduzir custos operacionais e aprimorar a sustentabilidade dos sistemas de produção sob estufa, mantendo elevados padrões de qualidade dos frutos de tomate grape. Portanto, objetivou-se comparar o SAFERT com o manejo convencional de fertirrigação, buscando verificar se ocorreu ganhos em eficiência hídrica, estabilidade do substrato e consistência na oferta nutricional, alinhando-se aos princípios da Agricultura 5.0.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação convencional localizada nas dependências do Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde – GO, localizada na região sudoeste do estado de Goiás, com altitude média de 720 m ao nível do mar (Figura 1). O clima da região é classificado conforme Köppen e Geiger (1928) e Alvares *et al.* (2013), como Aw (tropical), com chuva nos meses de outubro a maio e, com seca nos meses de junho a setembro. As precipitações variam de 1.500 a 1.800 mm anuais. Foram analisados o sistema SAFERT e o sistema Convencional de fertirrigação sob automação.

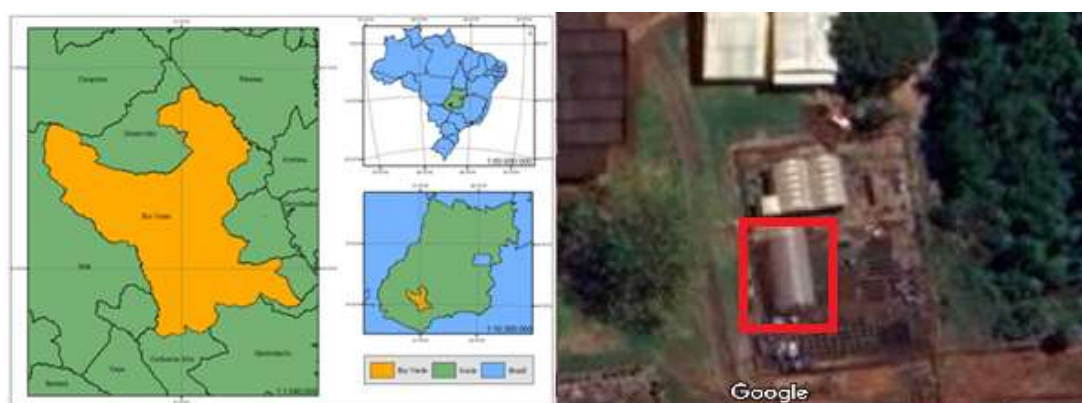


Figura 1. Mapa de geolocalização do município de Rio Verde - GO e identificação do local do experimento (casa de vegetação do Laboratório de Hidráulica e Irrigação).

Fonte: Autor (2025)

Cada sistema foi composto por duas linhas de gotejamento, sendo que cada linha continha 20 vasos de 10 litros, totalizando 40 vasos por sistema. Os gotejadores empregados forma do tipo autocompensantes, com espaçamento de 0,35 metros (m), vazão de 4 litros por hora (L h⁻¹) e para cada vaso utilizou-se dois gotejadores. Os vasos

foram preenchidos com fibra de coco triturada como substrato, por causa das propriedades de alta retenção de umidade e boa aeração, além de ser um material inerte e de fácil manejo. Os vasos foram organizados com espaçamento de 0,5 m entre plantas e 1 m entre linhas. A variedade de tomate grape utilizada foi a *Sweet Heaven*, conhecida pela alta produtividade e qualidade de frutos.

O *Sweet Heaven* é um tomate tipo grape, com tamanho menor e mais alongado que o tipo cereja, com sabor adocicado e alto teor de açúcar, podendo chegar a 9-12° Brix, possui rusticidade e alta tolerância a rachaduras dos frutos. Essa variedade de tomate grape destaca-se pela adaptação a diferentes ambientes e níveis de tecnologia, com colheita prolongada e alta qualidade (ALMEIDA *et al.*, 2020).

O sistema Convencional consistiu em um controlador que acionava a irrigação a fertirrigação em tempos programados, sendo assim, a programação consistiu na recomendação do fornecedor de fertilizante, sendo, 6 acionamentos por dia (7, 9, 11, 13, 15 e 17 horas) com tempo de 5 minutos cada, uma vez que, todos os dias foram realizadas fertirrigações, exceto na quinta-feira e domingo que era acionada a irrigação, como forma de remover os sais do sistema de fertirrigação, de acordo com fornecedora de fertilizante Plantpar. Utilizou-se sensores de solo no sistema convencional para monitorar os dados de umidade, condutividade elétrica (CE) e temperatura.

O sistema proposto o Sistema Automatizado de Fertirrigação (SAFERT) foi equipado por uma estação de sensor, incluindo um painel solar de 20 W de silício policristalino com tensão máxima de 17,56 V, corrente máxima de 1,14 A, e dimensões de 500 x 350 x 25 mm. O sistema incluiu um controlador de carga solar PWM de 10 A, configurado para gerenciar a carga e descarga em sistemas de 12 V ou 24 V, com tensão de flutuação padrão ajustável de 13,7 V e recarga de 13 V.

A placa CPB Mini 32, equipada com ESP32 e adaptador LoRa, foi utilizada no projeto SAFERT para comunicação de longa distância em sistemas IoT. Com um software instalado, a placa coleta dados de CE, umidade do solo e temperatura utilizando um sensor resistivo multifuncional, confirmando as medições dos parâmetros do solo. Os dados foram enviados no intervalo de 5 minutos, para a nuvem, sendo armazenados e monitorados através do InfluxDB Cloud. O receptor, que também possuiu um ESP32 e relês, utilizando essas informações para ligar e desligar a bomba de fertirrigação ou irrigação, garantindo o controle automatizado.

Cada sistema testado foi constituído de duas bombas, sendo, uma bomba para fertirrigação (solução nutritiva em caixa de 1000 L) e uma bomba para irrigação (somente

água). No sistema SAFERT, as bombas eram ativadas de acordo com o nível mínimo de umidade (28%) e condutividade elétrica dependia de cada fase fenológica), sendo (1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; e 2,4 dS m⁻¹ nas fases respectivas de 1, 2, 3, 4, 5 e 6) de acordo com a fornecedora dos fertilizantes.

Realizaram três testes de uniformidade de irrigação, conduzidos no início, meio e final do experimento. O método utilizado foi o proposto por Keller e Karmeli (1974), que consiste na coleta da vazão dos gotejadores em posições específicas ao longo da linha gotejadora (1/4, 2/4, 3/4 e 4/4), considerando duas linhas de gotejamento para cada sistema. Durante as análises, manteve-se a pressão de serviço em 1 bar para ambos os sistemas. As vazões dos gotejadores foram coletadas durante um período de 1 minuto. Posteriormente, foi calculado o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) para os dois sistemas (94%), permitindo avaliar a eficiência da uniformidade de aplicação de água (EA).

A calibração dos sensores utilizados no experimento foi realizada em duas etapas: 1º) compreendeu a calibração dos sensores de CE, pH e temperatura, e a 2ª) a calibração do sensor de umidade do solo. Na primeira etapa, foi utilizado o método de comparação com soluções padrão para calibração dos parâmetros de CE, pH e temperatura. Para a CE, foram utilizadas soluções com valores conhecidos e as medições obtidas pelo sensor foram ajustadas com base na equação de calibração linear gerada ($y = 1,704x + 0,0731$). As soluções padrão tinham (CE = 6,28; 145,6; e 1413 dS m⁻¹), (pH = 4, 5, 7 e 10).

O pH foi ajustado utilizando a equação de calibração $y = 1,1576x + 0,0923$, enquanto os dados de temperatura foram ajustados pela equação $y = -2,7530x + 1,8726$. Esses ajustes garantiram que os valores registrados pelo sensor fossem consistentes com os valores reais das soluções padrão, minimizando possíveis erros de leitura. As misturas das soluções nutritivas foram realizadas de acordo com a condutividade elétrica da própria solução nutritiva de acordo com o estágio de desenvolvimento do tomate e seguiu-se as recomendações da Empresa Plantpar (Tabela 1).

Tabela 1. Recomendação da mistura da solução nutritiva por fase do cultivo do tomate grape

Penca	(Dias)	Fertilizantes (gramas)						
		Arrank	Equilibre	Bomber	Nitrato de Cálcio	Calcio 18	UltrabBAC	Plantamino
0	0 - 10	1,0	0	0	0	0,3	0,5	0
1	10 - 15	0,5	0,5	0	0	0,5	0	0,5
1 - 3	15 - 35	0,5	1,0	0	1,0	0	0	0,5
3 - 5	35 - 65	0	0,7	1,0	0	1	0	0,75
5 - 7	65 - 80	0	2,5	0	0	1,5	0	1,0
7 - 10	80 - 110	0	2,0	1,0	2,0	0	0	2,0
> 10	> 110	0	0	3,5	1,0	2,0	0	2,0

Penca = cacho ou grupo de frutos de tomate que crescem juntos em um ramo da planta;

Na segunda etapa, a calibração do sensor de umidade foi realizada pelo método da estufa (Teixeira *et al.* 2017), em que o substrato foi elevado até a capacidade de campo e pesado antes e após o processo de secagem de 48 horas na temperatura de 60° para determinar a umidade gravimétrica e posteriormente a capacidade de campo (CC). A CC resultou em 45,25% de umidade no sensor. A umidade ideal para o experimento foi definida como 70% a 80% da CC, dessa forma, o algoritmo foi definido para irrigar quando o sensor acusar abaixo de 70% da CC. O sistema realizava aplicação por 1 minuto e caso necessitasse de mais aplicação, repetia a aplicação de 1 min até que a umidade mantivesse adequada. Quanto a umidade era extrapolada o sistema ficava desligado até que a umidade ficasse abaixo de 70% da CC, o sistema manteve-se ligado 24 horas por dia.

A variedade de tomate grape utilizada foi a *Sweet Heaven*, conhecida pela alta produtividade e qualidade de frutos. A solução nutritiva foi preparada manualmente, de acordo com as necessidades específicas das plantas em cada fase do ciclo de cultivo. A solução nutritiva foi preparada manualmente, de acordo com as necessidades específicas da cultura para cada fase do ciclo. A Tabela 1 apresenta as doses recomendadas e utilizadas de fertilizantes para cada fase do desenvolvimento do tomate grape, desde o transplante até o final da colheita. A CE foi ajustada, conforme as recomendações dos fornecedores, assegurando um suprimento balanceado de nutrientes. Cada valor representa a massa em gramas (g) do fertilizante para uma planta por dia.

