

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PABLO RUGERO MAGALHÃES DOURADO

**NITROGÊNIO NO TOMATEIRO: SENSORIAMENTO REMOTO E
EFICIÊNCIA DE USO DE ÁGUA**

RECIFE

2021

Pablo Rugero Magalhães Dourado
Engenheiro Agrônomo

**Adubação nitrogenada em tomateiro: sensoriamento remoto e análise
lisimétrica em cultivo hidropônico**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de
Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Edivan Rodrigues de Souza. D.Sc.

Coorientadores:

Prof. Emidio Cantídio de Oliveira, D.Sc.

Prof. José Amilton Santos Júnior, D.Sc.

**Recife
2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D739n Dourado, Pablo Rugero Magalhães
 Nitrogênio no tomateiro: Sensoriamento remoto e eficiência de uso de água / Pablo Rugero Magalhães Dourado.
 - 2021.
 126 f. : il.

 Orientador: Edivan Rodrigues de Souza.
 Inclui referências.

 Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo,
 Recife, 2022.

 1. Tomate. 2. Híbrido TY2006. 3. NDVI. 4. Produtividade. 5. Consumo de água. I. Souza, Edivan Rodrigues de,
 orient. II. Título

CDD 631.4

PABLO RUGERO MAGALHÃES DOURADO

**Adubação nitrogenada em tomateiro: sensoriamento remoto e análise
lisimétrica em cultivo hidropônico**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovado em 29 de novembro de 2021

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza - Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Emidio Cantídio de Oliveira – examinador interno
DEPA/UFRPE

Prof. Dr. Mario de Andrade Lira Junior – examinador interno
DEPA/UFRPE

Prof. Dr. Renato Lemos dos Santos – examinador externo
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Amilton Santos Júnior – examinador externo
DEAGRI/UFRPE

Aos meus filhos, Eli e Mateus
A minha querida e saudosa avó (*in memoriam*),
DEDICO

AGRADECIMENTOS

Tenho a satisfação de agradecer as pessoas abaixo reconhecendo sua imensurável ajuda na realização desse projeto:

Agradeço minha esposa Clarissa, por me ouvir, por provocar em mim meus melhores insights, por segurar a barra sempre, às vezes até sozinha. Essa tese é sua também.

Agradeço ao meu pai pelo apoio incondicional, pelas melhores críticas, pela inspiração; e a minha mãe, pelo sorriso na hora certa, pelo carinho, por estar sempre disposta a ajudar. Agradeço a minha irmã que mesmo longe consegue transmitir seu entusiasmo com nosso trabalho.

Agradeço também ao meu cunhado Vitor, além de vibrar comigo por minhas conquistas, me ajudou no desenvolvimento do sistema hidropônico e pesagem dos vasos, sua vasta experiência com automação foi imprescindível.

Agradeço aos meus caros amigos de equipe, além de toda ajuda científica, nos conceitos, nas teorias, nos métodos, que tanto me fez evoluir, pelo apoio nos momentos mais complicados e por rimos juntos tantas outras vezes. Hidelblandi, Cintia, Danilo, Martha e Aglair estiveram presentes em todas as etapas desse doutorado.

Ao pessoal da iniciação científica pelo apoio e presteza. Aos nossos colegas de laboratório, pelo bom convívio e respeito.

A Socorro que me ajudou tantas e tantas vezes.

Aos meus queridos professores do Programa de pós-graduação em ciência do solo da UFRPE que tanto me ensinaram.

Ao meu estimado orientador, Professor Edivan Rodrigues, por não aceitar menos que nossa capacidade, pelas críticas, pelo desafio, por acreditar em nós e fazer todo o possível para que este trabalho fosse realizado.

Sou graduado, mestre e doutor pela UFRPE, tenho muito orgulho dessa ser minha origem científica, agradeço pelos anos de acolhida.

À CAPES pela concessão da bolsa de doutorado e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Agradeço também as empresas Compo do Brasil, Seminis do Brasil e Agrofito pelo suporte logístico e financeiro.

Sem vocês esse trabalho não seria possível.

Nitrogênio no tomateiro: sensoriamento remoto e eficiência de uso de água

RESUMO GERAL

Em cultivos de tomate a biodisponibilidade de nitrogênio é o principal agente limitante, por essa razão os ganhos de produtividade pelo uso de adubação nitrogenada têm repercutido em aumento no consumo de fertilizantes nitrogenados em escala global, sobretudo em olerícolas de alto valor agregado como o tomateiro, sendo, porém parte expressiva desse insumo aplicado ao solo perdido para o ambiente, sendo necessárias medidas que aumentem eficiência de uso desse nutriente. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar em ambiente controlado e em condição de campo respostas do híbrido de tomate TY-2006 (espectral, teores na folha, produtividade e consumo de água) em relação a biodisponibilidade do nitrogênio. Para tanto foi realizado um levantamento de campo e um experimento em ambiente controlado: primeiro, o levantamento em um cultivo comercial de tomate na região de Irecê-BA (Longitude 41° 51' 24". Oeste, Latitude 11° 17' 60" Sul (DMS)) visando isolar plantas do híbrido TY-2006 pela produtividade conforme a variabilidade espacial da biodisponibilidade de nitrogênio por meio do índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) e análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD), em uma área de 84x112m dividida em um grid de 49 células.; segundo, um experimento de cultivo hidropônico com o mesmo híbrido visando verificar o efeito de cinco concentrações crescentes de nitrogênio na solução nutritiva usada para cultivo (85,5; 128,3; 171; 213,8 e 256,1 ppm de N) na variação da massa fresca de plantas e consumo de água estimados por um sistema autônomo de pesagem dos vasos de cultivo, avaliando teor de nitrogênio foliar (TNF), o índice SPAD, eficiência quântica do fotossistema II(Ph), quenching não fotoquímico (NPQ), massa seca(MS), e a eficiência do uso da água (EUA). O levantamento mostrou que o NDVI e SPAD não foram capazes de separar pela produtividade plantas que variaram pela biodisponibilidade de nitrogênio de plantas que variaram pela ação de outros agentes estressantes. O experimento em ambiente controlado, mostrou que a superdosagem de nitrogênio na solução nutritiva provoca aumento de consumo de água pelo híbrido TY2006., e redução do NPQ, indicando que o aumento da biodisponibilidade de nitrogênio na solução nutritiva pode resultar em menor temperatura do limbo foliar.

Palavras-chave: Tomate, híbrido TY2006. NDVI. SPAD NDVI. SPAD. Consumo de água. Produtividade.

Nitrogen in tomato: remote sensing and water use efficiency

GENERAL ABSTRACT

In a scenario of water scarcity and population growth, the increase in the productivity of crops with a low consumption of water and energy resources is vital to guarantee food security on a global scale. Achieving the productivity and growth potential of an agricultural crop depends on the characterization and definition of several local attributes related to nutritional management. In tomato crops, nitrogen bioavailability is the main limiting agent, for this reason the use of nitrogen fertilization has increased, achieving productivity gains. However, the risks of contamination of groundwater and lake environments must be monitored, in addition to the increase in expenses with excessive dosages. The objective of this work was to analyze, in a tomato hybrid of determined growth, aspects related to the identification of non-destructive methods capable of characterizing a phenotypic variation caused by the accumulation of nitrogen in the plant tissue and physiological aspects related to the effect of increasing the concentration of nitrogen no water consumption. For this purpose, two experiments were set up: first, a survey was carried out in a commercial tomato crop in the region of Irecê-Ba classic to isolate phenotypes of the TY-2006 hybrid that varied by nitrogen availability through the normalized difference vegetation index (NDVI.) and soil-plant development analysis (SPAD), an experimental field of 0.9408ha was monitored for determinations of leaf nitrogen content, SPAD reading using a chlorophyllmeter, productivity data based on the weight of fruits per plant (PFP) and NDVI by image capture by a multispectral sensor coupled to a drone in an area of 84x112m divided into a 49 cell grid.; second, a hydroponic cultivation experiment with the same hybrid verifying the effect of five nitrogen cultures in the nutrient solution used for cultivation (85.5; 128.3; 171; 213.8 and 256.1 ppm of N) on variation in plant fresh mass and water consumption estimated by an autonomous system of weighing of pots. In addition, leaf nitrogen content (TNF), SPAD index, quantum efficiency of photosystem II (Ph), non-photochemical quenching (NPQ), dry mass (DM), and water use efficiency (USA) were analyzed. . The first experiment showed that NDVI and SPAD were not able to separate phenotypes that varied by nitrogen bioavailability from phenotypes that varied by the action of other stressors. The second experiment showed that the overdose of nitrogen in the nutrient solution causes an increase in water consumption, affecting the profitability of tomato crops.

Keywords: Nitrogen. NDVI. SPAD. Quantum efficiency of photosystem II. Water consumption. Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1. Localização da área de cultivo na Microrregião de Irecê-Ba	54
Figura 2. Imagem Vermelho (R), o Verde (G) e Azul (B) RGB da área estudada com detalhe em verde das linhas de cultivo	57
Figura 3. Mapa do índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI)	59
Figura 4. Grid de cores usado para a interpretação dos mapas coropléticos coloridos bivariados	61
Figura 5. Ajuste de regressão linear do teor de nitrogênio foliar (TNF) em relação ao índice análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD).....	65
Figura 6. Ajuste de regressão linear do teor de nitrogênio foliar (TNF) em relação ao Índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI)	66
Figura 7. Mapa da coroplético bivariado do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao teor de nitrogênio foliar (TNF) e outliers excluídos do grid pelo resíduo externo studentizado	67
Figura 8. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao teor de nitrogênio foliar (TNF)	68
Figura 9. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao teor de nitrogênio foliar (TNF) após a exclusão de outliers pelo teste de Tietjen-Moore na regressão PFPxTNF	69
Figura 10. Mapa da coroplético bivariado do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao Índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) e outliers excluídos do grid pelo resíduo externo studentizado.....	70
Figura 11. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI).....	71
Figura 12. Mapa da coroplético bivariado do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao índice de análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD) e outliers excluídos do grid pelo resíduo externo studentizado.....	72
Figura 13. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao índice análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD).....	73
Figura 14. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao índice análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD) após a exclusão de outliers pelo teste de Tietjen-Moore na regressão PFPxSPAD.....	74

Figura 15. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao teor de nitrogênio foliar (TNF) após a exclusão de outliers pelo teste de Tietjen-Moore na regressão PFPxSPAD	74
---	----

Capítulo 2

Figura 1. Sistema de exaustão para controle de umidade relativa do ar, refrigeração e iluminação artificial.....	92
Figura 2. Esquema e fotos dos contêineres de cultivo em camadas de vasos	93
Figura 3. Detalhe de níveis eletrônicos usados para limitar o volume da solução nutritiva nos contêineres	94
Figura 4. Esquema dos ciclos de irrigação e drenagem nos contêineres de cultivo.....	94
Figura 5. Detalhe da pinagem da controladora, relès e amplificadores hx711.....	95
Figura 6. Detalhe da conexão entre vasos por tubulação flexível	95
Figura 7. Sistema de bombeamento e drenagem individualizado por tratamento.....	96
Figura 8. Esquema do preenchimento da 3ª camada com as proporções de argila expandida e perlita.....	97
Figura 9. Esquema da recirculação das soluções nutritivas A e B	98
Figura 10. Detalhe da célula de carga utilizada na pesagem dos vasos	98
Figura 11. Regressão linear do teor de nitrogênio foliar(TNF) à concentração de nitrogênio na solução nutritiva do cultivo hidropônico de tomate (85,5; 128,3; 171; 213,8 e 256,1ppm)	102
Figura 12. Variação do índice SPAD em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva.....	103
Figura 13. Variação da eficiência quântica do fotossistema II (Ph) em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva.....	104
Figura 14. Variação do quenching não fotoquímico (NPQ) em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva.....	105
Figura 15. Regressão linear da massa fresca estimada por lisímetros de pesagem em relação aos dias de cultivo nos tratamentos 85,5; 128,3; 171; 213,8 e 256,1ppm.	107
Figura 16. Variação da massa seca das plantas (MS) em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva	109
Figura 17. Regressão polinomial de 2º grau do consumo hídrico acumulado(estimado por lisímetros de pesagem) em relação aos dias de cultivo nos tratamentos 85,5; 128,3; 171; 213,8 e 256,1ppm	110

Figura 18. Regressão polinomial de 2º grau da eficiência do uso de água (EUA) em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva112

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1. Características químicas do extrato de saturação e do complexo sortivo do solo na camada de 0-20 cm.....	54
Tabela 2. Características físicas do solo na camada de 0-20.....	54
Tabela 3. Parâmetros de estatística descritiva apresentando média (MM), desvio padrão (DP), mínimo (Min) e máximo (Max) de peso de frutos por planta(PFP), análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD em inglês)(, como índice de vegetação com diferença normalizada(NDVI em inglês), Teor de nitrogênio foliar(TNF).....	64
Tabela 4. Parâmetros da regressão linear por mínimos quadrados.....	65
Tabela 5. Parâmetros da regressão linear por mínimos quadrados.....	68
Tabela 6. Parâmetros da regressão linear por mínimos quadrados.....	70
Tabela 7. Parâmetros da regressão linear por mínimos quadrados.....	73

Capítulo 2

Tabela 1. Concentração de nutrientes em ppm e condutividade elétrica dos tratamentos utilizados.....	91
Tabela 2. Quantidade de sais utilizados na confecção da solução A.....	91
Tabela 3. Quantidade de sais utilizados na confecção da solução B.....	92
Tabela 4. Resultado da análise de variância para as variáveis ((SPAD); eficiência quântica do fotosistema II(Ph); Quenching não-fotoquímico(NPQ)); inclinação da reta ajustada entre massa fresca acumulada em relação aos dias após transplântio (a(MF)); inclinação da reta ajustada entre consumo hídrico acumulado em relação aos dias após transplântio (a(CH)) analisadas por comparação de médias	102
Tabela 5. Parâmetros(R^2 ; significância da inclinação da reta(p-a); inclinação da reta(a); significância do intercepto da reta no eixo y; intercepto da reta no eixo y(c)) da regressão realizada entre teor de nitrogênio foliar(TNF); (SPAD); eficiência quântica do fotosistema II(Ph); Quenching não-fotoquímico(NPQ) em relação a concentração de nitrogênio na solução nutritiva de cultivo(CN) aos 49 dias após o transplântio	103
Tabela 6. Parâmetros(R^2 ; significância da inclinação da reta(p-a); inclinação da reta(a); significância do intercepto da reta no eixo y; intercepto da reta no eixo y(c)) das regressões realizadas entre a massa fresca acumulada(MF) em cada tratamento(T1 = 85,5ppm; T2 = 128,3;	

T3 = 171ppm; T4 = 213,8ppm e T5 = 256,1ppm) em relação aos dias após o transplântio(D)
.....108

Tabela 7. Comparação da inclinação da reta (a) das regressões ajustadas entre massa fresca acumulada(MF) e os dias após o transplântio(D) entre os tratamentos(T1 = 85,5ppm; T2 = 128,3; T3 = 171ppm; T4 = 213,8ppm e T5 = 256,1ppm) pelo teste de tukey a 5%108

Tabela 8. Parâmetros(R^2 ; significância da inclinação da reta(p-a); inclinação da reta(a); significância do intercepto da reta no eixo y; intercepto da reta no eixo y(c)) da regressão realizada entre a massa seca acumulada(MS) em relação a concentração de nitrogênio na solução nutritiva de cultivo(CN) aos 49 dias após o transplântio.....109

Tabela 9. Parâmetros(R^2 ; significância da inclinação da curva(p-a); inclinação da curva(a); significância do intercepto da reta no eixo y; significância do sentido da curva após o intercepto em y(p-b); sentido da curva após o intercepto em y (b); significânciado; intercepto da reta no eixo y(p-c); intercepto da reta no eixo y(c)) das regressões polinomiais realizadas entre o consumo hídrico acumulado(CH) em cada tratamento(T1 = 85,5ppm; T2 = 128,3; T3 = 171ppm; T4 = 213,8ppm e T5 = 256,1ppm) em relação aos dias após o transplântio(D)....111

Tabela 10. Comparação da inclinação da curva (a) das regressões polinomiais ajustadas entre o consumo hídrico acumulado(CH) e os dias após o transplântio(D) entre os tratamentos(T1 = 85,5ppm; T2 = 128,3; T3 = 171ppm; T4 = 213,8ppm e T5 = 256,1ppm) pelo teste de tukey a 5%.....111

Tabela 11.. Parâmetros(R^2 ; significância da inclinação da curva(p-a); inclinação da curva(a); significância do intercepto da reta no eixo y; significância do sentido da curva após o intercepto em y(p-b); sentido da curva após o intercepto em y (b); significânciado; intercepto da reta no eixo y(p-c); intercepto da reta no eixo y(c)) das regressões polinomiais realizadas entre a eficiência do uso da água(EUA) em relação a concentração de nitrogênio na solução nutritiva de cultivo(CN) aos 49 dias após o transplântio.....112

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
1 INTRODUÇÃO GERAL	18
1.1 Hipóteses	19
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Ambiente de cultivo e variabilidade fenotípica do tomateiro.....	21
2.2 Uso de sensoriamento remoto na identificação de fenótipos de plantas.....	23
2.3 Índices de vegetação e SPAD e o status nutricional em nitrogênio.....	25
2.4 Aumento do consumo de nitrogênio	29
2.5 Impacto ambiental da ineficiência da adubação nitrogenada	31
2.6 Estudos sobre status hídrico e status nutricional em nitrogênio	31
2.7 Conclusões	33
Referências Bibliográficas.....	35
3 SENSORIAMENTO COM CÂMERA MULTIESPECTRAL E CLOROFILÔMETRO NA AVALIAÇÃO DA VARIBILIDADE DO NITROGÊNIO EM TOMATE.....	47
Resumo	47
Abstract.....	48
3.1 Introdução	49
3.2 Material e Métodos	53
3.2.1 Localização e caracterização da área monitorada.....	53
3.2.2 Descrição e condução da cultura	55
3.2.3 Coleta dos dados.....	56
3.2.3.1 Grid de amostragem.....	56

3.2.3.2	Coleta e análise dos teores de clorofila e nitrogênio foliar e do peso de frutos por planta	57
3.2.4	Captura de imagens por drone, processamento e análise	57
3.2.5	Determinação do NDVI	58
3.2.6	Determinação dos teores de clorofila e teor de nitrogênio	59
3.2.7	Determinação da massa total dos frutos	60
3.2.8	Análise de dados	60
3.2.8.1	Mapas coropléticos coloridos bivariados	60
3.2.8.2	Análise de regressão	61
3.2.8.3	Critério para identificação de outliers (Tietjen-Moore)	62
3.3	Resultados e Discussão	63
3.3.1	Estatística descritiva	63
3.3.2	Regressão entre os índices SPAD, NDVI e o teor de nitrogênio foliar	65
3.3.3	Teor de nitrogênio foliar e peso de fruto por planta	67
3.3.4	Índice de vegetação com diferença normalizada e peso de fruto por planta	69
3.3.5	Análise de SPAD e peso de fruto por planta (PFP)	72
3.4	Conclusões	75
	Referências Bibliográficas	77
4	PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA E CONSUMO HÍDRICO DE TOMATE HIDROPÔNICO COM CONCENTRAÇÕES CRESCENTES DE NITROGÊNIO	84
	Resumo	84
	Abstract	85
4.1	Introdução	86
4.2	Material e Métodos	90
4.2.1	Localização e caracterização do local do experimento	90
4.2.2	Delineamento experimental e estatística	90
4.2.3	Definição dos tratamentos	90
4.2.4	Sistema hidropônico	92

4.2.5	Análises realizadas	99
4.2.5.1	Produção de biomassa.....	99
4.2.6	Performance fotossintética	100
4.2.6.1	Fluorescência da clorofila.....	100
4.2.7	Índice SPAD.....	101
4.2.8	Teor de Nitrogênio foliar.....	101
4.2.9	Consumo hídrico	101
4.3	Resultados e Discussão.....	101
4.3.1	Desempenho fotossintético e teor de Nitrogênio foliar.....	102
4.3.2	Consumo hídrico e produção de biomassa	106
4.4	Conclusões.....	115
	Referências Bibliográficas.....	116
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	123

1 INTRODUÇÃO GERAL

Em um cenário de escassez hídrica e crescimento populacional o aumento da produtividade das culturas com baixo consumo de recursos hídricos e energéticos é vital para a garantia da segurança alimentar em escala global. Para isso é recomendável aperfeiçoar o uso dos recursos disponíveis amenizando-se os custos ambientais, financeiros e energéticos envolvidos na produção agrícola, melhorando a aplicação de fertilizantes e buscando estratégias mais eficientes de irrigação.

Água e nitrogênio são os principais fatores que afetam diretamente a produtividade de ambientes agrícolas. O manejo eficiente destes dois fatores na agricultura pode melhorar o crescimento, taxa de fotossíntese e reprodução das espécies cultivadas, ao mesmo tempo em que ameniza o risco de poluição de rios lagos e oceanos e água de subsolo por nitrato.

A resposta espectral do estresse em plantas é uma ferramenta de fenotipagem que deve ser usada no manejo da adubação nitrogenada. Com a popularização do uso de sensores multiespectrais acoplados a drones e clorofilômetros, o uso de manejos balizados em informações espectrais de cultivos comerciais tende a aumentar.

O mapeamento da resposta espectral das plantas tem permitido o uso de índices de vegetação que se relacionam a capacidade fotossintética das plantas (como o NDVI) e SPAD na caracterização de fenótipos afetados pela disponibilidade de nitrogênio. No entanto, os parâmetros usados por estes índices se relacionam a outros agentes estressantes além da biodisponibilidade de nitrogênio o que gera incertezas sobre a real capacidade de se identificar fenótipos exclusivamente afetados pela disponibilidade de nitrogênio apenas checando a proporção de absorção e reflexão de frequências de onda específicas do espectro eletromagnético.

Além disso, a interação entre mais de um fator ambiental estressante, como disponibilidade de água e disponibilidade de nitrogênio, pode aumentar os erros de estimativas de variabilidade fenotípica com base no NDVI e SPAD. E dada a interação entre biodisponibilidade de nitrogênio e transpiração, é possível que seja relevante o efeito de dosagens excessivas de nitrogênio no aumento consumo de água.

Atualmente duas perguntas parecem estar no centro dos objetivos de pesquisas que visam a otimização do manejo nutricional do nitrogênio em cultivos comerciais de tomate. Primeiro, é viável o uso de NDVI e SPAD para identificar o efeito da variabilidade do nitrogênio acumulado em tecido vegetal na produtividade? Segundo, a interação entre

disponibilidade de nitrogênio e consumo de água pode limitar a aplicação de fertilizantes nitrogenados pelo aumento da demanda hídrica acumulada.

A fim de avançar na busca de respostas para estas duas perguntas essa tese foi dividida em três capítulos:

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO 3: SENSORIAMENTO COM CÂMERA MULTIESPECTRAL e CLOROFILÔMETRO NA AVALIAÇÃO DA VARIBILIDADE DO NITROGÊNIO em TOMATE

CAPÍTULO 4: PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA E CONSUMO HÍDRICO DE TOMATE HIDROPÔNICO SOB CONCENTRAÇÕES CRESCENTES DE NITROGÊNIO.

1.1 Hipóteses

As frequências de onda usadas na confecção dos índices NDVI e SPAD por se relacionarem ao conteúdo de pigmento fotossintetizante das folhas possibilitam a identificação da variação espacial da disponibilidade de nitrogênio, a despeito de ruídos de respostas espectrais similares causados por outros fatores ambientais estressantes que também possam afetar fotossíntese e crescimento do híbrido de tomate TY-2006.

O aumento da biodisponibilidade de nitrogênio repercute em maior consumo de água, assim como em maior produção de biomassa pelo híbrido de tomate TY-2006 de modo que não há perdas na eficiência do uso de água, pois a maior demanda hídrica para o cultivo é proporcionalmente compensada pelo maior acúmulo de matéria seca.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse estudo foi avaliar em condição de campo e em ambiente controlado respostas fenotípicas (espectral, produtividade e consumo de água) do híbrido de tomate TY-2006 em função da biodisponibilidade de nitrogênio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a variabilidade espacial do teor de nitrogênio foliar de uma área de cultivo comercial de tomate

- Avaliar a produtividade do híbrido de tomate de crescimento determinado TY-2006 com base em peso de frutos por planta em relação ao teor de nitrogênio foliar
- Caracterizar a variabilidade espacial dos índices NDVI e SPAD e comparar estas respostas em relação ao teor de nitrogênio foliar
- Adaptar um sistema hidropônico com irrigação autônoma mantendo disponibilidade ideal de água
- Adaptar sistema autônomo de pesagem para os vasos de cultivo hidropônico
- Verificar o efeito do aumento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva de tomate cultivado hidroponicamente no consumo de água e eficiência quântica do fotossistema II.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ambiente de cultivo e variabilidade fenotípica do tomateiro

A produtividade de culturas cultivadas resulta de diversas interações de causalidade entre o aparato genético da planta (genótipo) e as condições climatológicas de meio de cultivo sob as quais essa planta se desenvolve (ambiente) (TARDIEU et al., 2017).

A adaptação de genótipos desenvolvidos por melhoramento genético visando a obtenção de fenótipos mais produtivos em diferentes cenários pressupõe a caracterização do ambiente de cultivo identificando a qualidade e quantidade de estímulos e inputs locais nos processos fisiológicos desses genótipos (TIRADO, 2020). Esse processo visa a modelagem da produtividade do genótipo em relação a valores de referência de parâmetros ambientais conforme a variação de características edáficas e climáticas de interesse agrônomo (CHANG et al., 2019).

Porém, há custos atrelados ao monitoramento da variação espacial e temporal das características ambientais pela aquisição de sensores, coleta de amostras e análises, como também há custos atrelados à manipulação ambiental para a manutenção de condições alvo (ROITSCH et al., 2019; REYNOLDS et al., 2019); PRATAP et al., 2019).

Do ponto de vista da produção agrícola ocorrem tanto genótipos que mantem produtividade média em uma ampla variedade de condições, como também genótipos mais especializados cujo ganho de produtividade está condicionado a uma gama de cenários de crescimento mais restritivo (NDLOVU, 2020). No passado, o melhoramento genético de olerícolas em geral, se pautava em selecionar variedades com características desejadas, mas ao mesmo tempo com robustez de respostas adaptativas e plasticidade a um amplo gradiente de condições ambientais (SHENDE, 2012).

No Brasil, por exemplo, a cultivar de tomate Santa Clara foi o material de crescimento indeterminado mais utilizado em todas as regiões produtoras do país até fim da década de 1990 e cultivar IPA-6 foi o material de crescimento determinado mais cultivado comercialmente no em todo o nordeste no mesmo período (NAGAI, 1991, MARTINS et al., 2017).

Ao longo do desenvolvimento da tomaticultura brasileira, especificidades mercadológicas e ambientais das diferentes regiões produtoras do país impuseram desafios menos generalistas. Uma ampla diversidade de soluções genéticas customizadas a condições locais passaram a ser ofertadas por empresas brasileiras e multinacionais focadas na produção de sementes de materiais melhorados (AMARAL, 2017).

Nesse sentido, em olerícolas de alto valor agregado como o tomate o melhoramento genético passou a agregar características específicas ao produto do melhoramento (ACHARYA et al., 2018) e a técnica de hibridização tem desenvolvido materiais altamente produtivos (SINGH et al., 1999) que permitem maior adensamento (BEUMER; EDELENBOSCH., 2019), resistentes a doenças (ALMEIDA et al., 2020) e pragas (DAWOOD, 2020), e com melhor qualidade de fruto (AVDIKOS et al., 2021), mas ao mesmo tempo adaptados a condicionantes ambientais mais específicas.

Essa migração de modelo de solução genética pela qual passou a tomaticultura brasileira, de genótipos adaptados a uma ampla variedade de cenários ambientais para genótipos customizados para condições ambientais específicas (MELO et al, 2008), não foi acompanhado por processos de fenotipagem pela produtividade visando caracterizar valores de referência de parâmetros ambientais específicos de cada região produtiva para cada híbrido comercializado (ZUBA et al., 2011; NOWAKI et al., 2017).

As recomendações de adubação dos manuais, indicando valores de referência para os estados da federação brasileira não consideravam a diversidade de solos, diversidade de genótipos usados e características locais, predominando caracterizações mais amplas considerando diferenças entre estados ou regiões, mas desconsiderando as diferenças de características dentro dessas regiões geográficas mais amplas, tratando como uniformes uma grande diversidade de características. A recomendação era simplesmente dividida entre adubação para tomate indeterminado e adubação para tomate determinado e os intervalos de referência muito amplos (INGLE, 1989; SBCS, 2004; FREIRE, 2013; PAVINATO et al., 2017).

A realidade tecnológica de cultivo das cultivares Santa Clara e IPA-6 nas décadas de 1980 e 1990 se adequava a esses valores de referência mais amplos, mas o mesmo ajuste não é possível para os híbridos predominantes na tomaticultura brasileira a partir da década de 2000 (ZUBA et al., 2011; NOWAKI et al., 2017), cujo contexto ideal de cultivo requer valores de referência dentro de um limite de valor crítico mais estreito, sob menor variabilidade, direcionadas para áreas menores agrupadas por características mais homogêneas (KIANI; SIAHCHEHREH, 2018).

Com o avanço do uso de tomates híbridos no país essas recomendações de manuais caíram em desuso e passou a ser mais viável para tomaticultores ajustarem suas recomendações de adubação empiricamente ou a partir de pequenos ensaios locais o que permitiu recomendações mais adaptados para os diferentes contextos de cultivo (NOWAKI et al., 2017), mas ao mesmo tempo abriu margem para erros de diagnóstico, por nem sempre o método

experimental usado ser o mais adequado para a confecção de valores de referência nesses levantamentos empíricos.

A ampla variedade de cenários ambientais e de genótipos utilizados para cultivo dificulta a identificação de valores de referência específicos para cada condição por pesquisas mais direcionadas (REYNOLDS et al., 2019), pois os métodos tradicionais de fenotipagem vegetal se baseiam na inspeção manual de plantas e amostragem de tecido *in loco* para posterior análise em laboratório, o que é trabalhoso, leva muito tempo, demanda maior número de pessoal treinado e custa mais caro (WHITE et al., 2012). Nem sempre é viável financeiramente o monitoramento contínuo de áreas extensas por estes métodos.

Ao longo dos anos tem sido uma tarefa complexa a tentativa de identificar e organizar a informação gerada a partir de variáveis quantitativas que melhor expressem a interação de sistemas biológicos em seus ambientes de desenvolvimento (STANTON et al., 2000; CHAWADE et al., 2019; MULLER; MARTRE; 2019; LEW et al., 2020).

A dificuldade nesse processo se relaciona a multiplicidade de dimensões espaciais e temporais a serem entendidas conjuntamente (NABWIRE et al., 2021; CHAWADE et al., 2019), pois há ampla possibilidade combinatória entre a forma e intensidade que cada fator que interesse agrônomo interage as culturas cultivadas (STANTON et al., 2000). Assim não é possível contemplar especificamente em um modelo a realidade de todos os contextos possíveis de cultivo (MULLER; MARTRE; 2019), pois a maior abrangência requer alta resolução temporal e espacial de múltiplas variáveis (LEW et al., 2020), o que tem elevado custo de análises (WHITE et al., 2012) e processamento de dados (NABWIRE et al., 2021).

2.2 Uso de sensoriamento remoto na identificação de fenótipos de plantas

Estudos têm mapeado diversas alterações de características anatômicas de plantas como o conteúdo de pigmentos (LI et al., 2018; MOHAMMED et al., 2019), teor relativo de água de tecidos (MEGUEKAM et al., 2021; KONINGS; RAO, 2019), diferentes estados de lignificação de tecidos (BHUIYAN et al., 2009; VANSELOW et al., 2021), variação de cor (FENG et al., 2020) e arquitetura de plantas (WANG et al., 2019), características sujeitas a alterações pela ação de diversos agentes estressantes bióticos e abióticos.

Estas alterações de cunho morfológico e fisiológico podem corresponder a respostas em regiões mais sensíveis do espectro às diferenciações biofísicas e bioquímicas (JIN et al., 2018), como o aumento da refletância da banda vermelha e redução da banda infra-vermelha próxima em plantas submetidas a condições de estresse hídrico e deficiência nutricional de nitrogênio (FENG et al., 2020).

Esses dados espectrais podem ser capturados por sensores óticos usados manualmente, direto no campo (DEERY et al., 2014) ou embarcado em veículos que possam transportá-lo permitindo a captura à distância (TATTARIS et al., 2016).

A capacidade de relacionar dados espectrais do tecido vegetal a aspectos relacionados a fisiologia vegetal fez com que o sensoriamento remoto passasse a fazer parte do instrumental utilizado na avaliação da variação espacial da produtividade de plantas nas últimas décadas, graças a sua habilidade de coletar dados espaciais de forma contínua na superfície de paisagens (HAN et al., 2018)

O sensoriamento remoto faz parte de um conjunto de técnicas analíticas capazes de monitorar respostas fisiológicas e morfológicas das plantas assim como as alterações de características químicas e físicas do ambiente (DENG et al., 2018), permitindo o aumento de área monitorada ao nível global (JUNG et al., 2021), o aumento de amostras por unidade de área (KARTHIKEYAN et al., 2020), o número de amostras ao longo do tempo (WOODCOCK et al., 2020) e o número de variáveis estudadas (HERMAN et al., 2018; HOLLOWAY; MENGERSEN, 2018). Hoje tem-se a percepção de que métodos autônomos de modelagem podem resolver a dificuldade de processamento de grandes bancos de dados (JIN et al., 2018).

Porém, do ponto de vista dos custos com análise não é viável a geração dessa quantidade de dados experimentalmente. Ainda é preciso se viabilizar estratégias de compartilhamento e controle de qualidade de dados gerados em ambientes comerciais de cultivo visando atingir a formulação de bancos de dados mais amplos e confiáveis, contemplando uma maior diversidade de cenários ambientais testados (MADSEN et al., 2020).

A complexidade logística para o design de experimentos que contemplem múltiplas interações entre fatores pode ser superada pela caracterização da causa e extensão da variabilidade da produtividade no *locus* de desenvolvimento da planta em múltiplos cenários de cultivo usando a variabilidade espontânea de campos comerciais (ARNOLD et al., 2019).

As técnicas de sensoriamento baseadas na resposta espectral das plantas podem facilitar a captura de dados para estimar parâmetros que permitem essa caracterização em campos comerciais (TARDIEU et al., 2017). A característica experimental de isolamento de variáveis é alcançada pela separação de populações diferentes do mesmo organismo na área sob monitoramento (diferentes fenótipos) (MALOSETT et al., 2013; WANG et al., 2015; AGYEMAN et al., 2021), classificando-as pelos distintos fatores limitantes no cultivo.

Nesse sentido o foco do sensoriamento remoto na fenotipagem é agrupar populações semelhantes de fenótipos classificando grupos por causas distintas de variabilidade da produtividade (SKOBELEV et al., 2019). Ou seja, identificar zonas de plantas homogêneas em

produtividade ,dada a variabilidade espacial de atributos ambientais limitantes ao cultivo (FALCO et al., 2021; BENAMI et al., 2021).

O cálculo de suficiência amostral condiciona o número de amostras necessárias para a caracterização representativa de uma área de acordo com a variabilidade do parâmetro observado e do erro tolerável nas estimativas, sendo maior o número de amostras quanto maior a variabilidade e menor o erro tolerável (GUERIF et al., 2000). A identificação de zonas homogêneas permite reduzir o número de amostras necessárias para uma caracterização, por haver menor variabilidade dentro de uma mesma zona (DE GROOTE; TRAORÉ, 2005).

2.3 Índices de vegetação e SPAD e o status nutricional em nitrogênio

Ambientes variam espacial e temporalmente na qualidade e quantidade de estímulos e inputs que podem condicionar o desenvolvimento das plantas (CHEN et al., 2021) incluindo a disponibilidade de água, disponibilidade de nutrientes, radiação incidente, fotoperíodo, composição atmosférica, temperatura, umidade relativa do ar, etc (FURBANK; TESTER, 2021). Um dos aspectos mais estudados do ponto de vista de condicionante ambiental para ganho de produtividade tem sido o efeito da biodisponibilidade de nitrogênio, pelo fato deste ser um dos fatores ambientais mais limitantes em ambientes de cultivo (LEMAIRE e GASTAL, 2018).

A estimativa do *status* nutricional de nitrogênio em plantas pode ser dividida em dois tipos: dados oriundos de métodos destrutivos e não-destrutivos de amostras (SIMONNE et al., 1994; ALIE et al., 2017).