Os fertilizantes listados anteriormente, incluem produtos com características distintas, como o Bomber, que se destaca pela alta concentração de Potássio (36%) e uma formulação balanceada de Nitrogênio (6%) e Fósforo (8%). Ele também fornece pequenas

quantidades de micronutrientes, como Ferro (0,038%) e Manganês (0,035%), sendo uma opção interessante para culturas com alta demanda de Potássio, como frutíferas e hortaliças.

Por outro lado, o Equilibre apresenta uma composição equilibrada de macronutrientes, com 18% de Nitrogênio, Fósforo e Potássio. Além disso, possui maior concentração de Ferro solúvel (0,12%) em comparação com outros fertilizantes da lista, tornando-se uma escolha versátil para diversas culturas.

Outro produto importante é o Cálcio 18, que possui 13% de Cálcio na formulação. Este fertilizante é ideal para corrigir deficiências de Cálcio no solo, mas não fornece outros nutrientes essenciais, como Nitrogênio, Fósforo ou Potássio, o que limita a aplicação a situações específicas.

O Arrank, por sua vez, é notável pelo alto teor de Fósforo (50%), acompanhado de concentrações moderadas de Nitrogênio (8%) e Potássio (8%). Este fertilizante é especialmente indicado para o desenvolvimento inicial das plantas, promovendo o crescimento radicular e a formação de flores e frutos.

O Plantamino é apresentado em duas formas: na composição percentual e em gramas por litro (g L^{-1}), que destacam a flexibilidade de aplicação. Com Nitrogênio (2%), Fósforo (13%) e Potássio (2%), este fertilizante é boa fonte de nutrientes balanceados e apresenta pequenas quantidades de micronutrientes solúveis, como Ferro (0,02%) e Manganês (0,01%).

Por fim, o UltraCAB é especializado em fornecer Cálcio (27,5%) e Boro (1,3%), sendo indispensável em situações em que há deficiências desses elementos no solo. Ele não contém Nitrogênio, Fósforo ou Potássio, restringindo sua aplicação a demandas específicas.

O experimento foi delineado para comparar a eficiência dos sistemas de fertirrigação SAFERT e Convencional em termos de retenção de nutrientes no substrato, estabilidade dos parâmetros do substrato (umidade, CE e temperatura) e qualidade nutricional dos frutos de tomate grape.

Foram avaliadas variáveis nutricionais das folhas e do substrato, além de variáveis físicas do substrato (umidade, temperatura e CE). As amostragens foram feitas em duas fases distintas: no início da fase produtiva (junho) e ao final dessa fase (outubro), comparando-se dois sistemas de cultivo do tomate grape, denominados SAFERT e Convencional.

Para realizar a análise dos diferentes componentes do sistema, foram empregadas metodologias distintas para as folhas de tomate e para o substrato. A análise química foliar foi conduzida segundo o método descrito por Silva (2009), no Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes. Foram coletadas folhas de tomate no estágio de maturação do primeiro fruto. As amostras foram analisadas para determinar os teores de macronutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) e micronutrientes dentre eles ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn) e boro (B). A interpretação dos resultados baseou-se nos níveis adequados para a cultura do tomate, conforme o mesmo manual e os dados foram comparados com os limites estabelecidos para cada elemento.

Para o substrato, foi realizada a análise do extrato de saturação, seguindo os procedimentos recomendados para compostagem. Foram avaliados os níveis dos mesmos macronutrientes e micronutrientes analisados nas folhas e citados anteriormente, além de parâmetros como umidade, carbono orgânico (C.O.), relação C.N⁻¹ e pH. A amostragem foi enviada ao laboratório SoloTech Cerrado, para extração dos resultados. Esses valores serviram para ajustar as condições de fertilidade e manejo do substrato no experimento e analisar as diferenças entre os sistemas. Ainda, analisou-se a massa fresca e seca das folhas (MF e MS). Também foram analisadas as variáveis do solo (umidade, temperatura e CE).

Devido ao número pequeno de amostras (apenas duas observações por grupo) e à ausência de distribuição normal dos dados (dados que não seguem o padrão estatístico convencional), foram utilizados testes estatísticos específicos para esses casos (não paramétricos). Para verificar diferenças entre esses sistemas, utilizou-se o teste de Mann-Whitney, que compara as medianas entre dois grupos independentes. Já o teste de Wilcoxon foi aplicado para comparar as avaliações feitas nas duas fases (junho e outubro) dentro de cada sistema. Esses testes foram escolhidos por serem apropriados e mais robustos quando os dados são poucos ou não têm comportamento estatístico convencional. Ressalta-se que a análise estatística dos dados foi realizada utilizando o software R Studio (R Core Team, 2022) para os testes estatísticos, e o software Microsoft Excel para a elaboração dos gráficos.

3.3 RESULTADOS

De acordo com as análises laboratoriais realizadas nas folhas e substratos, e considerando as análises estatísticas, o sistema SAFERT apresentou maior teor de nutrientes essenciais nas folhas das plantas e maior disponibilidade destes nutrientes no substrato em relação ao sistema de fertirrigação Convencional no mês de junho. Esse resultado sugere condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas de tomate grape nesse período. Os valores médios dos teores dos macronutrientes e micronutrientes avaliados nas folhas e substrato encontram-se nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Médias dos teores de macronutrientes e micronutrientes nas folhas do tomate grape cultivado sob os sistemas SAFERT e Convencional sob duas épocas de avaliação (julho e outubro de 2024).

Nutriente	SAFERT	Convencional	SAFERT	Convencional
	Junho de 2024		Outubro de 2024	
Nitrogênio (N)	52,40	45,29	39,13	32,45
Fósforo (P)	13,12	11,29	3,87	3,74
Potássio (K)	44,63	45,13	46,13	28,75
Cálcio (Ca)	29,10	33,62	25,38	28,31
Magnésio (Mg)	6,76	7,09	4,24	3,82
Sulfato (S)	9,87	13,14	8,17	7,77
Ferro (Fe)	597,88	415,40	1892,03	2039,75
Manganês (Mn)	43,75	28,30	225,60	202,15
Cobre (Cu)	8,28	6,98	12,43	11,50
Zinco (Zn)	63,05	59,93	45,08	31,23
Boro (B)	311,39	214,01	140,98	131,00

Macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S = g kg⁻¹; Micronutrientes Fe, Mn, Cu, Zn e B = mg kg⁻¹

Tabela 3. Médias dos teores de macronutrientes e micronutrientes dos substratos do tomate grape cultivado sob os sistemas SAFERT e Convencional sob duas épocas de avaliação (julho e outubro de 2024).

Nutriente	SAFERT	Convencional	SAFERT	Convencional
	Junho de 2024		Outubro de 2024	
Nitrogênio (N)	5,7	6,2	4,60	5,15
Fósforo (P)	12,4	6,7	9,71	9,34
Potássio (K)	12,4	5,1	10,75	6,70
Cálcio (Ca)	10,6	12,3	10,81	12,04
Magnésio (Mg)	2,8	3,5	3,30	2,95
Sulfato (S)	0,5	0,5	0,56	0,54
Ferro (Fe)	318,75	422,55	335,51	471,73
Manganês (Mn)	7,70	6,90	9,77	9,19
Cobre (Cu)	5,50	8,60	8,25	8,57
Zinco (Zn)	35,00	50,35	25,01	26,25
Boro (B)	27,50	16,55	17,35	10,13

Macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S = g kg⁻¹; Micronutrientes Fe, Mn, Cu, Zn e B = mg kg⁻¹

De acordo com as análises laboratoriais das folhas e substratos das plantas de tomate grape, os níveis dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) encontraram-se, em geral, nas faixas recomendadas por Silva (2009) no início da fase produtiva (junho) (Tabela 4). Contudo, observou-se que os micronutrientes Fe e B apresentaram concentrações acima dos valores considerados adequados nas folhas, em comparação às faixas apresentadas na mesma tabela. Esses resultados sugerem possível necessidade de revisão e ajuste da composição da solução nutritiva utilizada, especialmente no tocante ao equilíbrio dos micronutrientes, para evitar possíveis efeitos negativos decorrentes do excesso desses elementos e favorecer melhores resultados no desenvolvimento das plantas e na produtividade da cultura.

Tabela 4. Níveis nutricionais recomendados para cultura de tomate, segundo Silva (2009).

Nutriente	Unidade	Faixa recomendada
Nitrogênio (N)	g kg ⁻¹	40 - 60
Fósforo (P)	g kg ⁻¹	4 - 8
Potássio (K)	g kg ⁻¹	30 - 50
Cálcio (Ca)	g kg ⁻¹	14 - 40
Magnésio (Mg)	g kg ⁻¹	4 - 8
Enxofre (S)	g kg ⁻¹	3 - 10
Ferro (Fe)	mg kg ⁻¹	100 - 300
Cobre (Cu)	mg kg ⁻¹	5 - 15
Manganês (Mn)	mg kg ⁻¹	50 - 250
Zinco (Zn)	mg kg ⁻¹	30 - 100
Boro (B)	mg kg ⁻¹	30 - 100

Fonte: Adaptado de Silva (2009) - Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes.

O N, um dos macronutrientes mais relevantes para o crescimento e metabolismo vegetal, apresentou a média de 52,4 g kg⁻¹ nas folhas sob o sistema SAFERT, enquanto no sistema Convencional foi observado valor inferior de 45,25 g kg⁻¹. Já na análise laboratorial dos substratos, a retenção deste nutriente foi semelhante entre os sistemas, com médias de 6,5 g kg⁻¹ e 6,15 g kg⁻¹ (gramas de N por kg do substrato), respectivamente.

O P é considerado elemento fundamental para a fotossíntese e o desenvolvimento das raízes, apresentou maior concentração no substrato do sistema SAFERT (12,4 g kg⁻¹), praticamente o dobro do observado no sistema Convencional (6,7 g kg⁻¹). Nas folhas, a média também foi superior no SAFERT (13,1 g kg⁻¹) em relação ao Convencional (11,3 g kg⁻¹), evidenciando maior quantidade disponível desse nutriente.

Quanto K, que atua diretamente na regulação hídrica e na síntese de proteínas, os resultados nas folhas foram similares entre os sistemas, com valores médios de 44,6 g kg⁻¹ no SAFERT e 45 g kg⁻¹ no Convencional. No entanto, no substrato, o SAFERT apresentou média de 12,35 g kg⁻¹, sendo maior que apenas 5,1 g kg⁻¹ no sistema Convencional.