O método padrão é destrutivo, envolve análise do conteúdo de nitrogênio o qual é quantificado pela técnica de Kjeldahl após a digestão do tecido vegetal (SIMONNE et al., 1994). Essa técnica tem elevado custo por amostra e requer tempo e pessoal capacitado para sua realização, além de requerer uma estrutura de equipamentos de laboratório (JONES; MOSELEY, 1993; VIGNEAU et al., 2011). Tendo em vista a alta variabilidade espacial da disponibilidade de nitrogênio e os custos com análises, a caracterização contínua de áreas extensas, ou de múltiplas áreas, por meio do método destrutivo de determinação de nitrogênio não é viável.

Por essa razão avançaram estudos que correlacionam a concentração de nitrogênio em tecido vegetal a características físicas e bioquímicas de plantas que geram respostas espectrais características sendo passíveis de serem capturadas por scanners e sensores óticos (DU et al., 2018). Isso permite que métodos não destrutivos e menos dispendiosos para estimativa do *status*

nutricional de plantas possam ser usados para identificar zonas homogêneas quanto ao acúmulo de nitrogênio em tecido vegetal (TAN et al., 2018).

Remonta a Gates et al. (1964) a confirmação de que a radiação solar total absorvida pelas folhas é diretamente relacionada a quantidade de pigmentos fotossintetizantes presente no tecido vegetal. A clorofila total (clorofila a + clorofila b) contidas no cloroplasto constitui a maior parte dos pigmentos fotossintetizantes em plantas exploradas na agricultura.

Camp et al. (1982) avaliaram alterações em enzimas relacionadas a fotossíntese e atividade fotossintética no processo de senescência de folhas de trigo, provaram que a redução da fotossíntese em folhas senescentes era resultado da redução do número total de cloroplastos repercutindo em perda de pigmentos fotossintetizantes. Este estudo abriu caminho para diversos trabalhos posteriores que relacionaram o efeito de agentes estressantes na redução da taxa de fotossíntese de plantas, pelo déficit hídrico (WANG et al., 2018), por deficiência de nitrogênio (XIONG et al., 2018) e pela ação de agentes fitopatológicos (LU; YAO, 2018) que dispararam na planta processos similares ao da senescência das folhas (FIELD et al., 1995; SCHLEMMER et al., 2013).

A partir de então a identificação de comprimentos de onda capazes de monitorar alterações no conteúdo de clorofila passou a ser o foco de estudos que tentaram calibrar coeficientes de absorção da luz pelas folhas em relação a razão de energia luminosa incidente a qual ocorre durante a captura de luz no fotossistema II (SCHLEMMER et al., 2013), ou seja na clorofila da membrana dos tilacoides no interior dos cloroplastos.

Foi descoberto que em plantas o coeficiente de absorção da luz incidente nos espectros verde (~550 nm) e vermelho próximo (~700 nm) era mais lentamente absorvido que nos espectros azul (~450 nm) e vermelho (~650 nm) (HENIK, 2012). Entretanto, a profundidade de penetração da luz no tecido vegetal mostrou-se maior no verde e no vermelho próximo. Estudos também mostraram que mais de 80% da luz incidente entre 400 e 700 nm era absorvida (MOSS et al., 1952).

O resultado disso é que os espectros verde e vermelho próximo são mais sensíveis a alterações no conteúdo de clorofila que outras frequências de onda. Essas conclusões foram metodologicamente descritas pelo estudo de Gitelson et al. (2003) o qual demonstrou a relação entre conteúdo de clorofila foliar e refletância espectral.

Além disso, ao estudar propriedades espectrais a nível molecular de diversas espécies, Gates et al. (1964) mostraram que conforme as cores e uma amostra de tecido vegetal variava de mais claras para mais escuras a absorbância no espectro do visível aumentava. Este estudo demonstrou que a absorbância máxima ocorria a 680 nm e que a mínima ocorria a 550nm.

O entendimento sobre o comportamento espectral das plantas apresentou a oportunidade de correlacionar o status de qualidade e saúde de vegetais - e o que é mais importante – populações de plantas conjuntamente por abordagens não destrutivas, interpretando a quantidade de luz incidente absorvida e refletida em frequências de onda específicas. Esses estudos abriram caminho para todo um instrumental ótico usado na fenotipagem de plantas (Ζηαγγ; Ηθαγγ, 2014; Μισηρα et al., 2016).

O conceito de avaliar a quantidade de luz incidente e refletida em diferentes frequências de onda tem sido utilizado para o desenvolvimento de diversas proporções entre frequências de onda conjuntamente conhecidos como índices de vegetação. Estes são sensíveis a diferentes parâmetros ambientais e fisiológicos Hatfield et al. (2008). O índice de vegetação mais utilizado é o índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI), é amplamente utilizado na identificação de zonas de manejo para adubação nitrogenada (SOZZI et al., 2021).

Desenvolvido no fim da década de 1970 (DEERING, 1978) o NDVI foi amplamente aceito pela sua facilidade, usa apenas duas frequências de onda, conforme equação abaixo:

$$NDVI = \frac{(NIR - Ver)}{(NIR + Ver)}$$

NIR = Infra vermelho; Ver = Vermelho.

e pela importante característica fisiológica com que se relaciona (capacidade fotossintética e crescimento). Esse índice foi correlacionado a status de nitrogênio na planta, teor de clorofila, biomassa foliar, estresse hídrico, incidência de doenças fungicas, ataque por afídeos e produtividade (MA et al., 1996; SHANAHAN et al., 2001; SHANAHAN et al., 2003; SOLARI et al., 2008). Aplicando a normalização, a proporção de frequência de onda do espectro eletromagnético absorvida e refletida se resume a uma relação que varia de -1 a 1, permitindo a comparação de respostas espectrais em diferentes ambientes (CRIPPEN, 1990).

Muitos agentes estressantes diferentes podem causar variação espectral similar no infravermelho e vermelho (GERHARDS et al., 2019). De modo que o NDVI pode não ser capaz de separar o efeito de dois agentes estressantes com resposta espectral similar, causando erros no entendimento sobre a disponibilidade de N (HOLMAN et al., 2019). Por essa razão tem avançado estudos com sensores hiperespectrais para diferenciar fenótipos precisamente pelo agente estressante (FENG et al., 2020; MISHRA et al., 2020; LIU et al., 2020). Estudos com sensoriamento pela assinatura espectral têm sido bem-sucedidos em separar estresses múltiplos (SANKARAN et al., 2019), mas esses sensores são ainda muito caros (MAHLEIN et al., 2018).

Como o NDVI pode ser gerado por equipamentos mais simples e baratos como câmeras multiespectrais, é importante buscar métodos para reduzir os erros os quais o NDVI é passível (MAHLEIN et al., 2018).

Com o avanço de tecnologias que popularizaram a possibilidade de realização de voos de sondagens como os drones assim como a redução de peso, tamanho e aumento da eficiência energética de sensores multiespectrais, a combinação destas duas tecnologias tem promovido o aumento do uso de índices de vegetação em rotinas do manejo agrícola e esse uso tende a crescer ainda mais nos próximos anos (YANG et al., 2017).

A correlação de dados de produtividade e dados espectrais de índices de vegetação (a exemplo do NDVI) capturados pelo sensoriamento remoto por câmeras multiespectrais acoplados a drones pode ser uma fonte viável para compartilhamento por produtores e prestadores de serviço (PIERUSCHKA e SCHURR, 2019).

No entanto o principal parâmetro usado para a identificação da sanidade vegetal pelo sensoriamento remoto é indicativo da atividade fotossintética a qual pode ser afetada similarmente por diferentes agentes ambientais estressantes (GAMON et al., 1995). Assim variações ambientais de fatores diferentes podem causar respostas fisiológicas similares de senescência foliar. Essa pode ser a fonte de erros ao se agrupar plantas sujeitas a inputs e estímulos ambientais distintos como fenotipicamente homogêneas apenas com base em valores de NDVI (MAGNEY et al, 2020).

Do ponto de vista da identificação de zonas de manejo na agricultura, o zoneamento pautado exclusivamente no NDVI para manejo de adubação nitrogenada com taxa variável pode levar ao aumento de dosagens de fertilizantes em locais de baixo NDVI (URIBEETXEBARRIA et al. 2021).. Isso pode ocorrer quando a redução de produtividade não for causada pela deficiência de nitrogênio, mas pela ação de outro(s) agente(s) estressante(s), reduzam a produção de biomassa e/ou o acúmulo de pigmentos fotossintetizantes no tecido da cultura cultivada (MAGNEY et al, 2020).

Nesses casos a estimativa do *status* nutricional em nitrogênio com base no NDVI tende a relacionar o baixo NDVI aos sintomas de deficiência de nitrogênio, essas plantas seriam agrupadas em zonas deficientes em nitrogênio demandando maiores doses de adubo onde eventualmente esse não tenha sido o fator limitante (GAMON et al., 1995). Por essa razão novos trabalhos têm buscado métodos para separar populações em uma mesma área de cultivo sujeitos agentes estressantes distintos (URIBEETXEBARRIA et al. 2021).

Considerando que múltiplos agentes estressantes ocorrem simultaneamente no campo, Peteinatos et al. (2016) achou importante buscar métodos baseados em sensores óticos que

puddessem separar por agentes estressantes populações diferentes de uma mesma cultivar de trigo em uma mesma área de manejo. Tentou usar sensores óticos para separar quatro fatores limitantes do desenvolvimento em um campo de cultivo (privação de água, acúmulo de nitrogênio em tecido vegetal, presença de erva daninha e infecção fungica), mas concluiu que as interações entre os fatores dificultaram a separação das plantas sob diferentes agentes estressantes, sendo possível apenas separar plantas estressadas e plantas não estressadas, bem como o estágio de desenvolvimento em que ela se encontra, mas não o principal agente estressante.

Técnicas autônomas de fenotipagem com quantificação simultânea de múltiplas características morfológicas e fisiológicas (NDVI, fluorescência da clorofila a e índice SPAD), segundo Lazarević et al. (2021), foram capazes de separar populações de plantas sujeitas a dois fatores estressantes distintos (salinidade e seca).

Por sua vez, Karimi et al. (2018) foram bem-sucedidos em diferenciar o efeito combinado de diferentes níveis de nitrogênio e intensidades de competição por erva daninha em milho usando imageamento hiperespectral. E Backoulou et al. (2020) usou câmera hiperespectral para separar estresse causado pelo ataque de afídeos de outros agentes estressantes em trigo.

foram bem-sucedidos em É possível separar plantas cujo desenvolvimento foi limitado por diferentes agentes estressantes bióticos e abióticos (oídio, ferrugens, déficit hídrico e deficiência nutricional em nitrogênio) por meio de sensoriamento remoto com câmeras hiperespectrais (GUAN et al., 2020). Cheng et al. (2019) foram capazes de correlacionar por meio da transformada contínua de wavelet o conteúdo de água de folhas a dados hiperespectrais captados por sensoriamento remoto. Já Huang et al. (2018) separaram plantas sujeitas a estresse biológico de plantas sujeitas a déficit hídrico e deficiência de nitrogênio, também baseado em sensoriamento por meio de câmeras hiperespectrais.

2.4 Aumento do consumo de nitrogênio

Nitrogênio é um dos nutrientes essenciais cuja disponibilidade no solo mais varia a depender da quantidade e características da matéria orgânica do solo (CONG et al., 2015), que pode fixar ou disponibilizar este elemento de acordo com aspectos ambientais e edáficos (HEIL et al., 2016). Quando não ligado aos compostos da matéria orgânica do solo é instável e sujeito a perdas para o ambiente (GHALY; RAMAKRISHNAN, 2015), dependendo de pH, temperatura, estado oxidativo do solo e presença de comunidades microbiológicas específicas (BARAKAT et al., 2016; KUYBERS et al., 2018).

Além disso, a variação local de relevo, condições de umidade do solo, sombreamento e características anatômicas e bioquímicas de cultivos pretéritos podem favorecer a alta variabilidade espacial em pequenas distâncias em relação a disponibilidade de nitrogênio na solução nutritiva (ROMPRÉ et al., 2015). Muitas vezes em ambientes agrícolas o manejo adotado não favorece a disponibilização no solo das quantidades de nitrogênio demandadas pelas culturas cultivadas apenas pela ciclagem da matéria orgânica (SHARMA et al., 2015). Nesses casos a prática da adubação nitrogenada pode amenizar o efeito limitante da insuficiência de nitrogênio disponível promovendo aumento de produtividade (PADILLAET al., 2020).

A biodisponibilidade de nitrogênio é por essa razão um dos mais importantes fatores limitantes ao crescimento e produtividade das plantas tanto em ambientes naturais como em ambientes agrícolas (MOREAU et al., 2019).

A raiz das plantas absorve nitrogênio principalmente nas formas de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) (ALEMÁN et al., 2014). Na maior parte dos solos a forma predominante de N é NO_3^- , resultado da rápida conversão microbiana de N ligado à matéria orgânica do solo e do NH_4^+ em NO_3^- (KUYPERS et al., 2018), o preenchimento dos poros do solo pela água é que condicionam o estado redox do ambiente, fator determinante para a direção das transformações do nitrogênio no solo

Como os íons de NH_4^+ são adsorvidos pelas partículas coloidais do solo sua lixiviação no perfil do solo é significativamente restrita (GHALY; RAMAKRISHNAN, 2015). Adversamente, o NO_3^- (a forma mais móvel de N em ecossistemas) não é tão facilmente retido pelos coloides do solo e por essa razão sua lixiviação até a águas do subsolo é altamente provável em condição de condutividade hidráulica favorável (GHALY; RAMAKRISHNAN, 2015)

Essa suscetibilidade a perdas pela instabilidade das formas reduzidas de N e ciclagem de nutrientes pela matéria orgânica do solo limitada em ambientes agrícolas tem implicado em quantidades insuficientes - para a maior parte das culturas agrícolas - deste elemento em solos sem a adição de adubos nitrogenados (ROBERTSON; VITOUSEK, 2009).

Esse fato atrelado ao papel crítico deste elemento em funções vitais diretamente relacionadas à produtividade (crescimento e fotossíntese) tem feito com que o uso de adubação nitrogenada tenha ampliado nos últimos 100 anos com ganhos de produtividade (LU et al., 2017; CAO et al., 2018). Globalmente o uso de fertilizantes nitrogenados excedeu 118 milhões de toneladas em 2020 e estima-se que houve aumento de 8% do consumo nos últimos 5 anos (FAO, 2017).

2.5 Impacto ambiental da ineficiência da adubação nitrogenada

Porém, o uso de adubação nitrogenada não é livre de riscos. Aplicações intensivas de adubação nitrogenada visando aumento de produtividade geralmente resultam em dosagens excessivas, estima-se que apenas metade do nitrogênio aplicado no cultivo de espécies agrícolas seja utilizado pelas plantas. O excedente de nitrogênio solubilizado não absorvido pelas culturas pode ser transportado superficialmente pela água de chuvas ou percolado para os lençóis freáticos (SAVCI et al., 2012).

A maior parte do N inorgânico residual, especialmente na forma de nitratos, é solúvel em água e, portanto, suscetível à lixiviação através do solo para as águas subterrâneas, à perda através de canais, riachos e lagos (WANG et al., 2018), e à perda via escoamento superficial e erosão (BERHE et al., 2018).

Altas concentrações de nitrato em águas superficiais contribuem para o crescimento descontrolado de espécies de algas levando a eutrofização de ambientes lacustres, rios e oceanos, limitando a passagem de luz para a subsuperfície da água provocando a degradação ambiental (KARCHER et al., 2020).

O aumento da concentração de nitrato em água potável para o consumo humano pode levar a ocorrência de casos de metemoglobinemia (síndrome do bebê azul) e tendo sido também relacionado ao aumento do risco de câncer de estômago (BRENDER, 2020). Além disso, parte do nitrogênio do solo não fixado pela matéria orgânica pode ser perdido para a atmosfera na forma óxido nitroso (N_2O), gás com maior potencial que o CO_2 para aquecimento global em consequência do efeito estufa (SMITH et al., 1997).

2.6 Estudos sobre status hídrico e status nutricional em nitrogênio

Em ambientes estressantes os problemas de dosagens excessivas podem ser potencializados, visto que as recomendações existentes sobre a adição de nutrientes minerais para atender a demanda de plantas é baseada em culturas mantidas sob condições agronômicas ideais, que não refletem a demanda real de nutrientes das plantas que crescem sob condições adversas de campo (ERCOLI et al., 2008).

O estresse hídrico em plantas resulta da redução do potencial hídrico do solo em relação ao das raízes, a qual reduz a condutividade hidráulica no fluxo de água absorvido pelas plantas (SHANGGUAN et al., 2000; OSAKABE et al., 2014). Esse processo é conduzido pela demanda hídrica na interface oposta, entre folha e atmosfera, via trocas gasosas nos estômatos (PLETT et al., 2020). Seja essa redução causada pela variação do potencial matricial, ou pela variação do potencial osmótico (ALGHORY; YAZAR, 2019). Como a velocidade do fluxo diminui e

tende a encerrar conforme aumenta o nível de estresse, reduz-se também a quantidade absorvida de água e nutrientes em solução (DUGO et al., 2010).

A inibição no crescimento e transpiração causados pela menor disponibilidade de água reduzem a quantidade de nutrientes extraídos do solo (SEGAL et al. 2010, RAMOS et al. 2012), principalmente o N (MACTAVISH; COHEN, 2017). Portanto é negligenciada a real demanda por fertilizantes em plantas cultivadas sob déficit hídrico. Isso pode potencializar os efeitos ambientais deletérios das dosagens excessivas de nitrogênio, e mesmo afetar negativamente a produtividade das culturas cultivadas (WANG et al., 2011).

Passou-se a estudar a interação entre déficit hídrico de déficit nutricional em nitrogênio visando atenuar os riscos atrelados ao uso de adubação nitrogenada em ambientes estressantes. Shangguan e Shao (2000) projetaram um estudo para reduzir incertezas sobre a interação entre o estresse provocado pela deficiência nutricional de nitrogênio e o estresse hídrico em trigo. Para tanto foi montado um sistema de cultivo hidropônico variando-se a disponibilidade de nitrogênio pela concentração da solução nutritiva e a disponibilidade de água, manipulando-se o potencial osmótico da solução por meio da adição de polietileno glicol.

Nesse estudo foi constatada a hipótese de que o déficit hídrico afeta a absorção de nitrogênio e o déficit nutricional em nitrogênio afeta o consumo de água. Shangguan e Shao (2000) concluíram que na condição ambiental de ocorrência destes dois estresses simultaneamente (comum em condições de cultivo) o dano fisiológico não se restringe a soma do efeito isolado de cada um dos estresses, mas sim a potencialização da ação combinada dos dois agentes estressantes.

A limitação edáfica previa ao máximo desenvolvimento das espécies vegetais relacionada à disponibilidade de água no solo para cada ambiente de cultivo deve ser considerado na recomendação da adubação nitrogenada, porque a dose ideal em um ambiente estressante tende a ser menor que em um ambiente não estressante (YU et al., 2019).

Nesse sentido algumas pesquisas tem reiterado a necessidade de melhorar os modelos em que se baseam as recomendações de adubação nitrogenada indicando mais precisamente a demanda de N por culturas de importância em diferentes condições de estresse (GONZALEZ-DUGO et al. 2010; LACERDA et al.,2016). LACERDA et al. (2016) consideraram a redução da transpiração da cultura do milho sob estresse salino e conseguiram reduzir a aplicação de N sem danos adicionais ao desenvolvimento da planta. Eles concluíram ser relevante considerar transpiração do milho na recomendação de adubação para reduzir o risco de contaminação dos lençóis freáticos por lixiviação de NO_3^- .

A resposta fisiológica tanto do déficit nutricional em N como do déficit hídrico tem sido bem documentada. Porém trabalhos sobre a interação entre estes dois fatores são mais escassos. No levantamento bibliográfico realizado no presente estudo nenhum trabalho foi encontrado que tenha buscado avaliar o efeito da variação da disponibilidade de nitrogênio no consumo de água em plantas livres de estresse hídrico.

Estudos mais antigos de Shimshi (1970) em feijão, Tesha e Kumar (1978) em trigo e Shanguan (1997) em café já constatavam que a condutância estomática nestas espécies aumenta com o incremento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva, sob condição adequada de irrigação, tornando as plantas mais sensíveis a variações no gradiente de potencial hídrico solo-planta. Outros trabalhos pioneiros nesse tema indicaram comportamento oposto, Nagarajah (1981) com chá e Radin e Ackerson (1989) com algodão notaram que a sensibilidade estomatal das folhas a alterações no potencial hídrico reduzia com o aumento da disponibilidade de nitrogênio para a nutrição vegetal.

No início da década de 1990 Sugiharto et al. (1990) identificaram correlação positiva entre capacidade fotossintética e conteúdo de nitrogênio nas folhas indicando a importância do nitrogênio na síntese de moléculas componentes do aparato fotossintético. Principalmente a concentração da rubisco – proteína componente da folha que desempenha importante papel na assimilação do carbono – foi afetada pela deficiência de nitrogênio (Seemann et al., 2020). Embora a assimilação de CO₂ e NO₃⁻ estejam relacionadas, ainda não está completamente elucidado qual o mecanismo dessa interação. Portanto é relevante que estudos complementares avancem o entendimento da relação entre o conteúdo de nitrogênio nas folhas, realização de fotossíntese e consumo de água.

2.7 Conclusões

Novas abordagens para separar o efeito do nitrogênio em contextos de múltiplos agentes estressantes, embora bem-sucedidas, requerem sensoriamento remoto por câmeras hiperespectrais que são equipamentos que demandam elevado investimento, limitando a possibilidade do uso desses métodos na gestão rotineira de campos comerciais. Nesse sentido, são relevantes estudos que busquem separar o efeito do nitrogênio de outros agentes estressantes distintos por meio de tecnologias mais acessíveis como sensores multiespectrais acoplados a drones, pois uma amplitude maior de usuários e áreas poderia ser monitorada, viabilizando fenotipagem pela produtividade em uma maior diversidade de cenários ambientais.

A alta correlação entre a condutância estomática e o conteúdo de nitrogênio das folhas expressa a necessidade de estudos que avaliem o efeito da disponibilidade de nitrogênio no

consumo de água pelas plantas, pois doses excessivas de nitrogênio podem causar redução da rentabilidade de cultivos pelo aumento de custos com irrigação, além dos custos com fertilizantes em excesso e dos impactos ambientais decorrentes desse uso indiscriminado. Além disso, a correlação entre disponibilidade de água e quantidade de nitrogênio absorvido pelas plantas resulta em interação entre o estresse hídrico e o estresse provocado pela deficiência de nitrogênio o que dificulta a separação de fenótipos condicionados individualmente por cada um destes agentes estressantes pelo sensoriamento remoto, sendo necessários estudos que visem entender a interação destes que são os dois principais agentes estressantes em ambientes agrícolas.

Referências Bibliográficas

ACHARYA, B.; DUTTA, S.; DUTTA, S.; & CHATTOPADHYAY, A.. Breeding tomato for simultaneous improvement of processing quality, fruit yield, and dual disease tolerance. **International Journal of Vegetable Science**, v. **24** n.5, p. 407-423, 2018. <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1427648>

AGYEMAN, A.; & EWOOL, M. Genotype by environment interaction analysis of grain yield and yield components in provitamin A maize. **Journal of Crop Improvement**, v. **36** n.1, p. 1-24, 2022. <https://doi.org/10.1080/15427528.2021.1895402>

ALGHORY, A.; & YAZAR, A. Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. **Irrigation Science**, v. **37** n.1, p. 61-77, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0603-y>

ALI, M.; AL-ANI, A.; EAMUS, D.; & TAN, K. Leaf nitrogen determination using non-destructive techniques—A review. **Journal of Plant Nutrition**, **40**(7), 928-953, 2017. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1143954>

AMARAL, T.; GRAÇA, J.; VIVAS, M.; VIANA, P.; & RODRIGUES, R. Prospecting of tomato hybrids for table and industry via mixed modeling and multivariate analysis. **Horticultura Brasileira**, v. **35**, p. 20-25, 2017. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620170104>

ARNOLD, A.; KRUK, E.; & NICOTRA, B. How to analyse plant phenotypic plasticity in response to a changing climate. **New Phytologist**, v. **222**, n. 3, p. 1235-1241, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010129>

AVDIKOS, D.; TAGIAKAS, R.; MYLONAS, I.; XYNIAS, N.; & MAVROMATIS, G. Assessment of Tomato Recombinant Lines in Conventional and Organic Farming Systems for Productivity and Fruit Quality Traits. **Agronomy**, v. **11**, n. 1, p. 129, 2021. <https://doi.org/10.1111/nph.15656>

BALMFORD, A.; AMANO, T.; BARTLETT, H.; CHADWICK, D.; COLLINS, A.; EDWARDS, D.; & EISNER, R. The environmental costs and benefits of high-yield farming. **Nature sustainability**, v. **1**, n. 9, p. 477-485, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0138-5>

BARAKAT, M.; CHEVIRON, B.; & ANGULO-JARAMILLO, R. Influence of the irrigation technique and strategies on the nitrogen cycle and budget: A review. **Agricultural Water Management**, v. **178**, p. 225-238, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.027>

BENAMI, E.; JIN, Z.; CARTER, R.; GHOSH, A.; HIJMANS, J.; HOBBS, A.; & LOBELL, B. Uniting remote sensing, crop modelling and economics for agricultural risk management. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. **2**, n. 2, p. 140-159, 2021.

BERHE, A. A.; BARNES, R. T.; SIX, J.; & MARÍN-SPIOTTA, E. Role of soil erosion in biogeochemical cycling of essential elements: Carbon, nitrogen, and

phosphorus. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 46, p. 521-548, 2018. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00122-y>

BEUMER, K.; & EDELENBOSCH, R. Hybrid potato breeding: A framework for mapping contested socio-technical futures. **Futures**, v. 109, p. 227-239, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2019.01.004>

BHUIYAN, N. H.; SELVARAJ, G.; WEI, Y.; & KING, J. Role of lignification in plant defense. **Plant signaling & behavior**, v.4, n. 2, p. 158-159, 2009. <https://doi.org/10.4161/psb.4.2.7688>

BRENDER, D. Human health effects of exposure to nitrate, nitrite, and nitrogen dioxide. In **Just Enough Nitrogen** p. 283-294. Springer, Cham, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58065-0_18

CAO, P.; LU, C.; & YU, Z. Historical nitrogen fertilizer use in agricultural ecosystems of the contiguous United States during 1850–2015: application rate, timing, and fertilizer types. **Earth System Science Data**, v. 10, n.2, p. 969-984, 2018. <https://doi.org/10.5194/essd-10-969-2018>

CHANG, T. G.; CHANG, S.; SONG, Q. F.; PERVEEN, S.; & ZHU, X. G. Systems models, phenomics and genomics: three pillars for developing high-yielding photosynthetically efficient crops. **in silico Plants**, v. 1, n. 1, p. 003, 2019. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diy003>

CHAWADE, A.; VAN HAM, J.; BLOMQUIST, H.; BAGGE, O.; ALEXANDERSSON, E.; & ORTIZ, R. High-throughput field-phenotyping tools for plant breeding and precision agriculture. **Agronomy**, v. 9, n.5, p. 258, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050258>

CHEMURA, A.; MUTANGA, O.; ODINDI, J.; & KUTYWAYO, D. Mapping spatial variability of foliar nitrogen in coffee (*Coffea arabica* L.) plantations with multispectral Sentinel-2 MSI data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 138, 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.004>

CHEN, Z.; FOWLER, M.; TOKURIKI, N. Environmental changes dictate selection and nonspecific epistasis in an empirical phenotype-environment-fitness landscape. **bioRxiv**, 2021. <https://doi.org/10.1101/2021.04.14.439889>

CONG, F.; HOFFLAND, E.; LI, L.; SIX, J.; SUN, H.; BAO, G.; & VAN DER WERF, W. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. **Global change biology**, v. 21, n.4, p. 1715-1726, 2015. <https://doi.org/10.1111/gcb.12738>

DAWOOD, M. H. S. A. **Arthropod Resistant Tomatoes: Screening Tools, Yield and Nutritional Quality of Interspecific Hybrids**, 2020. <https://doi.org/10.13023/etd.2020.090>

DE ALMEIDA, Q.; DE OLIVEIRA, J.; COPATI, F.; DE OLIVEIRA, F.; & DOS SANTOS, C. Tomato breeding for disease resistance. **Multi-Science Journal** (ISSN 2359-6902), v. 3, n. 3, p. 8-16, 2020. <https://doi.org/10.33837/msj.v3i3.1287>

DE GROOTE, H.; & TRAORÉ, O. The cost of accuracy in crop area estimation. **Agricultural Systems**, v.84, n. 1, p. 21-38, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.06.008>

DEERY, D.; JIMENEZ-BERNI, J.; JONES, H.; SIRAUT, X.; & FURBANK, R. Proximal remote sensing buggies and potential applications for field-based phenotyping. **Agronomy**, v.4 ,n. 3, p. 349-379, 2014. <https://doi.org/10.3390/agronomy4030349>

DENG, L.; MAO, Z.; LI, X.; HU, Z.; DUAN, F.; & YAN, Y. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 146, p. 124-136, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008>

DESSUREAULT, J.; ZEBARTH, J.; BURTON, L.; & GEORGALLAS, A. Predicting soil nitrogen supply from soil properties. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 95, n.1, p. 63-75, 2015. <https://doi.org/10.4141/cjss-2014-057>

DIACONO, M.; RUBINO, P.; & MONTEMURRO, F. Precision nitrogen management of wheat. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 1, p. 219-241, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0111-z>

DIMITROVA, M.; VALCHEVA, D.; MIHOVA, G.; & DYULGEROVA, B. Genotype-environment interaction and stability analysis for grain yield of winter barley in the conditions of North-East and South Bulgaria. **Agricultural Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 19-23, 2016. <https://doi.org/10.15547/ast.2016.01.003>

DU, L.; GONG, W.; & YANG, J. Application of spectral indices and reflectance spectrum on leaf nitrogen content analysis derived from hyperspectral LiDAR data. **Optics & Laser Technology**, v. 107, p. 372-379, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.06.019>

ERCOLI, L.; LULLI, L.; MARIOTTI, M.; MASONI, A.; & ARDUINI, I. Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 2, p. 138-147, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.06.002>

FALCO, N.; WAINWRIGHT, M.; DAFFLON, B.; ULRICH, C.; SOOM, F.; PETERSON, E.; & HUBBARD, S. Influence of soil heterogeneity on soybean plant development and crop yield evaluated using time-series of UAV and ground-based geophysical imagery. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 1-17, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86480-z>

FENG, D.; XU, W.; HE, Z.; ZHAO, W.; & YANG, M. Advances in plant nutrition diagnosis based on remote sensing and computer application. **Neural Computing and Applications**, p. 32, n. 22, p. 16833-16842, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3932-0>

FENG, X.; ZHAN, Y.; WANG, Q.; YANG, X.; YU, C.; WANG, H.; & HE, Y. Hyperspectral imaging combined with machine learning as a tool to obtain high-throughput plant salt-stress phenotyping. **The Plant Journal**, v. 101, n. 6, p. 1448-1461, 2020. <https://doi.org/10.1111/tpj.14597>

FIELD, B.; GAMON, A.; & PEÑUELAS, J. Remote sensing of terrestrial photosynthesis. In **Ecophysiology of photosynthesis** (pp. 511-527. Springer, Berlin, Heidelberg, 1995. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79354-7_24

FREIRE, R. Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro. **Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2013.

FURBANK, T.; & TESTER, M. Phenomics—technologies to relieve the phenotyping bottleneck. **Trends in plant science**, v. 16, n. 12, p. 635-644, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.09.005>

GAMON, A.; FIELD, B.; GOULDEN, L.; GRIFFIN, L.; HARTLEY, E.; JOEL, G.; & VALENTINI, R. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. **Ecological Applications**, v. 5, n. 1, p. 28-41, 1995. <https://doi.org/10.2307/1942049>

GERHARDS, M.; SCHLERF, M.; MALLICK, K.; & UDELHOVEN, T. Challenges and future perspectives of multi-/Hyperspectral thermal infrared remote sensing for crop water-stress detection: A review. **Remote Sensing**, v. 11, p. 10, p. 1240, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11101240>

GHALY, E.; & RAMAKRISHNAN, V. Nitrogen sources and cycling in the ecosystem and its role in air, water and soil pollution: A critical review. **Journal of Pollution Effects & Control**, 1-26, 2015. <http://dx.doi.org/10.4172/2375-4397.1000136>

GONZALEZ, V.; DURAND, L.; & GASTAL, F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 30, n.3), p. 529-544, 2010. <https://doi.org/10.1051/agro/2009059>

GUERIF, M.; & DUKE, L. Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 81, n. 1, p. 57-69, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00168-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00168-7)

HAN, L.; YANG, G.; YANG, H.; XU, B.; LI, Z.; & YANG, X. Clustering field-based maize phenotyping of plant-height growth and canopy spectral dynamics using a UAV remote-sensing approach. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1638, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01638>

HEIL, J.; VEREECKEN, H.; & BRÜGGEMANN, N. A review of chemical reactions of nitrification intermediates and their role in nitrogen cycling and nitrogen trace gas formation in soil. **European journal of soil Science**, v. 67, n. 1, p. 23-39, 2016. <https://doi.org/10.1111/ejss.12306>

HENIK, J. **Utilizing NDVI and remote sensing data to identify spatial variability in plant stress as influenced by management**. Iowa State University, 2012.

HERMAN, R.; NEJADHASHEMI, P.; ABOUALI, M.; HERNANDEZ, S.; DANESHVAR, F.; ZHANG, Z.; & SHARIFI, A. Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 39-49, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.009>

HOLLOWAY, J.; & MENGERSEN, K. Statistical machine learning methods and remote sensing for sustainable development goals: A review. **Remote Sensing**, v. 10, n. 9), p. 1365, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10091365>

HOLMAN, H.; RICHE, B.; CASTLE, M.; WOOSTER, J.; & HAWKESFORD, J. Radiometric calibration of ‘commercial off the shelf’ cameras for UAV-based high-resolution temporal crop phenotyping of reflectance and NDVI. **Remote Sensing**, v. 11, n. 14, p. 1657, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11141657>

HOULE, D.; GOVINDARAJU, R.; & OMHOLT, S. Phenomics: the next challenge. **Nature reviews genetics**, v. 11, n. 12, p. 855-866, 2010. doi:10.1038/nrg2897

INGLE, WDG. Manual de adubação e calagem para o Estado da Bahia. **Embrapa Semiárido-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 1989.

JIN, X.; KUMAR, L.; LI, Z.; FENG, H.; XU, X.; YANG, G.; & WANG, J. A review of data assimilation of remote sensing and crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 92, p. 141-152, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.002>

JUNG, J.; MAEDA, M.; CHANG, A.; BHANDARI, M.; ASHAPURE, A.; & LANDIVAR, J. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 70, p. 15-22, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003>

KARCHER, B.; ROTH, F.; CARVALHO, S.; EL-KHALED, C.; TILSTRA, A.; KÜRTEEN, B.; & WILD, C. Nitrogen eutrophication particularly promotes turf algae in coral reefs of the central Red Sea. **PeerJ**, v. 8, p. e8737, 2020. <https://doi.org/10.7717/peerj.8737>

KARTHIKEYAN, L.; CHAWLA, I.; & MISHRA, K. A review of remote sensing applications in agriculture for food security: Crop growth and yield, irrigation, and crop losses. **Journal of Hydrology**, v. 586, p. 124905, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124905>

KIANI, G.; SIAHCHEHREH, M. Genetic diversity in tomato varieties assessed by ISSR markers. **International Journal of Vegetable Science**, v. 24, n. 4, p. 353-360, 2018. <https://doi.org/10.1080/19315260.2017.1419397>

KONINGS, G.; RAO, K; STEELE, C. Macro to micro: microwave remote sensing of plant water content for physiology and ecology. **New Phytologist**, v. 223, n. 3, p. 1166-1172, 2019. <https://doi.org/10.1111/nph.15808>

KUYPERS, M.; MARCHANT, K.; & KARTAL, B. The microbial nitrogen-cycling network. **Nature Reviews Microbiology**, v. 16, n. 5, p. 263-276, 2018. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>

LEMAIRE, G.; & GASTAL, F. Crop responses to nitrogen. **Encyclopedia of sustainability science and technology**. v. 1, p. 159-184, 2018. DOI 10.1007/978-1-4939-2493-6_385-3

LEMENEN, S.; MATHIASSEN, K.; DYRMANN, M.; LAURSEN, S.; PAZ, C.; & JØRGENSEN, N. Open plant phenotype database of common weeds in denmark. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, p. 1246, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12081246>

LEW, S.; SAROJAM, R.; JANG, C.; PARK, S.; NAQVI, I.; WONG, H.; & STRANO, S. Species-independent analytical tools for next-generation agriculture. **Nature Plants**, v. 6, n. 12, p. 1408-1417, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-00808-7>

LI, Y.; HE, N.; HOU, J.; XU, L.; LIU, C.; ZHANG, J.; & WU, X. Factors influencing leaf chlorophyll content in natural forests at the biome scale. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 6, p. 64, 2018. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00064>

LIAO, G.; LIN, Y.; KANG, D.; CHANDRA, D.; BON, J.; KAMINSKI, N.; & TSENG, C. Missing value imputation in high-dimensional phenomic data: imputable or not, and how?. **BMC bioinformatics**, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2014. <https://doi.org/10.1186/s12859-014-0346-6>

LIU, H.; BRUNING, B.; GARNETT, T.; & BERGER, B. Hyperspectral imaging and 3D technologies for plant phenotyping: From satellite to close-range sensing. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, p. 105621, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105621>

LU, C.; & TIAN, H. Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance. **Earth System Science Data**, v. 9, n.1, p. 181-192, 2017. <https://doi.org/10.5194/essd-9-181-2017>

LU, Y.; & YAO, J. Chloroplasts at the crossroad of photosynthesis, pathogen infection and plant defense. **International journal of molecular sciences**, v. 19, n. 12, p. 3900, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijms19123900>

MAGNEY, S.; BARNES, L.; & YANG, X. On the covariation of chlorophyll fluorescence and photosynthesis across scales. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 23, p. e2020GL091098, 2020. <https://doi.org/10.1029/2020GL091098>

MAHLEIN, K.; KUSKA, T.; BEHMANN, J.; POLDER, G.; & WALTER, A. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art. **Annual review of phytopathology**, v. 56, p. 535-558, 2018. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050100>

MALOSETTI, M.; RIBAUT, M.; & VAN EEUWIJK, A. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. **Frontiers in physiology**, v. 4, p. 44, 2013. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00044>

MARTINS, C.; DE BARROS, P.; MAGALHÃES, S.; & REIS, S. Análise da produtividade de duas variedades de tomate em vasos com solo orgânico em ambiente protegido. **Revista Ambientale**, v. 9, n. 1, p. 14-20, 2017.

MEGUEKAM, T. L.; MOUALEU, D. P.; TAFFOUO, V. D.; & STÜTZEL, H. Changes in plant growth, leaf relative water content and physiological traits in response to salt stress in peanut (*Arachis hypogaea* L.) varieties. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 49, n. 1, p. 12049-12049, 2021. <https://doi.org/10.15835/nbha49112049>

MELO, T.; MELO, T.; & BOITEUX, S. Overview and perspectives of tomato breeding for fresh market adapted to mild tropical climates of Brazil. In **International Symposium on Tomato in the Tropics**, v. 821, p. 55-62, 2008. 10.17660/ActaHortic.2009.821.4

MISHRA, P.; LOHUMI, S.; KHAN, A.; & NORDON, A. Close-range hyperspectral imaging of whole plants for digital phenotyping: Recent applications and illumination correction approaches. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 178, p. 105780, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105780>

MOHAMMED, H.; COLOMBO, R.; MIDDLETON, M.; RASCHER, U.; VAN DER TOL, C.; NEDBAL, L.; & ZARCO, J. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. **Remote sensing of environment**, v. 231, p. 111177, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.030>

MOREAU, D.; BARDGETT, D.; FINLAY, D.; JONES, L.; & PHILIPPOT, L. A plant perspective on nitrogen cycling in the rhizosphere. **Functional Ecology**, v. 33, n. 4, p. 540-552, 2019. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13303>

MULLER, B.; & MARTRE, P. Plant and crop simulation models: powerful tools to link physiology, genetics, and phenomics, 2019.

NABWIRE, S.; SUH, K.; KIM, S.; BAEK, I.; & CHO, K. Application of artificial intelligence in phenomics. **Sensors**, v. 21, n. 13, p. 4363, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21134363>

NAGAI, H.; SIQUEIRA, W.; & LOURENCLAO, A. TOMATO breeding for resistance to diseases and pests in Brazil. In **IV International Symposium on Processing Tomatoes** v. 301, p. 91-98, 1991. 10.17660/ActaHortic.1992.301.10

NDLOVU, N. Application of Genomics and Phenomics in Plant Breeding for Climate Resilience. **Asian Plant Research Journal**, p. 53-66, 2020

NOWAKI, R. H.; PARENT, S. É.; CECÍLIO FILHO, A. B.; ROZANE, D. E.; MENESES, N. B.; SILVA, J. A.; & PARENT, L. E. Phosphorus over-fertilization and

nutrient misbalance of irrigated tomato crops in Brazil. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 825, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00825>

OSAKABE, Y.; OSAKABE, K.; SHINOZAKI, K.; & TRAN, L. S. P. Response of plants to water stress. **Frontiers in plant science**, v. 5, p. 86, 2014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>

PADILLA, M.; FARNESELLI, M.; GIANQUINTO, G.; TEI, F.; & THOMPSON, B. Monitoring nitrogen status of vegetable crops and soils for optimal nitrogen management. **Agricultural Water Management**, v. 241, p. 106356, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106356>

PAVINATO, S.; PAULETTI, V.; MOTTA, V.; & MOREIRA, A. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná, 2017.

PIERUSCHKA, R.; SCHURR, Uli. Plant phenotyping: past, present, and future. **Plant Phenomics**, v. 2019, 2019. <https://doi.org/10.34133/2019/7507131>

PLETT, C.; RANATHUNGE, K.; MELINO, J.; KUYA, N.; UGA, Y.; & KRONZUCKER, J. The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity. **Journal of experimental botany**, v. 71, n. 15, p. 4452-4468, 2020. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa049>

POMMIER, C.; GARNETT, T.; LAWRENCE-DILL, J.; PRIDMORE, T.; WATT, M.; PIERUSCHKA, R.; & GHAMKHAR, K. Phenotyping; From Plant, to Data, to Impact and Highlights of the International Plant Phenotyping Symposium-IPPS 2018. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1907, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.618342>

PRATAP, A.; GUPTA, S.; NAIR, M.; GUPTA, K.; SCHAFLEITNER, R.; BASU, S.; ... & BAEK, H. Using plant phenomics to exploit the gains of genomics. **Agronomy**, v. 9, n. 3, p. 126, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030126>

RAHAMAN, M.; CHEN, D.; GILLANI, Z.; KLUKAS, C.; & CHEN, M. Advanced phenotyping and phenotype data analysis for the study of plant growth and development. **Frontiers in plant science**, v. 6, p. 619, 2015. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00619>

REYNOLDS, D.; BARET, F.; WELCKER, C.; BOSTROM, A.; BALL, J.; CELLINI, F.; & TARDIEU, F. What is cost-efficient phenotyping? Optimizing costs for different scenarios. **Plant Science**, v. 282, p. 14-22, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.06.015>

REZK, A.; ABHARY, M.; & AKHKHA, A. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Breeding Strategies for Biotic and Abiotic Stresses. In **Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops** (pp. 363-405). Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66961-4_10

ROBERTSON, P.; & VITOUSEK, M. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource. **Annual review of environment and resources**, v. 34, p. 97-125, 2009. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.032108.105046>

ROITSCH, T.; CABRERA-BOSQUET, L.; FOURNIER, A.; GHAMKHAR, K.; JIMÉNEZ-BERNI, J.; PINTO, F.; & OBER, S. New sensors and data-driven approaches—A path to next generation phenomics. **Plant Science**, v. 282, p. 2-10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.01.011>

SANKARAN, S.; QUIRÓS, J.; & MIKLAS, N. Unmanned aerial system and satellite-based high resolution imagery for high-throughput phenotyping in dry bean. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 165, p. 104965, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104965>

SAVCI, S. An agricultural pollutant: chemical fertilizer. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 3, n. 1, p. 73, 2012.

SCHLEMMER, M.; GITELSON, A.; SCHEPERS, J.; FERGUSON, R.; PENG, Y.; SHANAHAN, J.; & RUNDQUIST, D. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 25, p. 47-54, 2013. [tps://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003](https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003)

SHANGGUAN, P.; SHAO, A.; & DYCKMANS, J. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat. **Environmental and experimental botany**, v. 44, n. 2, p. 141-149, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(00\)00064-2](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(00)00064-2)

SHARMA, K.; & BALI, K. A review of methods to improve nitrogen use efficiency in agriculture. **Sustainability**, v. 10, n. 1, p. 51, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10010051>

SHENDE, D.; TANIA, S.; SUBHRA, M.; & ARUP, C. Breeding tomato (*Solanum lycopersicum* L.) for higher productivity and better processing qualities. **SABRAO Journal of Breeding and Genetics**, v. 44, n. 2, p. 302-321, 2012.

SHIRI, R.; & BAHRAMPOUR, T. Genotype× environment interaction analysis using GGE biplot in grain maize (*Zea mays* L.) hybrids under different irrigation conditions. **Cereal Research**, v. 5, n. 1, p. 83-94, 2015.

SIMONNE, H.; MILLS, A.; JONES JR, B.; SMITTLE, A.; & HUSSEY, A. comparison of analytical methods for nitrogen analysis in plant tissues. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, n. 7-8, p. 943-954, 1994. <https://doi.org/10.1080/00103629409369090>

SINGH, S.; DHALIWAL, S.; CHEEMA, S.; & BRAR, S. Breeding tomato for high productivity. **Advances in Horticultural Science**, p. 95-98, 1999.

SKOBELEV, P.; GALUZIN, V.; TRAVIN, V.; GALITSKAYA, A.; & SIMONOVA, E.. Determining Inhomogeneity Areas in Agricultural Fields Based on the Earth Remote Sensing Images. In **2019 25th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)** (pp. 272-278. IEEE, 2019. 10.23919/FRUCT48121.2019.8981539
SMITH, A.; MCTAGGART, P.; & TSURUTA, H. Emissions of N₂O and NO associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation. **Soil**

use and management, v. 13, p. 296-304, 1997. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00601.x>

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO (SBCS); NÚCLEO REGIONAL SUL. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 2004.

STANTON, L.; ROY, A.; & THIEDE, A. Evolution in stressful environments. I. Phenotypic variability, phenotypic selection, and response to selection in five distinct environmental stresses. **Evolution**, v. 54, n. 1, p. 93-111, 2000. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2000.tb00011.x>

STELTZER, H.; & WELKER, M. Modeling the effect of photosynthetic vegetation properties on the NDVI–LAI relationship. **Ecology**, v. 87, n. 11, p. 2765-2772, 2006. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[2765:MTEOPV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[2765:MTEOPV]2.0.CO;2)
TAN, C.; DU, Y.; ZHOU, J.; WANG, D.; LUO, M.; ZHANG, Y.; & GUO, W. Analysis of different hyperspectral variables for diagnosing leaf nitrogen accumulation in wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 674, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00674>

TARDIEU, F.; CABRERA-BOSQUET, L.; PRIDMORE, T.; & BENNETT, M. Plant phenomics, from sensors to knowledge. **Current Biology**, v. 27, n. 15, p. R770-R783, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.055>

TATTARIS, M.; REYNOLDS, P.; & CHAPMAN, C. A direct comparison of remote sensing approaches for high-throughput phenotyping in plant breeding. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1131, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01131>

TORRES, V.; VILLEGAS, G.; DOMÍNGUEZ, L.; SOTELO, H.; RODRÍGUEZ, A.; MELGOZA, M.; & ALIA, I. Role of nitrogen and nutrients in crop nutrition. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 4, n.1B, p. 29, 2014.

VANSELOW, K. A.; ZANDLER, H.; & SAMIMI, C. Methods of assessing vegetation dynamics and pasture potentials in arid mountain regions. In **Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes** (pp. 373-382. Springer, Cham, 2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-67448-9_16

VASU, D.; SINGH, S. K.; SAHU, N.; TIWARY, P.; CHANDRAN, P.; DURAISAMI, V. P.; & KALAISELVI, B. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. **Soil and Tillage Research**, v. 169, p. 25-34, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.006>

WANG, D.; XU, Z.; ZHAO, J.; WANG, Y.; & YU, Z. Excessive nitrogen application decreases grain yield and increases nitrogen loss in a wheat–soil system. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science**, v. 61, n. 8, p. 681-692, 2011. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.534108>

WANG, H.; PAULO, J.; KRUIJER, W.; BOER, M.; JANSEN, H.; TIKUNOV, Y.; & VAN EEUWIJK, F. Genotype–phenotype modeling considering intermediate level of biological variation: a case study involving sensory traits, metabolites and QTLs in ripe tomatoes. **Molecular BioSystems**, v. 11, n. 11, p. 3101-3110, 2015.

10.1039/C5MB00477B

WANG, J.; CHADWICK, D. R.; CHENG, Y.; & YAN, X. Global analysis of agricultural soil denitrification in response to fertilizer nitrogen. **Science of the Total Environment**, v. 616, p. 908-917, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.229>

WANG, X.; ZHANG, R.; SONG, W.; HAN, L.; LIU, X.; SUN, X.; & ZHAO, J. Dynamic plant height QTL revealed in maize through remote sensing phenotyping using a high-throughput unmanned aerial vehicle (UAV). **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39448-z>

WANG, Z.; LI, G.; SUN, H.; MA, L.; GUO, Y.; ZHAO, Z.; & MEI, L. Effects of drought stress on photosynthesis and photosynthetic electron transport chain in young apple tree leaves. **Biology open**, v. 7, n. 11, p. bio035279, 2018. <https://doi.org/10.1242/bio.035279>

WHITE, W.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; GORE, A.; BRONSON, F.; COFFELT, T. A.; CONLEY, M.; & WANG, G. Field-based phenomics for plant genetics research. **Field Crops Research**, v. 133, p. 101-112, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.04.003>

WOODCOCK, E.; LOVELAND, R.; HEROLD, M.; & BAUER, E. Transitioning from change detection to monitoring with remote sensing: A paradigm shift. **Remote Sensing of Environment**, v. 238, p. 111558, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111558>

XIONG, Q.; TANG, G.; ZHONG, L.; HE, H.; & CHEN, X. Response to nitrogen deficiency and compensation on physiological characteristics, yield formation, and nitrogen utilization of rice. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 1075, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01075>

YANG, G.; LIU, J.; ZHAO, C.; LI, Z.; HUANG, Y.; YU, H.; & YANG, H. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1111, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01111>

YANG, L.; WEN, S.; RUAN, X.; ZHAO, X.; WEI, F.; & WANG, Q. Response of plant secondary metabolites to environmental factors. **Molecules**, v. 23, n. 4, p. 762, 2018. <https://doi.org/10.3390/molecules23040762>

YU, C.; HUANG, X.; CHEN, H.; GODFRAY, J.; WRIGHT, S.; HALL, W.; TAYLOR, J. Managing nitrogen to restore water quality in China. **Nature**, v. 567, n. 7749, p. 516-520, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1001-1>

ZUBA, N.; NOGUEIRA, L.; FERNANDES, A.; SAMPAIO, A.; & COSTA, D. Yield and nutrition of tomato using different nutrient sources. **Horticultura Brasileira**, v. 29, p. 50-56, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362011000100009>

FAO. World Fertilizer Trends and Outlook to 2020: Summary Report. 2017

INGLE, WDG. Manual de adubação e calagem para o Estado da Bahia. **Embrapa Semiárido-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 1989.

FREIRE, L. R. Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro. **Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2013.

PAVINATO, Paulo Sérgio et al. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. 2017.

LI; ZHANG; HUANG,;. A review of imaging techniques for plant phenotyping. **Sensors**, v. 14, n. 11, p. 20078-20111, 2014. <https://doi.org/10.3390/s141120078>

MISHRA, . et al. Plant phenotyping: a perspective. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 4, p. 514-527, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40502-016-0271-y>

SOZZI, Marco et al. Economic comparison of satellite, plane and UAV-acquired NDVI images for site-specific nitrogen application: Observations from Italy. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2098, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112098>

URIBEETXEBARRIA, A. et al. Investigation of the potential use of NDVI from different dates to determine more efficient nitrogen management zones early in the growing season. In: **Precision agriculture'21**. Wageningen Academic Publishers, 2021. p. 212-221. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9>

3 SENSORIAMENTO COM CÂMERA MULTIESPECTRAL E CLOROFILÔMETRO NA AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DO NITROGÊNIO EM TOMATE

Resumo

O uso do índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) e análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD) tem sido útil para identificar plantas deficientes em nitrogênio e, ou afetados por outros estresses ambientais. NDVI e SPAD são usados para essa finalidade por sua alta correlação com o teor de clorofila das folhas. Porém, múltiplos agentes estressantes podem afetar o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes em cultivos de tomate, não se sabendo a eficiência desses índices em se separar especificamente o dano causado pela deficiência do nitrogênio de outros danos. Este trabalho buscou responder se NDVI e SPAD são eficazes em separar a variação de produtividade decorrente do teor de nitrogênio foliar (TNF) em um contexto de cultivo comercial em que múltiplos agentes estressantes afetam o desenvolvimento do tomateiro, sem que a disponibilidade de nitrogênio seja isolada. Para tanto, entre mês/ano e mês/ano, em plantas de tomateiro (Híbrido TY2006), cultivadas em um campo experimental de 0,9408 ha e situado na Região de Irecê-Ba (Longitude 41° 51' 24". Oeste, Latitude 11° 17' 60" Sul (DMS) foi monitorado o teor de nitrogênio foliar, o índice SPAD por clorofilômetro, produtividade com base no peso de frutos por planta e o NDVI por câmera multiespectral acoplada a drone. A dependência entre essas variáveis foi analisada por regressão linear. O TNF médio na área estudada foi de 29,4 g kg⁻¹, PFP médio de 7 kg planta⁻¹, NDVI médio de 0,62 e leitura em SPAD médio de 45,6. As análises de regressão (PFPxTNF, TNFxNDVI e TNFxSPAD) foram significativas, constatando-se que na maior parte das células do grid a variação de PFP correspondia a variação de TNF, sendo possível identificar células com deficiência de N com base no NDVI e SPAD. A correlação PFPxNDVI também foi significativa, possibilitando o uso do NDVI como estimador de produtividade. Porém, considerando os baixos valores de R² das regressões analisadas, notou-se que em um ambiente sob múltiplos agentes estressantes a estimativa de TNF com base em NDVI ou SPAD pode ser comprometida pela ocorrência de ruídos causados pela resposta espectral similar de outros agentes estressantes além do déficit nutricional em nitrogênio. A análise de resíduos de PFPxTNF permitiu identificar amostras em que a variação de PFP não era decorrente de TNF, no entanto PFPxNDVI e PFPxSPAD não foram capazes de separar as mesmas células.

Palavras-chave: Índice de vegetação. Clorofila. Variabilidade espacial. Regressão. Resíduos.

SENSING WITH MULTISPECTRAL CAMERA AND CHLOROPHYLLMETER IN THE EVALUATION OF NITROGEN VARIABILITY IN TOMATOES

Abstract

Given the importance of nitrogen fertilization for agricultural productivity and the high spatial variability of nitrogen (N) availability in the soil, studies that aim to identify the nutritional status of tomato plants in the field are recurrent. In this sense, the use of the normalized difference vegetation index (NDVI) and soil-plant development analysis (SPAD) has been useful to identify plants deficient in nitrogen and/or affected by other environmental stresses. NDVI values are commonly calculated based on data obtained by satellite that, in small areas, a spatial resolution and accuracy of the data. Thus, there is growing interest in the use of multispectral sensors coupled to drones that capture images at a centimetric level of detail. This work sought to answer whether NDVI and SPAD are effective in separating the variation in productivity resulting from the leaf nitrogen (TNF) content. Hence, an experimental field of 0.9408ha of tomato (Híbrido TY2006) in the Irecê-Ba region was monitored for determinations of leaf nitrogen content, SPAD reading by chlorophyllometer, productivity data based on the weight of fruits per plant (PFP) and NDVI by image capture by a multispectral sensor coupled to a drone in an area of 84x112m divided into a grid of 49 cells. The mean TNF in the studied area was 29.4 g kg⁻¹, mean PFP of 7 kg plant⁻¹, mean NDVI of 0.62 and mean SPAD reading of 45.6. The dependence between these variables was analyzed by linear regression. Regression analyzes (PFPxTNF, TNFxNDVI and TNFxSPAD) were significant, noting that in most of the grid cells the PFP variation corresponded to the TNF variation, being possible to identify cells with N deficiency based on NDVI and SPAD. The PFPxNDVI correlation was also decreased, making it possible to use NDVI as a productivity estimator. Analysis of PFPxTNF residues should identify in which PFP variation was not due to TNF, however PFPxNDVI and PFPxSPAD were not able to separate the same cells.

Keywords: Vegetation index. Chlorophyll. Spatial variability. Regression. Residues.

3.1 Introdução Nitrogênio é o nutriente mais limitante para a produção de tomateiro, por ser demandado em altas quantidades e provocar perdas significativas de produtividade desde reduções marginais abaixo da concentração ideal (DU et al., 2017). A deficiência intensa desse elemento é de fácil diagnose visual, pois seus sintomas são expressos nas folhas, principalmente o amarelecimento de folhas na base; folhas novas que permanecem pequenas e com um verde menos intenso e em casos mais severos as folhas mais velhas que amarelecem e morrem prematuramente (MAIA et al., 2019).

A deficiência moderada expressa menos os sintomas foliares, sendo mais difícil a diagnose visual (SAINJU et al., 2003). Os sintomas mais típicos são a redução da taxa de crescimento da planta, redução do número e tamanho de frutos, perda de qualidade de armazenamento dos frutos, cor pálida da polpa de frutos e perda do sabor (MAIA et al., 2019).

Por essa razão a principal forma de diagnose em um contexto de deficiência moderada de N (mais comum em áreas adubadas por fertirrigação) se baseia na análise do teor de nitrogênio foliar (TNF) - sendo o método padrão o de Kjeldhal e nos últimos anos também se destacando análises pelo método de Dumas – verificando se esses valores se encontram dentro de um intervalo ideal de referência identificado em estudos prévios (PADILLA et al., 2020).

A informação da variabilidade espacial de nitrogênio disponível é necessária para se avaliar o potencial produtivo de lavouras (YAN et al., 2017). Atividades agrícolas como cultivos anteriores, pastagem, manejo de adubação em cultivo de leguminosas, frequência de irrigação, compactação do solo, revolvimento do solo, drenagem e adubação podem afetar a variabilidade espacial da disponibilidade de nitrogênio (GONG et al., 2019).

A demanda pelo entendimento da distribuição espacial de atributos de interesse agrônomo tem crescido nas últimas décadas em decorrência dos avanços da agricultura de precisão (TREVISAN et al., 2021), sobretudo na capacidade de aplicação em taxa variável de nutrientes, por drones de pulverização (KLAUSER; PAUSCHINGER, 2021) ou máquinas adubadoras com taxa variável (GORAI et al., 2021).

A elevada resposta em produtividade com o aumento da disponibilidade de N no solo (até limites ideais) tem feito com que a distribuição espacial de TNF continue sendo dos atributos mais monitorados para agricultura de precisão (SHARIFI et al., 2020; ARGENTO et al., 2021).

Dado o custo da análise de teor de nitrogênio foliar - tanto pelo método de Dumas, como por Kjeldhal - ser relativamente elevado por amostra (JUNG et al., 2003), e a crescente demanda pelo entendimento da variabilidade espacial de TNF requerer um número sempre maior de amostras, são recorrentes pesquisas que visam estabelecer correlações entre o TNF e outros

atributos que sejam confiáveis e permitam maior número de amostras por área sem o consumo elevado de tempo e dinheiro requerido por análises laboratoriais de TNF (ZHOU; YIN, 2018).

Nesse sentido as estimativas de variação de TNF por índices baseados na reflectância da folha como índice de vegetação com diferença normalizada(NDVI em inglês) (CABRERA-BOSQUET et al., 2011; EZENNE et al., 2019; e GRADOS; SCHREVEN, 2020) e análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD em inglês)(Netto et al., 2005, GIANQUINTO e al., 2006; JIANG et al., 2017; YUE et al., 2020) são as mais proeminentes e utilizadas.

Embora existam outros índices além do NDVI usados no sensoriamento remoto voltado para a agricultura,(índice de vegetação ajustado ao solo(SAVI), índice de vegetação da diferença normalizada verde(GNDVI) e diferença normalizada do vermelho limítrofe(NDRE), NDVI foi identificado como o melhor índice para determinar o conteúdo de clorofila e a produtividade em tomate de crescimento determinado (Ihuoma, e Madramootoo, 2020) Dada a correlação entre conteúdo de clorofila foliar e o teor de nitrogênio foliar, o NDVI pode ser usado para determinar o status de nitrogênio da planta (LINK et al, 2002; SRIPADA et al., 2008; ENCISO et al. 2019).

A aquisição de dados para o cálculo do NDVI é oriunda do sensoriamento remoto. Imagens de resolução média tem mostrado alta capacidade em quantificar alterações, danos e desenvolvimento de cultivos agrônômicos. Imagens de MODIS e o Landsat são usados extensivamente para essas análises(JAIN; PANDEY, 2021). Sentinel-2 possui relativamente melhor resolução e por essa razão constituiu uma melhoria para aplicações de análise em ambientes de cultivo. Ainda nesse contexto, imagens de satélites comerciais de alta resolução espacial como Deimos-2, GeoEye-2, QuickBird, WorldView-2 tem se mostrado mais apropriados, sobretudo quando nível o detalhe de objetos observados aumenta(GUISURAGA et al., 2020).

Sensoriamento remoto por drones rompe uma barreira sobre a popularização da aquisição de imagens para a agricultura, dada sua praticidade e baixo custo(CAVALO, 2018). Esse método de aquisição de imagens tem sido cada vez mais utilizado não apenas por essas facilidades mencionadas, mas também pela superioridade de resolução espacial classificada como ultra elevada, devido aos voos em baixa altitude captarem detalhes em escala centimétrica(JAIN; PANDEY, 2021).

Por conta dessa maior praticidade, menor custo e maior resolução espacial e temporal, o sensoriamento remoto por drones tem permitido que ferramentas consolidadas há décadas como o índice NDVI na interpretação da variabilidade espacial de cultivos em áreas extensas

possa também ser usado para culturas de maior valor agregado em áreas menores, por meio da combinação com câmeras multiespectrais(CAVALO, 2018).

Além do NDVI calculado com base em dados do sensoriamento remoto, o índice SPAD é outro método muito utilizado para interpretar a variabilidade espacial da absorção de nitrogênio pelas plantas sem a necessidade de análises laboratoriais. Os clorofilômetros calculam o valor ou índice SPAD, que indica a intensidade do verde e é altamente correlacionado com o teor de clorofila (WOOD *et al.*, 1992; MARKWELL *et al.*, 1995; SILVEIRA *et al.*, 2003).

O manejo adequado da adubação nitrogenada pressupõe o conhecimento prévio de valores de referência, oriundos da explicação matemática de modelos desenvolvidos com base em análise de regressão (TEI; GUIDUCCI, 2002). Tais modelos resultam do ajuste de curvas por interpolação de dados sobre a variação da produtividade em relação à variação do acúmulo de N no tecido vegetal, podendo posteriormente - partindo desse modelo - se estimar uma produtividade esperada de cultivos com base em valores do conteúdo de nitrogênio observado nas plantas (WEERAKKODY, 2021).

Em tomateiro, observa-se alta correlação positiva entre o peso de frutos por planta (PFP) e o conteúdo total de N nas plantas (ERABADUPITIYA *et al.*, 2020). E há também alta correlação positiva entre o conteúdo total de N na planta e o teor foliar de N das primeiras folhas mais expandidas de tomateiro (folhas guia) (HARTZ e BOTTOM, 2009). Isso permite a extrapolação dos teores analisados na folha para valores estimados de conteúdo de N em toda a planta e também que a análise de folhas guia (mais representativas do conteúdo de N da planta) possam ser usadas para descrever proporcionalmente o efeito da variação do conteúdo de N na planta no peso de frutos (SAINJU *et al.*, 2003).

Faz parte do processo da identificação do intervalo ideal de TNF (em que ocorre o maior peso de frutos por planta(PFP)) a categorização dos níveis de PFP em resposta aos diferentes TNFs (ELIA; CONVERSA, 2012). A curva típica de nitrogênio aumenta em produtividade com o aumento da disponibilidade de nitrogênio até valores em que o incremento da disponibilidade de N repercute apenas em um ganho marginal de produtividade tendendo a um platô na curva em que não há incremento de produtividade, sendo o máximo dessa curva, a máxima produtividade, posteriormente a esse platô o aumento de N causa redução da produtividade (MAROUELLI *et al.*, 2014).

Desse modo, para conhecer o limite ideal de concentração de nitrogênio no tecido vegetal (considerando a maior produtividade) a interpolação de dados da curva requer uma amplitude de amostras com níveis crescentes de TNF em uma população em que o PFP seja

dependente de TNF, pois a variação de PFP em decorrência de outros fatores além de TNF aumentaria o erro da estimativa de PFP desse modelo (KANISZEWSKI et al., 2019).

Isso acontece porque em um ajuste ideal a variação do peso de frutos por planta seria exclusivamente afetada por TNF e sendo nitrogênio um nutriente essencial há uma demanda mínima necessária proporcional à demanda fisiológica que o aumento de PFP requer. Assim toda variação em TNF resultaria em uma proporcional e idêntica variação entre todas as repetições de um mesmo tratamento (OLANIYI; AJIBOLA, 2008).

Porém, a estimativa de variação de PFP com base na variação de TNF não é capaz de prever alterações na proporção de variação de PFP por fatores extrínsecos à variação de TNF (TRAN et al., 2019). Assim, quando se pressupõe que a variação de PFP é dependente da variação em TNF, mas não é, a curva ajustada se diferencia da curva ideal, perdendo-se capacidade preditiva, já que a diferença entre os valores preditos de PFP dos valores observados tende a ser maior quanto maior a diferença entre a curva ajustada e a ideal.

É imperativo para o aumento da certeza matemática desses modelos que - na população amostrada - PFP seja dependente de TNF (SANTIAGO et al., 2012). Para tanto normalmente medidas de controle da variação do acaso são tomadas, como a garantia no campo de que a variação ocorra exclusivamente na disponibilidade de N, mantendo-se os demais fatores que afetam a produtividade constantes (ZOBEL et al., 1988; FAGERIA, 2005; FAGERIA, 2007; PINHEIRO et al., 2018); ou garantindo-se que as amostras usadas na regressão sejam todas compatíveis com esse preceito por meio da exclusão de outliers (FAGERIA, 2007; ILLÉS et al., 2020).

Além disso, a alta variabilidade espacial da disponibilidade de nitrogênio no solo (HUANG et al., 2007; GUAN et al., 2017) causa também alta variabilidade do teor de nitrogênio foliar (CHEMURA et al., 2018), fazendo-se necessário maior número de amostras para garantir a representatividade da população amostrada (MULLA; MCBRATNEY, 2002). Sendo o dispêndio com análises de amostras que não são aproveitadas na construção de valores de referência despesas desnecessárias que devem ser evitadas na abordagem.

Tendo em vista a necessidade de separar populações em que a variação de PFP é dependente de TNF para otimizar as análises de regressão e diminuir os custos de análises de amostras descartadas como outliers, considerando a alta correlação existente entre NDVI e índice SPAD em relação ao teor de clorofila foliar (e por conseguinte a correlação existente entre teor de clorofila foliar e TNF), há uma legítima esperança na comunidade científica de que estes índices sejam capazes de identificar previamente em campo a variabilidade espacial

do conteúdo de nitrogênio nas plantas. Mas realmente é possível usar NDVI e SPAD para separar o efeito do nitrogênio de outros fatores ambientais na produtividade?

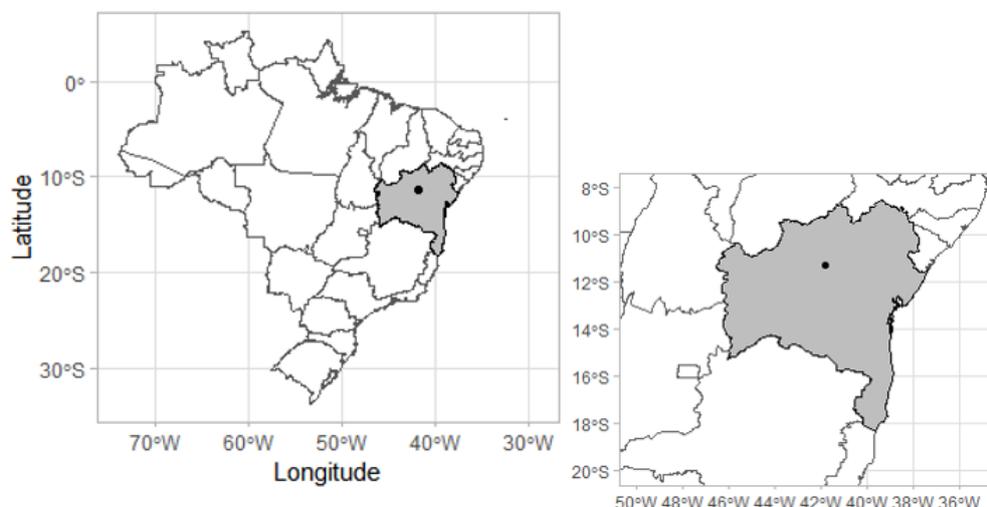
O objetivo desse trabalho foi verificar se é possível – por meio de dados de índice SPAD e NDVI - separar amostras em que o teor de nitrogênio foliar é o principal fator de variação do peso de frutos por planta em um cultivo comercial de tomate de crescimento determinado com práticas de manejo adotadas por produtores.

3.2 Material e Métodos

Pretende-se alcançar esse objetivo comparando a significância do modelo explicativo do efeito do teor de nitrogênio foliar (TNF) em relação ao peso de fruto por planta (PFP) antes e após a exclusão de outliers identificados pela análise dos resíduos studentizados calculados com base na diferença entre valores observados e valores estimados pela equação da regressão linear por mínimos quadrados (OLS) de: a) Peso de frutos por planta x Teor de nitrogênio foliar(padão); b) Peso de frutos por planta x NDVI; e c) Peso de frutos por planta x SPAD.

3.2.1 Localização e caracterização da área monitorada

O campo experimental foi montado no município de Irecê-BA, coordenadas geográficas: Longitude 41° 51' 24". Oeste, Latitude 11° 17' 60" Sul (DMS) (Figura 1). A microrregião de Irecê se localiza na porção centro-norte do Estado da Bahia, Chapada Diamantina Setentrional, principal região produtora de tomate no nordeste Brasileiro (IBGE). Ocupa área de 22.748 km², abrangendo as bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré (SANTOS, 2017). De acordo com a classificação de Koppen o clima da microrregião é BSWH, semiárido, com temperaturas médias anuais de 23°C a 26°C (BAHIA, 1998).

Figura 1. Localização da área de cultivo na Microrregião de Irecê-BA

• = Localização da área de estudo

A caracterização química e física do solo, antes do transplante das mudas de tomate (05/01/2021), de acordo com (Richards, 1964 e EMBRAPA, 2017) e os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2. Classificação: Cambissolo Hálpico Ta Eutrófico latossólico, perfis desenvolvidos a partir do intemperismo de um complexo formado por rochas calcárias entremeadas de camadas fosfáticas, e com influência de mineralizações sulfetadas, ocorrendo na forma de gossan em relevo suave ondulado.

Tabela 1. Características químicas do extrato de saturação e do complexo sortivo do solo na camada de 0-20 cm

Extrato de Saturação*							
pHes	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	
	(dS m ⁻¹)	-----mmol L ⁻¹ -----					
7,7 (± 0,7)	2,36(± 2)	2(± 1,3)	4,5(± 3,1)	18,12(± 5,8)	7,63(± 2,9)	10,21(± 4,4)	
Complexo Sortivo**							
pH	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	P	(SB)	T
(1:2,5)	-----cmol _c /dm ³ -----				---(mg/dm ³)---		
7,5 (± 0,6)	0,1 (± 0,06)	0,5(± 0,4)	6,3(± 3,2)	3,6(± 1,5)	50(± 20)	10,4(± 3,9)	10,5(± 4,1)

CE= Condutividade Elétrica; SB= Soma de Bases; T= capacidade de troca de cátions; n= 25 amostras (*Richards, 1954; **EMBRAPA, 2017)

Tabela 2. Características físicas do solo na camada de 0-20

Areia	Silte	Argila	Ds	Dp	PT
-----g kg ⁻¹ -----			-----g cm ⁻³ -----		%
235(± 10)	441(± 16)	324(± 13)	1,31(± 0,9)	2,66(± 0,3)	51 (± 0,9)

Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partícula; PT= Porosidade; n= 25 amostras.