O Ca, apresentou maior concentração nas folhas no sistema Convencional (34,5 g kg⁻¹) em comparação ao SAFERT (29,1 g kg⁻¹). No entanto, no substrato, o SAFERT manteve uma retenção ligeiramente superior (3,4 g kg⁻¹ contra 2,9 g kg⁻¹). Esse resultado

sugere que o sistema SAFERT pode estar retendo mais cálcio no substrato, reduzindo a disponibilidade para as plantas, o que explicaria os teores mais baixos observados nas folhas.

Já o Mg, componente central da clorofila, mostrou valores similares em ambos os sistemas, tanto nas folhas (6,8 g kg⁻¹ no SAFERT e 7,1 g kg⁻¹ no Convencional) quanto nos substratos (2,2 g kg⁻¹ e 2,0 g kg⁻¹, respectivamente).

Para o S, foi observada maior concentração nas folhas do sistema Convencional (13,3 g kg⁻¹) em comparação ao SAFERT (9,9 g kg⁻¹). Nos substratos, os valores foram próximos, com médias de 1,9 g kg⁻¹ no SAFERT e 1,7 g kg⁻¹ no Convencional.

Entre os micronutrientes, o Fe destacou-se com uma concentração significativamente maior nas folhas do sistema SAFERT (595,8 mg kg⁻¹) em relação ao Convencional (416,6 mg kg⁻¹). Nos substratos, o SAFERT também apresentou retenção superior, com 45 mg kg⁻¹ contra 30,2 mg kg⁻¹ no Convencional. O Mn seguiu tendência semelhante, com médias de 43,5 mg kg⁻¹ nas folhas e 12,5 mg kg⁻¹ nos substratos sob o SAFERT, em comparação com 28,9 mg kg⁻¹ e 9,3 mg kg⁻¹, respectivamente, no sistema Convencional.

O Cu apresentou valores discretamente superiores no SAFERT, tanto nas folhas (8,4 mg kg⁻¹ contra 7,1 mg kg⁻¹) quanto nos substratos (0,9 mg kg⁻¹ contra 0,6 mg kg⁻¹). Já o Zn, o sistema SAFERT manteve uma concentração ligeiramente maior nas folhas (63,4 mg kg⁻¹) e no substrato (3,4 mg kg⁻¹) em comparação ao sistema Convencional, com 60,3 mg kg⁻¹ e 2,8 mg kg⁻¹, respectivamente. O B, fundamental para o crescimento e reprodução das plantas, apresentou médias substancialmente superiores no SAFERT, com 312,6 mg kg⁻¹ nas folhas e 0,7 mg kg⁻¹ nos substratos, enquanto o Convencional apresentou 214 mg kg⁻¹ e 0,5 mg kg⁻¹, respectivamente.

A análise nutricional das folhas do tomate Sweet Grape nos sistemas SAFERT e Convencional revelou que os teores de N e K estiveram nas faixas recomendadas para a cultura, conforme descrito por Campagnol *et al.* (2017). No entanto, o P apresentou queda em outubro, aproximando-se do limite inferior. O Ca e o Mg mantiveram-se adequados, enquanto o S esteve acima dos níveis recomendados. Entre os micronutrientes, o Fe superou os valores ideais, sugerindo risco de toxicidade, e o B esteve elevado, exigindo monitoramento (Agrolink, 2025).

No substrato, os teores de P e K foram superiores no sistema SAFERT, o que pode indicar menor eficiência na absorção pelas plantas. O N manteve-se nos padrões, enquanto o S permaneceu abaixo do ideal, podendo impactar o crescimento (Campagnol

et al., 2017). Quanto aos micronutrientes, os teores de Fe, Mn e Cu estiveram adequados, mas o B foi superior ao recomendado, o que pode comprometer o desenvolvimento da cultura (Agrolink, 2025).

O sistema SAFERT apresentou um desempenho diferenciado na gestão de umidade e CE no cultivo do tomate grape, demonstrando maior estabilidade e valores médios superiores em comparação ao sistema Convencional (Tabela 2 e Figura 1).

Tabela 5. Médias e desvios padrão de umidade, CE e temperatura dos substratos nos sistemas SAFERT e Convencional para o tomate grape, medidos através de sensores.

Variável	SAFERT (Média ± DP)	Convencional (Média ± DP)
Umidade (%)	29 ± 0,01	36 ± 0,02
Condutividade Elétrica (dS/m)	0,69 ± 0,01	0,35 ± 0,02
Temperatura (°C)	26,34 ± 0,01	18,20 ± 0,09

O sistema SAFERT foi projetado com o objetivo de otimizar variáveis ambientais críticas para o cultivo do tomate Sweet Grape, como umidade do substrato, CE e temperatura. Em relação à umidade, o SAFERT apresentou valor médio de 29%, ligeiramente abaixo da faixa considerada ideal para a cultura (70–80% da capacidade de campo), que corresponde aproximadamente a 32%–36%. Já o sistema Convencional manteve média de 36%, coincidente com o limite superior da faixa recomendada.

A menor umidade observada no SAFERT pode ter sido resultado de ajustes automatizados mais conservadores do sistema ou de uma estratégia de manejo voltada à redução de umidade para evitar excessos. Por outro lado, a umidade mais elevada no sistema Convencional pode estar associada a lixiviações menos controladas ou ao uso contínuo de lâminas fixas de irrigação, sem monitoramento automatizado. Ainda assim, ambos os sistemas operaram próximos ou na faixa considerada adequada, sem prejuízo evidente à disponibilidade de água para as plantas.

A CE do substrato foi superior no sistema SAFERT (0,69 dS m⁻¹) em comparação ao Convencional (0,35 dS m⁻¹), refletindo maior retenção de nutrientes no meio de cultivo. Embora o valor registrado esteja abaixo das faixas recomendadas para as diferentes fases fenológicas do tomateiro (variando de 1,4 a 2,4 dS m⁻¹, conforme a fase do desenvolvimento da planta), o controle automatizado proporcionado pelo SAFERT pode ter atuado de forma conservadora, ajustando a aplicação de nutrientes com base em sensores de umidade e CE para evitar acúmulos indesejados.

A menor CE observada no sistema Convencional, por outro lado, pode ter sido consequência de lixiviações mais intensas e não controladas, favorecendo a perda de sais do substrato. Apesar dos baixos valores de CE em ambos os sistemas, a automação do SAFERT garante monitoramento contínuo, permitindo realizar ajustes na solução nutritiva ao longo do ciclo produtivo para atender as necessidades específicas de cada fase fenológica, evitando deficiências nutricionais ou riscos de salinização.

A temperatura do substrato no sistema SAFERT foi, em média, de 26,34°C, superior ao sistema Convencional, que apresentou 18,20°C. Essa diferença pode estar relacionada ao manejo hídrico adotado e à menor umidade observada no SAFERT, o que pode ter contribuído para maior retenção de calor no substrato. Embora os valores estejam acima do registrado no sistema convencional, não foram observados indícios visuais de estresse térmico nas plantas durante o período avaliado. Ressalta-se que o objetivo do sistema era testar um modelo automatizado de fertirrigação, e os parâmetros utilizados seguiram as condições operacionais propostas no experimento.

A Figura 2 mostra a variação temporal da umidade e da CE nos substratos dos sistemas SAFERT (gráficos A e C) e Convencional (gráficos B e D). Apesar de a média de umidade no SAFERT ter sido menor (29%), nota-se menor oscilação ao longo do tempo, indicando maior estabilidade no controle hídrico automatizado. No sistema Convencional, embora a umidade média tenha sido superior (36%), observa-se maior variação, possivelmente pela aplicação manual da irrigação. Essa diferença sugere que o SAFERT contribuiu para um controle mais uniforme da umidade, mesmo operando com valores próximos ao limite inferior da faixa recomendada.

Em relação à condutividade elétrica, os gráficos revelam picos acentuados no SAFERT, especialmente nas fases intermediárias do cultivo, indicando acúmulo momentâneo de sais no substrato. Essa variação pode estar relacionada à calibração das curvas de fertirrigação ou à frequência de drenagens. A ausência de uniformização total da umidade, em parte, pode ter comprometido a diluição e lixiviação dos sais, justificando os valores mais elevados de CE. Ainda que a CE registrada ($0,69 \text{ dS m}^{-1}$) esteja abaixo das recomendações máximas para a fase avaliada, a interpretação desse parâmetro requer atenção, pois está diretamente relacionada à disponibilidade de nutrientes e ao risco de salinização. Recomenda-se revisão das curvas de manejo da solução nutritiva, para melhor adequação à dinâmica da cultura.

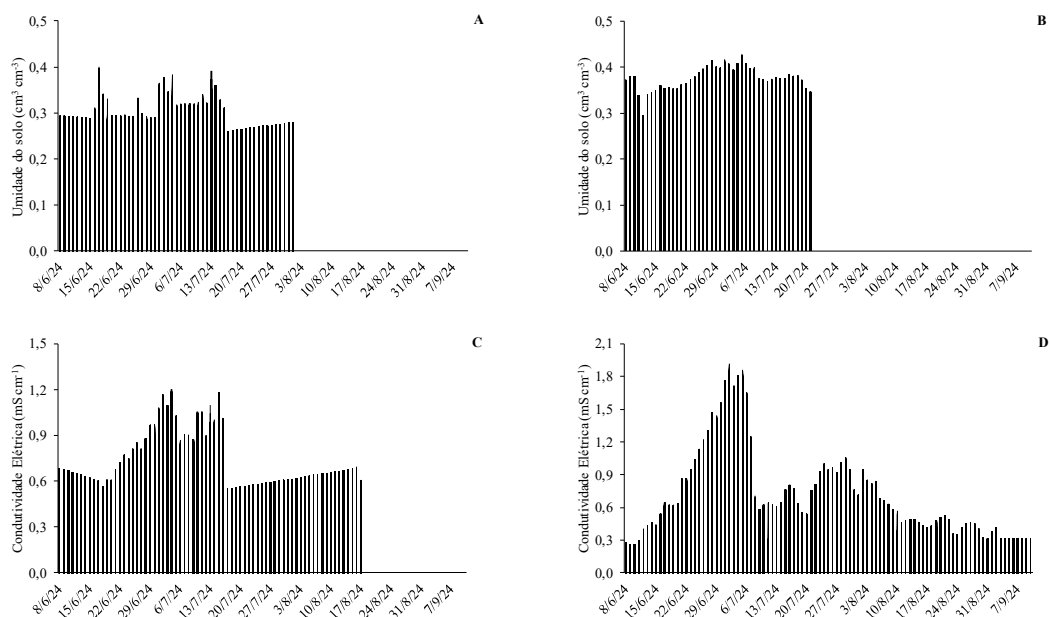


Figura 2. Variação temporal da umidade do solo e condutividade elétrica (CE) nos sistemas SAFERT (A e C) e Convencional (B e D).

A média de umidade no SAFERT foi de $29 \pm 0,01\%$, enquanto no sistema Convencional foi de $36 \pm 0,02\%$. Embora o valor do SAFERT esteja levemente abaixo da faixa ideal (32–36%), observou-se menor variação ao longo do tempo, sugerindo maior controle hídrico pontual. No entanto, os dados da Tabela 3 revelam que esse controle não foi suficiente para garantir uniformidade total da umidade entre os períodos avaliados, especialmente no substrato, em que ocorreram oscilações expressivas. Isso indica que, embora o SAFERT tenha respondido aos parâmetros programados, ajustes adicionais nos sensores ou nas curvas de irrigação podem ser necessários para alcançar melhor estabilidade.

A CE no SAFERT apresentou média de $0,69 \pm 0,01 \text{ dS m}^{-1}$, superior ao sistema Convencional ($0,28 \pm 0,02 \text{ dS m}^{-1}$). Esses valores estão bem abaixo dos níveis recomendados para soluções nutritivas ($2,0\text{--}3,0 \text{ dS m}^{-1}$), indicando que a solução no substrato pode ter sofrido diluição ou que houve perdas por lixiviação. Portanto, não se pode afirmar que a CE estava na faixa ideal para a cultura, e sim que permaneceu em uma faixa segura do ponto de vista da salinização. A baixa CE observada pode ter limitado a oferta de nutrientes, e esse aspecto deve ser revisto em futuras calibrações do sistema.

Apesar da menor variação observada na CE do SAFERT ao longo do experimento, os valores absolutos foram baixos e, por vezes, incompatíveis com uma nutrição ideal. Isso indica que, embora o sistema automatizado tenha contribuído para

certo controle da salinidade, não se observou estabilidade adequada dos dois parâmetros principais (umidade e CE) ao longo de todas as fases fenológicas. Reforça-se, portanto, a importância de ajustes técnicos no manejo do sistema, especialmente em relação à reposição de nutrientes e à frequência de irrigação, para alcançar um equilíbrio mais próximo das exigências da cultura.

A análise temporal (Figura 2) mostra que o sistema SAFERT apresentou menor variação nos níveis de umidade e CE ao longo do tempo, em comparação ao sistema Convencional, que exibiu oscilações mais evidentes. Essa maior estabilidade pode estar relacionada à operação contínua do SAFERT, com sensores atuando em tempo real para manter as condições nos limites estabelecidos. Ainda que se observem variações pontuais na CE, estas parecem estar mais relacionadas às respostas naturais do substrato à dinâmica da absorção e redistribuição dos sais.

Dessa forma, a maior estabilidade observada no SAFERT pode ser atribuída ao seu sistema de monitoramento contínuo e ajuste dinâmico, garantindo condições mais controladas ao longo do ciclo de cultivo.

Por fim, em relação à temperatura do substrato, o sistema SAFERT manteve a média de $26,34 \pm 0,01$ °C, superior à registrada no sistema Convencional ($18,20 \pm 0,09$ °C). Essa diferença de temperatura pode estar associada a uma combinação de fatores, como o menor teor de umidade registrado no SAFERT e a maior condutividade elétrica observada nesse sistema (Figura 3). Ambos os parâmetros podem influenciar o comportamento térmico do substrato, considerando que a umidade atua como moderador térmico e a concentração de sais interfere na dinâmica de calor, especialmente em ambientes protegidos.

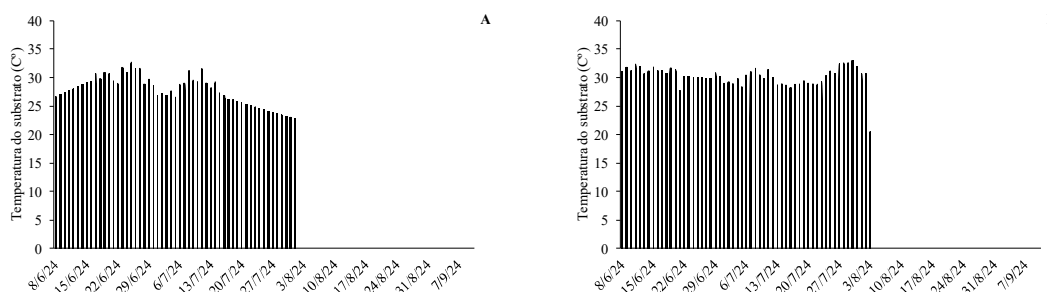


Figura 3. Variação temporal da temperatura do substrato nos sistemas SAFERT (A) e Convencional (B).

3.4 DISCUSSÃO

A comparação entre o sistema SAFERT e o manejo convencional revelou que o SAFERT forneceu concentrações foliares e de substrato significativamente mais altas para vários macronutrientes e micronutrientes no mês de junho de 2024. Esses resultados corroboram estudos recentes que demonstram o papel da fertirrigação inteligente na melhoria da absorção de nutrientes. Wang *et al.* (2024) mostraram que sistemas de fertirrigação de alta frequência, controlados por sensores de umidade, aumentam a taxa de absorção de N, P e K em tomate cultivado em estufas solares, resultando em maior biomassa radicular e eficiência no uso de insumos. Além disso, Cedeño *et al.* (2024) compararam métodos de avaliação de captação de nutrientes em tomate e destacaram que sistemas balanceados tendem a refletir mais fielmente a verdadeira absorção, especialmente para elementos móveis como N e K, alinhando-se ao aumento observado no SAFERT.

Embora o SAFERT tenha promovido maior disponibilidade de micronutrientes como ferro e boro, as concentrações observadas excederam as faixas ideais estabelecidas para a cultura, apontando para a necessidade de ajustes na composição da solução nutritiva. Revisões recentes de estratégias de manejo de solução nutritiva em sistemas hidropônicos enfatizam a importância de balancear a relação iônica para prevenir fenômenos de antagonismo e toxicidade (Liu *et al.*, 2023), sendo recomendável a adoção de protocolos dinâmicos capazes de modular continuamente as proporções de micromicronutrientes, conforme o estágio fenológico. Implementação de protocolos dinâmicos de manejo de solução nutritiva, que ajustam continuamente as concentrações iônicas em resposta a medições em tempo real, tem demonstrado capacidade de modular a expressão de genes transportadores de micronutrientes nas células radiculares, prevenindo tanto deficiências quanto toxicidades e promovendo desenvolvimento radicular saudável (Fathidarehniyeh *et al.* 2024).

O avanço das tecnologias digitais e da Internet das Coisas (IoT) tem sido determinante para viabilizar sistemas como o SAFERT. Ahamed *et al.* (2023) detalharam em IoT and AI in Agriculture como arquiteturas baseadas em LoRaWAN e algoritmos de controle adaptativo permitem, por meio de análise de big data, prever demandas hídricas e nutricionais em tempo real, reduzindo desperdícios e melhorando a precisão das intervenções. Ademais, revisões de aplicativos de Inteligência Artificial of Things (AIoT) observam que a fusão de sensores IoT com modelos preditivos de aprendizado de

máquina pode antecipar estresses hídricos e nutricionais, orientando ações proativas antes do surgimento de sintomas de deficiências.

Por fim, a integração de sistemas automatizados de fertirrigação com ferramentas de modelagem dinâmica, como o VegSyst v3, pode apoiar o planejamento sazonal e ajustes em larga escala, simulando ET_0 e absorção de nutrientes em diferentes condições agroclimáticas (Zhang *et al.*, 2025). Essa sinergia entre automação, modelagem e análise de dados sustenta a Agricultura 5.0, na qual práticas sustentáveis e tecnologias convergem para elevar a produtividade, reduzir impactos ambientais e assegurar a resiliência dos sistemas de produção.

3.5 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou diferenças no manejo hídrico e nutricional entre os sistemas avaliados, refletidas na estabilidade da umidade e condutividade elétrica do substrato, bem como nos teores de macro e micronutrientes nas folhas e no meio de cultivo. Ambos mantiveram os nutrientes, em geral, nas faixas recomendadas, embora tenham ocorrido variações sazonais e, em alguns casos, concentrações acima ou próximas aos limites de referência. Os dados indicam que ajustes no manejo e na composição da solução nutritiva são necessários para otimizar a oferta de nutrientes e evitar excessos, mantendo o equilíbrio hídrico e nutricional ao longo do ciclo produtivo.

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROLINK. **Nutrientes e distúrbios fisiológicos na cultura do tomate**. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/culturas/tomate/adubos/quimico/nutrientes-e-disturbios-fisiologicos-na-cultura-do-tomate_441046.html. Acesso em: 11 fev. 2025.

AHAMED, M. H. S.; KAHANDAGE, P. D.; TOFAEL, A. An IoT-Based Precision Irrigation System to Optimize Plant Water Requirements for Indoor and Outdoor Farming Systems. In: IoT and AI in Agriculture. Singapore: **Springer**, p. 47–69. 2023.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

CAMPAGNOL, R.; GUIMARÃES, M. A.; MELLO, S. C.; FURLAN, M. R.; GUIMARÃES, T. G. **Cultivo de mini tomate Sweet Grape em ambiente protegido**. Londrina: IAPAR, (Circular, 183). 2017.

CEDENO, J. M.; MAGÁN, J.-J.; THOMPSON, R. B.; FERNÁNDEZ, M.-D.; GALLARDO, M. Comparison of Methods to Determine Nutrient Uptake of Tomato Grown in Free-Draining Perlite Substrate—Key Information for Optimal Fertigation Management. **Horticulturae**, v. 10, n. 3, art. 232, 2024.

EMBRAPA. **Manejo da fertirrigação em cultivo protegido de tomateiro**. Comunicado Técnico 292, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2023.

FATHIDAREHNIJEH, E.; NADEEM, M.; CHEEMA, M.; THOMAS, R.; KRISHNAPILLAI, M.; GALAGEDARA, L. Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient and water use efficiency in hydroponic systems. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 104, n. 2, p. 1325–1340. 2024.