3.2.2 Descrição e condução da cultura

Foi utilizado o híbrido de Tomate TY – 2006® (Semini), por ser mais utilizado no nordeste brasileiro. É um híbrido com hábito de crescimento determinado, frutos tipo saladete de tamanho uniforme com peso médio de 180 a 210 g e resistente à Murcha de *Verticillium* (Va/Vd), Murcha de *Fusarium* (Fol), Nematóides (Mi/Ma/Mj), Geminivírus (TYLCV), Mancha de *Estenfilium* (Ss) e Mancha de *Alternária* (Aal)(conforme registro de resistência da empresa produtora de sementes).

O semeio foi realizado em bandejas de poliestireno de 128 células, alocadas em ambiente protegido, preenchidas com substrato de turfa de esfagno, sendo depositada uma semente por célula. A irrigação feita ao longo do dia conforme a demanda hídrica das mudas (observada pelos técnicos da estufa com base na coloração do substrato e peso das bandejas) por sistema de barras, em que os bicos aspersores são dispostos em linha, cobrindo transversalmente a área a ser irrigada, transportadas paralelamente ao longo das linhas de bandejas. A adição de nutrientes conduzida por fertirrigação. O período de berçário das mudas foi de 27 dias após o semeio – DAS, após este período, as mudas foram transplantadas na área.

O cultivo da área seguiu os protocolos locais de controle de pragas e doenças e irrigação por gotejamento, a área era irrigada conforme a demanda hídrica, ocorrendo avaliação diária das condições de umidade do solo por tensiometria, sendo a tomada de decisão do momento da irrigação realizada pelo gerente da área, geralmente iniciava-se a irrigação quando o potencial mátrico estimado com base nos tensiômetros atingissem -80kpa, a rega ocorria sempre a noite por motivo de a taxa de consumo da energia elétrica ser reduzida nesse horário. Os eventos de irrigação ocorriam em média a cada três dias.

Como o período de cultivo era sujeito a chuvas utilizou-se mulching plástico para cobrir o solo, evitando-se doenças bacterianas e perda de frutos em contato com o solo. Fertirrigações semanais foram realizadas (Tabela 3). Para tanto foi usada a formulação 20-5-5, Nitrogênio total 20% (nitrato 4%, amoniacal 16%), Fósforo (P_2O_5) 5%, Potássio K_2O 5%, Magnésio 1,7%, Enxofre (SO_3) 39%, Manganês 0,05%, Zinco 0,02%, Boro 0,01%, Ferro 0,05%, Cobre, 0,02% e molibdênio 0,01% da Linha Hakaphos® (Compo expert), fertilizante hidrossolúvel composto que contém: nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, magnésio e micronutrientes, sendo estes quelatizados com EDTA. Para a manutenção das proporções de fósforo e potássio demandados nos diferentes estádios de desenvolvimento fenológico foram utilizadas as formulações 7-12-40 e 13-40-13 também da linha Linha Hakaphos®, compensando proporcionalmente a entrada de N, reduzindo-se a aplicação de 20-5-5 (Tabela 3).

Tabela 3. Quantidade aplicada de fertilizante por fertirrigação ao longo das semanas de cultivo

Semana após transplatio	Fertilizante	Quantidade semanal (kg)
1	13-40-13	4
2	13-40-13	7
3	13-40-13	14
4	7-12-40	20
4	20-5-5	7
6	7-12-40	25
6	20-5-5	8,75
7	7-12-40	30
7	20-5-5	10
8	7-12-40	35
8	20-5-5	8
9	7-12-40	35
9	20-5-5	5
10	7-12-40	35
10	20-5-5	5

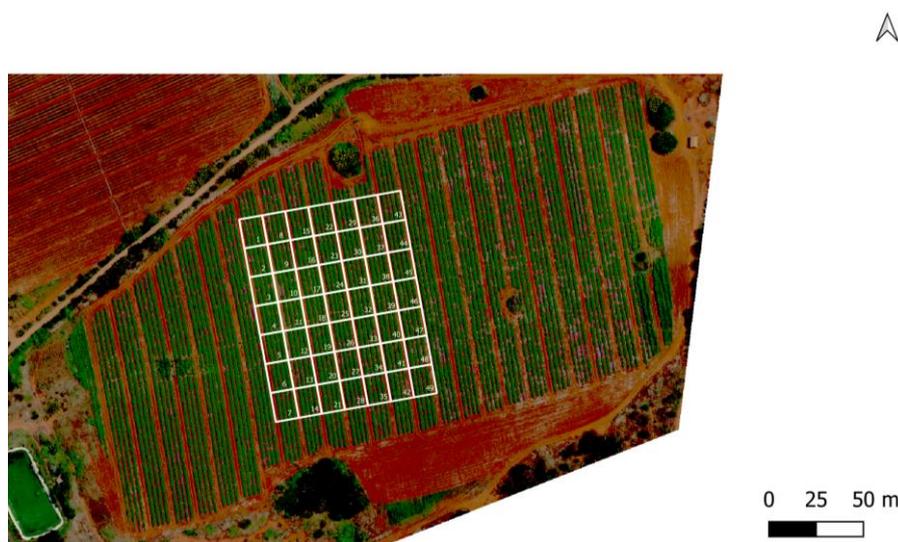
3.2.3 Coleta dos dados

3.2.3.1 Grid de amostragem

A área total do campo experimental foi de 4,5176 ha (aproximadamente 9.200 pés de tomate). Considerou-se, no entanto, para monitoramento, uma área de 0,9408 ha com um grid composto de 49 células considerando espaçamento de 12 x 16 m (Figura 2). Considerando o espaçamento de cultivo de 1,6 m entre plantas e que cada célula do grid contemplando quatro linhas de irrigação, cada célula do grid era composto por aproximadamente 40 plantas. Procurou-se monitorar a área central do campo de cultivo para evitar efeitos de bordadura em que as plantas estão mais sujeitas ao avanço de pragas e doenças.

Nenhum tratamento específico foi realizado nesses pontos de amostra para isolar as variáveis estudadas (teor de nitrogênio foliar, teor de clorofila foliar, peso de frutos por planta e índice de vegetação com diferença normalizada). Foi utilizada a própria variabilidade espacial do cultivo para as comparações.

Figura 2. Imagem Vermelho (R), o Verde (G) e Azul (B) RGB da área estudada com detalhe em verde das linhas de cultivo



3.2.3.2 Coleta e análise dos teores de clorofila e nitrogênio foliar e do peso de frutos por planta

Época, metodologia de análise e características do voo

No dia 03 de Fevereiro de 2020 foi realizado o transplântio das mudas de tomate TY2006. Aos 45 dias após o transplântio - DAT (início da floração em (20 de Março de 2020), foi realizado o voo para coleta de dados com a sensor multiespectral na área de estudo.

Os dados coletados pelo sensor multiespectral foram utilizados para identificar as localizações georreferenciadas do grid amostral identificando espacialmente os pontos de coleta dos valores de NDVI, e com o auxílio do aplicativo Avenza Maps do teor de nitrogênio foliar (TNF), peso de frutos por planta (PFP) e do índice SPAD.

A escolha das plantas amostradas seguiu o critério de que as leituras deveriam ser realizadas em três plantas por linha de irrigação em cada célula do grid e localizadas em pontos homogeneamente distribuídos ao longo dos três terços de cada célula amostrada, seguindo o sentido da linha de irrigação. As plantas analisadas e as células do grid foram identificadas por torniquetes e etiquetas no local da amostragem para monitoramento futuro do peso dos frutos por planta.

3.2.4 Captura de imagens por drone, processamento e análise

O voo foi conduzido com um drone DJI Inspire II (DJI, Shenzhen, China) equipado com sensor multiespectral MicaSense RedEdge-MX (MicaSense, Seattle, Washington, USA). Esse

sensor é capaz de capturar simultaneamente cinco bandas do espectro eletromagnético (azul, verde, vermelho, vermelho limítrofe infravermelho próximo) por lentes individualizadas (ROSAS et al., 2020).

O voo ocorreu em condição de plena iluminação, das 10:00 às 14:00h, isso foi feito para padronizar as condições de iluminação (escolha de dia livre de nuvens). O plano e controle do voo foi feito com o aplicativo DroneDeploy (FERNÁNDEZ et al, 2020).

A altura setada de voo foi de 80 m, e o drone fez uma sobreposição de 75% (frontal e lateral). O sensor foi programado para capturar uma imagem em cada uma das cinco lentes simultaneamente a cada segundo para garantir o número de fotos necessárias para o processamento.

A fim de permitir comparação das imagens em relação a outras áreas ou na mesma área em momentos diferentes, foi realizada uma calibração da reflectância no dia dos voos em que - com auxílio do painel de calibração de reflectância oferecido pelo fabricante do sensor - foram capturadas imagens de uma superfície com padrões de reflectância conhecidos no início e ao final do voo. Posteriormente essas imagens do painel e os respectivos valores padrão para cada uma das cinco bandas foi usado no processamento das imagens para atenuar os efeitos de variações nos padrões de iluminação (CARATAO et al., 2018).

Além disso, um sensor de irradiação solar DSL foi utilizado para atenuar os efeitos de sombreamento eventualmente causados por nuvens (CARATAO et al., 2018). Quatro alvos foram distribuídos na área a fim de otimizar a qualidade do mapa produzido, já que a identificação da localização das imagens desses alvos no ortomosaico foi utilizado para melhorar a precisão do mapa. O sistema de georreferenciamento utilizado foi SIRGAS 2000 / Brazil Mercator EPSG:5641.

O processamento das imagens foi realizado com o software Agisoft Metashape (Agisoft, St. Petersburg, Russia) (TAGLE; ZABALA, 2017). O seguinte protocolo foi seguido para se alcançar um ortomosaico em cada banda capturada: primeiro, foram feitos os procedimentos de alinhamento de fotos e otimização do alinhamento. Posteriormente foi construída uma densa nuvem de pontos e essa nuvem de pontos foi usada para a confecção do modelo digital do terreno. Partindo desse produto foi finalmente confeccionado o ortomosaico para cada banda espectral.

3.2.5 Determinação do NDVI

Os ortomosaicos das bandas azul, vermelho e verde foram usados para a construção da imagem RGB (Figura 2) da área amostrada. Além disso os ortomosaicos de cada banda

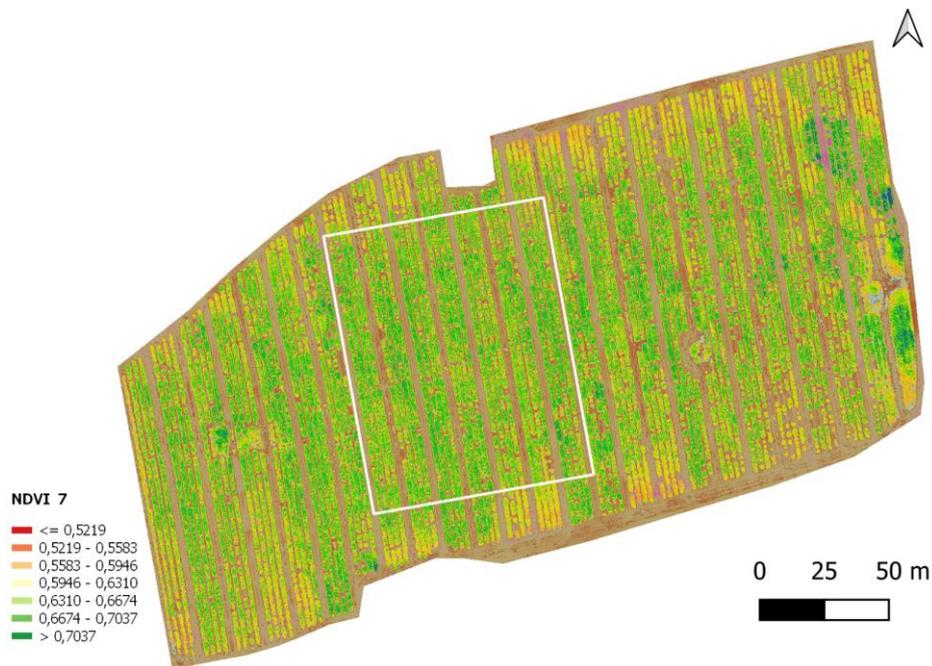
individualizada foram exportados para o software QGIS, e utilizando a calculadora de raster foi gerado o mapa de NDVI (Figura 3) conforme a equação abaixo:

$$NDVI = \frac{(NIR - Ver)}{(NIR + Ver)}$$

NIR = Infra vermelho próximo; Ver = Vermelho.

Após esse procedimento as folhas foram separadas dos demais objetos observados por um procedimento de mascaras, sendo excluídos do cálculo as folhas de ervas daninhas das entrelinhas gerando o mapa final de NDVI (Figura 4) usado nas comparações. O cálculo da média e desvio padrão dos índices foi realizado apenas em objetos considerados folha, visto que os parâmetros estudados se relacionam a folha (teores na folha (clorofila e N total)).

Figura 3. Mapa do índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI)



A fim de padronizar o mapa de NDVI ao grid amostral foi calculado o NDVI médio de cada célula do grid por meio da ferramenta Zonal Statistics do software QGIS, permitindo a comparação entre os dados de NDVI e os demais parâmetros estudados (SPAD, TNF e PFP).

3.2.6 Determinação dos teores de clorofila e teor de nitrogênio

No mesmo dia do voo de drone para a coleta de dados com o sensor multiespectral foi analisado a resposta em índice SPAD das folhas e realizada a coleta das folhas guia para análise do teor de nitrogênio foliar.

Em cada planta foi feita a leitura do SPAD por meio de um medidor de clorofila Minolta SPAD modelo 501 (Minolta corporation, Ltd., Osaka, Japan) (BULLOCK; ANDERSON, 1998). Foram realizadas três leituras em cada folha escolhida para análise (folhas completamente expandidas do terço superior da planta, as mesma folhas amostradas para a determinação do TNF), aceitando-se a média das três leituras como a resposta em SPAD da folha analisada e a média das 12 plantas como a média do SPAD nas plantas que se encontravam na célula desse grid.

As folhas guia coletadas foram acondicionadas em sacolas de papel e levadas para laboratório onde as nervuras foram retiradas e foi aferida a massa fresca do limbo foliar. Esse material vegetal coletado foi individualmente lavado em água destilada, seco por papel toalha e posto para secar em estufa de circulação de ar forçada a temperatura de 65 °C até apresentarem peso constante.

O material então foi homogeneizado em moinho de facas tipo Willey e posteriormente o teor de nitrogênio foi determinado por titulação após digestão em ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio e destilado pelo método Kjeldahl. Os teores dos nutrientes lidos foram convertidos para massa seca e o resultado foi considerado o teor médio da célula amostrada.

3.2.7 Determinação da massa total dos frutos

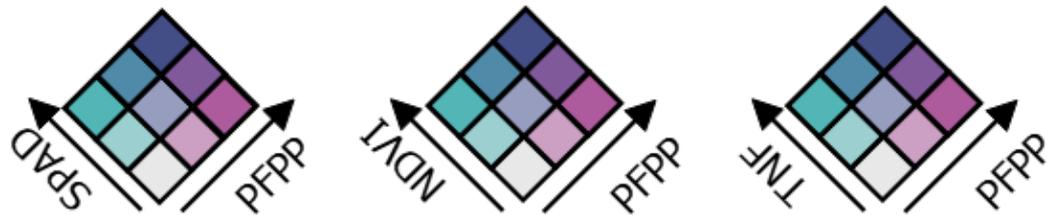
Aos 71 dias após o transplântio quando pelo menos 50% dos frutos estavam maduros, a massa total dos frutos foi determinada nas plantas identificadas por etiqueta para a leitura de clorofila e do teor de nitrogênio foliar. Assim foi calculado o valor médio do peso de frutos por planta nas células amostradas.

3.2.8 Análise de dados

3.2.8.1 Mapas coropléticos coloridos bivariados

Mapas coropléticos coloridos bivariados foram usados para mostrar a distribuição espacial da relação entre duas variáveis por meio da combinação de duas paletas de cores distintas uma para cada variável. A paleta de cor rosa foi usada para expressar a variável dependente das células do grid (PFP) e a paleta de cor verde para expressar as variáveis preditivas estudadas (TNF, NDVI e SPAD), sendo consideradas três classes de cores para cada paleta, formando um grid de 3x3 cores chave. Foram produzidos três mapas coropléticos coloridos bivariados permitindo a geovisualização da relação entre os dados de PFPxTNF, PFPxNDVI e PFPxSPAD de acordo com essa paleta de cores (Figura 5).

Figura 4. Grid de cores usado para a interpretação dos mapas coropléticos coloridos bivariados



A cor mais clara da paleta no canto inferior do quadrado expressa células do grid em que tanto a variável dependente quanto a variável preditiva são baixas, a cor cinza no centro do quadrado expressa células do grid em que ambas variáveis avançam proporcionalmente a valores intermediários e a cor azul escura no topo representa células do grid em que a variável dependente aumenta com o aumento da variável preditiva.

O verde escuro no canto esquerdo do quadrado expressa células do grid em que a variável preditiva atinge os valores mais altos identificados no grid amostral, com valores mais baixos da variável dependente. Por sua vez o rosa escura no canto direito do quadrado expressa células do grid em que o peso de frutos por planta atinge os valores médios mais altos encontrados no grid, mas com valores mais baixos da variável preditiva. As demais cores expressam valores intermediários aos descritos acima seguindo a tendência de crescimento apontada pelas setas.

3.2.8.2 *Análise de regressão*

A análise de regressão foi utilizada para verificar a relação entre variáveis dependentes e variáveis preditivas. Essa relação foi modelada pressupondo um erro (ϵ) randomizado, tendo em vista a impossibilidade de se identificar todos fatores influentes na variação das variáveis dependentes, acrescentando o ϵ ao modelo de regressão linear:

$$y_i = \beta + \alpha x_i + \epsilon_i$$

Tendo em vista a alta variabilidade dos parâmetros estudados e os múltiplos fatores atuantes nesse estudo de campo sem medidas de controle do acaso foi necessária a exclusão de outliers para se alcançar os ajustes mais representativos da realidade e com menor erro.

Analisou-se a resposta dos índices (NDVI e SPAD) em relação ao TNF, para confirmar na área estudada a validade de que estes índices podem ser usados em estimativas sobre a variação de TNF. Analisou-se também a resposta de PFP em relação a variação de TNF, para confirmar o efeito do nitrogênio na produtividade da área estudada. E finalmente a resposta de

PFP em relação ao NDVI e ao SPAD para verificar se NDVI e SPAD podem chegar a um diagnóstico similar ao obtido por TNF em relação ao padrão de variação de PFP na área estudada.

3.2.8.3 Critério para identificação de outliers (Tietjen-Moore)

Para proceder a exclusão de outliers destas regressões foram feitas análises de resíduos com base no teste de Tietjen-Moore (TIETJEN; MOORE, 1972). Esse teste permite a detecção de múltiplos outliers em um banco de dados univariado com distribuição aproximadamente normal, é uma generalização do teste de Grubbs quando se tem múltiplos outliers, sendo necessário indicar previamente o número de outliers a ser testado. Nesse método testa-se as hipóteses: Hipótese nula (H_0) que não existem outliers no banco de dados; e a Hipótese alternativa (H_a) que há exatamente k outliers nesse banco de dados. Sendo k o número de outliers suspeitos.

O teste de Tietjen-Moore foi performedo nas análises das regressões PFPxTNF, PFPxNDVI e PFPxSPAD, testando os k maiores valores absolutos dos resíduos externos studentizados.

O valor de k para cada análise de regressão foi definido considerando células do grid em que PFP médio foi baixo mas com TNF médio elevado e também em células em que o PFP médio foi elevado, mas com TNF médio baixo (o mesmo para NDVI e SPAD, dada a correlação positiva existente entre esses índices e o TNF). O número de células verde escuro e rosa escuro identificados como sem correlação pelo mapa coroplético bivariado foi considerado o valor de k a ser testado pelo teste Tietjen-Moore nos resíduos studentizados de PFPxTNF, PFPxNDVI e PFPxSPAD.

Comparou-se os outliers identificados nas regressões entre PFPxNDVI e PFPxSPAD (outliers estimados pelos índices) com os identificados pelo padrão (PFPxTNF) (outliers reais), verificando-se a melhoria dos parâmetros da regressão PFPxTNF após a exclusão dos outliers identificados pelas três diferentes regressões.

A separação da população em que a variação de PFP é dependente de TNF da população em que PFP é dependente de outros fatores seria considerada bem sucedida por meio de NDVI e SPAD conforme a exclusão dos outliers resultasse na melhoria dos parâmetros da regressão PFPxTNF, considerando ideal a melhoria resultante da exclusão dos outliers com base em TNF.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Estatística descritiva

O teor de nitrogênio foliar (TNF) para a área de estudo variou entre 19 a 41 g kg⁻¹ (Tabela 3), com média (M) e o desvio padrão (DP) de 29,4 e 4,8 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 3). Tendo em vista o teor ideal de N em folha de tomate no estágio de desenvolvimento da amostragem (entre 30 e 50 g kg⁻¹) (SAINJU et al., 2003; ERABADUPITIYA, 2020), a média de TNF observado nesse campo está aproximadamente a ideal. A variação de peso de frutos por planta (PFP) foi de 3,5 a 12,3 kg planta⁻¹ (Tabela 3), com média (M) e desvio padrão (DP) de 7 e 1,8 kg planta⁻¹ respectivamente (Tabela 3), acima da média nacional.

A produtividade média oficial de tomate no Brasil de acordo com o IBGE é de 65,6 t ha⁻¹, ressalta-se que a estatística oficial do IBGE não separa o segmento de tomate indeterminado do segmento de tomate determinado, mas estima-se que em 2012 a safra brasileira de tomate determinado foi de 36% da área total cultivada (VILELA et al. 2012). Como a densidade de plantas ha⁻¹ varia entre os dois segmentos (20.000 a 50.000 planta ha⁻¹ tomate indeterminado, 5.000 a 15.000 planta ha⁻¹ tomate determinado) foi preciso padronizar os dados de produtividade para peso de frutos por planta. 65,6 t ha⁻¹ equivaleria a 6,27 kg de frutos planta⁻¹, considerando-se o espaçamento usado na área de estudo.

A variação de 251% em PFP entre as plantas com menor e maior TNF é superior ao esperado pela estimativa de (ERABADUPITIYA et al, 2020), que sob uma variação similar de TNF observou uma variação em torno de 127% em PFP. Essa elevada variação de PFP observado no estudo expressa a perda de produtividade a que esteve sujeito o campo de cultivo avaliado, apontando que possivelmente outros fatores ambientais além da disponibilidade de nitrogênio afetaram localmente a produtividade na escala observada.

As variações observadas nos valores do índice SPAD das folhas de tomateiro lido em clorofilômetro (SPAD) e do índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) (adimensionais) também corroboram os dados observados de PFP e TNF, à medida em que houve variação de 55% do SPAD (oscilando entre 35 e 55) (Tabela 3) e variação de 60% do NDVI (entre 0,47 e 0,76) (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros de estatística descritiva apresentando média (MM), desvio padrão (DP), mínimo (Min) e máximo (Max) de peso de frutos por planta(PFP), análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD em inglês)(, como índice de vegetação com diferença normalizada(NDVI em inglês), Teor de nitrogênio foliar(TNF)

Variável	M	DP	Min	Max
TNF _(g kg⁻¹)	29,4	4,8	19	41
PFP _(kg planta⁻¹)	7	1,8	3,5	12,3
NDVI	0,62	0,062	0,47	0,76
SPAD	45,6	5,94	35	55

Tais intervalos englobam desde plantas com baixa produtividade, sintomas de baixo crescimento e baixo TNF nos níveis mais baixos de SPAD e NDVI, até plantas com alto potencial de produtividade em plantas cujos valores atingem o patamar ideal acima de 46 para SPAD (MENDONZA et al., 1998; GIANQUINTO et al., 2004; SHI; CAI, 2020, DING; ZHANG, 2020) e acima de 0,65 para NDVI (FORTES et al., 2014; FORTES et al., 2015; ENCISCO et al., 2019).

Embora a produtividade média do campo tenha sido superior à média nacional (6,3kg planta⁻¹), as 15 células mais produtivas somaram de 40% do total produzido nas células amostradas. Isso mostra o potencial aumento de produtividade na maior parte da área estudada conforme os fatores que causaram a redução de PFP no campo fossem identificados e as inconformidades corrigidas nos mesmos moldes das células de maior produtividade.

Apenas 20 das 49 células amostradas se encontrava dentro do intervalo ideal de TNF (entre 30 e 50 g kg⁻¹) (SAINJU et al., 2003) e nenhuma acima desse valor, portanto em 59% das células o TNF se encontrava abaixo do limite recomendado.

Em relação ao NDVI nota-se que 61% dos valores médios das células se encontravam abaixo do ideal para este estágio de desenvolvimento de 0,65 (CANDIAGO et al., 2015). O valor de 0,7 é uma referência geral para o NDVI de uma planta sadia, em que geralmente as maiores produtividades são alcançadas. Em tomate esse valor pode variar conforme o estágio de desenvolvimento da cultura (FORTES et al., 2015), considera-se que o NDVI acima de 0,65 se encontra em um patamar comumente identificado em plantas sadias de tomate no estágio de desenvolvimento vegetativo (FORTES et al., 2014, ENCISCO et al., 2019).

Por sua vez, em relação aos valores de índice SPAD das folhas de tomateiro, aproximadamente 55% das células da área de estudo se encontravam abaixo de 46, valor a partir do qual se considera uma planta de tomate sadia no estágio de desenvolvimento em que foi realizada a coleta (SHI; CAI, 2020; DING; ZHANG, 2020).

3.3.2 Regressão entre os índices SPAD, NDVI e o teor de nitrogênio foliar

O resultado do ajuste de regressão entre TNF e SPAD aponta correlação positiva significativa a 1% entre TNF e SPAD (Tabela 4). Essa tendência em tomate já havia sido identificada previamente (GIANQUINTO et al., 2004, SHI; CAI, 2018, AL-MUGHEER et al., 2021).

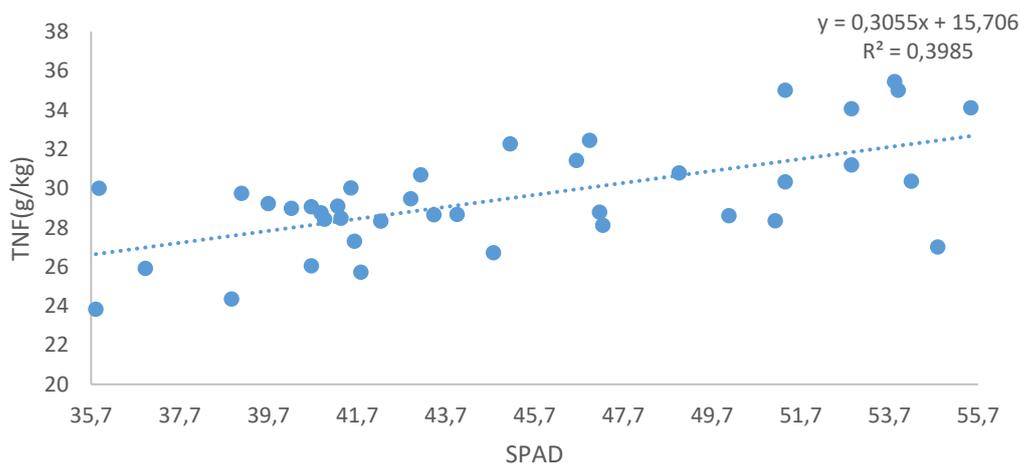
Tabela 4. Parâmetros da regressão linear por mínimos quadrados

Regressão	R ²	p-value(α)	α	β
TNF x SPAD	0,399	0,00687**	0,3055	15,706
TNF x NDVI	0,418	0,00327 **	29,376	10,658

** = significativo a 1%

Houve tendência de aumento do SPAD com o aumento do TNF (Figura 6). Esse comportamento está relacionado ao fato do nitrogênio ser um dos constituintes da molécula da clorofila (Netto et al., 2005) e ao fato do índice SPAD está relacionado ao status de nitrogênio das folhas analisadas (AL-MUGHEER et al., 2021).

Figura 5. Ajuste de regressão linear do teor de nitrogênio foliar (TNF) em relação ao índice análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD)



Isso tem permitido que o índice SPAD tenha se popularizado como indicador do *status* de nitrogênio não apenas em tomate, mas em diversas culturas cultivadas para o manejo da adubação nitrogenada (SHI; CAI, 2018; REYES et al., 2017; YUE et al., 2020), embora no presente estudo esse índice não tenha apresentado R² suficientemente elevado para garantir que o SPAD fosse usado para realizar tais estimativas. Isso ocorreu devido ao fato de no campo

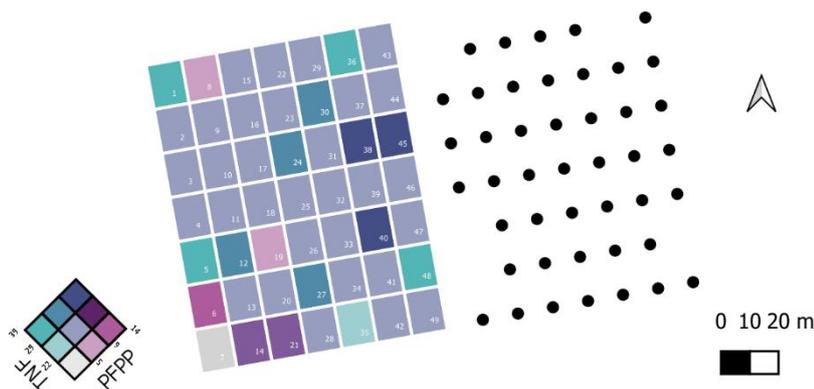
Além disso, o aumento do tamanho das plantas e maior crescimento é também consequência da maior quantidade de nitrogênio absorvido por plantas de tomate (HERNÁNDEZ et al., 2016, RONGA et al., 2019,) implicando em maior área de solo coberta pela vegetação (REN et al., 2011). Como o solo reflete mais o vermelho, quanto maior a porção do solo coberta por vegetação, maior NDVI da área observada (BOIARSKII; HASEGAWA, 2019).

Esses resultados apontam NDVI e SPAD como estimadores viáveis da variabilidade espacial do estado nutricional em plantas de tomate no tocante ao nitrogênio, sendo possível identificar espacialmente o gradiente de variação da concentração de nitrogênio no tecido vegetal, entre valores mais baixos, médios e elevados. Porém, limitado pelo baixo R^2 não é possível usá-los para estimar precisamente os valores da concentração de N nas folhas.

3.3.3 Teor de nitrogênio foliar e peso de fruto por planta

É possível identificar, no mapa coroplético entre PFP e TNF, cinco amostras (1, 5, 6, 36 e 48) que não tem o comportamento esperado de aumento de PFP com aumento de TNF (Figura 8). Em campo foi possível verificar que essa inconsistência estava atrelada ao estresse hídrico pelo entupimento de gotejadores, porém nenhuma variável de status hídrico foi avaliada.

Figura 7. Mapa da coroplético bivariado do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao teor de nitrogênio foliar (TNF) e outliers excluídos do grid pelo resíduo externo studentizado



A célula 6 teve comportamento de PFP elevado com baixo TNF e nas demais células ocorre elevado TNF e baixo PFP, ou seja, os valores estimados pela equação da reta ajustada pela regressão seriam maiores que os observados nas células verdes e menores que o observado na célula rosa.

Nota-se pela Tabela 5 que quando todas as células do grid são usadas na análise de regressão, não se identifica correlação significativa entre PFP e TNF.

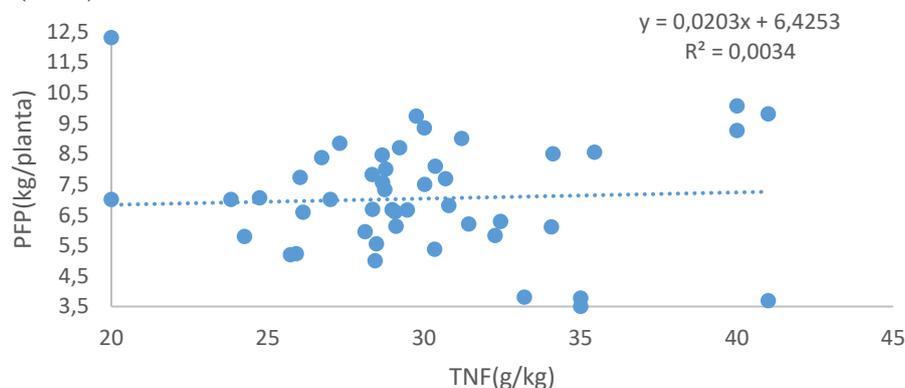
Tabela 5. Parâmetros da regressão linear por mínimos quadrados

Regressão	R ²	p(α)	α	β	VC _(5%)	E _k
PFP x TNF	0,003	0,69264	0,0203	6,43	0,46	0,381
PFP x TNF'	0,311	0,00296 **	0,1665	2,42	-	-

PFP = Peso de fruto por planta; TNF = teor de nitrogênio foliar; NDVI = Índice de vegetação com diferença normalizada; SPAD = Análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD); ' = Regressão após a exclusão de outliers; (NDVI) = exclusão de outliers por PFPxNDVI; (SPAD) = exclusão de outliers por PFPxSPAD; *** = significativo a 0,1%; ** = significativo a 1%; * = significativo a 5%.

Na Figura 9 observa-se que a inclinação da curva ajustada tende a um valor constante. Considerando o número de células com comportamento anômalo identificado no mapa coroplético bivariado, o valor de k a ser considerado no teste de Tietjen-Moore para essa regressão foi igual a 5.

Figura 8. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao teor de nitrogênio foliar (TNF)

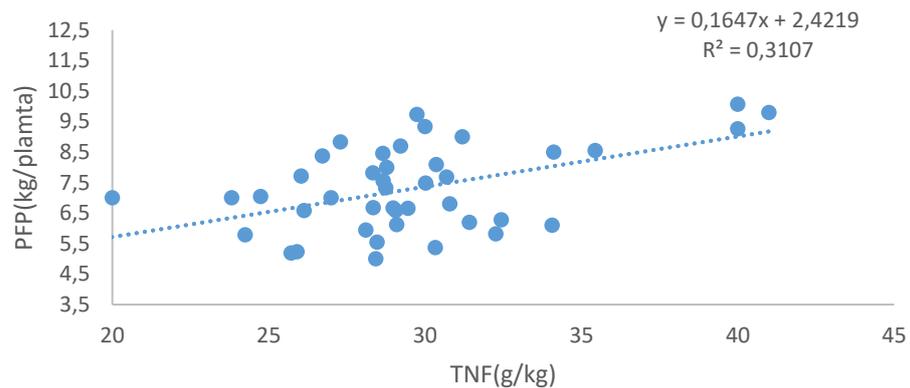


O valor crítico com nível de significância a 5% ($VC_{(5\%)}$) obtido pelo teste de Tietjen-Moore de foi igual a 0,46 (Tabela 5), de acordo com esse método valores de ($VC_{(5\%)}$) abaixo de 0,5 indicam a possibilidade de outliers nos dados. De acordo com o resultado do teste o E_k foi igual a 0,381, menor que $VC_{(5\%)}$.

Portanto, rejeitou-se a hipótese nula e confirmou-se a hipótese de que os cinco maiores valores absolutos de resíduo externo studentizado dessa regressão - em ordem decrescente as células 6, 5, 1, 36 e 48 - deveriam ser excluídas como outliers, por serem valores extremos, altamente influentes na curva e com comportamento anômalo em relação a absorção de um elemento essencial.

Após a exclusão dos outliers, verificou-se que houve correlação positiva em PFP x TNF, significativa em nível de 0,01 de probabilidade, melhorando-se também o R^2 da regressão de 0,003 para 0,31(Tabela 5). Nesse sentido o melhor ajuste da reta identifica o comportamento de aumento de PFP com aumento de TNF (Figura 10).

Figura 9. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao teor de nitrogênio foliar (TNF) após a exclusão de outliers pelo teste de Tietjen-Moore na regressão PFPxTNF



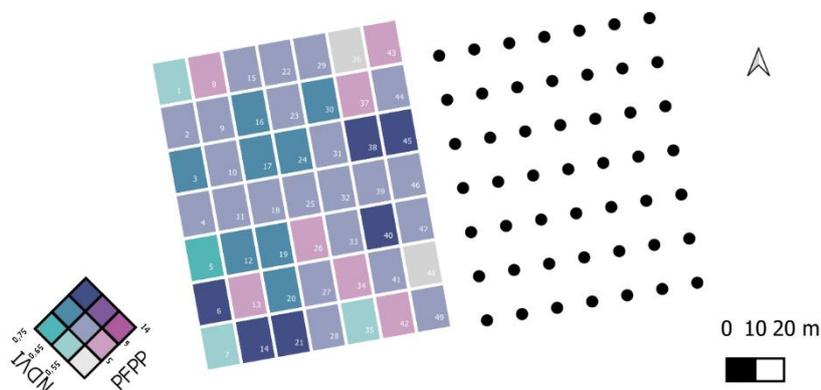
É provável que a variação de produtividade nessas células tenha sido mais influenciada por outros fatores que não TNF. Nesse sentido estas amostras compunham uma população diferente das demais células do grid amostral e por isso não poderiam ser consideradas conjuntamente na análise de regressão.

3.3.4 Índice de vegetação com diferença normalizada e peso de fruto por planta

Considerando a correlação positiva significativa a 1% entre NDVI e TNF (Tabela 4) e também a correlação positiva entre NDVI e produtividade em tomate, identificada em estudos anteriores (GALEGO et al., 2015), o comportamento esperado é de aumento do PFP com aumento do NDVI.

O mapa coroplético bivariado das variáveis PFP e NDVI no grid amostral aponta que célula 5 do grid amostral é incoerente com o comportamento esperado (Figura 11), pois nela foi observado elevado valor de NDVI e baixo o valor de PFP. No contexto destes dados os valores estimados pela regressão PFPxNDVI são maiores que o observado na célula 5.

Figura 10. Mapa da coroplético bivariado do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao Índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) e outliers excluídos do grid pelo resíduo externo studentizado



A despeito dessa célula com valores discrepantes, a análise de regressão entre PFP e NDVI apontou correlação positiva significativa a 1%, e R^2 de 0,51 (Tabela 6).

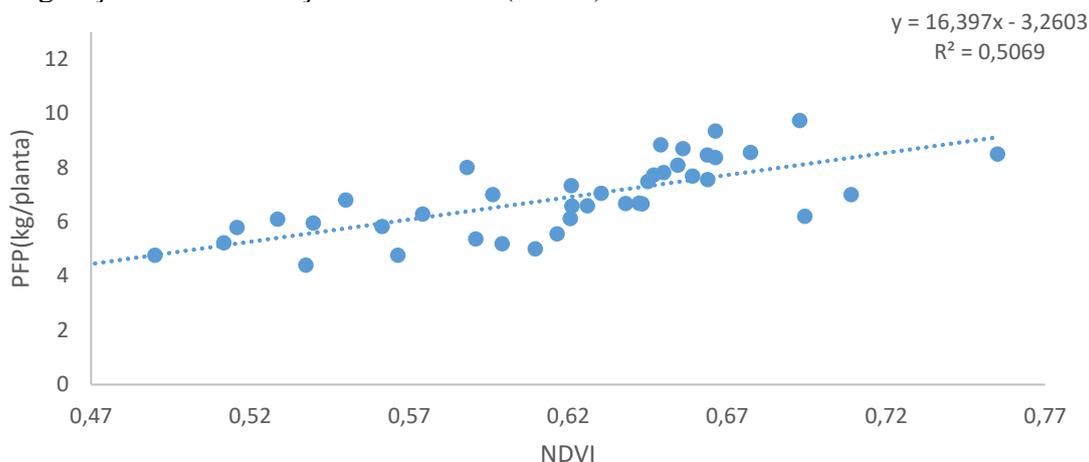
Tabela 6. Parâmetros da regressão linear por mínimos quadrados

Regressão	R^2	$p(\alpha)$	α	β	VC(5%)	E_k
PFPxNDVI	0,507	9.587e-05 ***	16,397	-3,260	0,79	0,741
PFPxTNF´	0,011	0,47158	0,0363	6,033	-	-

PFP = Peso de fruto por planta; TNF = teor de nitrogênio foliar; NDVI = Índice de vegetação com diferença normalizada; SPAD = Análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD); ´ = Regressão após a exclusão de outliers; $_{(NDVI)}$ = exclusão de outliers por PFPxNDVI; $_{(SPAD)}$ = exclusão de outliers por PFPxSPAD; *** = significativo a 0,1%; ** = significativo a 1%; * = significativo a 5%.

A curva ajustada aos pontos interpolados destas duas variáveis teve o comportamento de aumento de PFP com aumento do NDVI (Figura 12).

Figura 11. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI)



O teste de Tietjen-Moore apontou $VC_{(5\%)}$ acima de 0,5 e E_k maior que o $VC_{(5\%)}$ (Tabela 6), esse resultado aponta não haver a necessidade da exclusão de outliers para o ajuste da reta com menor erro nos pontos interpolados pelos valores destas duas variáveis.

Ainda assim testando-se a exclusão deste ponto anômalo identificado pelo mapa coroplético bivariado na regressão PFP x TNF não se observa melhoria nos parâmetros da regressão PFP x TNF (Tabela 6). Levando-se em consideração os pontos identificados como outliers pela regressão PFP x TNF, o NDVI não foi eficaz em separar as populações diferentes identificadas do grid amostral.

Embora o NDVI possa ser usado no manejo da adubação nitrogenada (PADILLA et al., 2020) dada sua alta correlação com o teor de clorofila foliar (PATANE; VIBHUTE, 2014), sobretudo em áreas em que o maior fator limitante à produtividade seja o nitrogênio (HOKMALIPOUR; DARBANDI, 2011), em plantas de tomateiro esse índice não é capaz de separar o dano na produtividade causado pela deficiência de nitrogênio de danos causados por outros fatores, ou seja o NDVI é indicativo de que há um estresse causando redução do acúmulo de biomassa, mas não identificar qual a causa.

Isso inviabiliza o uso do NDVI para seleção prévia de amostras menos sujeitas a ação de outros agentes limitantes ao crescimento como o déficit hídrico e a ação de fitopatógenos, permitindo amostras menos enviesadas para análise de regressão entre PFP e TNF a fim de ajustar modelos indicadores de valores de referência de TNF. Por outro lado a correlação significativa entre o NDVI e o PFP reitera o potencial de uso deste índice de vegetação na estimativa de produtividade em áreas de tomate com crescimento determinado, conforme já verificado por Wahab et al. (2018) em milho, Esquerdo e Junior (2011) em soja, Liu et al. (2017) em arroz e Fortes et al. (2014) em tomate.

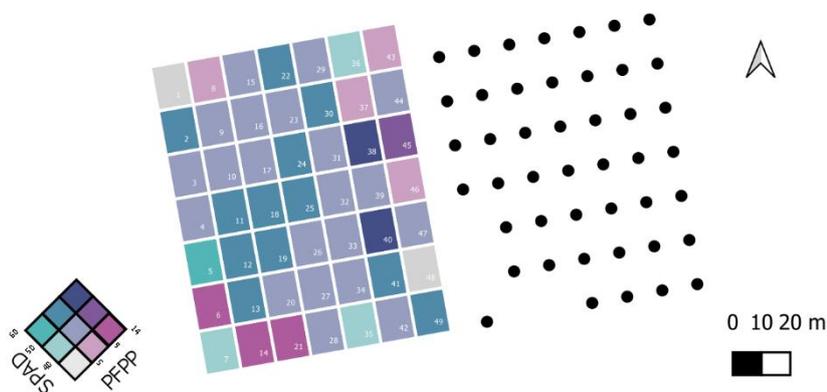
A análise de regressão entre NDVI e PFP, além de significativa a 1%, teve R^2 acima de 50%, mostrando ser possível estimar a variabilidade espacial da produtividade de tomate com base no NDVI. O baixo R^2 na regressão entre NDVI e TNF aponta por sua vez que a variação de PFP na área não foi apenas decorrente da biodisponibilidade de N. Portanto ruídos de outros agentes estressantes (visualmente identificado na área a predominância do estresse hídrico além da deficiência de nitrogênio) com similar resposta espectral ao estresse provocado pela deficiência em N impossibilitaram o uso do NDVI como estimador adequado do *status* nutricional em nitrogênio na área monitorada.

3.3.5 Análise de SPAD e peso de fruto por planta (PFP)

Tendo em vista a correlação positiva significativa entre TNF e SPAD (Tabela 7) e também considerando o comportamento esperado de aumento da produtividade com aumento do SPAD (ZHAO; JIANG, 2019), nota-se pelo mapa coroplético bivariado das variáveis PFP e SPAD que as células 5, 6, 14 e 21 não obedecem esse padrão pelo efeito de estresse hídrico identificado visualmente na área devido ao entupimento de emissores de irrigação (Figura 13).

A célula 5 (verde) ocorre elevado SPAD com baixo PFP, com estimativas supervalorizadas em relação aos valores observados (Figura 13). Por sua vez, nas células 6, 14 e 21 (rosas) ocorre o oposto, baixo SPAD com elevado PFP (Figura 13), gerando erros na regressão subestimando valores estimados em relação aos observados.

Figura 12. Mapa da coroplético bivariado do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao índice de análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD) e outliers excluídos do grid pelo resíduo externo studentizado



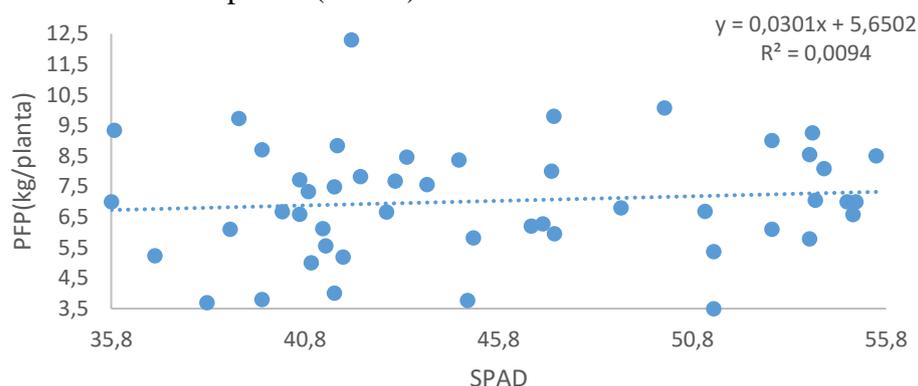
Além disso a tabela 7 mostra que a regressão entre PFP e SPAD não é significativa.

Tabela 7. Parâmetros da regressão linear por mínimos quadrados

Regressão	R ²	p(α)	α	β	VC _(5%)	E _k
PFPxSPAD	0.009	0.5068	0.0301	5.6502	0.462	0.426
PFPxSPAD´	0.089	0.0469*	0.0823	3.0775	-	-
PFPxTNF _(SPAD)	0.001	0.881	-0.008	7.0507	-	-

PFP = Peso de fruto por planta; TNF = teor de nitrogênio foliar; NDVI = Índice de vegetação com diferença normalizada; SPAD = Análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD); ´ = Regressão após a exclusão de outliers; _(NDVI) = exclusão de outliers por PFPxNDVI; _(SPAD) = exclusão de outliers por PFPxSPAD; *** = significativo a 0,1%; ** = significativo a 1%; * = significativo a 5%.

A curva ajustada aos pontos interpolados nessa regressão tende a um valor constante entre estas duas variáveis, indicando independência entre as variáveis estudadas (Figura 14).

Figura 13. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao índice análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD)

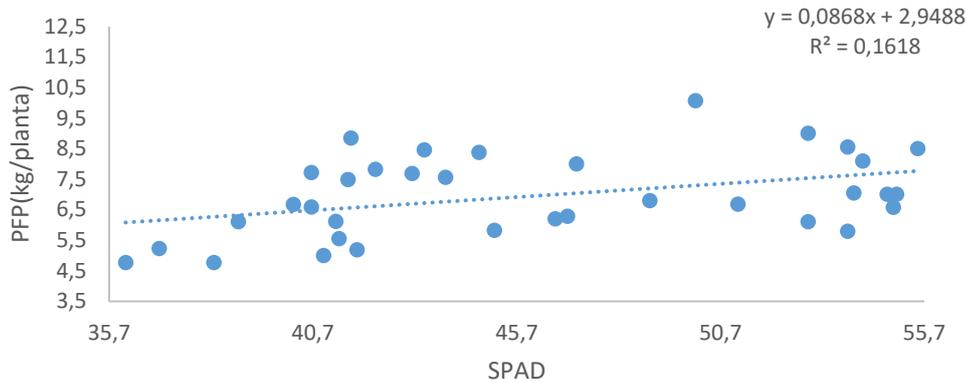
O teste de Tietjen-Moore na regressão entre PFP e SPAD considerou k igual a 4 na tentativa de verificar se os valores destas quatro células com comportamento anômalo do ponto de vista do comportamento esperado, tem também valores extremos e influentes na curva ajustada aos pontos interpolados entre PFP e SPAD impedindo o melhor ajuste da curva, identificando-os ou não como outliers, conforme os critérios do teste.

VC_{5%} foi menor que 0,5 e que E_k foi menor que VC_{5%} (Tabela 7), indicando que os quatro pontos discrepantes identificados no mapa coroplético bivariado de PFP e SPAD (os pontos de maior valor absoluto de resíduo externos studentizado) eram realmente outliers e não deveriam ser considerados na análise de regressão.

Após a exclusão destes pontos a regressão entre PFP x SPAD´ apresentou ajuste do coeficiente angular significativo a 5% (Tabela 7), verificando-se uma correlação positiva entre as variáveis (Figura 15). Portanto os outliers excluídos contribuiriam para a melhora do ajuste

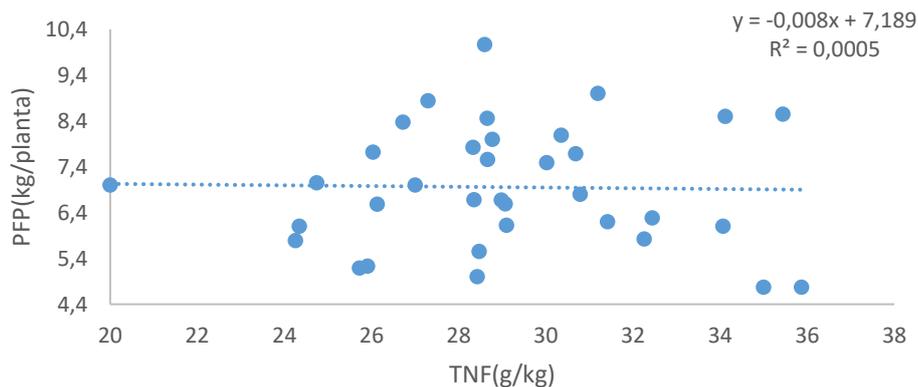
da curva, mas ainda de maneira insuficiente para explicar a variação em PFP apenas com base no SPAD.

Figura 14. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao índice análise de desenvolvimento solo-planta (SPAD) após a exclusão de outliers pelo teste de Tietjen-Moore na regressão PFPxSPAD



Além disso os outliers identificados pelo teste de Tietjen-Moore na regressão entre PFP e SPAD ao serem excluídos da regressão PFPxTNF não causaram qualquer melhora nos parâmetros da regressão (Tabela 7) e a curva ajustada aos pontos remanescentes não são coerentes com o esperado (Figura 16).

Figura 15. Ajuste de regressão linear do peso de frutos por planta (PFP) em relação ao teor de nitrogênio foliar (TNF) após a exclusão de outliers pelo teste de Tietjen-Moore na regressão PFPxSPAD



Assim, embora o SPAD tenha sido bem sucedido identificar deficiência de nitrogênio em tomate com crescimento determinado variando-se as doses de nitrogênio (Shi e Cai, 2020), apenas com o uso desse índice não foi possível separar as diferentes populações identificadas na área em termos do fator causador da variabilidade PFP quando a disponibilidade de

nitrogênio não foi isolada como único fator limitante ao desenvolvimento das plantas como no ambiente de cultivo monitorado.

Portanto, na condição de múltiplos agentes estressantes afetando a produtividade como a observada na área de cultivo (predominando o estresse hídrico e nutricional em nitrogênio) o índice SPAD não foi capaz de separar o dano na produtividade causado pela deficiência do nitrogênio dos demais agentes estressantes. Isso provocou um baixo R^2 nas regressões e índice SPAD não se relacionou ao TNF nem ao PFP. Isso mostra que este índice é mais sujeito a ruídos de outros agentes estressantes que possam afetar o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes similarmente ao efeito da deficiência nutricional em nitrogênio.

Índices baseados na reflectância da folha como NDVI e SPAD tem sido usado como indicadores funcionais de plantas, porque o verde da vegetação absorve a maior parte da luz refletida, consequência do conteúdo de pigmentos da folha (ex: clorofilas e carotenoides) (Yoder e Pettigrew-Crosby, 1995) os quais se correlacionam com o *status* fisiológico das plantas (Jones e Vaughan, 2010; Marcial-Pablo et al., 2018). São portanto sensíveis a variação da sanidade vegetal.

O conteúdo de pigmentos fotossintetizantes pode ser afetado por múltiplos fatores ambientais, como estresses bióticos (AROOJ et al., 2019; KIM et al., 2019), e estresses abióticos, como hídrico (ZHANG et al., 2018; SHIN et al., 2020), presença de metais pesados (ZEESHAN et al., 2020), temperatura excessiva (AHAMMED et al., 2018), exposição à radiação solar, YOON et al., 2020), além da deficiência do nitrogênio (JIANG et al., 2017). Tais índices não são indicadores capazes de separar especificamente efeitos do nitrogênio na variação da produtividade de áreas de tomateiro cultivado em campo aberto, pois nesse contexto a produtividade é dependente de além do nitrogênio de outros fatores que também afetam o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes.

3.4 Conclusões

Os índices NDVI e SPAD não foram capazes de separar a variação de fenótipos de tomate pelo *status* nutricional em nitrogênio devido a ocorrência de ruídos de pelo estresse hídrico ocasionado pelo entupimento de emissores com similar impacto no aparato fotossintético das plantas no ambiente observado, mas por meio de mecanismos diferentes. Isso fez com que alterações fenotípicas oriundas de agentes estressantes distintos tivessem respostas espectrais similares nas frequências de onda usadas para a confecção destes índices.

Essa limitação aumenta a chance de erros na classificação de zonas de manejo de adubação nitrogenada apenas com base na proporção entre as frequências de onda relacionadas

ao conteúdo de pigmentos fotossintetizantes das folhas, pela possibilidade de agrupar regiões com base na variação espectral provocada por outros agentes estressantes distintos da biodisponibilidade de nitrogênio. Isso implica na necessidade de combinar os dados do sensoriamento por NDVI e SPAD a outras camadas de informação sobre a variabilidade especial de áreas estudadas como mapas de produtividade, mapas da condutividade elétrica aparente do solo, mapas de resistência a penetração, mapas termais mapas de fertilidade da área, dados de armadilhas de pragas, etc. Do ponto de vista da otimização da amostragem, não é possível apenas com o NDVI e SPAD qualificar amostras mais representativas da variabilidade do *status* nutricional em nitrogênio na área sensoriada. Porém, a variabilidade observada por esses índices, sobretudo o NDVI, pode ajudar por meio de cálculos de suficiência amostral a determinar o número de amostras necessárias para uma caracterização representativa da variabilidade fenotípica da área por meio de análises de tecido, pois é possível calcular o desvio padrão da resposta espectral das plantas da área sensoreada.

Referências Bibliográficas

- AHAMMED, G. J.; XU, W.; LIU, A.; CHEN, S. COMT1 silencing aggravates heat stress-induced reduction in photosynthesis by decreasing chlorophyll content, photosystem II activity, and electron transport efficiency in tomato. **Frontiers in plant science**, v. 9, p. 998, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00998>
- AL-MUGHEER, L. K. A.; AL-JUMAILI, M. A. H.. Effect of the fertilizer type on the growth and yield of two tomato hybrids. **Plant Archives**, v. 21, n. 1, p. 927-932, 2021. <https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2021.v21.S1.144>
- AROOJ, S.; IFTEKHAR, Y.; MUBEEN, M.; ULLAH, M. I.; SAJID, A.; ALI, S.; QUDSIA, H. Effect of environmental factors on biochemical properties of tomato leaf curl virus infected leaves of tomato. **Pakistan Journal of Phytopathology**, v. 31, n. 1, p. 105-111, 2019. <https://doi.org/10.33866/phytopathol.031.01.0467>
- BOIARSKII, B.; HASEGAWA, H. Comparison of NDVI and NDRE indices to detect differences in vegetation and chlorophyll content. **Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences**, v. 4, p. 20-29, 2019. <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- CAMMARANO, D.; RONGA, D.; DI MOLA, I.; MORI, M.; PARISI, M. Impact of climate change on water and nitrogen use efficiencies of processing tomato cultivated in Italy. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106336, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106336>.
- CAMPIGLIA, E.; MANCINELLI, R.; RADICETTI, E.; CAPORALI, F. Effect of cover crops and mulches on weed control and nitrogen fertilization in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **Crop Protection**, v. 29(4), 354-363, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.12.001>
- CANDIAGO, S.; REMONDINO, F.; DE GIGLIO, M.; DUBBINI, M.; & GATTELLI, M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. **Remote sensing**, v. 7 n. 4, p. 4026-4047, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>
- CONDORELLI, G. E.; MACCAFERRI, M.; NEWCOMB, M.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; WHITE, J. W.; FRENCH, A. N.; TUBEROSA, R. Comparative aerial and ground based high throughput phenotyping for the genetic dissection of NDVI as a proxy for drought adaptive traits in durum wheat. **Frontiers in plant science**, v. 9, 893, 2018). <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00893>
- DENG, X.; MA, W.; REN, Z.; ZHANG, M.; GRIENEISEN, M. L.; CHEN, X.; LV, X. Spatial and temporal trends of soil total nitrogen and C/N ratio for croplands of East China. **Geoderma**, v. 361, p. 114035, 2020). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114035>
- DHAKAL, C. P. Dealing with outliers and influential points while fitting regression. **Journal of Institute of Science and Technology**, v. 22, n. 1, p. 61-65, 2017. <https://doi.org/10.3126/jist.v22i1.17741>

- DU, Y. D.; CAO, H. X.; LIU, S. Q.; GU, X. B.; & CAO, Y. X. Response of yield, quality, water and nitrogen use efficiency of tomato to different levels of water and nitrogen under drip irrigation in Northwestern China. **Journal of integrative agriculture**, v. 16 n .5, p. 1153-1161, 2017. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61371-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61371-0)
- ELIA, A.; CONVERSA, G. Agronomic and physiological responses of a tomato crop to nitrogen input. **European Journal of Agronomy**, v. 40, p. 64-74,2012). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.02.001>
- ESQUERDO, J. ZULLO JÚNIOR, J.; & ANTUNES, J. Use of NDVI/AVHRR time-series profiles for soybean crop monitoring in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32(13), p. 3711-3727,2011). <https://doi.org/10.1080/01431161003764112>
- FAGERIA, N. Soil fertility and plant nutrition research under field conditions: Basic principles and methodology. **Journal of plant nutrition**, v. 30 n. 2, p. 203-223,2007. <https://doi.org/10.1080/01904160601117887>
- FAGERIA, N. K.; & BALIGAR, V. C, Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in agronomy**, v. 88, p. 97-185, 2005. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)
- FALLAHI, E.; COLT, W. M.; & FALLAHI, B. Optimum ranges of leaf nitrogen for yield, fruit quality, and photosynthesis in 'BC-2 Fuji'apple. **Journal of the American Pomological Society**, v. 55 .n 2, p. 68, 2001.
- FENG, Z.; ZHANG, J.; CHEN, Q. Statistical inference for linear regression models with additive distortion measurement errors. **Statistical Papers**, v. 61n. 6, p. 2483-2509, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00362-018-1057-2>
- FORTES, R.; PRIETO, M. H.; TERRÓN, J. M.; BLANCO, J.; MILLAN, S.; & CAMPILLO, C. Using apparent electric conductivity and NDVI measurements for yield estimation of processing tomato crop. **Transactions of the ASABE**, v. v. 57n. 3, p. 827-835, 2014. doi: 10.13031/trans.57.10456
- GITELSON, A.; MERZLYAK, M. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 12, p. 2691-2697, 1997. <https://doi.org/10.1080/014311697217558>
- GLEESON, S. K. Optimization of tissue nitrogen and root-shoot allocation. **Annals of Botany**, v. 71, n. 1, p. 23-31, 1993. <https://doi.org/10.1006/anbo.1993.1003>
- GONG, X.; LI, J.; MA, H.; CHEN, G.; DANG, K.; YANG, P.; FENG, B. Nitrogen deficiency induced a decrease in grain yield related to photosynthetic characteristics, carbon–nitrogen balance and nitrogen use efficiency in proso millet (*Panicum miliaceum* L.). **Archives of Agronomy and Soil Science**. 2019. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1619077>

GRADOS, D.; REYNARFAJE, X.; & SCHREVEN, E. A methodological approach to assess canopy NDVI-based tomato dynamics under irrigation treatments. **Agricultural Water Management**, v. 240, p. 106208, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106208>

HARTZ, T. K.; & BOTTOMS, T. G. Nitrogen requirements of drip-irrigated processing tomatoes. **HortScience**, v. 44, n. 7, p. 1988-1993, 2009. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.7.1988>

HE, F.; CHEN, Q.; JIANG, R.; CHEN, X.; ZHANG, F. Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with conventional and site-specific nitrogen management in Northern China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 77n. 1, p. 1-14, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-6275-7>

HOKMALIPOUR, S.; & DARBANDI, M. H. Effects of nitrogen fertilizer on chlorophyll content and other leaf indicate in three cultivars of maize (*Zea mays* L.). **World Applied Sciences Journal**, v. 15, n. 12, 1780-1785, 2011. doi=10.1.1.390.861

ILLÉS, Á.; MOUSAVI, S. N.; BOJTOR, C.; NAGY, J. The plant nutrition impact on the quality and quantity parameters of maize hybrids grain yield based on different statistical methods. **Cereal Research Communications**, v. 48, n. 4, p. 565-573, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00074-5>

JIANG, C.; JOHKAN, M.; HOHJO, M.; TSUKAGOSHI, S.; MARUO, T. A correlation analysis on chlorophyll content and SPAD value in tomato leaves. **HortResearch**, v. 71, p. 37-42, 2017. 10.20776/S18808824-71-P37

KANISZEWSKI, S.; KOSSON, R.; GRZEGORZEWSKA, M.; KOWALSKI, A.; BADELEK, E.; SZWEJDA-GRZYBOWSKA, J.; ... & AGATI, G. Yield and quality traits of field grown tomato as affected by cultivar and nitrogen application rate. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 21, n. 3, p. 683-697, 2019.

KIM, J. H.; BHANDARI, S. R.; CHAE, S. Y.; CHO, M. C.; & LEE, J. G. Application of maximum quantum yield, a parameter of chlorophyll fluorescence, for early determination of bacterial wilt in tomato seedlings. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 60(6), p. 821-829, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00182-0>

LI, H.; LIU, H.; GONG, X.; LI, S.; PANG, J.; CHEN, Z.; & SUN, J. Optimizing irrigation and nitrogen management strategy to trade off yield, crop water productivity, nitrogen use efficiency and fruit quality of greenhouse grown tomato. **Agricultural Water Management**, v. 245, p. 106570, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106570>

LI, Y.; SUN, Y.; LIAO, S.; ZOU, G.; ZHAO, T.; CHEN, Y.; ... & ZHANG, L. Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato. **Agricultural Water Management**, v. 186, p. 139-146, 2017.

LIANG, L.; RIDOUTT, B. G.; LAL, R.; WANG, D.; WU, W.; PENG, P.; ... & ZHAO, G. Nitrogen footprint and nitrogen use efficiency of greenhouse tomato production in North China. **Journal of cleaner production**, v. 208, p. 285-296, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.149>

LIU, X.; FERGUSON, R. B.; ZHENG, H.; CAO, Q.; TIAN, Y.; CAO, W.; & ZHU, Y. Using an active-optical sensor to develop an optimal NDVI dynamic model for high-yield rice production (Yangtze, China). **Sensors**, v. 17n. 4, p. 672, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17040672>

LV, H.; LIN, S.; WANG, Y.; LIAN, X.; ZHAO, Y.; LI, Y.; ... & BUTTERBACH-BAHL, K. Drip fertigation significantly reduces nitrogen leaching in solar greenhouse vegetable production system. **Environmental pollution**, v. 245, p. 694-701, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.042>

MAIA, S.; MARTINEZ, P.; CLEMENTE, M.; VENTRELLA, C.; MILAGRES, C. Growth, nutrient concentration, nutrient accumulation and visual symptoms of nutrient deficiencies in cherry tomato plants. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 40 n. 2, p. 585-598, 2019. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p585>

MASCLAUX-DAUBRESSE, C.; DANIEL-VEDELE, F.; DECHORGNAT, J.; CHARDON, F.; GAUFICHON, L.; SUZUKI, A. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. **Annals of botany**, v. 105, n. 7, p. 1141-1157, 2010. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq028>

NETTO, T.; CAMPOSTRINI, E.; DE OLIVEIRA, G.; & BRESSAN-SMITH, E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v. 104, n.2, p. 199-209, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.08.013Get>

OLANIYI, O.; & AJIBOLA, T. Effects of inorganic and organic fertilizers application on the growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon lycopersicum*). **Journal of Applied Biosciences**, v. 8, n. 1, p. 236-242, 2008. DOI: 10.2478/fhort-2018-0027

PADILLA, F. M.; FARNESELLI, M.; GIANQUINTO, G.; TEI, F.; & THOMPSON, R. B. Monitoring nitrogen status of vegetable crops and soils for optimal nitrogen management. **Agricultural Water Management**, v. 241, p. 106356, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106356>

PATANE, P.; VIBHUTE, A. Chlorophyll and nitrogen estimation techniques: A Review. **International Journal of Engineering Research and Reviews**, v. 2, n. 4, p. 33-41, 2014

PINHEIRO, I.; MELO, J.; ROBERTO, M.; SILVA, P. P.; FIORIO, P.; CERRI, C. ; & Eduardo Pellegrino Cerri, C. Prediction of sugarcane yield based on NDVI and concentration of leaf-tissue nutrients in fields managed with straw removal. **Agronomy**, v. 8, n. 9, p. 196, 2018. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090196>

REN, H.; ZHOU, G.; ZHANG, X. Estimation of green aboveground biomass of desert steppe in Inner Mongolia based on red-edge reflectance curve area method. **Biosystems**

Engineering, v. 109, n. 4, p. 385-395, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.05.004>

REYES, F.; CORREA, C.; ZUNIGA, J. Reliability of different color spaces to estimate nitrogen SPAD values in maize. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, p. 14-22, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.032>Get

RONGA, D.; PARISI, M.; PENTANGELO, A.; MORI, M.; DI MOLA, I. Effects of nitrogen management on biomass production and dry matter distribution of processing tomato cropped in southern Italy. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 855, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120855>

RONGA, D.; PENTANGELO, A.; PARISI, M. Optimizing N fertilization to improve yield, technological and nutritional quality of tomato grown in high fertility soil conditions. **Plants**, v. 9, n. 5, p. 575, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9050575>

ROSAS, F., DE CARVALHO PINTO, A., QUEIROZ, D., DE MELO VILLAR, M., MARTINS, N., & SILVA, A. Low-cost system for radiometric calibration of UAV-based multispectral imagery. **Journal of Spatial Science**, p. 1-15, 2020

SAN-MARTÍN-HERNÁNDEZ, C.; TREJO-TÉLLEZ, L. I.; GÓMEZ-MERINO, F. C.; VOLKE-HALLER, V. H.; ESCALANTE-ESTRADA, J. A.; GARCÍA, P. S.; & SAUCEDO-VELOZ, C. Nitrogen and potassium nutrition differentially affect tomato biomass and growth. **Interciencia**, v. 41 n.1, p. 60-66, 2016.

SANTIAGO, J. P.; HALTEMAN, W.; SMAGULA, J. M. Determining Optimum Macro-and Micronutrient Leaf Concentrations for Lowbush Blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.) Using the Boundary Line Approach and Quantile Regression. In **X International Symposium on Vaccinium and Other Superfruits**, v. 1017 p. 505-514, 2012. [10.17660/ActaHortic.2014.1017.63](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1017.63)

SCHMIDT, A. F.; FINAN, C. Linear regression and the normality assumption. **Journal of clinical epidemiology**, v. 98, p. 146-151, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2017.12.006>

SHI, X.; & CAI, H. Nitrogen nutrition diagnosis based on critical nitrogen model and SPAD value of different leaf positions in greenhouse tomato. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 24, n. 4, p. 891-899, 2020. [10.17957/IJAB/15.1514](https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1514)

SHIN, Y. K.; BHANDARI, S. R.; CHO, M. C.; & LEE, J. G. Evaluation of chlorophyll fluorescence parameters and proline content in tomato seedlings grown under different salt stress conditions. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 61, n. 3, p. 433-443, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13580-020-00231-z>

SOTILLE, M. E.; BREMER, U. F.; VIEIRA, G.; VELHO, L. F.; PETSCH, C.; & SIMÕES, J. C. Evaluation of UAV and satellite-derived NDVI to map maritime Antarctic vegetation. **Applied Geography**, v. 125, p. 102322, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102322>

TEI, F.; Benincasa, P.; & Guiducci, M. Critical nitrogen concentration in processing tomato. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 45-55, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00096-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00096-5)

TIETJEN, G. L. The analysis and detection of outliers. In *Goodness-of-fit techniques* Routledge, p. 497-522, 2017.

TRAN, T.; CHOI, W.; LE, H.; & KIM, W. A comparative study of deep CNN in forecasting and classifying the macronutrient deficiencies on development of tomato plant. **Applied Sciences**, v. 9 n. 8, p. 1601, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9081601>

WAHAB, I.; HALL, O.; JIRSTRÖM, M. Remote sensing of yields: Application of uav imagery-derived ndvi for estimating maize vigor and yields in complex farming systems in sub-saharan africa. **Drones**, v. 2, n. 3, p. 28, 2018. <https://doi.org/10.3390/drones2030028>

WANG, L.; CHIOU, M.; & MÜLLER, G. Functional data analysis. **Annual Review of Statistics and Its Application**, v. 3, p. 257-295, 2016. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-041715-033624>

WEERAKKODY, P. Determination of Optimum Nitrogen Concentrations in Hydroponics for Tomato Grown in Coir Medium in Tropical Greenhouse, 2021.