IBGE. **Estimativas de Safra Agrícola 2025 – Tomateiro**. Estimativas de Safra, 2025.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928.

LIU, X.; ZHANG, Y.; LI, J. Current perspective on nutrient solution management strategies to enhance stability and efficiency in hydroponic systems. **Canadian Journal of Plant Science**, 2023.

MARÇAL DE QUEIROZ, P. R. et al. Ajustes dinâmicos na fertirrigação de tomateiro protegido via sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 42, n. 2, p. 123–130, 2020.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.

SILVA, F. C. da. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**.

Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SHEWANGIZAW, Beza; et al. Tomato yield and water use efficiency as affected by nitrogen rate and irrigation regime in the central lowlands of Ethiopia. **Scientific Reports**, v. 14, art. 13307, 2024.

WAMSER, A. F.; et al. Manejo autônomo da fertirrigação do tomate grape cultivado em substrato utilizando sensores Irrigás®. **Irriga**, v. 27, n. 3, p. 452–464, 2022.

WANG, Q.; JIA, Y.; PANG, Z.; ZHOU, J.; et al. Intelligent fertigation improves tomato yield and quality and water and nutrient use efficiency in solar greenhouse production. **Agricultural Water Management**, v. 284, art. 108873, 2024.

WOLFERT, S.; GE, L.; VERDOUW, C.; BOGAARDT, M.-J. Big Data in Smart Farming – a review. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 69–80, 2017.

ZHANG, L.; KUMAR, P.; SMITH, D. Use of the VegSyst v3 model to simulate seasonal dry matter and nutrient uptake of greenhouse tomatoes. **Agricultural Water Management**, 2025.

4 CAPÍTULO II

QUALIDADE DE FRUTOS DE TOMATE GRAPE EM SISTEMAS DE FERTIRRIGAÇÃO AUTOMATIZADO SOB SENSORES E CONVENCIONAL

Resumo: Este artigo comparou a qualidade de frutos de tomate Sweet Heaven produzidos sob dois sistemas de fertirrigação: o SAFERT, que emprega controle automatizado por sensores de umidade e condutividade elétrica, e um sistema convencional de programação fixa. Foram avaliados parâmetros físico-químicos, coordenadas de cor (L^* , a^* , b^*), sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$), pH e dimensões (comprimento, largura e espessura), em seis fases fenológicas. O SAFERT aumentou significativamente a intensidade da cor vermelha (a^*), elevou os teores de sólidos solúveis e manteve o comprimento dos frutos mais estável ao longo do ciclo, refletindo melhor equilíbrio hídrico-nutricional. Já o manejo convencional, apesar de apresentar maior variabilidade nos parâmetros, mostrou-se operacionalmente simples e adequado para produtores com infraestrutura limitada. Conclui-se que o SAFERT é uma alternativa promissora para cultivos em substrato, capaz de gerar frutos de maior qualidade sensorial e potencialmente mais valorizados no mercado.

Palavras-chave: *Solanum lycopersicum* L, Características qualitativas, Fertirrigação inteligente, Agricultura de precisão, Cultivo em substrato.

QUALITY OF GRAPE TOMATO FRUITS IN AUTOMATED SENSOR-BASED AND CONVENTIONAL FERTIGATION SYSTEMS

Abstract: This study compared fruit quality of Sweet Heaven tomatoes grown under two fertigation regimes: SAFERT, with automated sensor-based control of moisture and electrical conductivity, and a fixed-schedule Conventional system. Physicochemical attributes—color coordinates (L^* , a^* , b^*), soluble solids ($^{\circ}\text{Brix}$), pH, and dimensions (length, width, thickness), were assessed across six phenological stages. SAFERT significantly enhanced red color intensity (a^*), increased soluble solids content, and provided greater fruit length stability, indicating improved water–nutrient management. Conversely, the Conventional approach, while exhibiting higher variability, proved operationally straightforward and accessible for growers with limited technology. The findings suggest that SAFERT offers a promising soilless cultivation strategy to produce tomatoes with superior sensory quality and market potential.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., Qualitative characteristics, Intelligent fertigation, Precision agriculture, Substrate cultivation.

4.1 INTRODUÇÃO

A integração da aplicação de fertilizantes ao sistema de irrigação, denominada fertirrigação, consolidou-se como técnica capaz de distribuir água e nutrientes diretamente na zona radicular, otimizando o uso de insumos hídricos e fertilizantes visando elevar a produtividade e qualidade das culturas. No tomateiro, estudos recentes indicam que esse manejo propicia maior teor de sólidos solúveis (SST) em ° Brix e compostos fenólicos, além de melhorar atributos físicos dos frutos, como firmeza e coloração (Singh *et al.*, 2022).

O controle da condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva é fundamental para regular a concentração iônica durante a fertirrigação. Investigação efetuada por Garcia *et al.* (2024) revelou que ajustar a taxa de aplicação da solução nutritiva entre 70% e 100% da recomendação padrão mantém a CE em níveis ideais para maximizar o °Brix e a vitamina C, sem impactar negativamente o rendimento.

A escolha do substrato exerce forte influência sobre a retenção de água, aeração e disponibilidade de nutrientes. Pesquisa de Kim *et al.* (2025) demonstrou que substratos com $30\% \pm 2\%$ de fibra de coco promovem desenvolvimento radicular mais vigoroso e frutos com maior massa e teor de SST, em comparação a substratos minerais convencionais.

No Brasil, a adoção de tecnologias de agricultura de precisão, incluindo sensores de umidade e CE interligados por redes IoT, tem ampliado a eficiência dos sistemas de fertirrigação. Sousa *et al.* (2024) apontou que essas tecnologias podem reduzir em mais de 25% o consumo de água e fertilizantes, além de mitigar a lixiviação de nutrientes para aquíferos. Entretanto, a implementação de sistemas de fertirrigação enfrenta desafios operacionais, como manutenção de emissores para evitar entupimentos, compatibilidade de fertilizantes em mistura e monitoramento contínuo da qualidade da água (Singh *et al.*, 2022).

Diante do potencial agrônômico e dos obstáculos técnicos, comparações entre métodos convencionais e sistemas inteligentes de fertirrigação, que utilizam controle automatizado para responder em tempo real às demandas da cultura, são essenciais para validar ganhos em eficiência, qualidade de fruto e sustentabilidade. Este estudo avaliou o desempenho de um sistema automatizado de fertirrigação (SAFERT) e de um sistema convencional de fertirrigação, com base em parâmetros físicos e químicos de frutos de tomate grape varieta Sweet Heaven cultivados em substrato.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em casa de vegetação tradicional, instalada nas dependências do Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde – GO localizado na região sudoeste de Goiás, a aproximadamente 720 m de altitude (Figura 1). A área está inserida em clima tropical Aw, segundo Köppen & Geiger (1928) e Alvares *et al.* (2013), caracterizado por chuvas concentradas de outubro a maio e período seco de junho a setembro, com precipitação anual entre 1500 e 1800 mm. Nesse ambiente, instalou-se dois sistemas de fertirrigação o sistema automatizado SAFERT e o sistema convencional para fins comparativos.



Figura 1. Mapa de geolocalização do município de Rio Verde - GO e identificação do local do experimento (casa de vegetação do Laboratório de Hidráulica e Irrigação).

Fonte: Autor (2025)

Adotou-se um delineamento de blocos em fatorial 2×6 , sendo com os fatores: 2 sistemas de fertirrigação o SAFERT e o Convencional e 6 épocas de avaliação ao longo do ciclo. Cada tratamento experimental foi instalado em 2 linhas de sistema de localizado por gotejamento, e cada linha foi composta por 20 vasos perfazendo 40 parcelas por tratamento totalizando 80 parcelas experimentais. Esses vasos possuíam capacidade de 10 litros (L), que foram preenchidos com substrato à base de fibra de coco triturada, em virtude da alta capacidade de retenção hídrica, excelente aeração e caráter inerte, além da facilidade de manejo. A cultura empregada no ensaio foi a do tomate tipo grape com a variedade Sweet Heaven selecionada pela alta produtividade e qualidade dos frutos. O sistema de fertirrigação foi composto por emissores autocompensantes tipo *on line* com

vazão nominal de 4 L h⁻¹, posicionados a cada 0,35 m, sendo dois gotejadores por vaso. Esses vasos foram dispostos com espaçamento de 0,5 m entre plantas e 1 m entre as linhas, garantindo condições homogêneas de cultivo.

No sistema convencional, a irrigação e a fertirrigação eram acionadas por um controlador programado segundo as especificações da Plantpar, com seis ciclos diários sendo eles às 7, 9, 11, 13, 15 e 17 horas com tempo de acionamento de 5 minutos cada de. Diariamente aplicava-se solução nutritiva, exceto às quintas-feiras e domingos, quando ocorria apenas a irrigação para lavagem de sais acumulados. Paralelamente, sensores de umidade, condutividade elétrica e temperatura do solo registravam continuamente os parâmetros, servindo unicamente para monitoramento, sem interferir na programação fixa.

O sistema de fertirrigação SAFERT contou com uma estação de sensoriamento autônoma, alimentada por um painel solar de silício policristalino de 20 W (V_{mp} 17,56 V; I_{mp} 1,14 A; dimensões 500 × 350 × 25 mm) e regulador PWM de carga de 10 A, configurado para bancadas de 12 V ou 24 V (tensão de flutuação 13,7 V; limiar de recarga 13 V). Essa infraestrutura garantiu fornecimento contínuo de energia aos dispositivos IoT.

Para a aquisição de dados, empregou-se a placa CPB Mini 32, equipada com microcontrolador ESP32 e módulo LoRa, dotada de software que captura leituras de condutividade elétrica, umidade do solo e temperatura via sensor resistivo multifuncional. A cada 5 min, as medições eram transmitidas ao InfluxDB Cloud, e um receptor (ESP32 com relés) interpretava as informações e acionava automaticamente as bombas de fertirrigação (reservatório de 1 000 L) ou de irrigação (apenas água), assegurando a execução autônoma do regime de manejo.

Em ambos os arranjos, instalaram-se duas bombas: uma dedicada à solução nutritiva e outra exclusiva para água pura. No SAFERT, as ativações obedeciam a dois critérios, umidade abaixo de 28% da capacidade de campo e condutividade elétrica ajustada para cada fase fenológica (1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4 dS m⁻¹ para as fases 1 a 6, respectivamente), conforme orientação da fornecedora.