YAN, Z.; TIAN, D.; HAN, W.; TANG, Z.; FANG, J. An assessment on the uncertainty of the nitrogen to phosphorus ratio as a threshold for nutrient limitation in plants. **Annals of botany**, v. 120, n. 6, p. 937-942, 2017. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx106>

YOON, H. I.; KANG, J. H.; KANG, W. H.; SON, J. E. Subtle changes in solar radiation under a green-to-red conversion film affect the photosynthetic performance and chlorophyll fluorescence of sweet pepper. **Photosynthetica**, v. 58, n. 5, p. 1107-1115, 2020. DOI: 10.32615/ps.2020.057

YUE, X., HU, Y., ZHANG, H., SCHMIDHALTER, U. Evaluation of both SPAD reading and SPAD index on estimating the plant nitrogen status of winter wheat. **International Journal of Plant Production**, v. 14, n. 1, p. 67-75, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00068-2>

ZEESHAN, M.; AHMAD, W.; HUSSAIN, F.; AHAMD, W.; NUMAN, M.; SHAH, M.; AHMAD, I. Phytostabalization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120318, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120318>

ZHANG, Y.; YU, I.; GONG, J.; ZHAO, L.; LI, L.; HU, H.; WANG, C. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 10, p. 2151-2159, 2018. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62038-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62038-6)

ZHAO, H.; LI, X.; JIANG, Y. Response of nitrogen losses to excessive nitrogen fertilizer application in intensive greenhouse vegetable production. **Sustainability**, v. 11, n. 6, p. 1513, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11061513>

ZHOU, G.; & YIN, X. Assessing nitrogen nutritional status, biomass and yield of cotton with ndvi, spad and petiole sap nitrate concentration. **Experimental Agriculture**, v. 54, n. 4, p. 531-548, 2018. doi:10.1017/S0014479717000229

ZOBEL, R. W.; WRIGHT, M. J.; GAUCH JR, H. G. Statistical analysis of a yield trial. **Agronomy journal**, v. 80, n.3, p. 388-393,1988. doi:10.2134/agronj1988.0002196200

CALVO, L. Using Unmanned Aerial Vehicles in Postfire Vegetation Survey Campaigns through Large and Heterogeneous Areas: Opportunities and Challenges. **UAV or Drones for Remote Sensing Applications: v. 1, n. 18**, p. 149, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18020586>

IHUOMA,L., & MADRAMOOTOO, A. Narrow-band reflectance indices for mapping the combined effects of water and nitrogen stress in field grown tomato crops. **Biosystems Engineering**, v. 192, p. 133-143, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.017>

FERNÁNDEZ, G, ABLANEDO, E., SEOANE, S., & CALVO, L. (2018). Using unmanned aerial vehicles in postfire vegetation survey campaigns through large and heterogeneous areas: Opportunities and challenges. **Sensors**, v. 18 n. 2, p. 586. 2018 <https://doi.org/10.3390/s18020586>

JAIN & PANDEY. Calibration of Satellite Imagery with Multispectral UAV Imagery. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 49, n. 3,p. 479-490, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01251-z>

4 PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA E CONSUMO HÍDRICO DE TOMATE HIDROPÔNICO COM CONCENTRAÇÕES CRESCENTES DE NITROGÊNIO

Resumo

Disponibilidade de água e nitrogênio são os dois mais importantes fatores que limitam a produtividade na tomaticultura. Estes problemas podem ocorrer conjuntamente durante o cultivo e há interação entre o consumo de água pelas plantas e o conteúdo de nitrogênio no tecido vegetal. Embora, estudos tenham constatado redução do consumo de água em situações de menor disponibilidade de nitrogênio e menor absorção de nitrogênio em situações de déficit hídrico, pouca atenção tem sido dedicada sobre o efeito no consumo de água de plantas supernutridas em nitrogênio. O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da variação da dose de nitrogênio no consumo de água e crescimento de plantas de tomate determinado sob condição de hidroponia sem limitação hídrica ao crescimento. Para tanto observou-se o efeito de cinco concentrações crescentes de nitrogênio na solução nutritiva usada para cultivo (85,5; 128,3; 171; 213,8 e 256,1 ppm de N) na variação da massa fresca de plantas e consumo de água estimados por técnica de lisimetria em cultivo hidropônico com controle de peso utilizando um sistema automatizado. Além disso, foi analisado o teor de nitrogênio foliar (TNF), o índice SPAD, eficiência quântica do fotossistema II(Ph), quenching não fotoquímico(NPQ), massa seca(MS), e a eficiência do uso da água(EUA). Houve aumento do consumo de água e maior acúmulo de matéria fresca ao longo do período experimental com aumento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva. O aumento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva teve resposta morfofisiológica nas plantas de tomate que diferiram estatisticamente entre si em relação a TNF, SPAD, Ph, NPQ, MS e EUA. Nesse sentido conforme ocorreu acúmulo de N no tecido vegetal favoreceu-se ao aumento do SPAD, assim o ganho na capacidade de converter luz em energia indicado pelo aumento de Ph e redução de NPQ esteve atrelado ao acúmulo de clorofila na folha. Em consequência disso plantas cultivadas sob maiores concentrações de N produziram mais MS.

O incremento de MS em relação ao consumo de água aumentou até a concentração de 213,8 ppm de N, quando o maior consumo de água não promoveu ganho de biomassa, causando redução de EUA a partir da concentração de 256,1 ppm de N na solução nutritiva.

Palavras-chave: Consumo de nitrogênio. Evapotranspiração. Crescimento. Lisímetro de pesagem. Hidroponia.

PHOTOSYNTHETIC PERFORMANCE AND WATER CONSUMPTION OF HYDROPONIC TOMATO WITH INCREASING CONCENTRATIONS OF NITROGEN

Abstract

The availability of important water and disposal are the two main factors limiting productivity in tomato cultivation. These problems can occur together during cultivation and interaction between water consumption and plant content in plant tissue. Although studies have found a reduction in water consumption in situations of lower availability of water resources and lower consumption of plants with little availability of water resources, attention has been highlighted on water consumption in situations of lower availability of water resources. The objective of this work was to evaluate the effect of water dose and tomato plant growth determined under the hydroponics condition without limiting the water condition on plant growth. For both observed the effect of five major crop solution chemicals used for cultivation (85.5; 128, 171.3 ppm fresh plants; 171.3.1 ppm fresh plants and consumption) on water estimated by Lysimetry technique in hydroponic use with weight control using an automated system. In addition, the non-leaf water index (TNF), SPAD, quantum efficiency of the system II (NPQ), photochemical quenching (NPQ), mass (MS) and water use efficiency (USA) were verified. There was an increase in water consumption and greater accumulation of fresh matter throughout the experimental period with an increase in the concentration of the nutrient solution. The increase in the concentration of plants had a nutrient nutrition solution in the nutrient solutions that differed statistically from each other in relation to the relationship between TNF, SPAD, Ph, NPQ, MS and USA. In this sense, as the N gain in the plant tissue favored the increase in SPAD, so the energy indicated by the increase in Ph and reduction in NPQ seems to be linked to the increase in chlorine in the leaf. As a result, plants grown under the highest N value produced more MS. MS increased in water consumption until the water consumption ratio 213.8 reduction, increase in biomass concentration increase does not increase the concentration of EUA from the water of 256.1 ppm of N in the nutrient solution.

Keywords: Nitrogen consumption. Evapotranspiration. Growth. Weighing lysimeter. Hydroponics.

4.1 Introdução

A horticultura tem enfrentado desafios relacionados às mudanças climáticas e novas exigências de mercado que combinam ao mesmo tempo uma demanda por produtos de alta qualidade, a preços acessíveis e com impacto ambiental positivo (PONSIOEN; HELMES, 2020). O avanço tecnológico no cultivo de hortícolas tanto em campo como em estufas tem se intensificado para atender a tais demandas (ONYANCHA, 2018; HASAN et al., 2018). Devido ao alto valor agregado de olerícolas, flores e frutas têm sido financeiramente viável o crescente investimento em tecnologia de cultivo para se atender tais exigências (MISHRA et al., 2018).

Além disso, o mundo tem passado pelo aumento do custo de insumos, combinado a restrição de terras disponíveis para o cultivo, visto que a maior parte das áreas adequadas para cultivo já estão em uso e que parte destas áreas tem se inviabilizado devido a problemas de salinização de solos e restrições hídricas para irrigação (SINGH, 2018). Isso ocorre ainda em um contexto de aumento populacional mundial, a qual exige práticas de cultivo cada vez mais eficientes (SINGH, 2020). Por essa razão, estratégias inovadoras e técnicas sofisticadas que ao mesmo tempo permitam o aumento da produtividade de lavouras, melhorem a qualidade dos produtos, reduzam o consumo de energia e amenizem os danos causados pela contaminação ambiental com agroquímicos tem sido adotadas (CHANDA et al., 2021).

Na horticultura o cultivo de tomate ocupa a posição da mais importante olerícola cultivada mundialmente, sendo produzido tanto em campo aberto como em estufas, com intensiva aplicação de insumos e tecnologia por m² de cultivo (SHARMA et al., 2018). Em cultivos de tomate com maior nível tecnológico a aplicação de fertilizantes está atrelada à irrigação, quando nutrientes são disponibilizados por fertirrigação, tanto em cultivos em solo, como hidropônicos (YANG et al., 2020). Essa prática consiste em dissolver o fertilizante na água de irrigação disponibilizando-se a solução nutritiva na zona radicular por meio de emissores (MAHESH et al., 2021).

No contexto do tomate, globalmente, disponibilidade de água e nitrogênio são os dois mais importantes fatores que limitam a produtividade e essa é uma realidade comum em cultivos agrícolas de alto valor agregado (WANG et al., 2019). Ocorre alta interação entre o consumo de água pelas plantas e o conteúdo de nitrogênio no tecido vegetal, onde já foi constatada a ocorrência de redução do consumo de água em situações de menor disponibilidade de nitrogênio como consequência do sintoma de restrição do crescimento pela deficiência desse nutriente (WEI et al., 2018; DU et al., 2017).

Isso acontece porque plantas com crescimento limitado pela assimilação insuficiente de nitrogênio possuem área superficial da parte aérea em contato com a atmosfera menor que

plantas com o crescimento sob doses adequadas de nitrogênio (ZHOU et al., 2020). A menor superfície de contato compromete as trocas gasosas realizadas na folha no processo de fotossíntese, sobretudo reduzindo a emissão de vapor de água por meio da transpiração das folhas (DING et al., 2018). Como a absorção hídrica realizada pelas raízes e o transporte pelo xilema dependem do movimento da água na planta como um todo, a menor liberação de vapor de água pelas folhas reduz o fluxo ao longo de toda a planta, reduzindo-se a absorção do nitrogênio da solução nutritiva (GLOSER et al., 2020).

Embora a interação entre nitrogênio e consumo de água tenha sido estudada em diversas espécies (ULLAH et al., 2019; KUNRATH et al., 2018), esses estudos em tomate geralmente buscam variar tanto a disponibilidade de água pela irrigação como doses de nitrogênio na adubação para observar o efeito do déficit hídrico na absorção do nitrogênio e/ou da deficiência de nitrogênio no consumo de água (WANG et al., 2018; CHENG et al., 2021).

Porém, pouca atenção sido dedicada sobre o efeito do aumento da concentração do nitrogênio da solução nutritiva na demanda hídrica de tomate em regime ideal de suprimento de água. Isso permitiria conclusões não apenas sobre a redução do consumo de água em plantas deficientes, mas também sobre se há o aumento do consumo em plantas supernutridas.

É importante entender melhor a interação entre doses de nitrogênio na solução nutritiva e o consumo de água para identificar o custo hídrico de doses excessivas de nitrogênio na tomaticultura (ZHOU et al., 2020), visto que muitos agricultores optam por um manejo de adubação que reduza o risco de perdas por deficiência de nitrogênio, sem o devido cuidado com perdas por superdosagem (QU et al., 2020).

Isso ocorre por se considerar que o retorno financeiro pelo aumento marginal da produtividade em uma cultura de alto valor agregado compensa o possível custo extra de um eventual uso excessivo deste insumo (RÜTTING et al., 2018). Além disso, considera-se remota a possibilidade de redução de produtividade por fitotoxicidade decorrente do excesso de adubação com um macronutriente (TEI et al., 2020).

Embora seja uma abordagem correta se buscar o aumento de rentabilidade do cultivo pelo suprimento da adubação nitrogenada, é importante não se negligenciar os efeitos deletérios de superdosagens no suprimento de fertilizantes nitrogenados (RONGA et al., 2019). Tais perdas não se restringem apenas ao valor financeiro investido na aquisição de insumos além do necessário, da perda de qualidade de frutos e do risco de contaminação de fontes hídricas (PADILLA et al., 2020). Soma-se a esses danos o aumento do uso de recursos hídricos e energéticos necessários para se suprir por irrigação o maior consumo de água eventualmente demandado por plantas de tomate supernutridas em nitrogênio (KANAN et al., 2021).

É importante se identificar não apenas os danos causados pela deficiência do nitrogênio, mas também os efeitos deletérios de doses excessivas para se aprimorar a aplicação mais racional da adubação nitrogenada na fertirrigação de culturas de alto valor agregado(GONZAGA et al., 2020). Pois em um cenário de agricultores dispostos a aumentar a eficiência de cultivos via investimento em tecnologia, o passivo resultante do uso excessivo desse nutriente pode superar ganhos marginais(LI et al., 2019), não compensando os riscos e demais perdas financeiras com o desperdício pelo uso desnecessário de insumos e pela redução da qualidade de frutos(Liang et al., 2019).

Porém, os estudos supracitados tem grande dificuldade operacional de serem implantadas em campo, pois o nitrogênio é um nutriente sujeito a ampla variabilidade espacial e temporal em ambientes agrícolas (YAO et al., 2020). Essa variabilidade resulta de diversos fatores ambientais como oscilações no microrrelevo de áreas de cultivo, disponibilidade de matéria orgânica, condutividade hidráulica de solos, presença de microrganismos, textura e regime de irrigação (COUCHENEY et al., 2017).

Por essa razão é preciso alternativas ao cultivo em campo aberto para se isolar todos os fatores ambientais capazes de afetar a disponibilidade de nitrogênio no solo e o desenvolvimento das plantas a fim de se isolar o efeito do nitrogênio. Além disso, é preciso garantir que a estimativa do consumo de água seja os mais próximos da realidade. Nesse sentido a técnica de cultivo hidropônico combinada a lisímetros de pesagem é uma opção viável para levantamentos que visem dimensionar o efeito da disponibilidade de nitrogênio no consumo de água das plantas.

Hidroponia, o “cultivo de plantas em água” , tem sido usada tanto em pesquisas como em cultivos comerciais desde o século XVIII(SHARMA et al., 2018). Embora seja atualmente utilizada em larga escala e de forma rentável por produtores comerciais de diversa olerícolas como alface, morangos, pimentões, berinjela, pepinos e tomates, sua origem está relacionada a pesquisa em nutrição de plantas(MHADHBI, 2012).

A possibilidade de controle de fatores de produção relacionados ao solo - fonte de alta variabilidade espacial em campos comerciais - proporcionados hidroponia, atraiu inicialmente a atenção de biólogos de plantas para a realização de pesquisas(TREFTZ; OMAYE, 2016). Os primeiros usos da hidroponia em pesquisas trouxeram uma série de respostas importantes para perguntas que até então apenas os estudos de campo não haviam sido capazes de responder, sobretudo em conhecimentos relacionados ao mecanismo de toxicidade e deficiências nutricionais e seus efeitos no desenvolvimento de plantas em geral(ASAO, 2012).

Desde os primeiros usos da hidroponia em pesquisa a técnica tem evoluído principalmente graças a combinação de novas tecnologias relacionadas a automação do controle de condições ambientais para o desenvolvimento das plantas(Cho et al., 2018). O isolamento de cada um dos elementos essenciais, as espécies químicas assimiláveis, concentrações mínimas para sobrevivência, descrição de sintomas de deficiência, concentrações ideais visando produtividade e limites de toxicidade para plantas foram avanços relacionados a essa evolução da aplicação da técnica da hidroponia e do controle de ambiente (SHARMA et al., 2018). Os avanços tecnológicos tem permitido automatizar ciclos de rega e concentração de nutrientes com base em sensores, controle de temperatura, iluminação artificial, concentração de gases na atmosfera, dentre outros(PANT et al., 2018).

Além dos estudos em relação ao efeito da disponibilidade de elementos essenciais, o cultivo hidropônico também tem sido usado em estudos sobre relações hídricas e consumo de água por plantas cultivadas em substrato (SILVA et al., 2019). Nesses estudos se combina o controle de fatores específicos possibilitado pela hidroponia ao monitoramento da evapotranspiração por lisímetros de pesagem em que células de carga são montadas para aferir a variação da massa dos vasos de cultivo (NICOLA et al., 2020).

A mudança na massa dos vasos, a depender da frequência de pesagens e limite de erro do sensor usado para as aferições, é resultante de dois eventos: em uma escala de tempo de dias a variação na massa do vaso resulta do crescimento das plantas e em escala de minutos a variação da massa dos vasos está relacionada a perda da massa de água para a atmosfera por evaporação da superfície de água diretamente em contato com o ar e pela transpiração das folhas(PHENE et al., 1989; MEDRANO et al., 2010).

Estudos com a abordagem de lisímetros de pesagem acoplado a vasos de cultivo hidropônico tem sido usados na calibração de modelos para a automação de sistemas de irrigação com base na evapotranspiração das culturas (NIKOLAOU et al., 2017). Outros estudos tem combinado o uso de lisímetros de pesagem em cultivo hidropônico objetivando conclusões acerca do crescimento das plantas ao longo do ciclo de desenvolvimento ou em estádios de desenvolvimento fenológico específicos (MAJEED et al., 2019).

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da variação da dose de nitrogênio – mantendo-se constante disponibilidade de água e dos demais nutrientes, iluminação, temperatura e umidade relativa do ar – no consumo de água determinado por meio de lisímetros de pesagem em cultivo hidropônico e a sua performance fotossintética com base em parâmetros de florescência da clorofila a.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Localização e caracterização do local do experimento

O estudo foi conduzido entre 25 de março de 2021 e 21 de maio de 2021 nas estufas de produção de mudas da Agrofito em Irecê, Bahia, Brasil. O experimento consistiu em comparar o efeito de concentrações crescentes de nitrogênio, partindo de valores deficientes até valores que extrapolam o ideal na solução nutritiva para cultivo hidropônico em tomate durante o estágio de desenvolvimento vegetativo da cultura.

4.2.2 Delineamento experimental e estatística

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com cinco tratamentos, correspondentes às concentrações de N na solução nutritiva (T1=, T2=, T3=, T4= e T5=) e seis repetições, totalizando 30 unidades amostrais, sendo realizado teste de normalidade de todas as variáveis estudadas. Foi realizada análise de regressão entre (TNF, SPAD, Ph, NPQ, MS e EUA em relação a concentração de nitrogênio na solução nutritiva), nas variáveis em que o R^2 foi superior a 50% e os parâmetros da equação tenham sido significativos a no mínimo 5% de confiança a análise foi feita com base no ajuste de regressão, quando o R^2 e significância das equações não atingiram o mínimo necessário a análise dos dados foi feita por teste de comparação de média por Tukey a 5% de significância. Foi também analisado por regressão o efeito do tempo (dias após transplante) no acúmulo de massa fresca estimado pelo sistema de pesagem dos vasos de cultivo e também o efeito do tempo (dias após transplante) no consumo hídrico acumulado, nesses dois ajustes de regressão os parâmetros da curva significativos indicativos da taxa de aumento das variáveis ao longo do tempo (a) e de interesse teórico foram comparados entre si por teste de comparação de média por Tukey a 5% de significância

4.2.3 Definição dos tratamentos

Foram testadas cinco concentrações de nitrogênio total – 85,5; 128,3; 171; 213,8 e 256,1 mg L⁻¹ (Tabela 1), ou seja 25; 50; 100; 125 e 150% (T1, T2, T3 - testemunha, T4 e T5, respectivamente) da dose recomendada Snyder (1992), no preparo da solução nutritiva.

As demais quatro concentrações de nitrogênio foram comparadas em relação a T3, mantendo-se os demais nutrientes constantes, conforme as limitações das misturas de sais necessárias para promover a variação da concentração de nitrogênio na solução nutritiva.

Tabela 1. Concentração de nutrientes em ppm e condutividade elétrica dos tratamentos utilizados

	N-NO ₃	N-NH ₄	P	K	Ca	Mg	Na	S-SO ₄	Cl	Fe	B	Cu	Zn	Mn	Mo	CE
T1	78,5	7,0	48,0	303,8	180,0	47,9	1,1	145,5	177,9	3,00	1,07	0,20	0,40	1,50	0,10	2,22
T2	117,8	10,5	48,0	303,8	180,0	47,9	1,1	149,0	79,5	3,00	1,07	0,20	0,40	1,50	0,10	2,23
T3	157,0	14,0	48,0	303,8	180,0	47,9	1,1	144,1	0,0	3,00	1,07	0,20	0,40	1,50	0,10	2,26
T4	178,5	35,3	48,0	303,8	180,0	47,9	1,1	143,9	0,0	3,00	1,07	0,20	0,40	1,50	0,10	2,4
T5	200,7	55,4	48,0	303,8	180,0	47,9	1,1	141,4	0,0	3,00	1,07	0,20	0,40	1,50	0,10	2,54

CE (mS cm⁻¹)

Tomando como referência a dose T3 (tratamento controle), os tratamentos T1 e T2 foram preparados com concentrações de N aproximadamente 50% e 25% menores que T3, respectivamente; enquanto os tratamentos T4 e T5 foram preparados com concentrações de N aproximadamente 25% e 50% acima de T3, respectivamente.

A combinação de sais para promover a variação da concentração de nitrogênio na solução nutritiva causou também marginal alteração na concentração de S-SO₄ e na condutividade elétrica. Além de aumento na concentração de Cl em T1 e T2 e aumento da proporção entre N-NH₄ e N-NO₃ em T4 e T5 (Tabela 1). Porém em nenhum dos tratamentos a variação nas concentrações dos elementos da solução nutritiva ficou abaixo do ideal, ou acima do limite de toxicidade, não causando interferência nos resultados.

Tabela 2. Quantidade de sais utilizados na confecção da solução A

	Ca(NO ₃) ₂ (kg)	CaCl ₂ (kg)	KNO ₃ (kg)	NH ₄ NO ₃ (kg)	Ferro EDTA (g)
T1	0,05	0,03	0	0,01	2,31
T2	0,09	0,01	0	0,01	2,31
T3	0,11	0	0,01	0,01	2,31
T4	0,11	0	0,01	0,01	2,31
T5	0,11	0	0,01	0,02	2,31

Baseado na solubilidade e compatibilidade entre os elementos usados na fertirrigação - visto que o Ca²⁺ com fosfatos (PO₄⁻¹) e sulfatos (SO₄⁻²) e o Fe²⁺ pode reagir com fosfatos (PO₄⁻

¹ 1 ou 2

*) formando precipitados - duas soluções nutritivas foram preparadas separando os nutrientes incompatíveis para cada tratamento em dois tanques estoque contendo duas soluções - solução A (Tabela 2) e solução B (Tabela 3) - as quais combinadas proporcionam as concentrações alvo conforme o planejado para cada tratamento (Tabela 1).

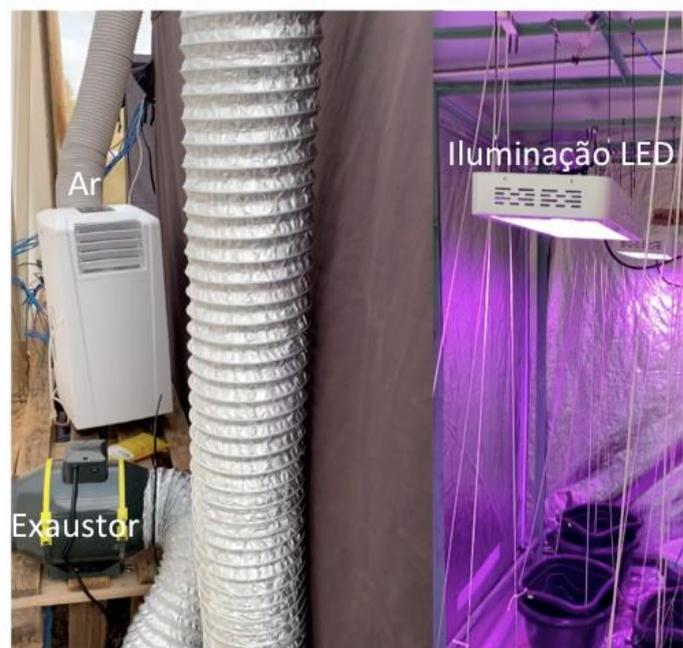
Tabela 3. Quantidade de sais utilizados na confecção da solução B

	Mg SO ₄	Mg (NO ₃) ₂	(NH ₄) ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄	KN O ₃	K ₂ S O ₄	KCl	Borax	Cu S ₄	ZnS O ₄	MnS O ₄	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
T1	0,05	0	0	0,02	0	0,05	0,01	0,95	0,08	0,18	0,46	0,02
T2	0,05	0	0	0,02	0	0,05	0,01	0,95	0,08	0,18	0,46	0,02
T3	0,05	0	0	0,02	0,01	0,05	0	0,95	0,08	0,18	0,46	0,02
T4	0,05	0	0,01	0,02	0,01	0,03	0	0,95	0,08	0,18	0,46	0,02
T5	0,04	0,01	0,01	0,02	0,01	0,04	0	0,95	0,08	0,18	0,46	0,02

4.2.4 Sistema hidropônico

O cultivo hidropônico foi conduzido em uma cabine de cultivo 3 x 3m.. Nas condições de temperatura ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (abaixo de $60\% \pm 5\%$) e fotoperíodo (16 horas diárias) controladas na cabine de cultivo por condicionador de ar (Figura 1), exaustor (Figura 1) e luzes led fullspectrum (Figura 1).

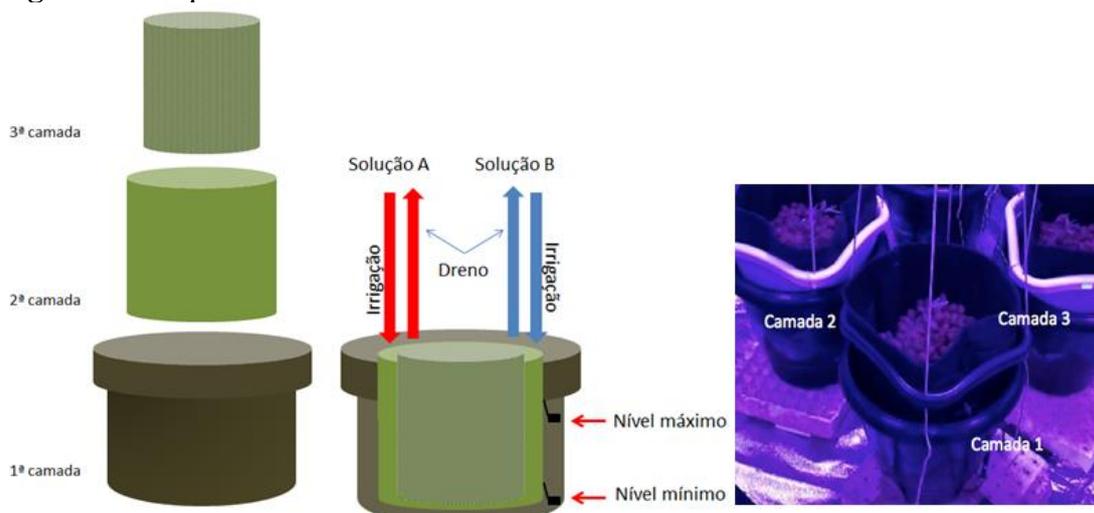
Figura 1. Sistema de exaustão para controle de umidade relativa do ar, refrigeração e iluminação artificial



Para o cultivo hidropônico foi usada uma adaptação do sistema de balde holandês (JONES, 2007; MACWAN, 2019; e YANG e SAMARAKOON, 2021). Nesse sistema os containers de cultivo das plantas são individualizados e se conectam por meio de dutos para entrada e saída da solução nutritiva a qual recircula de/para um tanque estoque comum, conforme se alternam ciclos de irrigação e drenagem. Nesse estudo as repetições de um mesmo tratamento compartilhavam entre si a mesma linha de irrigação e drenagem e também o mesmo tanque estoque para a solução nutritiva.

Cada contêiner usado para o cultivo das plantas era composto por três camadas de vasos, cada uma cumprindo uma função específica para a operacionalidade do sistema (Figura 2). A primeira camada é um vaso plástico de 15 litros. Esse recipiente recebe a solução nutritiva conduzida do tanque estoque e a armazena durante o ciclo de irrigação enquanto o substrato retém a solução nutritiva.

Figura 2. Esquema e fotos dos contêineres de cultivo em camadas de vasos



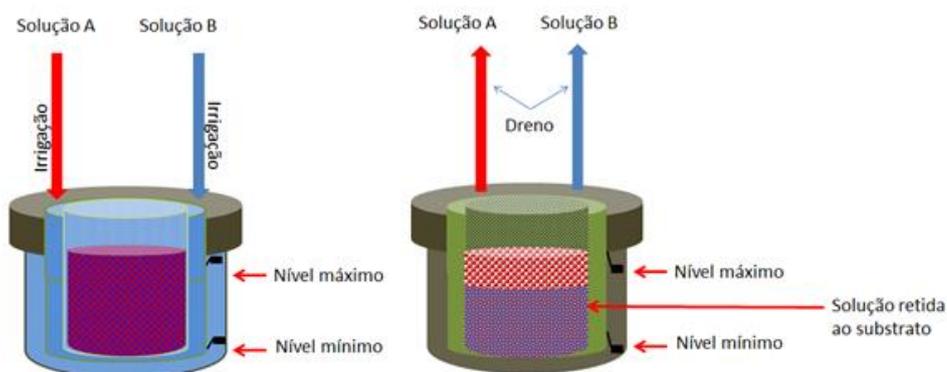
No vaso de 15 litros também é realizado controle do volume da solução irrigada por meio de dois níveis eletrônicos (Figura 3). O nível máximo para garantir que durante o ciclo de irrigação a solução nutritiva armazenada no contêiner esteja em contato com a rizosfera e também limitando um volume máximo a ser conduzido do tanque estoque ao contêiner e o nível mínimo para evitar que a bomba operasse em seco.

Figura 3. Detalhe de níveis eletrônicos usados para limitar o volume da solução nutritiva nos contêineres



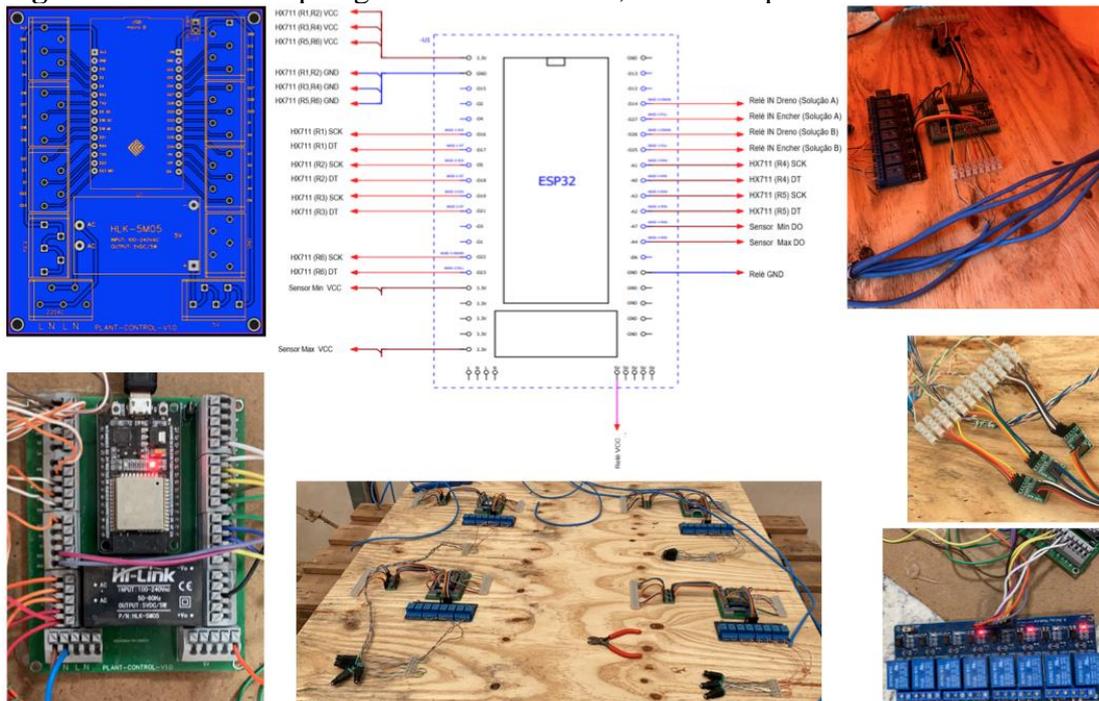
O bombeamento da solução nutritiva do tanque estoque para o contêiner (irrigação) ocorre até que o nível da água eleva a boia até o máximo volume de água programado acionando o nível eletrônico instalado na altura do limite superior indicando o vaso cheio (Figura 4). Essa informação é recebida pela controladora (Figura 4) como um comando de desligamento da bomba de irrigação.

Figura 4. Esquema dos ciclos de irrigação e drenagem nos contêineres de cultivo



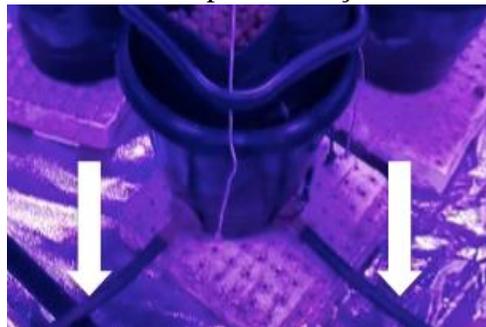
Por sua vez o bombeamento da solução nutritiva do contêiner para o tanque estoque (drenagem) ocorre até o completo esvaziamento do vaso de 15 litros, quando a boia baixa ao limite inferior estabelecido desligando o nível eletrônico instalado no ponto mais baixo do vaso (Figura 4). Essa informação é recebida pela controladora como um comando para o desligamento da bomba de drenagem. O acionamento destas bombas é feito por meio dos relês (Figura 5).

Figura 5. Detalhe da pinagem da controladora, relès e amplificadores hx711



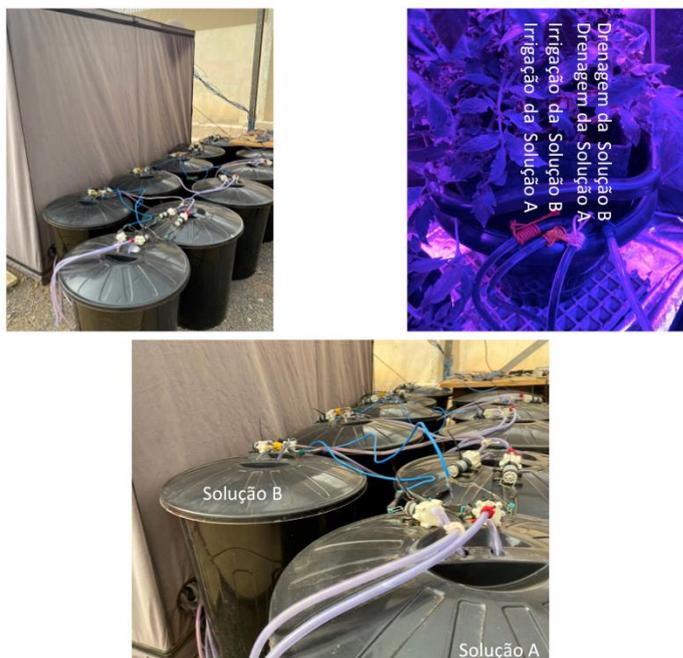
Nas seis repetições de cada tratamento, esses vasos de 15 litros são interligados entre si na parte inferior por uma tubulação flexível, o que permite a passagem da solução nutritiva de um vaso para o outro (Figura 6).

Figura 6. Detalhe da conexão entre vasos por tubulação flexível



Desse modo o transporte da solução nutritiva do tanque estoque para os contêineres (irrigação), e dos contêineres para o tanque estoque (drenagem) em um dos vasos reflete em igual irrigação e drenagem para todos os vasos do mesmo tratamento. Como todos os vasos foram montados em uma superfície plana e se comunicavam por meio dos dutos, foi necessário instalar em apenas um dos containers da cada tratamento os drenos, os emissores de irrigação (Figura 7) e os níveis eletrônicos para a execução da recirculação nas seis repetições.

Figura 7. Sistema de bombeamento e drenagem individualizado por tratamento

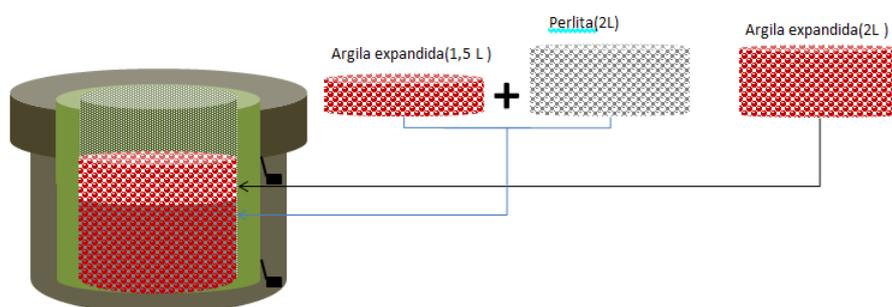


A segunda camada do contêiner é um vaso plástico de 7 litros, com 4 orifícios no fundo que comunica esse recipiente ao interior do vaso de 15 litros de modo que a solução nutritiva conduzida durante o ciclo de irrigação transborda ao interior do vaso plástico de 7 litros, permitindo também que seja lixiviada durante a drenagem. A função dessa segunda camada é de recipiente para o substrato inerte usado como suporte para cultivo das plantas de tomate.

A terceira camada é um vaso de feltro de 11 litros que reveste o vaso de 7 litros. A função dessa camada é de filtragem. No interior da terceira camada foi preenchido com o substrato inerte usado para o cultivo conforme descrito: foi depositado um litro e meio de argila expandida e posteriormente dois litros de perlita, sendo necessário agitar vaso para acomodar a perlita no espaço poroso deixado entre as esferas da argila expandida (HOCHMUTH; HOCHMUTH, 2001; DELMÁS et al., 2020) (Figura 8). Essa mistura atingia aproximadamente a metade da altura do vaso de 7 litros. As mudas de TY2006 foram transplantadas na primeira metade do vaso preenchida com a mistura de perlita e argila expandida.

Acima desta camada foi adicionado um volume de dois litros de argila expandida que serviu cobertura do substrato ao fundo do vaso, após a adição dessa segunda camada de argila expandida aproximadamente $\frac{3}{4}$ da altura do vaso estava preenchido com as partículas sólidas, o $\frac{1}{4}$ superior do vaso foi usado como margem de segurança sem preenchimento para evitar o derramamento da solução nutritiva (Figura 8). Essa composição foi feita para facilitar a drenagem dos vasos nos ciclos de recirculação da solução nutritiva.

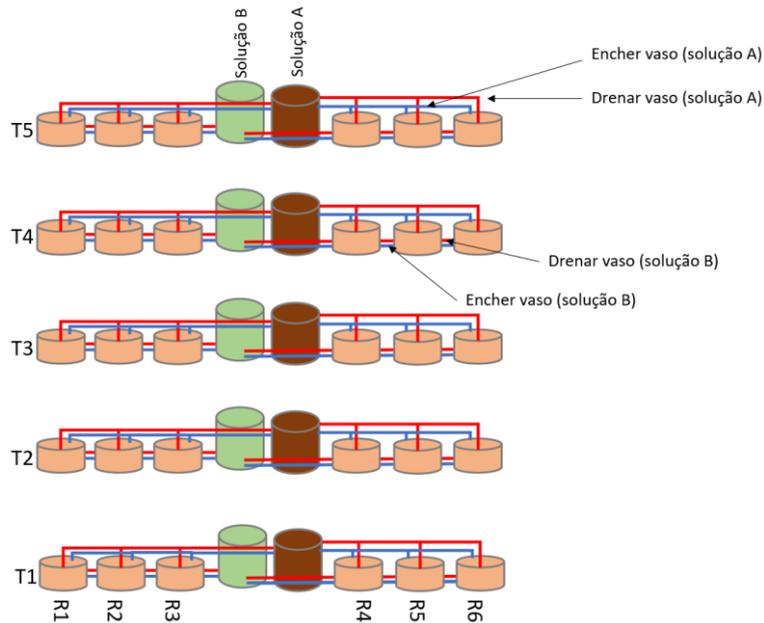
Figura 8. Esquema do preenchimento da 3ª camada com as proporções de argila expandida e perlita



A recirculação da solução nutritiva alterna ciclos de oxigenação das raízes com ciclos de irrigação. O ciclo de oxigenação das raízes é o período em que os containers permanecem apenas com a água retida no substrato após a drenagem da solução nutritiva para o tanque estoque (tratado nesse trabalho como ciclo seco). O ciclo de irrigação é o período em ocorre a condução da solução nutritiva do tanque estoque para os containers os quais permanecem cheios, para infiltração da solução nutritiva nos poros do substrato até o início do próximo ciclo seco.

A duração do ciclo seco foi de 55 minutos e do ciclo de irrigação de 5 minutos(após o tempo gasto para enchimento e esvaziamento dos vasos), levando-se em média 11 minutos para encher e 9 minutos para drenar os vasos. No total 12 ciclos de irrigação diários eram realizados, conforme a recomendação para a o substrato utilizado (HOCHMUTH et al., 2020).

Cada tanque estoque foi equipado com duas bombas, uma com a função de irrigação, levando a solução nutritiva do tanque estoque para o contêiner (Figura 6 e Figura 9), outra com a função de drenagem, levando a solução nutritiva do contêiner para o tanque estoque (Figura 6 e Figura 9). A fim de evitar o contato simultâneo das duas soluções, os ciclos de irrigação alternavam sequencialmente irrigação e drenagem das soluções A e B, de modo que o primeiro ciclo começava com a solução A e o ciclo seguinte com a solução B, atenuando-se a precipitação dos elementos incompatíveis, pois desse modo se evitava a combinação das duas soluções nutritivas ao mesmo tempo no contêiner de cultivo.

Figura 9. Esquema da recirculação das soluções nutritivas A e B

Foi instalada uma célula de carga em cada um dos contêiners de cultivo. Estas células de carga foram conectadas a amplificadores HX711(Figura 10) que convertem o sinal analógico da variação da massa dos vasos em sinal digital permitindo a calibração da variação da massa captada pela célula de carga e a transmissão da informação para a placa controladora a qual foi programada para registrar uma série de duas pesagens no intervalo dos ciclos, uma no início e outra no final de cada ciclo. Os dados de consumo hídrico eram armazenados em um servidor conectado às placas controladoras.

Figura 10. Detalhe da célula de carga utilizada na pesagem dos vasos

A primeira pesagem ocorria sempre após o desligamento da bomba de irrigação conforme o acionamento do nível de boia máximo, nesse momento era realizada a aferição da massa dos contêineres no início do ciclo de irrigação, quando se encerrava o ciclo de irrigação, cinco minutos após o enchimento do contêiner, antes de iniciar a drenagem era realizada a segunda pesagem. A função dessas pesagens era avaliar a variação da massa do contêiner no ciclo de irrigação, porém a variação da massa do contêiner gerado pela perda de água nesse espaço de tempo não foi percebido pelas células de carga utilizadas.

No ciclo seco a primeira pesagem ocorria 5 minutos após a conclusão do bombeamento de drenagem, tempo suficiente para a conclusão do escoamento da água gravitacional, aferindo a massa dos contêineres no início do ciclo seco. A segunda pesagem ocorria 55 minutos após o início do ciclo seco, antes de se iniciar o bombeamento de irrigação do ciclo seguinte. A redução da massa do contêiner entre o início (primeira pesagem) e o fim do ciclo seco (segunda pesagem) foi considerado o consumo de água da unidade amostral em cada ciclo, o somatório do consumo de água de todos os ciclos executados em um dia foi estimado como o consumo diário de água. Os ciclos foram programados para iniciar diariamente com o início iluminação artificial às 05:00 horas da manhã.

Após o preenchimento dos vasos com o substrato, previamente ao transplântio, foi realizado um ensaio visando quantificar a massa média de água retida nesse conjunto (vaso de 7l + vaso de filtro de 1l + substrato) após a drenagem. A solução nutritiva de cada tratamento foi adicionada aos tanques de estoque e os ciclos de rega programados para o cultivo hidropônico acionados pelo período de cinco dias antes do transplântio.

Nesse período a massa individual dos contêineres foi aferida conforme descrito acima por meio das células de carga e os valores registrados. O valor individual médio da segunda pesagem foi considerado o peso do contêiner seco (PCS), sendo esse valor específico de cada contêiner considerado nas estimativas. O incremento em PCS após o transplântio no decorrer dos dias de cultivo foi considerado o aumento do peso fresco da planta no período do experimento.

4.2.5 Análises realizadas

4.2.5.1 Produção de biomassa

Ao final do experimento, aos 49 dias após o transplântio (no estágio de crescimento de desenvolvimento vegetativo) as plantas de tomate foram cuidadosamente retiradas dos vasos separando-se as raízes do substrato e foi aferida sua massa fresca por meio de balança digital. Os valores de massa fresca estimados por cada lisímetro no momento da coleta foram usados

para calcular o crescimento das plantas ao longo do período de condução do experimento. As plantas coletadas no desmonte do experimento foram postas para desidratar em estufa de circulação de ar forçada a temperatura de 65°C até atingir peso constante, sendo posteriormente aferida sua massa seca.

4.2.6 Performance fotossintética

4.2.6.1 Fluorescência da clorofila

A fluorescência da clorofila foi determinada com um fluorômetro portátil (Modelo Fluorpen FP 100) em folhas não destacadas, sadias e totalmente expandidas da região do terço médio. Foram avaliadas folhas adaptadas ao escuro selecionando-se sempre uma única folha (a mesma usada para leitura de índice SPAD) por planta aos 49 dias após transplântio.

Para avaliar as folhas adaptadas ao escuro realizou-se o procedimento de pinçamento de uma região circular da folha (impedindo o acesso da luz ao local de determinação da fluorescência) por um período de 30 minutos. Esse procedimento é importante por promover a abertura dos centros de reação do PSII, ou seja, condição em que todos os receptores primários encontram-se oxidados e para que a perda de calor fosse mínima.

Realizou-se então as leituras de fluorescência após o procedimento de pinçamento. (WATERKEYN, 2017). A fluorescência inicial (F_0 e F_0') foram determinadas a partir da incidência de um pulso de luz modulada de baixa intensidade ($< 0,1 \text{ Mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para não repercutir em influências na fluorescência variável.

A fluorescência máxima (F_m e F_m') foram obtidas a partir da incidência de um pulso de luz saturante 0,3s de duração (MAXWELL; JOHNSON, 2000). A F_v foi determinada pela diferença entre F_0 e F_m (MAXWELL; JOHNSON, 2000). De modo que:

$$F_v = F_0 - F_m$$

A partir dos resultados de F_v e F_m obteve-se a relação F_v/F_m , sendo essa relação considerada a eficiência quântica do fotossistema II (Ph), em que:

$$Ph = F_v/F_m.$$

A partir dos resultados de F_m e F_m' foi calculado o Quenching não fotoquímico (NPQ) (Maxwell & Johnson, 2000), conforme equação abaixo. Considerando que no escuro o ciclo bioquímico da fotossíntese é desativado, o mecanismo de proteção do complexo proteico de pigmentos não opera e, portanto, não há liberação do excesso de energia na forma de calor, por isso em plantas adaptadas ao escuro essa perda é considerada igual a 0. Como em plantas não adaptadas ao escuro (após o pulso de luz saturante) a fotossíntese está em completa atividade, ocorre perdas pelo calor. Desse modo F_m' é menor que F_m , e a diferença representa a

dissipação do excesso de energia que o aparato fotossintético não consegue processar, o Quenching não fotoquímico (NPQ):

$$NPQ = (F_m - F_m') / F_m'$$

4.2.7 Índice SPAD

Em cada planta foi feita a leitura da clorofila por meio de um medidor de clorofila Minolta SPAD modelo 501 (Minolta corporation, Ltd., Osaka, Japan) (BULLOCK; ANDERSON, 1998). Ao fim do experimento foram realizadas cinco leituras em cada folha escolhida para análise (folhas completamente expandidas do terço superior da planta), aceitando-se a média das leituras como a resposta em SPAD da folha analisada.

4.2.8 Teor de Nitrogênio foliar

As folhas guias coletadas foram acondicionadas em sacolas de papelão e levadas imediatamente para laboratório onde foi aferida a massa fresca da parte aérea. Esse material vegetal coletado foi individualmente lavado em água destilada, seco por papel toalha e posto para desidratar em estufa de circulação de ar forçada a temperatura de 65°C até atingir peso constante. O material então foi moído em moinho de facas tipo Willey e posteriormente o teor de nitrogênio foi determinado por titulação após digestão em ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio e destilado pelo método Kjeldahl (EMBRAPA, 2009).

4.2.9 Consumo hídrico

O consumo diário de água foi estimado conforme descrito no item 2.21. A eficiência do uso de água (EUA) foi calculada pela relação entre a massa seca das plantas (conforme descrito no item 2.4.1) e o consumo total de água durante a condução do experimento.

4.3 Resultados e Discussão

O aumento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva para cultivo hidropônico de tomate determinado proporcionou efeito significativo a 1% na variação de SPAD, e Ph e 0,1% na variação de TNF, NPQ, MS, a(CH) e a(MF) eficiência do uso da água (Tabela 4).

Tabela 4. Resultado da análise de variância para as variáveis ((SPAD); eficiência quântica do fotosistema II(Ph); Quenching não-fotoquímico(NPQ)); inclinação da reta ajustada entre massa fresca acumulada em relação aos dias após transplântio (a(MF)); inclinação da reta ajustada entre consumo hídrico acumulado em relação aos dias após transplântio (a(CH))) analisadas por comparação de médias

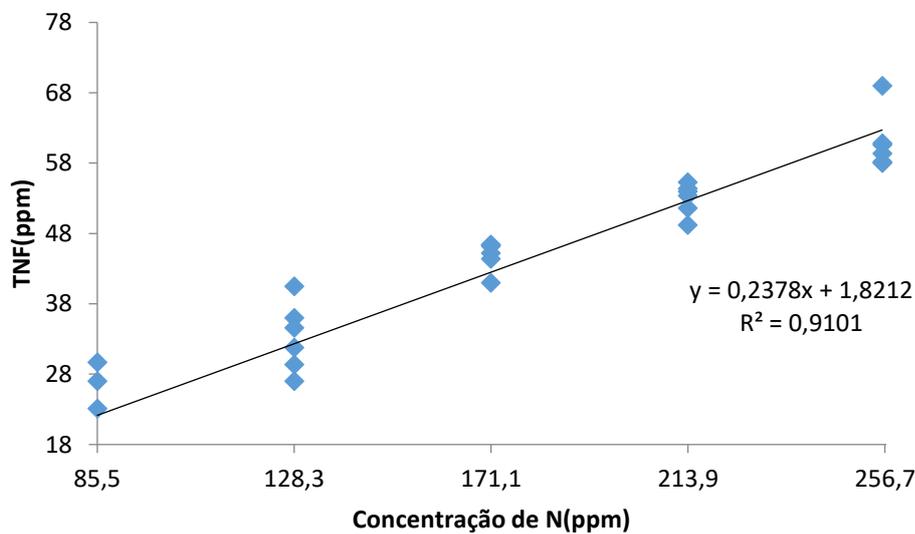
Variável	F	Pr(>F)
SPAD	6,487	0,00107**
Ph	5,933	0,00169**
NPQ	17,64	5,37e-07***
a(MF)	191,1	1,45-11***
a(CH)	258,4	5,05e-09***

* = significativo a 5%; ** = significativo a 1%; *** = significativo a 0,1%

4.3.1 Desempenho fotossintético e teor de Nitrogênio foliar

Ocorreu aumento de TNF com aumento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva (Figura 11).

Figura 11. Regressão linear do teor de nitrogênio foliar(TNF) à concentração de nitrogênio na solução nutritiva do cultivo hidropônico de tomate (85,5; 128,3; 171; 213,8 e 256,1ppm)



Tomateiros sujeitos aos tratamentos com maior concentração de N na solução nutritiva acumularam mais nitrogênio no tecido vegetal em relação aos cultivado sob menores concentrações, visto que a regressão do TNF em relação a concentração de N na solução nutritiva teve elevado R^2 e probabilidade significativa a 0,1% de que a inclinação da reta descreva a taxa de crescimento do acúmulo de nitrogênio no tecido vegetal(Tabela 8), embora

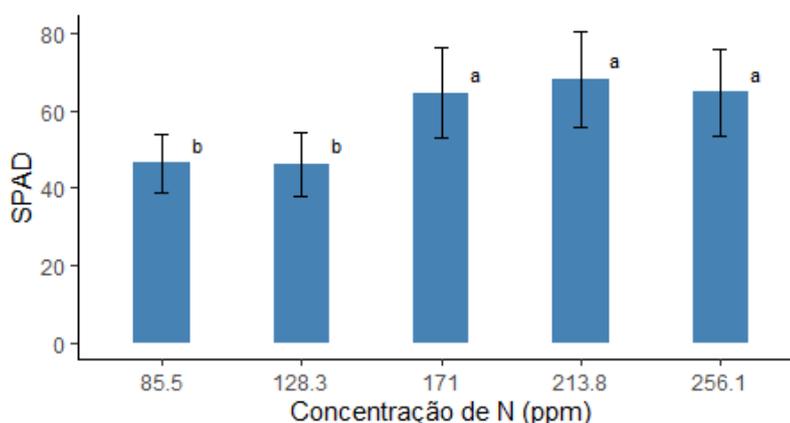
não tenha sido possível ajustar regressões das variáveis SPAD, Ph e NPQ pelo baixo R^2 alcançado sem significância dos parâmetros das regressões em que se buscou o melhor ajuste.

Tabela 5. Parâmetros (R^2 ; significância da inclinação da reta (p-a); inclinação da reta (a); significância do intercepto da reta no eixo y; intercepto da reta no eixo y (c)) da regressão realizada entre teor de nitrogênio foliar (TNF); (SPAD); eficiência quântica do fotosistema II (Ph); Quenching não-fotoquímico (NPQ) em relação a concentração de nitrogênio na solução nutritiva de cultivo (CN) aos 49 dias após o transplante

Análise	R^2	p-(a)	a	p-(c)	c	Modelo
TNFxCN	0,910	3,52e-16***	0,238	0,483	1,8212	Linear
SPADxCN	x	x	x	x	x	Sem ajuste
PhxCN	x	x	x	x	x	Sem ajuste
NPQxCN	x	x	x	x	x	Sem ajuste

Houve diferença significativa (pelo teste de Tukey) na resposta das folhas do tomateiro TY2006 em índice SPAD ao aumento da concentração de N na solução nutritiva. Foram expressos dois patamares de valores, primeiro entre 85,5 e 128,3 ppm de N na solução nutritiva com SPAD médio de 46,3 e entre 171 e 256,1 ppm de N na solução nutritiva com SPAD médio de 65,7 (diferença de 42%) (Figura 12). Por sua vez não houve diferença significativa entre os tratamentos T1 e T2, nem entre os tratamentos T3, T4 e T5.

Figura 12. Variação do índice SPAD em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva

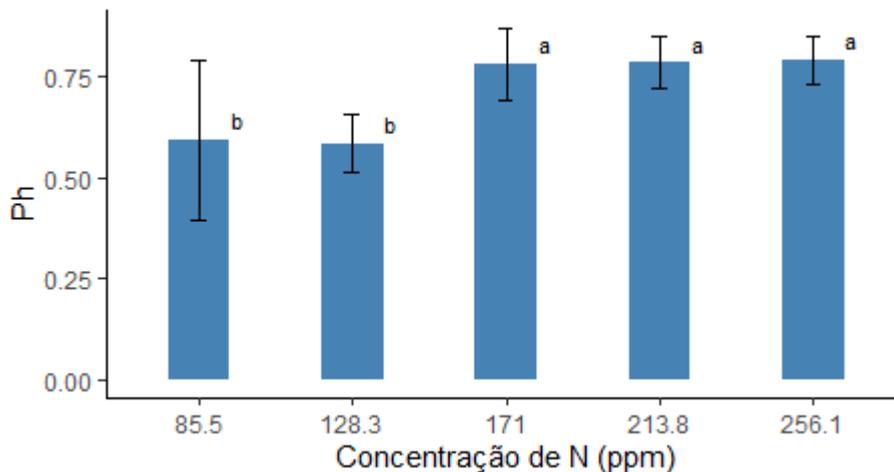


Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a ($p < 0,05$) de probabilidade.

Houve aumento significativo da eficiência quântica do fotosistema II (PhII) com o aumento da concentração de N na solução nutritiva, embora não tenha ocorrido diferença significativa entre os tratamentos T3 (171 ppm de n), T4 (213,8 ppm de N) e T5 (256 ppm de N), assim como entre os tratamentos T1 (85,5 ppm de N) e T2 (128,3 ppm de N), de acordo com

o teste de Tukey a 5% de significância (Figura 13). Nos dois tratamentos com menor concentração de N na solução nutritiva o valor de PhII foi em média 33% menor que nas plantas cultivadas a partir de 171 ppm de N (Figura 13).

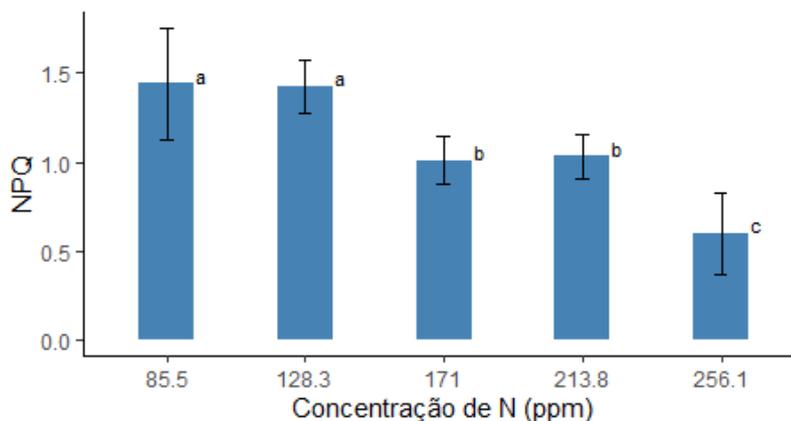
Figura 13. Variação da eficiência quântica do fotossistema II (Ph) em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a ($p < 0,05$) de probabilidade.

O aumento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva teve como resposta a redução do NPQ em três patamares distintos: primeiro, o patamar mais elevado de NPQ composto pelas plantas cultivadas entre 85,5 e 128,3 ppm de N, as quais não se diferenciaram estatisticamente entre si; segundo o patamar intermediário, formado por plantas entre 171 e 213,8 ppm de N que não se diferenciaram estatisticamente entre si; e por fim, os menores valores de NPQ foram observados em plantas cultivadas sob a concentração de 256,1 ppm de N (Figura 14). Entre esses três patamares de resposta de NPQ às diferentes concentrações de N na solução nutritiva houve diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de significância. O NPQ foi em média 20% maior em plantas cultivadas entre 85,5 e 128,3 ppm de N que em plantas cultivadas plantas entre 171 e 213,8 ppm de N na solução nutritiva, e nestas em média o NPQ foi 41% maior que nas plantas cultivadas sob a concentração de 256,1 ppm de N (Figura 14).

Figura 14. Variação do quenching não fotoquímico (NPQ) em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva



Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a ($p < 0,05$) de probabilidade.

O aumento da concentração de N na solução nutritiva elevou a concentração de N em tecido vegetal, como observado pelos maiores valores de TNF sob os tratamentos de maior concentração.

O aumento de Ph em plantas com maior TNF implica em que a variação da fluorescência da clorofila a de tomateiro cultivado sob maior disponibilidade de N tendeu à fluorescência máxima. Isso aponta melhora na performance fotossintética dessas plantas (PÉREZ et al., 2020), pois quanto mais próximo da fluorescência máxima a fluorescência variável, mais próxima da capacidade máxima de transporte de elétrons do fotossistema II para o fotossistema I foi assimilação de energia dos fótons de luz pelos tilacóides (MURCHIE; LAWSON, 2013).

Valores entre 0,75 e 0,83 são esperados na maioria das espécies de plantas superiores em uma situação livre de estresses (Pérez et al, 2019), e o valor médio a partir de 171 ppm de N foi superior a 0,75. Quanto mais próximo de 1 for o valor de Ph, menor a diferença entre o processamento atual de luz em energia química em relação a capacidade máxima da espécie, sendo por essa razão maior a eficiência quântica do fotossistema II (BANKS, 2017).

O comportamento dos valores de Ph e índice SPAD foram similares às diferentes concentrações de N na solução nutritiva. E nesse sentido a correlação entre índice SPAD e teor de clorofila foliar (ALI et al., 2020) permite inferir que a menor capacidade em converter luz em energia em tomateiro cultivado sob as menores concentrações de N se relaciona a redução de pigmentos fotossintetizantes. Isso ocorre devido ao menor TNF observado em plantas de tomate cultivadas em plantas cultivadas sob estes tratamentos, visto que N é um dos componentes da molécula da clorofila (SONG et al., 2019).

A redução da concentração de N na solução nutritiva para 171 ppm de N foi o ajuste realizado por Larsen (1977) à solução nutritiva proposta por Steiner (1966) para cultivo de tomate, esta foi a menor concentração de N para cultivo hidropônico de tomate sem perda de produtividade (LARSEN, 1982). Posteriormente esta concentração passou a ser amplamente utilizada tanto em pesquisas como em cultivos comerciais (RODRÍGUEZ et al., 2020). As plantas de tomate cultivadas abaixo dessa concentração passaram por deterioração do desempenho fotossintético durante o estágio de desenvolvimento vegetativo, conforme indicado pelas reduções de Ph e SPAD.

A redução de capacidade fotossintética em plantas cultivadas sob concentrações mais baixas de N faz com que a parte da energia luminosa não convertida em energia química na fotossíntese fosse perdida na forma de calor para o ambiente (YANG et al., 2018). O NPQ é um processo foto-protetor que remove o excesso de energia incidente no complexo proteico de clorofila. Esse processo evita a excitação acima da capacidade fisiológica das membranas dos tilacóides, impedindo a formação de radicais livres degradantes, dissipando a energia na forma de calor (DEMMIG; ADAMS, 2006).

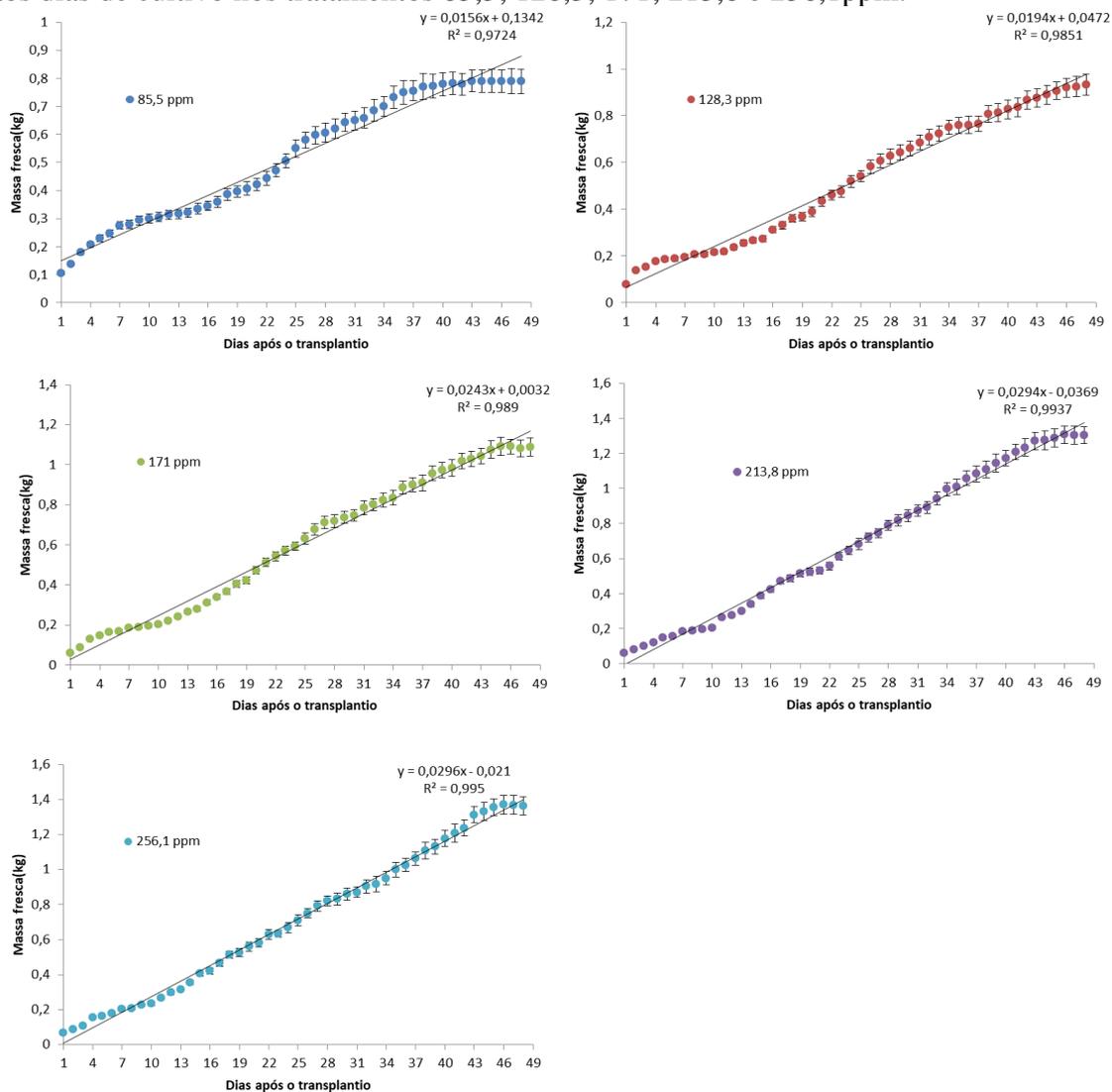
Quanto maior a capacidade da planta de realizar fotossíntese, mais energia seu complexo coletor é capaz de absorver e transmitir via cadeia de elétrons para os centros de reação escura no fotossistema I e, portanto, menores são as perdas na forma de calor (TIETZ et al., 2017). Consequentemente, plantas com maior capacidade de realizar fotossíntese perdem menos de energia na forma de calor, o que reflete menor NPQ na folha (MURCHIE; LAWSON, 2013).

A redução do NPQ a partir do tratamento controle indica que o acúmulo de N no tecido vegetal reduziu perdas de energia na forma de calor, sendo maior a quantidade de luz convertida em açúcares pela fotossíntese (LIU; ZHANG, 2018). Portanto é possível que a temperatura do limbo foliar seja uma variável complementar ao índice SPAD na identificação de plantas deficientes em N (LONG et al., 2013)

4.3.2 Consumo hídrico e produção de biomassa

A massa fresca estimada pela pesagem dos vasos (MF) aumentou em todos os tratamentos ao longo dos 49 dias de cultivo (Figura 16).

Figura 15. Regressão linear da massa fresca estimada por lisímetros de pesagem em relação aos dias de cultivo nos tratamentos 85,5; 128,3; 171; 213,8 e 256,1ppm.



Partiram de valores médios de 79 g por planta para 803, 940, 1.104, 1.318 e 1382g de MF por planta respectivamente em T1, T2, T3, T4, T5 (Figura 16). Sendo possível verificar o padrão de aumento da massa fresca acumulada(MF) ao longo dos dias em todos os 5 tratamentos, visto que a regressão entre a massa fresca acumulada e os dias após o transplântio tiveram elevado R^2 e probabilidade significativa a 0,1% de que a inclinação da reta descreva a taxa de crescimento do acúmulo de massa fresca em todos os tratamentos (Tabela 9).

Tabela 6. Parâmetros(R^2 ; significância da inclinação da reta(p-a); inclinação da reta(a); significância do intercepto da reta no eixo y; intercepto da reta no eixo y(c)) das regressões realizadas entre a massa fresca acumulada(MF) em cada tratamento(T1 = 85,5ppm; T2 = 128,3; T3 = 171ppm; T4 = 213,8ppm e T5 = 256,1ppm) em relação aos dias após o transplântio(D)

Análise	R^2	p-(a)	a(MF)	p-(c)	c	Modelo
MF(T1)xD	0,973	<2e-16***	0,01544	3,63e-16***	0,132	Linear
MF(T2)xD	0,984	<2e-16***	0,01931	2,51e-05***	0,047	Linear
MF(T3)xD	0,989	<2e-16***	0,02426	0,758	0,0033	Linear
MF(T4)xD	0,993	<2e-16***	0,02945	0,000414***	-0,0366	Linear
MF(T5)xD	0,995	<2e-16***	0,02965	0,0141*	-0,0224	Linear

Por sua vez notou-se diferença significativa por tratamento no total de massa fresca acumulado e na taxa com que a massa fresca se acumulou no tecido ao longo do tempo(a(MF)) (Tabela 10). O parâmetro a(MF) da regressão entre MFxD foi em média 22% maiores em T4 e T5(que não foram diferentes estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%) que em T3. Por sua vez a(MF) em T3 foi 24% maior que em T2 que teve a(MF) em média 24% maior que em T1.

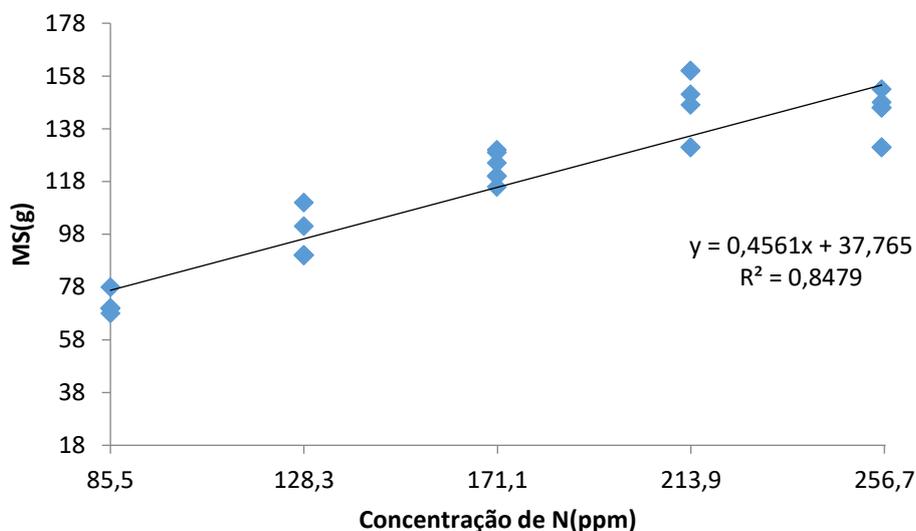
Tabela 7. Comparação da inclinação da reta (a) das regressões ajustadas entre massa fresca acumulada(MF) e os dias após o transplântio(D) entre os tratamentos(T1 = 85,5ppm; T2 = 128,3; T3 = 171ppm; T4 = 213,8ppm e T5 = 256,1ppm) pelo teste de tukey a 5%

Concentração de nitrogênio	a(MF)	Desvio padrão
85,5	0,0155d	0,000919
128,3	0,0193c	0,000952
171	0,0243b	0,00104
213,8	0,0295a	0,00121
256,1	0,0297a	0,00128

Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a ($p < 0,05$) de probabilidade.

Houve aumento de MS em resposta ao aumento da concentração de N na solução nutritiva (Figura 17).

Figura 16. Variação da massa seca das plantas (MS) em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva



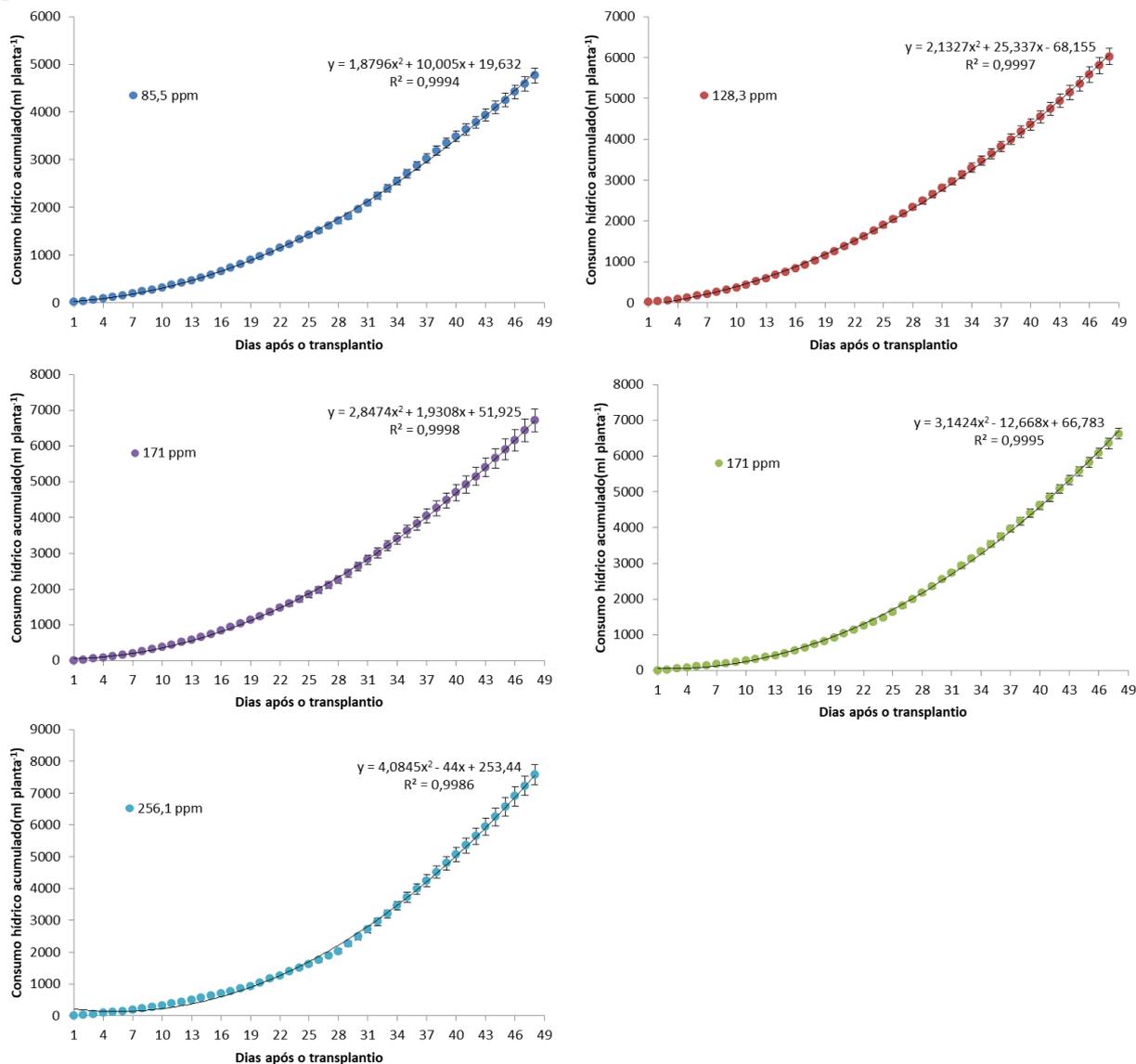
Tomateiros sujeitos aos tratamentos com maior concentração de N na solução nutritiva acumularam mais matéria seca (MS) no tecido vegetal em relação aos cultivados sob menores concentrações, visto que a regressão da MS em relação a concentração de N na solução nutritiva teve elevado R^2 e probabilidade significativa a 0,1% de que a inclinação da reta descreva a taxa de acúmulo de massa seca no tecido vegetal (Tabela 8).