Foram realizados três testes de uniformidade de irrigação, no início, meio e fim do ciclo, seguindo o método de Keller e Karmeli (1974). Em cada sistema, coletaram-se vazões de gotejadores em quatro posições ao longo da linha (1/4, 2/4, 3/4 e 4/4), sob pressão de serviço fixa de 1 bar, durante 1 min. Com esses dados, calculou-se o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) de cada tratamento.

A calibração dos sensores ocorreu em duas fases. Primeiramente, sensores de condutividade elétrica (EC), pH e temperatura foram ajustados por comparação com soluções padrão (EC = 6,28; 145,6; 1413 $\mu\text{S cm}^{-1}$; pH = 4, 5, 7, 10), gerando curvas lineares de calibração (EC: $y = 1,704x + 0,0731$; pH: $y = 1,1576x + 0,0923$; temperatura: $y = -2,7530x + 1,8726$). As formulações das soluções nutritivas seguiram essas condutividades recomendadas, conforme Tabela 1.

Em seguida, o sensor de umidade foi calibrado pelo método da estufa: o substrato foi saturado até a capacidade de campo, pesado, seco por 48 h a 60°C e pesado novamente, determinando 45,25% de umidade à CC. Definiu-se como limiar de irrigação 70% da CC, com aplicação de 1 min por ciclo até atingir 80% da CC; fora dessa faixa, o sistema permanecia inativo, operando ininterruptamente enquanto mantivesse autonomamente o monitoramento.

A cada fase fenológica do tomateiro grape, preparou-se manualmente a solução nutritiva de acordo com as necessidades da planta. A Tabela 1 apresenta as doses (g planta $\cdot$ dia $^{-1}$) de cada fertilizante, e os ajustes de condutividade elétrica foram realizados, conforme as recomendações dos fornecedores, garantindo oferta balanceada de nutrientes.

Tabela 1. Recomendação da mistura da solução nutritiva por fase do cultivo do tomate grape.

Penca	(Dias)	Fertilizantes (gramas)						
		Arrank	Equilibre	Bomber	Nitrato de Cálcio	Calcio 18	UltrabBAC	Plantamino
0	0 - 10	1,0	0	0	0	0,3	0,5	0
1	10 - 15	0,5	0,5	0	0	0,5	0	0,5
1 - 3	15 - 35	0,5	1,0	0	1,0	0	0	0,5
3 - 5	35 - 65	0	0,7	1,0	0	1	0	0,75
5 - 7	65 - 80	0	2,5	0	0	1,5	0	1,0
7 - 10	80 - 110	0	2,0	1,0	2,0	0	0	2,0
> 10	> 110	0	0	3,5	1,0	2,0	0	2,0

Penca = cacho ou grupo de frutos de tomate que crescem juntos em um ramo da planta;

Os fertilizantes citados anteriormente diferenciam-se por suas formulações específicas. O Bomber, por exemplo, possui elevado teor de Potássio (36%) e dosagem equilibrada de Nitrogênio (6%) e Fósforo (8%), além de conter vestígios de micronutrientes como Ferro (0,038%) e Manganês (0,035%), o que o torna particularmente indicado para culturas de alta exigência potássica. Já o Equilibre oferece

proporções homogêneas de Nitrogênio, Fósforo e Potássio (18% cada), apresentando ainda maior concentração de Ferro solúvel (0,12%) em relação aos demais, conferindo-lhe versatilidade de uso em diferentes sistemas produtivos.

O Cálcio 18, por sua vez, destaca-se pelo aporte de Cálcio (13%) — essencial para corrigir carências desse nutriente —, mas é inócuo em Nitrogênio, Fósforo e Potássio, limitando a aplicação a correções pontuais. O Arrank traz alta dosagem de Fósforo (50%) e níveis moderados de Nitrogênio e Potássio (8% cada), sendo recomendado na fase inicial de desenvolvimento para estimular o enraizamento e a floração.

O Plantamino está disponível tanto em porcentagem quanto em gramas por litro, com Nitrogênio (2%), Fósforo (13%) e Potássio (2%), e incorpora quantidades mínimas de Ferro (0,02%) e Manganês (0,01%), conferindo flexibilidade de uso em diversos estágios de cultivo. Por fim, o UltraCAB fornece Cálcio (27,5%) e Boro (1,3%) sem Nitrogênio, Fósforo ou Potássio, sendo ideal para corrigir deficiências específicas desses elementos em solos em que apenas esses nutrientes estão carentes.

Foram coletados frutos maduros de cada parcela experimental para análise dos seguintes parâmetros de qualidade: Cor: Determinada pelas coordenadas de cor L* (luminosidade), a* (vermelho/verde) e b* (amarelo/azul), utilizando um colorímetro portátil conforme metodologia descrita por Nascimento *et al.* (2013); Sólidos Solúveis Totais (°Brix): Medidos com um refratômetro digital, conforme procedimentos estabelecidos por Fontes *et al.* (2004); pH: Determinado utilizando um pHgâmetro calibrado, seguindo as normas da AOAC (Association of Official Analytical Chemists); e Dimensões dos Frutos: Comprimento, largura e espessura foram mensurados com paquímetro digital com precisão de 0,01 mm.

Os conjuntos de dados foram avaliados quanto à normalidade por meio do teste de Shapiro–Wilk. Para as variáveis que apresentaram distribuição normal, procedeu-se a Análise de Variância (ANOVA) e, em caso de diferenças estatisticamente significativas, aplicaram-se análises de regressão e o teste de Tukey a 5 % de nível de significância para comparação de médias. Todos os procedimentos estatísticos foram executados no R Studio (R Core Team, 2022), enquanto a elaboração dos gráficos foi realizada no Microsoft Excel.

Cada data foi convertida em “dias após o início do experimento” (27 de junho = 26 dias; 1º de agosto = 61 dias) e aplicada regressão linear simples com esses valores no eixo temporal e as coordenadas de cor (a* e b*) como variáveis resposta. O ajuste

apresentou coeficientes de determinação acima de 0,85 e permitiu estimar que, em 27 de julho (56 dias), a^* atingiu a cerca de 16 unidades e b^* aproximadamente 17,5 unidades, valores que cresceram levemente até 1º de agosto.

4.3 RESULTADOS

O teste de Shapiro–Wilk (Tabela 2) indicou que cinco das oito variáveis avaliadas não apresentaram desvios significativos da normalidade ($p > 0,05$), sugerindo que seus valores seguem aproximadamente uma distribuição gaussiana e permitindo o uso de testes paramétricos. São elas: coordenada a^* da cor ($W = 0,9811$; $p = 0,3716$), sólidos solúveis (°Brix) ($W = 0,9664$; $p = 0,0569$), comprimento ($W = 0,9919$; $p = 0,9366$), largura ($W = 0,9919$; $p = 0,9356$) e espessura ($W = 0,9817$; $p = 0,3986$). Valores de W próximos de 1 associam-se a boa aderência à normalidade, e p -values acima de 0,05 indicam ausência de evidência estatística para rejeitar essa hipótese.

Em contraste, três variáveis apresentaram $p < 0,05$, demonstrando desvios significativos da normalidade e recomendando métodos não paramétricos para comparações entre grupos: luminosidade L^* ($W = 0,9747$; $p = 0,1679$), coordenada b^* da cor ($W = 0,9614$; $p = 0,0301$) e pH do suco do fruto ($W = 0,9537$; $p = 0,0113$). Nesses casos, a distribuição dos dados é assimétrica ou contém valores extremos que comprometem a validade de testes paramétricos, sendo indicadas alternativas como o teste de Mann–Whitney ou de Wilcoxon para análise de diferenças entre tratamentos.

Tabela 2. Resultados do teste de normalidade para as variáveis analisadas, indicando estatística W e valores de p para cada variável.

Variável	W-Statistic	P-Value
L	0,975	0,168
a	0,981	0,372
b	0,961	0,030
brix	0,966	0,057
pH	0,954	0,011
comprimento	0,992	0,937
largura	0,992	0,936
espessura	0,982	0,399

Utilizando um delineamento fatorial 2×6 , em que os fatores investigados foram o tipo de sistema de fertirrigação (SAFERT versus Convencional) e as seis fases de desenvolvimento do tomateiro ao longo do ciclo produtivo, procedeu-se à Análise de Variância dos parâmetros de cor L^* , a^* e b^* (Tabela 3). Para a coordenada L^* (luminosidade), apenas o efeito da fase de avaliação mostrou-se estatisticamente significativo ($p < 0,01$), evidenciando que a luminosidade dos frutos variou ao longo do tempo, sem influência do sistema de fertirrigação nem de sua interação com as fases ($p > 0,05$), devido a características intrínsecas da maturação dos frutos.

Já na coordenada a^* (vermelho-verde), ambos os efeitos principais – fase ($p < 0,001$) e sistema ($p < 0,05$) – foram significativos, indicando que a intensidade da coloração vermelha responde tanto ao estágio fenológico quanto ao método de fertirrigação empregado; a interação sistema $\times$ fase não atingiu significância ($p > 0,05$). Por fim, a coordenada b^* (amarelo-azul) apresentou efeito significativo apenas para a fase ($p < 0,001$), demonstrando que oscilações nessa tonalidade acompanham o processo de maturação, independentemente do sistema utilizado. Esse arranjo fatorial permitiu, portanto, dissociar os papéis da fase de desenvolvimento e do tipo de manejo sobre a cor dos frutos, apontando a maturação como principal determinante cromático e o sistema de fertirrigação como fator adicional apenas na intensidade de vermelho.

Tabela 3. Resumo da análise de variância para as variáveis L, a e b, destacando os fatores significativos ($p < 0,05$) e suas respectivas interações.

L = Luminosidade			
Fator	SQ	F	P-Valor
Fase	54,37*	3,77	3,2E-03
Sistema	2,02	0,84	3,6E-01
Sistema x Fase	22,08	1,53	1,8E-01
Resíduo	134,46	-	-
a = Coordenada vermelho/verde			
Fase	279,97*	9,68	2,7E-07
Sistema	23,47*	4,87	3,2E-02
Sistema x Fase	19,46	0,67	6,7E-01
Resíduo	270,04	-	-
b = Coordenada amarelo / azul			
Fase	111,15*	4,95	4,0E-04
Sistema	4,82	1,29	2,6E-01
Sistema x Fase	14,99	0,67	6,8E-01
Resíduo	209,67	-	-

Na Figura 2, observou-se que as coordenadas vermelho/verde (A) apresentaram valores significativamente maiores no sistema SAFERT em comparação ao sistema Convencional. O teste de Tukey, com nível de significância de 5%, confirmou essa diferença, evidenciada pelas letras distintas atribuídas aos tratamentos.

Esses resultados indicam que o sistema SAFERT promoveu maior intensidade na tonalidade vermelha dos frutos, sugerindo um impacto positivo desse sistema no desenvolvimento da coloração, que é um indicador de maturação e qualidade visual dos tomates.

Essas informações são importantes para avaliar a eficiência do sistema SAFERT, pois a coloração dos frutos é uma característica de grande relevância comercial. Frutos com maior intensidade de vermelho geralmente são mais atrativos aos consumidores e podem refletir melhorias no teor de compostos bioativos, como licopeno, que também possuem benefícios nutricionais.

Assim, os resultados apresentados reforçam o potencial do sistema SAFERT em contribuir para a obtenção de tomates com melhor qualidade visual e, possivelmente, nutricional, destacando a importância para o mercado.

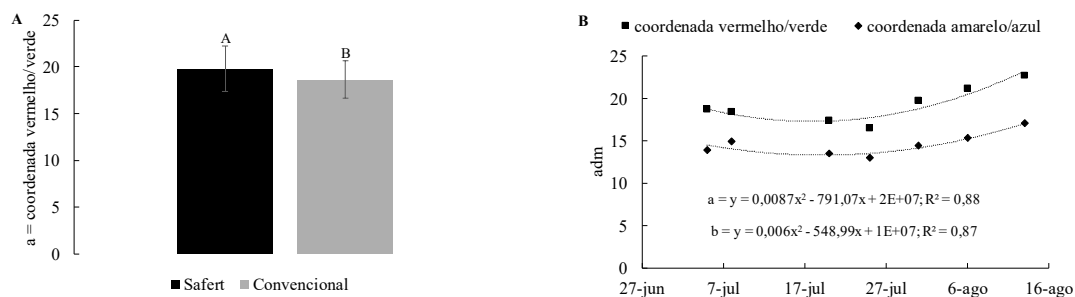


Figura 2. A) Diferença média das coordenadas de cor vermelho/verde de frutos de tomates cultivados nos sistemas SAFERT e Convencional e B) teste de regressão das coordenadas vermelho/verde e amarelo/azul, avaliados em diferentes fases de desenvolvimento, independente do sistema.

Além das características de cor, os parâmetros físicos dos frutos, como comprimento, espessura e largura, também apresentaram efeitos distintos, conforme os resultados da análise de variância apresentados na Tabela 4. Pela mesma tabela notou-se que para a variável comprimento, o fator Fase apresentou efeito significativo, enquanto os fatores Sistema e a interação entre Sistema x Fase não foram significativos. Quanto as variáveis espessura e largura, verificou-se que tanto o fator Fase quanto a interação Sistema x Fase apresentaram efeitos significativos (Tabela 4).

Tabela 4. Resultados da análise de variância para as variáveis comprimento, espessura e largura dos frutos, com os fatores e interações significativos indicados.

Comprimento dos Frutos			
Fator	SQ	F	P-Valor
Fase	306,56*	8,17	2,3E-06
Sistema	20,73	3,31	7,4E-02
Sistema x Fase	14,18	0,38	8,9E-01
Resíduo	350,20	-	-
Espessura dos Frutos			
Fase	113,48*	6,81	1,9E-05
Sistema	1,12	0,40	5,3E-01
Sistema x Fase	67,69*	4,06	1,9E-03
Resíduo	155,60	-	-
Largura dos Frutos			
Fase	95,07*	9,52	3,3E-07
Sistema	0,00	0,00	9,9E-01
Sistema x Fase	45,10*	4,52	8,4E-04
Resíduo	93,17	-	-

O comprimento e a espessura dos frutos diminuíram ao longo do tempo em ambos os sistemas, ajustando-se a modelos quadráticos. Para o comprimento, o coeficiente de determinação foi $R^2 = 0,95$ indicando bom ajuste, enquanto para a espessura o foi de $R^2 = 0,74$, com ajuste moderado para a espessura (Figura 3A).

As curvas de regressão para o comprimento dos frutos mostraram melhor ajuste no sistema SAFERT ($R^2 = 0,89$) em comparação ao sistema Convencional ($R^2 = 0,31$), sugerindo maior estabilidade no comprimento dos frutos no sistema SAFERT ao longo do tempo (Figura 3B).

A comparação das médias do comprimento dos frutos revelou diferenças significativas entre os sistemas em algumas datas de avaliação, com o sistema SAFERT apresentando valores superiores em algumas ocasiões, conforme indicado pelas letras diferentes entre os tratamentos ($p < 0,05$) (Figura 3C).

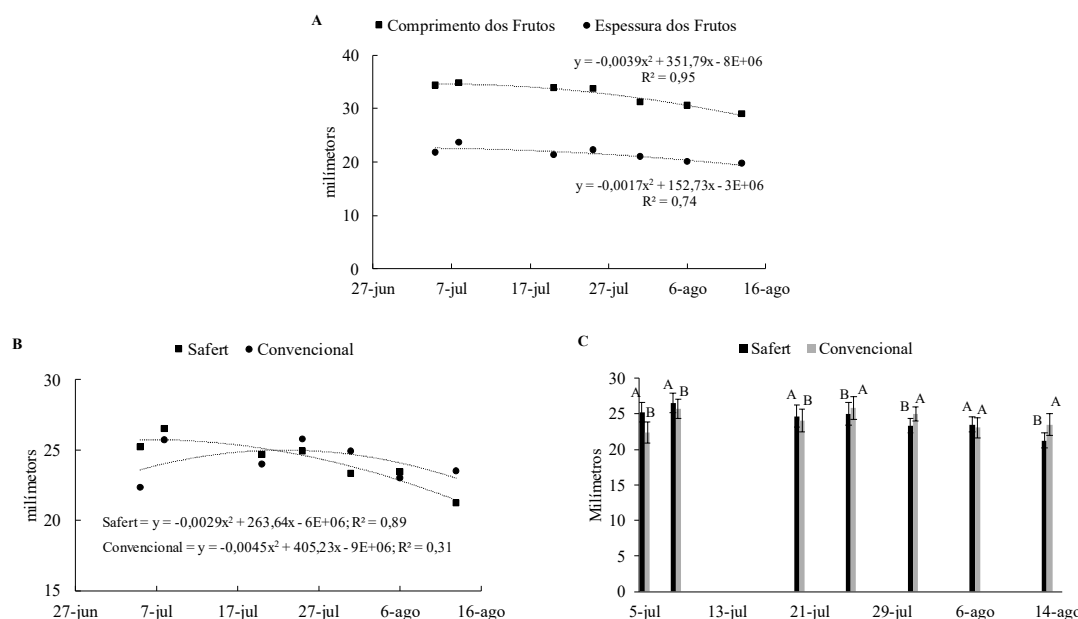


Figura 3. Variação do comprimento e espessura dos frutos ao longo do tempo (A), ajuste das curvas de regressão para o comprimento dos frutos nos sistemas SAFERT e Convencional (B) e comparação das médias do comprimento dos frutos entre os sistemas SAFERT e Convencional ao longo das diferentes datas de avaliação (C).

Para a variável brix, os fatores Fase, Sistema e a interação entre Sistema x Fase apresentaram efeitos significativos. Na variável pH, os fatores Fase, Sistema e a interação Sistema x Fase demonstraram significância estatística. Para a variável peso, apenas o fator Fase apresentou efeito significativo, enquanto os fatores Sistema e a interação entre Sistema x Fase não foram significativos (Tabela 5).

Tabela 5. Análise de variância para as variáveis brix, pH e peso, com destaque para os fatores e interações significativos.

brix			
Fator	SQ	F	P-Valor
Fase	2,63*	2,90	1,6E-02
Sistema	2,35*	15,54	2,3E-04
Sistema x Fase	15,78*	17,37	3,1E-11
Resíduo	8,48	-	-
pH			
Fase	1,71*	41,34	7,8E-19
Sistema	0,28*	41,36	3,0E-08
Sistema x Fase	0,12*	2,84	1,7E-02
Resíduo	0,39	-	-
Peso Unitário			
Fase	21,96	11,11	4,4E-08
Sistema	2,34	0,72	4,0E-01
Sistema x Fase	34,69	1,78	1,2E-01
Resíduo	179,08	-	-

Na Figura 4A, observa-se que o teor de sólidos solúveis variou ao longo do tempo em ambos os sistemas, ajustando-se a modelos quadráticos. O sistema SAFERT apresentou $R^2 = 0,49$, enquanto o sistema Convencional obteve um ajuste mais representativo, com $R^2 = 0,84$. Essa diferença sugere maior variabilidade no comportamento dos sólidos solúveis no sistema SAFERT.

Na Figura 4B, as médias do teor de sólidos solúveis entre os sistemas apresentaram diferenças significativas em todas as datas avaliadas, com o sistema SAFERT mostrando valores consistentemente superiores ao sistema Convencional. Essas diferenças são evidenciadas pelas letras distintas nos tratamentos, indicando significância estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

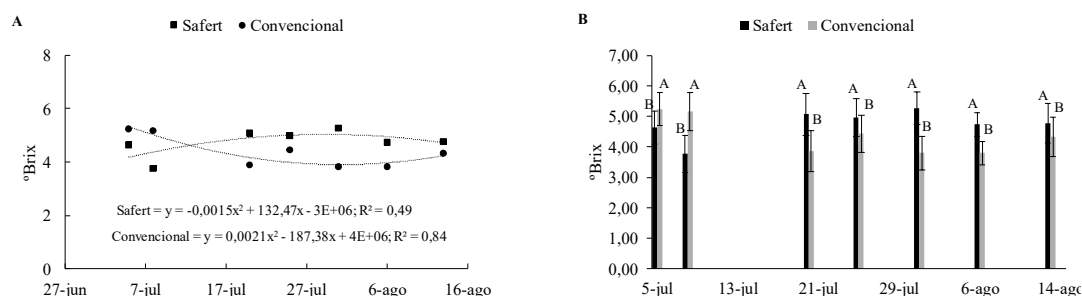


Figura 4. Variação do teor de sólidos solúveis (brix) ao longo do tempo, para os sistemas SAFERT e Convencional (A) e comparação das médias entre os sistemas SAFERT e Convencional em diferentes datas de avaliação (B)

Na Figura 5A, o pH dos frutos diminuiu ao longo do tempo em ambos os sistemas. Os dados ajustaram-se a modelos quadráticos, com $R^2 = 0,82$ para o sistema SAFERT e $R^2 = 0,50$ para o sistema Convencional, indicando que o sistema SAFERT apresentou maior previsibilidade na variação do pH.