Tabela 8. Parâmetros (R^2 ; significância da inclinação da reta (p-a); inclinação da reta (a); significância do intercepto da reta no eixo y; intercepto da reta no eixo y (c)) da regressão realizada entre a massa seca acumulada (MS) em relação a concentração de nitrogênio na solução nutritiva de cultivo (CN) aos 49 dias após o transplante

Análise	R^2	P-value(a)	a	P-value(b)	b	P-value(c)	c	Modelo
MSxCN	0,848	5,71e-13***	0,456	4,04e-06***	37,765	x	x	Linear

O consumo de água por planta ao longo do ciclo de crescimento vegetativo foi maior em plantas cultivadas sob concentrações mais elevadas de N na solução nutritiva. Ocorreu aumento da massa de água perdida diariamente por evapotranspiração (MAP) em todos os tratamentos ao longo dos 49 dias de cultivo conforme estimado pelos lisímetros (Figura 18).

Figura 17. Regressão polinomial de 2º grau do consumo hídrico acumulado(estimado por lisímetros de pesagem) em relação aos dias de cultivo nos tratamentos 85,5; 128,3; 171; 213,8 e 256,1ppm



Tomateiros sujeitos aos tratamentos com maior concentração de N na solução nutritiva aumentaram o consumo hídrico acumulado(CH) ao longo dos dias em todos os 5 tratamentos, visto que a regressão polinomial do CH em relação aos dias após o transplântio tiveram elevado R^2 e probabilidade significativa a 0,1% de que a inclinação da curvatura da parábola descreva a taxa de variação de CH com o passar dos dias(Tabela 9).

Tabela 9. Parâmetros(R^2 ; significância da inclinação da curva(p-a); inclinação da curva(a); significância do intercepto da reta no eixo y; significância do sentido da curva após o intercepto em y(p-b); sentido da curva após o intercepto em y (b); significância do intercepto da reta no eixo y(p-c); intercepto da reta no eixo y(c)) das regressões polinomiais realizadas entre o consumo hídrico acumulado(CH) em cada tratamento(T1 = 85,5ppm; T2 = 128,3; T3 = 171ppm; T4 = 213,8ppm e T5 = 256,1ppm) em relação aos dias após o transplante(D)

Análise	R^2	p-value(a)	a	p-value(b)	b	p-value(c)	c	Modelo
CH(T1)xD	0,999	<2e-16***	1,88	3,08e-08***	10,0	0,224	19,630	Polinomial(2a)
CH(T2)xD	0,999	<2e-16***	2,13272	<2e-16***	25,3	1,65e-05***	-68,155	Polinomial(2a)
CH(T3)xD	0,999	<2e-16***	3,14239	<6,57e-08***	-12,67	0,00249**	66,783	Polinomial(2a)
CH(T4)xD	0,999	<2e-16***	2,8474	0,1154	1,931	0,000191***	51,925	Polinomial(2a)
CH(T5)xD	0,998	<2e-16***	4,0845	3,03e-15***	-43,99	9,57e-08***	253,438	Polinomial(2a)

Houve diferença significativa por tratamento na demanda hídrica total acumulada nos 49 dias de cultivo(Figura 16) e na taxa com que a o consumo hídrico aumentou por planta ao longo do tempo(a(MH)) (Tabela 10). O parâmetro a(MH) da regressão entre MHxD foi em média 30% maior em T5 que em T4(diferentes estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%) que por sua vez foi 10% maior que em T3. O a(MH) em T3 foi 33% maior que em T2 que teve a(MH) em média 13% maior que em T1. (Figura 18).

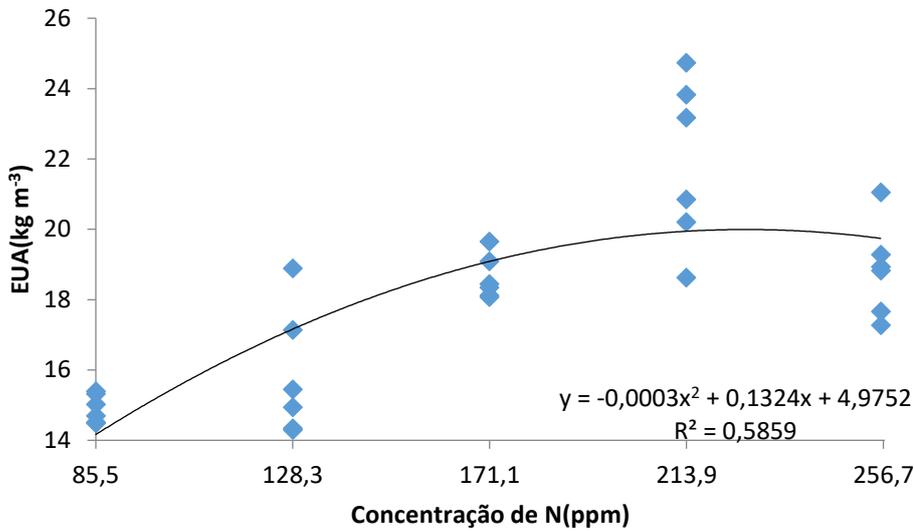
Tabela 10. Comparação da inclinação da curva (a) das regressões polinomiais ajustadas entre o consumo hídrico acumulado(CH) e os dias após o transplante(D) entre os tratamentos(T1 = 85,5ppm; T2 = 128,3; T3 = 171ppm; T4 = 213,8ppm e T5 = 256,1ppm) pelo teste de tukey a 5%

Concentração de nitrogênio	a(CH)	Desvio padrão
85,5	1,88e	0,0705
128,3	2,13d	0,0844
171	2,85c	0,161
213,8	3,14b	0,065
256,1	4,08a	0,216

Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a ($p < 0,05$) de probabilidade.

Houve aumento da eficiência do uso da água (EUA) em resposta aumento da concentração de N na solução nutritiva até 213,8 ppm de N (Figura 19). Nas plantas cultivadas sob a concentração de 256,1 ppm de N na solução nutritiva os valores de EUA não se diferenciou da média observada nas plantas cultivadas sob 171 ppm de N, significativamente menores que as plantas cultivadas sob 213,8 ppm de N, de acordo com o teste de Tukey (Figura 19).

Figura 18. Regressão polinomial de 2º grau da eficiência do uso de água (EUA) em relação à concentração de nitrogênio (N) na solução nutritiva



Tomateiros sujeitos aos tratamentos com maior concentração de N na solução nutritiva aumentaram a EUA até proximadamente a concentração de 214ppm de N na solução nutritiva do cultivo hidropônico, a partir dessa concentração de N observou-se a tendência de redução da EUA com o aumento da concentração de N na solução nutritiva, visto que a regressão polinomial da EUA em relação a concentração de N na solução nutritiva teve probabilidade significativa a 5% de que a inclinação da curvatura da parábola descreva a taxa de variação da EUA com o aumento da concentração de N na solução nutritiva, embora o R^2 não tenha sido tão elevado(Tabela 8), apontando para a possibilidade de inexatidão nas estimativas..

Tabela 11.. Parâmetros(R^2 ; significância da inclinação da curva(p-a); inclinação da curva(a); significância do intercepto da reta no eixo y; significância do sentido da curva após o intercepto em y(p-b); sentido da curva após o intercepto em y (b); significânciado; intercepto da reta no eixo y(p-c); intercepto da reta no eixo y(c)) das regressões polinomiais realizadas entre a eficiência do uso da água(EUA) em relação a concentração de nitrogênio na solução nutritiva de cultivo(CN) aos 49 dias após o transplantio

Análise	R^2	p-(a)	a	p-(b)	b	p-(c)	c	Modelo
EUAxCN	0,58	0,0172*	0,0003	0,0025**	0,132447	0,1225	4,97518	Polinomial(2a)

A estimativa de EUA mostra que na concentração de 213,8 ppm de N ocorreu a maior produção de biomassa, 22,85 kg de MS para cada m³ de água utilizado para cultivo (Figura 19). A menor produção ocorre na concentração de 85,5 ppm de N na solução nutritiva em que se produziu 16,6 kg de MS para cada m³ de água consumido (Figura 19). Enquanto nas concentrações de 128,3 e 171 ppm de N se produziria respectivamente 19 e 21 kg de MS para cada m³ de água consumido respectivamente (Figura 19).

A menor biomassa causada pela deficiência de nitrogênio repercutiu em uma limitação anatômica à condutividade hidráulica do fluxo de água para o interior das raízes conforme demandado pela transpiração das folhas (BARRY et al., 2019). Isso restringiu o consumo de água quando a tendência seria aumentar com o decorrer do desenvolvimento vegetativo das plantas (MATIMATI et al., 2014), isto relaciona-se ao menor número de estômatos em uma menor massa de tecido foliar (ZHOU et al., 2020),

Isso impacta em restrição no duto que comunica desde a superfície da folha até a água no entorno das raízes (via vasos xilemáticos e espaço apoplástico) (LAI; KATUL, 2000) reduzindo-se o transporte da solução em torno da rizosfera para limbo foliar em contato com a atmosfera (KUNRATH et al., 2020).

Nesse sentido há uma interdependência entre a absorção de nitrogênio e o consumo de água pelas plantas, visto que o menor consumo de água de modo geral reduz ainda mais o fluxo de nitrogênio transportado via xilema (NIU et al., 2007), de modo que plantas deficientes tenderam a crescer menos, consumindo menos água e absorvendo conseqüentemente menos nutrientes dissolvidos (GLOSER et al., 2020). Isso aumentou a disparidade de taxa de crescimento entre plantas bem nutridas e plantas deficientes ao longo do desenvolvimento vegetativo do tomateiro.

É possível se inferir que o aumento da concentração de N na solução nutritiva provocou o aumento da massa fresca das plantas em uma escala maior que o aumento da transpiração, desde a concentração 85,5 ppm de N (T1) até a concentração de 213,8 ppm de N (T4). Nesse sentido o aumento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva causou o aumento da eficiência de uso da água das plantas de tomate, conforme também observado por (ZHANG et al., 2020; SATOIGNON et al., 2021).

A taxa com que o consumo hídrico acumulado aumentou ao longo dos dias após transplantio estimado em T5 foi maior que em T4, embora a taxa com que ocorreu o aumento da massa fresca acumulada não tenham diferido significativamente entre si nesses mesmos tratamentos. Nesse caso o incremento de 50% acima da concentração de 171 ppm de N resultou proporcionalmente em maior aumento da transpiração que ganho de massa fresca por planta. Esse limite ao crescimento das plantas em relação a maior dose de nitrogênio pode estar relacionado a uma demanda por uma atmosfera mais rica em CO₂ para se manter a mesma proporção de aumento de massa com o aumento da disponibilidade de nitrogênio (Hong et al., 2021).

Quanto maior a concentração de N na solução nutritiva maior o potencial para trocas gasosas (DU et al., 2019). Essa resposta é uma consequência da maior biomassa da parte aérea

que aumenta a superfície de contato das folhas com a atmosfera (Ronga et al., 2019); e do maior teor de clorofila foliar que melhora a capacidade fotossintética das plantas, demandando mais água na conversão de luz em energia química (Petropoulos et al., 2020). Estes dois fatores aumentam a quantidade de água perdida por evapotranspiração e ao mesmo tempo aumentam também a quantidade de CO₂ assimilado (LI et al., 2020).

Neste sentido ocorre um ciclo de crescimento em que plantas maiores crescem ainda mais, aumentando-se a quantidade de carbono acumulado nos tecidos e a quantidade de energia produzida na fotossíntese, fazendo com que o aumento da disponibilidade de N na solução nutritiva acelere a taxa de crescimento das plantas (PAN et al., 2019), e conseqüentemente a quantidade de água e carbono consumidos.

O aumento da transpiração em tomateiro cultivado sob a concentração de 256,1 ppm de N na solução nutritiva não foi acompanhado pelo aumento da biomassa das folhas. São necessários novos estudos para se detalhar melhor porque houve aumento do consumo de água sem aumento na proporcional do crescimento das plantas.

É possível que sem restrição à disponibilidade de água para o cultivo, não tenha ocorrido também restrição estomática à transpiração das plantas (WANG et al., 2018), as quais perderam mais água na forma de vapor sem que houvesse quantidade de CO₂ suficiente na atmosfera da tenda de cultivo para suprir proporcionalmente o incremento de C necessário para compensar em matéria seca produzida a perda de água pela transpiração (WEI et al., 2018)

O aumento da transpiração com o aumento da concentração de nitrogênio na solução nutritiva de cultivo do tomateiro é um segundo fator além da redução do NPQ que também implica em redução da temperatura do limbo foliar com o aumento da concentração de N na solução de cultivo. Reitera-se a importância de novos estudos que verifiquem a resposta em termo de temperatura do limbo foliar do tomateiro a diferentes concentrações de N na solução de cultivo.

Além disso, como pôde ser observado na condição de cultivo hidropônico deste experimento, mesmo que não tenha ocorrido limitação hídrica ao crescimento, a concentração de nitrogênio absorvido pelas plantas afetou a quantidade de água consumida durante o estágio de crescimento vegetativo do tomateiro. Isso mostra que é relevante considerar o custo com irrigação (consumo de água e energia) na definição de uma dosagem ideal de nitrogênio.

Nesse sentido, conhecer o efeito do estresse hídrico no consumo de nitrogênio, permite ajustar uma dose ideal com base em uma produtividade máxima esperada, dadas as limitações ambientais ao desenvolvimento da espécie cultivada. Por outro lado, conhecer o efeito do nitrogênio acumulado em tecido vegetal no consumo de água, permite ajustar uma

recomendação ideal com base no menor custo com irrigação. A relação mais rentável entre estes dois fatores, de menor custo com irrigação e maior produtividade, pode ajudar na tomada de decisão sobre a quantidade de nitrogênio aplicada no manejo nutricional do cultivo de tomate com nutrição baseada em fertirrigação.

A morfologia e fisiologia das plantas foi afetada pelas diferentes quantidade de N acumulado no tecido das plantas de tomate cultivadas sob os distintos tratamentos (LIANG et al., 2019), interferindo principalmente no consumo de água (ZHOU et al., 2020), trocas gasosas (DU et al., 2020) e tamanho das plantas (RONGA et al., 2019).

4.4 Conclusões

Dados de NPQ e consumo de água apontam para a redução da temperatura foliar com o aumento da concentração de nitrogênio no tecido vegetal. Nesse sentido a resposta de plantas sujeitas a estresse nutricional em nitrogênio e déficit hídrico é também similar, pois a redução da disponibilidade de água impacta em redução da condutividade estomática e aumento de NPQ. Dados de bandas termais podem ser usados de maneira complementar ao NDVI e SPAD na diferenciação do estresse nutricional em nitrogênio e por déficit hídrico.

Em relação ao aumento do consumo de água em plantas de tomate submetidas a concentrações crescentes de nitrogênio na solução nutritiva mostra a necessidade de que se considere parâmetros do status hídrico da planta e disponibilidade de água no manejo de adubação nitrogenada. Nesse sentido a informação da taxa de aumento do consumo de água pelo incremento da disponibilidade de nitrogênio deve ser usado para estimar a redução da rentabilidade de um plantio pelo aumento do custo relacionado ao abastecimento de uma demanda hídrica maior para atender o pleno crescimento de plantas supernutridas em nitrogênio.

Além disso, dada a interação entre nitrogênio e água, e considerando que estes são os dois principais agentes estressantes em cultivos de tomate, é possível que a abordagem conjunta dos dois agentes estressantes permita agrupar fenótipos de plantas sujeitas a diferentes combinações de estresses hídrico e nutricional em nitrogênio simultaneamente. Nesse sentido a resposta spectral de plantas pode ser mais eficaz em agrupar fenótipos de acordo com o nível combinado dos dois estresses.

Referências Bibliográficas

MATIMATI, I.; VERBOOM, G. A.; & CRAMER, M. D. Nitrogen regulation of transpiration controls mass-flow acquisition of nutrients. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n.1 , p. 159-168, 2014. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert367>

GLOSER, V.; DVORACKOVA, M.; MOTA, D. H.; PETROVIC, B.; GONZALEZ, P.; & GEILFUS, C. M. Early changes in nitrate uptake and assimilation under drought in relation to transpiration. **Frontiers in plant science**, p. 11, 2020. <https://doi.org/10.0.13.61/fpls.2020.602065>

RONGA, D.; PARISI, M.; PENTANGELO, A.; MORI, M.; & DI MOLA, I. Effects of nitrogen management on biomass production and dry matter distribution of processing tomato cropped in southern Italy. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 855, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120855>

PETROPOULOS, S. A.; FERNANDES, Â.; XYRAFIS, E.; POLYZOS, N.; ANTONIADIS, V.; BARROS, L.; & CFR FERREIRA, I. The optimization of nitrogen fertilization regulates crop performance and quality of processing tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv. Heinz 3402. **Agronomy**, v. 10, n. 5, p. 715, 2020). <https://doi.org/10.3390/agronomy10050715>

LI, S.; HAMANI, A. K. M.; SI, Z.; LIANG, Y.; GAO, Y.; & DUAN, A. Leaf gas exchange of tomato depends on abscisic acid and jasmonic acid in response to neighboring plants under different soil nitrogen regimes. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1674, 2020). <https://doi.org/10.3390/plants9121674>

DU, Y. D.; GU, X. B.; WANG, J. W.; & NIU, W. Q. Yield and gas exchange of greenhouse tomato at different nitrogen levels under aerated irrigation. **Science of the total environment**, v. 668, p. 1156-1164, 2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.098>

WANG, C.; WU, S.; TANKARI, M.; ZHANG, X.; LI, L.; GONG, D.; ... & WANG, Y. Stomatal aperture rather than nitrogen nutrition determined water use efficiency of tomato plants under nitrogen fertigation. **Agricultural water management**, v. 209, p. 94-101, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.020>

ZHANG, Z.; ZHANG, Y.; SHI, Y.; & YU, Z. Optimized split nitrogen fertilizer increase photosynthesis, grain yield, nitrogen use efficiency and water use efficiency under water-saving irrigation. **Scientific Reports**, v. 10 n. 1, p. 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75388-9>

SATOIGNON, F.; OWIDO, S. F.; & LELEI, J. J. Effects of supplemental irrigation on yield, water use efficiency and nitrogen use efficiency of potato grown in mollic Andosols. **Environmental Systems Research**, v. 10 n. 1, 1-14,2021. <https://doi.org/10.1186/s40068-021-00242-4>

HONG, T.; CAI, Z.; ZHAO, R.; HE, Z.; DING, M.; & ZHANG, Z. Effects of water and nitrogen coupling on the yield, quality, and water and nitrogen utilization of watermelon under CO₂ enrichment. **Scientia Horticulturae**, v. 286, p. 110213, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110213>

PAN, T.; DING, J.; QIN, G.; WANG, Y.; XI, L.; YANG, J.; ... & ZOU, Z. Interaction of supplementary light and CO₂ enrichment improves growth, photosynthesis, yield, and quality of tomato in autumn through spring greenhouse production. **HortScience**, v. 54 n. 2, p. 246-252, 2019. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13709-18>

ZHOU, H.; KANG, S.; LI, F.; DU, T.; SHUKLA, M. K.; & LI, X. Nitrogen application modified the effect of deficit irrigation on tomato transpiration, and water use efficiency in different growth stages. **Scientia Horticulturae**, v. 263, p. 109112. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109112>

KUNRATH, T. R.; LEMAIRE, G.; TEIXEIRA, E.; BROWN, H. E.; CIAMPITTI, I. A.; & SADRAS, V. O. Allometric relationships between nitrogen uptake and transpiration to untangle interactions between nitrogen supply and drought in maize and sorghum. **European Journal of Agronomy**, v. 120, p. 126145, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126145>

NICOLA, S.; PIGNATA, G.; FERRANTE, A.; BULGARI, R.; COCETTA, G.; & ERTANI, A. Water use efficiency in greenhouse systems and its application in horticulture. **AgroLife Sci. J**, v. 9, p. 248-262, 2020.

PONSIOEN, T.; & HELMES, R. Environmental footprint of tomatoes: Summary of the representative product study. **Wageningen Economic Research**, Report 2020-041b, 2020.

HASAN, M.; SABIR, N.; SINGH, A. K.; SINGH, M. C.; PATEL, N.; KHANNA, M.; ... & PRAGNYA, P. **Hydroponics Technology for Horticultural Crops. Tech. Bull. TB-ICN**, v. 188, p. 30, 2018.

MISHRA, A. K.; SHAIK, S.; KHANAL, A. R.; BAIRAGI, S. Contract farming and technical efficiency: Evidence from low-value and high-value crops in Nepal. **Agribusiness**, 34(2), 426-440, (2018). <https://doi.org/10.1002/agr.21533>

ONYANCHA, M. **Factors Influencing Choice Of Irrigation Systems And Crop Water Requirement Of High Value Crops In Mwala, Machakos County, Kenyaong'Ina**. Tese (Doutorado) - University of Nairobi, Nairobi, 2018.

SINGH, A. Salinization of agricultural lands due to poor drainage: A viewpoint. **Ecological Indicators**, v. 95, p. 127-130, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.037>

SINGH, A. Salinization and drainage problems of agricultural land. **Irrigation and Drainage**, v. 69, n. 4, p. 844-853, 2020. <https://doi.org/10.1002/ird.2477>

CHANDA, S.; BHAT, M.; SHETTY, K. G.; JAYACHANDRAN, K. Technology, Policy, and Market Adaptation Mechanisms for Sustainable Fresh Produce Industry: The Case of Tomato Production in Florida, USA. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 5933, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13115933>

HOCHMUTH, R. C.; PARKELL, N. B.; LAUGHLIN, W. L.; & RIDER, S. C. Water and Nutrient Management Guidelines for Greenhouse Hydroponic Vegetable Production in Florida. **EDIS**, v. 1, p. 6-6, 2020.

LARSEN, J. E. Experience with the Steiner nutrient solution on greenhouse tomatoes.[Conference paper]. In **Fourth International Congress on Soilless Culture**. Las Palmas, Spain, 1977.

STEINER, A. The influence of the chemical composition of a nutrient solution on the production of tomato plants. **Plant and Soil**, v. 24, n. 3, p. 454-466, 1966. <https://doi.org/10.1007/BF01374052>

SNYDER, Richard Glen. Greenhouse tomato handbook. **Publication-Cooperative Extension Service, Mississippi State University (USA)**, 1992.

SHARMA, N.; ACHARYA, S.; KUMAR, K.; SINGH, N.; & CHAURASIA, O. P. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 17 n. 4, p. 364-371, 2018. <https://10.0.23.70/2455-7145.2018.00056.5>

YANG, Q.; ZHU, Y.; WANG, J. Adoption of drip fertigation system and technical efficiency of cherry tomato farmers in Southern China. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 123980, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123980>

MAHESH, R.; ANIL, P.; DEBASHISH, C.; & SIVAPRASAD, V. Improved mulberry productivity and resource efficiency through low-cost drip fertigation. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1852552>

WANG, X.; YUN, J.; SHI, P.; LI, Z.; LI, P.; & XING, Y. Root growth, fruit yield and water use efficiency of greenhouse grown tomato under different irrigation regimes and nitrogen levels. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 38, n. 2, p. 400-415, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9850-7>

WANG, C.; WU, S.; TANKARI, M.; ZHANG, X.; LI, L.; GONG, D.; WANG, Y. Stomatal aperture rather than nitrogen nutrition determined water use efficiency of tomato plants under nitrogen fertigation. **Agricultural water management**, v. 209, p. 94-101, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.020>

WEI, Z.; DU, T.; LI, X.; FANG, L.; & LIU, F. Interactive effects of CO₂ concentration elevation and nitrogen fertilization on water and nitrogen use efficiency of tomato grown under reduced irrigation regimes. **Agricultural water management**, v. 202, p. 174-182, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.027>

DU, Y. D.; CAO, H. X.; LIU, S. Q.; GU, X. B.; & CAO, Y. X. Response of yield, quality, water and nitrogen use efficiency of tomato to different levels of water and nitrogen under drip irrigation in Northwestern China. **Journal of integrative agriculture**, v. 16, n. 5, p. 1153-1161, 2017. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61371-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61371-0)

ZHOU, H.; KANG, S.; LI, F.; DU, T.; SHUKLA, M. K.; & LI, X. Nitrogen application modified the effect of deficit irrigation on tomato transpiration, and water use efficiency in different growth stages. **Scientia Horticulturae**, v.263, p. 109112, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109112>

DING, L.; LI, Y.; GAO, L.; LU, Z.; WANG, M.; LING, N.; GUO, S. Aquaporin expression and water transport pathways inside leaves are affected by nitrogen supply through transpiration in rice plants. **International journal of molecular sciences**, v. 19, n. 1, p. 256, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijms19010256>

GLOSER, V.; DVORACKOVA, M.; MOTA, D. H.; PETROVIC, B.; GONZALEZ, P.; & GEILFUS, C. M. Early changes in nitrate uptake and assimilation under drought in relation to transpiration. **Frontiers in plant science**, p. 11, 2020. <https://10.0.13.61/fpls.2020.602065>

ULLAH, H.; SANTIAGO-ARENAS, R.; FERDOUS, Z.; ATTIA, A.; & DATTA, A. Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: A review. **Advances in agronomy**, v. 156, p. 109-157, 2019. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.002>

KUNRATH, T. R.; LEMAIRE, G.; SADRAS, V. O.; & GASTAL, F. Water use efficiency in perennial forage species: Interactions between nitrogen nutrition and water deficit. **Field Crops Research**, v. 222, p. 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.031>

CHENG, M.; WANG, H.; FAN, J.; XIANG, Y.; TANG, Z.; PEI, S.; ZHANG, F. Effects of nitrogen supply on tomato yield, water use efficiency and fruit quality: A global meta-analysis. **Scientia Horticulturae**, v. 290, p. 110553, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110553>

ZHOU, H.; KANG, S.; LI, F.; DU, T.; SHUKLA, M. K.; & LI, X. Nitrogen application modified the effect of deficit irrigation on tomato transpiration, and water use efficiency in different growth stages. **Scientia Horticulturae**, v. 263, p. 109112, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109112>

QU, Z.; QI, X.; SHI, R.; ZHAO, Y.; HU, Z.; CHEN, Q.; & LI, C. Reduced N fertilizer application with optimal blend of controlled-release urea and urea improves tomato yield and quality in greenhouse production system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20 n. 4, p. 1741-1750, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00244-8>

JONES JR, J. Benton. **Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden**. CRC press, 2nd Edition, 2007.

MACWAN, J.; PANDYA, D. Review on soilless method. **International Journal of Recent Scientific Research** v. 11, n. 1F, p. 37122-37127, 2019. <http://dx.doi.org/10.24327/ijrsr.20>

YANG, T.; ALTLAND, J. E.; SAMARAKOON, U. Evaluation of organic substrates as an alternative to perlite for cucumber production in the Dutch bucket hydroponic system. In: **II International Symposium on Growing Media, Soilless Cultivation, and Compost Utilization in Horticulture**. v. 1317. p. 319-326, 2021. <https://10.0.68.252/ActaHortic.2021.1317.37>

RÜTTING, T.; ARONSSON, H.; & DELIN, S. Efficient use of nitrogen in agriculture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 110, p. 1–5, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9900-8>

TEI, F.; DE NEVE, S.; DE HAAN, J.; & KRISTENSEN, H. L. Nitrogen management of vegetable crops. **Agricultural Water Management**, v. 240, p. 106316, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106316>

RONGA, D.; PARISI, M.; PENTANGELO, A.; MORI, M.; & DI MOLA, I. Effects of nitrogen management on biomass production and dry matter distribution of processing tomato cropped in southern Italy. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 855, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120855>

PADILLA, F. M.; FARNESELLI, M.; GIANQUINTO, G.; TEI, F.; & THOMPSON, R. B. Monitoring nitrogen status of vegetable crops and soils for optimal nitrogen management. **Agricultural Water Management**, v. 241, p. 106356, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106356>

KANAN, A.; ALLAHHAM, A.; BOULEAU, C.; SAYARA, T.; QURIE, M.; & AWAD, L. Improving Water Use Efficiency Using Sensors and Communication System for Irrigation of Greenhouse Tomato in Tulkarm, Palestine. **Agricultural Research**, p. 1-9, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40003-021-00604-5>

GONZAGA, N. R.; GONZAGA, A. B.; PEPITO, S. L. A.; OCTAVIO, R. I.; & HARPER, S. M. Growth, yield and postharvest quality of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) as influenced by different rates of nitrogen fertilizer. In III **Asian Horticultural Congress-AHC2020**, v. 1312, p. 329-336, 2020. <https://10.0.68.252/ActaHortic.2021.1312.48>

LI, Y.; XUE, X.; GUO, W.; WANG, L.; DUAN, M.; CHEN, H.; & CHEN, F. Soil moisture and nitrate-nitrogen dynamics and economic yield in the greenhouse cultivation of tomato and cucumber under negative pressure irrigation in the North China Plain. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38695-4>

LIANG, L.; RIDOUTT, B. G.; LAL, R.; WANG, D.; WU, W.; PENG, P.; ZHAO, G. Nitrogen footprint and nitrogen use efficiency of greenhouse tomato production in North China. **Journal of cleaner production**, v. 208, p. 285-296, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.149>

YAO, X.; YU, K.; DENG, Y.; LIU, J.; & LAI, Z. Spatial variability of soil organic carbon and total nitrogen in the hilly red soil region of Southern China. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 6, p. 2385-2394, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01014-8>

COUCHENEY, E.; VILLA, A.; ECKERSTEN, H.; HOFFMANN, H.; JANSSON, P. E.; GAISER, T.; LEWAN, E. Spatial aggregation for crop modelling at regional scales: the effects of soil variability. In **EGU General Assembly Conference Abstracts** p. 14113, 2017. <https://10.0.3.248/j.agee.2011.05.016>

MHADHBI, H. **Plant Hydroponic Cultivation: A Support for Biology Research in the Field of Plant-Microbe-Environment Interactions**. *Hydroponics—A Standard Methodology for Plant Biological Researches*, p. 101, 2012.

- TREFTZ, C.; OMAYE, T. Comparison between hydroponic and soil systems for growing strawberries in a greenhouse. **International Journal of Agricultural Extension**, v. 3 n. 3, p. 195-200, 2016.
- SHARMA, N.; ACHARYA, S.; KUMAR, K.; SINGH, N.; CHAURASIA, O. P. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 17, n. 4, p. 364-371, 2018. <https://doi.org/10.0.23.70/2455-7145.2018.00056.5>
- SHAVRUKOV, Yuri; GENC, Yusuf; HAYES, Julie. **The use of hydroponics in abiotic stress tolerance research**. Rijeka: InTech, 2012.
- ASAO, T, Ed.). **Hydroponics: A standard methodology for plant biological researches**. BoD–Books on Demand. 2012.
- CHO, W. J.; KIM, H. J.; JUNG, D. H.; KIM, D. W.; AHN, T. I.; & SON, J. E. On-site ion monitoring system for precision hydroponic nutrient management. **Computers and electronics in agriculture**, v. 146, p. 51-58, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.019>
- PANT, T.; AGARWAL, A.; BHOJ, A. S.; JOSHI, R. P.; PRAKASH, O.; & DWIVEDI, S. K. Vegetable cultivation under hydroponics in Himalayas: Challenges and opportunities. **Defence Life Science Journal**, 3, 111-119, 2018. <https://doi.org/10.0.56.93/dlsj.3.12575>
- ŠIMKŪNAS, A.; DENISOV, V.; & VALAŠINAITĖ, S. Systemic research of plant growth and stress in a specially designed climatic hydroponics system. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 204(6), 613-623, 2018). <https://doi.org/10.1111/jac.12291>
- KHAN, S.; PUROHIT, A.; & VADSARIA, N. Hydroponics: current and future state of the art in farming. **Journal of Plant Nutrition**, 44(10), 1515-1538, 2020). <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1860217>
- SILVA, F. J. D.; SANTOS, J. A.; SILVA, M. M. D.; SILVA, Ê. F. D. F.; SOUZA, E. R. D. Water relations of chives in function of salinity and circulation frequency of nutrient solutions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 23, 359-365, 2019). <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n5p359-365>
- MEDRANO, E.; ALONSO, F. J.; SÁNCHEZ-GUERRERO, M. C.; LORENZO, P.; MARHUENDA, A.; & BRIONES, P. AA Simplified PM Model for Improving Irrigation Management of Strawberries in a Semi-Closed Hydroponic System. In **XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010)** v. 927 p. 361-366, 2010. <https://doi.org/10.0.68.252/ActaHortic.2012.927.43>
- PHENE, C. J.; MCCORMICK, R. L.; DAVIS, K. R.; PIERRE, J. D.; & MEEK, D. W. A lysimeter feedback irrigation controller system for evapotranspiration measurements and real time irrigation scheduling. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 2, p. 477-0484, 1989. <https://doi.org/10.0.50.231/2013.31029>

NIKOLAOU, G.; NEOCLEOUS, D.; KATSOULAS, N.; KITTAS, C. Modelling transpiration of soilless greenhouse cucumber and its relationship with leaf temperature in a mediterranean climate. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, p. 911-920, 2017. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2017.v29.i12.1561>

MAJEED, A.; HAQ, M.; NIAZ, A.; MAHMOOD, A.; AHMAD, N.; & KHAN, H. M. W. A. Comparison of soil and hydroponic based screening process to select salt tolerant wheat varieties. **Sarhad J. Agric**, v. 35, p. 1107-1112, 2019. <http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2019/35.4.1107.1112>

NTINAS, G. K.; KADOGLIDOU, K.; TSIVELIKA, N.; KROMMYDAS, K.; KALIVAS, A.; RALLI, P.; & IRAKLI, M. Performance and hydroponic tomato crop quality characteristics in a novel greenhouse using dye-sensitized solar cell technology for covering material. **Horticulturae**, v. 5 n. 2, p. 42, 2019. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5020042>

FOZIA, N.; JILANI, M. S.; KASHIF, W.; & MEHWISH, K. Performance of tomato hybrids under hydroponic culture. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 47, n. 1, p. 19-25, 2010.

Long, R., WAN, Z., SONG, F., JIAN, N., & QIN, J.. Effects of nitrogen fertilizer level on chlorophyll fluorescence characteristics in flag leaf of super hybrid rice at late growth stage. **Rice Science**, v. 20, n. 3, p. 220-228, 2013. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(13\)60138-9](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(13)60138-9)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A demanda por reduzir os custos com amostragem para manejo de adubação nitrogenada em tomate pela abordagem de zonas de manejo com base exclusivamente em dados de NDVI e SPAD está sujeita a erros, pois esses índices não são capazes de separar o efeito da deficiência de nitrogênio de outros agentes estressantes que possam ocorrer no campo, a exemplo do déficit hídrico.

A ineficácia do NDVI e SPAD para separar fenótipos pela disponibilidade de nitrogênio devido a estresses distintos com respostas espectrais similares no infravermelho e vermelho pode levar ao aumentando da ineficiência da adubação nitrogenada. Áreas cujo NDVI e/ou SPAD reduzido por um agente estressante diferente da deficiência de nitrogênio e agrupado inadequadamente como de baixa disponibilidade de nitrogênio induz a um cálculo de maior necessidade de nitrogênio que a real demanda.

A dependência do aumento da demanda hídrica acumulada em relação à concentração de nitrogênio na solução nutritiva impacta a eficiência hídrica do cultivo de tomate sendo necessário considerar a irrigação no dimensionamento de uma dose em que a produtividade compense a maior quantidade de água demandada.

A tendência de redução da temperatura do limbo foliar com aumento da biodisponibilidade de nitrogênio apontado pelos dados de NPQ e consumo de água (relacionados ao resfriamento da folha) mostra que temperatura é uma variável também relacionada ao acúmulo de nitrogênio no tecido vegetal. É necessário que em trabalhos futuros se verifique se dados de temperatura podem ser usados para identificar plantas com deficiência de nitrogênio em ambiente de múltiplos estressores. Isso pode contribuir para que dados de temperatura capturados por sensoriamento, além do NDVI e SPAD, sejam usados para agrupar plantas pela disponibilidade de nitrogênio e definir zonas de manejo menos sujeita a agrupar plantas deficientes em nitrogênio com plantas não deficientes.