Na Figura 5B, as médias do pH não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas SAFERT e Convencional em nenhuma das datas avaliadas, exceto em 5 de julho. As letras iguais sobre as barras reforçam a ausência de diferenças estatísticas.

Esses resultados destacam a eficiência do sistema SAFERT em proporcionar maior estabilidade no pH dos frutos, enquanto apresenta vantagens consistentes no teor de sólidos solúveis, um parâmetro fundamental para a qualidade dos frutos e a aceitação no mercado.

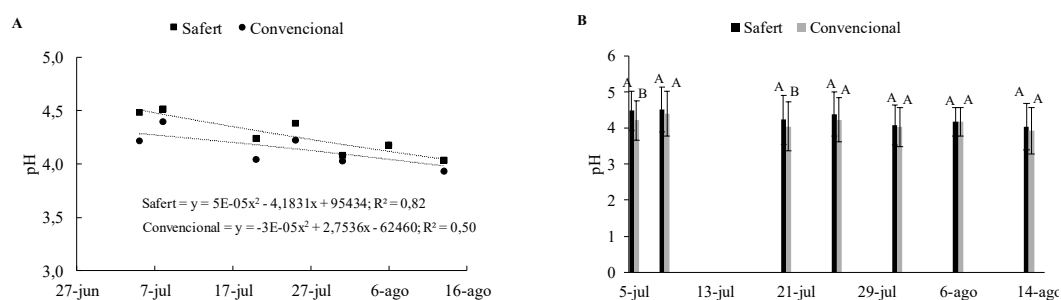


Figura 5. Variação do pH ao longo do tempo, para os sistemas SAFERT e Convencional (A) e comparação das médias entre os sistemas SAFERT e Convencional em diferentes datas de avaliação (B).

Os resultados indicaram que as variáveis "a", "brix", "comprimento", "largura" e "espessura" apresentaram distribuição normal, enquanto "Repetição", "L", "b" e "pH"

mostraram desvios significativos da normalidade.

Na análise de variância, o fator "Fase" demonstrou significância para diversas variáveis, destacando-se no comprimento e espessura dos frutos, bem como no teor de sólidos solúveis e pH.

O sistema SAFERT teve impacto significativo em algumas variáveis, como a coordenada vermelho/verde (a), comprimento e sólidos solúveis, reforçando a influência positiva no desenvolvimento e qualidade dos frutos.

As análises de regressão revelaram ajustes mais consistentes para o sistema SAFERT em relação ao comprimento ($R^2 = 0,89$) e ao pH ($R^2 = 0,82$), indicando maior estabilidade no comportamento dessas variáveis ao longo do tempo, em comparação ao sistema Convencional.

Diferenças significativas entre os sistemas foram observadas em variáveis como comprimento, sólidos solúveis e tonalidade vermelho/verde, evidenciando o potencial do sistema SAFERT em proporcionar frutos com melhores características comerciais e nutricionais.

4.4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no presente estudo reforçam a capacidade do sistema SAFERT de promover maior intensidade cromática e consistência fenológica nos frutos de tomate Sweet Heaven. A coordenada a^* elevou-se significativamente no SAFERT em todas as fases de análise dos frutos, corroborando achados de Wamser *et al.* (2022), que demonstraram que o controle contínuo da CE e do pH, via sensores online, otimiza a biossíntese de pigmentos como o licopeno, responsável pela coloração vermelha intensa. Embora a luminosidade (L^*) e a coordenada b^* não tenham sido afetadas pelo tipo de fertirrigação, a variação ao longo do ciclo seguiu padrões fenológicos previsíveis (Zhang *et al.*, 2025), indicando que estes atributos permanecem sob forte regulação endógena do tomateiro.

A análise dimensional dos frutos revelou ainda que o comprimento e a espessura decaíram com o avanço da maturação, ajustando-se bem a modelos quadráticos. Destaca-se o maior R^2 no ajuste de comprimento para o SAFERT (0,89), comparado ao convencional (0,31), sugerindo que a oferta pontual de água e nutrientes mantém melhor a turgidez e o potencial de crescimento celular, conforme descrito por Wang *et al.* (2024) em sistemas de alta frequência de fertirrigação. Por outro lado, o sistema convencional

apresentou maior variabilidade dimensional, possivelmente decorrente de períodos de sub- ou supra-irrigação inerentes à programação estática de ciclos.

Em relação ao teor de sólidos solúveis, observou-se interação significativa entre sistema e fase, com o SAFERT exibindo valores consistentemente superiores. Esse comportamento é consistente com Liu *et al.* (2023), que destacam que o controle automatizado de CE previne diluições excessivas e permite acumulação gradual de açúcares, resultando em frutos com melhor palatabilidade. A estabilidade do pH nos frutos também foi mais pronunciada no SAFERT ($R^2 = 0,82$), alinhando-se aos relatos de Ahamed; Kahandage; Tofael (2023) sobre a importância de plataformas IoT na manutenção de condições químicas ideais, evitando picos de acidez que prejudicam o sabor e a armazenagem.

No entanto, vale mencionar que o sistema convencional, apesar de não oferecer os mesmos ganhos de precisão e uniformidade, mostrou-se robusto e menos oneroso em termos de infraestrutura, demandando apenas controladores programados e sem a necessidade de conectividade contínua. Essa simplicidade operacional pode ser vantajosa para pequenos produtores ou regiões com acesso limitado a suporte técnico especializado. Ademais, a ausência de efeito significativo do sistema convencional sobre variáveis como L^* e b^* indica que, em termos de qualidade visual e parâmetros básicos, esse manejo ainda atende aos requisitos mínimos de mercado, especialmente quando associado a práticas de manejo cultural adequadas.

Por fim, a combinação de sistemas inteligentes de fertirrigação com modelagem de crescimento, como o VegSyst v3, pode potencializar ainda mais os ganhos no SAFERT, permitindo prever demandas hídricas e nutricionais de forma integrada (Zhang, *et al.*, 2025). A convergência entre automação, sensoriamento e modelagem preditiva sustenta o conceito de Agricultura 5.0, apontando caminhos para uma produção de tomate mais sustentável, eficiente e de alta qualidade.

4.5 CONCLUSÕES

O delineamento comparativo evidenciou que o SAFERT atuou positivamente sobre variáveis de cor (a^*), sólidos solúveis e estabilidade dimensional e de pH, enquanto o manejo convencional seguiu o padrão fenológico sem influenciar significativamente a coloração vermelha ou o pH. O sistema convencional, por sua vez, mostrou-se eficaz na condução geral do ciclo sem necessidade de infraestrutura complexa. Assim, a escolha entre SAFERT e cronograma fixo dependerá da prioridade por qualidade visual e química do fruto (SAFERT) ou por simplicidade operacional e menor custo tecnológico (Convencional)

4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHAMED, M. H. S.; KAHANDAGE, P. D.; TOFAEL, A. An IoT-Based Precision Irrigation System to Optimize Plant Water Requirements for Indoor and Outdoor Farming Systems. In: IoT and AI in Agriculture. Singapore: **Springer**, p. 47–69. 2023.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

FONTES, P. C. R.; LOURES, J. L.; GALVÃO, J. C.; CARDOSO, A. A.; MANTOVANI, E. C. Produção e qualidade do tomate produzido em substrato, no campo e em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, BRASÍLIA, v. 22, n.3, p. 614-619, 2004.

GARCIA, L. F. et al. Effects of nutrient solution application rates on yield, quality, and water and fertilizer use efficiency of coconut coir-based cultivated tomatoes. **Agricultural Water Management**, v. 284, art. 108873, 2024.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. Transactions of the ASAE, v.17, p.678-684, 1974.

KIM, H. S. et al. The effect of varying coconut coir substrates on tomato growth and fruit quality. **Sustainability**, 2025.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde.Gotha:** Verlag Justus Perthes. 1928.

LIU, X.; ZHANG, Y.; LI, J. Current perspective on nutrient solution management strategies to enhance stability and efficiency in hydroponic systems. **Canadian Journal of Plant Science**, 2023.

NASCIMENTO, A.R.; SOARES JÚNIOR, M.S.; CALIARI, M.; FERNANDES, P.M.; RODRIGUES, J.P.M.; CARVALHO, W.T. Qualidade de tomates de mesa cultivados em sistema orgânico e convencional no estado de Goiás. **Horticultura Brasileira**, v. 31: p. 628-635, 2013.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.

SINGH, R.; PATEL, A.; GUPTA, S. Productive and physico-chemical parameters of tomato fruits influenced by electrical conductivity and water treatment. **HortScience**, v. 57, n. 9, p. 1603–1610, 2022.

SOUSA, M. A.; OLIVEIRA, J. P.; LIMA, C. R. Assessing the impact of precision farming technologies: a literature review. **Science of the Total Environment**, 2024.

WAMSER, A. F. et al. Manejo autônomo da fertirrigação do tomate grape cultivado em substrato utilizando sensores Irrigás®. **Irriga**, v. 27, n. 3, p. 452–464, 2022.

WANG, Q. et al. Intelligent fertigation improves tomato yield and quality and water and nutrient use efficiency in solar greenhouse production. **Agricultural Water Management**, v. 284, art. 108873, 2024.

ZHANG, L.; KUMAR, P.; SMITH, D. Use of the VegSyst v3 model to simulate seasonal dry matter and nutrient uptake of greenhouse tomatoes. **Agricultural Water Management**, 2025.

5. CONCLUSÃO GERAL

O SAFERT, embora ainda restrito a testes em casa de vegetação no IF Goiano, mostrou-se promissor ao fornecer monitoramento contínuo e ajustes automáticos que refletiram em maior estabilidade de condições do meio de cultivo e ganhos em disponibilidade nutricional e qualidade visual-química dos frutos. No entanto, requer investimento em infraestrutura IoT, calibrações periódicas e suporte técnico. O manejo convencional, por sua vez, provou ser eficaz, de operação simples e com menores custos iniciais, mantendo resultados consistentes em parâmetros básicos de produção. A próxima fase do trabalho envolve a validação em áreas comerciais, visando avaliar a viabilidade de adoção em larga escala e o impacto econômico-operacional no contexto real de produtores.