

PAULO HENRIQUE DE OLIVEIRA VELOZO

**MODIFICAÇÕES AMBIENTAIS E SUA
INFLUÊNCIA NA ECOFISIOLOGIA, PRODUÇÃO E
QUALIDADE DE FRUTOS DE TOMATEIROS NA
AMAZÔNIA MATO-GROSSENSE**

Dissertação de Mestrado

ALTA FLORESTA-MT

2022

2 cm	15 cm	7 cm	5 cm
	PAULO H. O. VELOZO	Diss. MESTRADO	PPGBioAgro 2022



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO
FACULDADE DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E
AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
BIODIVERSIDADE E AGROECOSSISTEMAS
AMAZÔNICOS**



PAULO HENRIQUE DE OLIVEIRA VELOZO

**MODIFICAÇÕES AMBIENTAIS E SUA
INFLUÊNCIA NA ECOFISIOLOGIA, PRODUÇÃO E
QUALIDADE DE FRUTOS DE TOMATEIROS NA
AMAZÔNIA MATO-GROSSENSE**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos, para a obtenção do título de Mestre em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos.

Orientador: Prof. Dr. Santino Seabra Júnior
Coorientador: Prof. Dr. Marcio Roggia Zanuzo

ALTA FLORESTA-MT

2022

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO, CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Catálogo na publicação

Faculdade de Ciências Biológicas e Agrárias

Walter Clayton de Oliveira CRB 1/2049

VELOZO, Paulo Henrique de Oliveira.

V432m Modificações Ambientais e Sua Influência na Ecofisiologia, Produção e Qualidade de Frutos de Tomateiros na Amazônia Mato-Grossense / Paulo Henrique de Oliveira Velozo – Alta Floresta, 2022.

84 f.; 30 cm. (ilustrações) Il. color. (sim)

Trabalho de Conclusão de Curso
(Dissertação/Mestrado) – Curso de Pós-graduação Stricto Sensu (Mestrado Acadêmico) Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos, Faculdade de Ciências Biológicas e Agrárias, Câmpus de Alta Floresta, Universidade do Estado de Mato Grosso, 2022.

Orientador: Santino Seabra Júnior

Coorientador: Marcio Roggia Zanuzo

1. Cultivo Protegido. 2. Filme Agrícola. 3. Policarbonato. 4. Temperatura. 5. Tomaticultura. I. Paulo Henrique de Oliveira Velozo. II. Modificações Ambientais e Sua Influência na Ecofisiologia, Produção e Qualidade de Frutos de Tomateiros na Amazônia Mato-Grossense: .

CDU 634

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa e a minha família pelo apoio, e a todos os profissionais envolvidos em tornar a pesquisa possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa pela ajuda e paciência, a minha família pelo apoio irrestrito, ao meu orientador Prof. Dr. Santino Seabra Júnior, coorientador Prof. Dr. Marcio Roggia Zanuzo ao Dr. Flavio Fernandez Junior e a Dra. Silvia de Carvalho Campos, que contribuíram diretamente para execução deste projeto.

À UNEMAT onde cursei minha graduação pelo acolhimento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos– PPGBioAgro/UNEMAT pela oportunidade de cursar o mestrado.

A Embrapa Agrossilvipastoril pelo apoio e disponibilidade de seus laboratórios, equipamentos e colaboradores na execução do projeto.

À FAPEMAT (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Mato Grosso pelo apoio financeiro (Projeto nº0588913/2016).

A Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, campus de Sinop-MT, pelo suporte e auxílio nas análises.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE APÊNDICES.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	03
2.1 A cultura do tomateiro.....	03
2.2 Importância econômica	04
2.3 Importância nutricional	04
2.4 O tomate italiano (saladete) e seus fatores produtivos	05
2.5 Radiação Fotossintética	07
2.6 Cultivo protegido	08
2.7 Materiais de cobertura.....	09
2.8 Fotooxidação e fotoinibição no tomateiro	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Caracterização da área experimental.	13
3.2 Instalação e condução do experimento.....	13
3.2.1 Tratamentos e delineamento experimental	13
3.2.2 Descrição dos ambientes	14
3.2.3 Implantação, condução e manejo do cultivo do tomateiro.....	16
4. AVALIAÇÕES	18

4.1	Monitoramento das variáveis ambientais.....	18
4.2	Monitoramento da incidência de radiação PAR	19
4.3	Avaliação das características fisiológicas	20
4.4	Atributos de qualidade	21
4.5	Firmeza de polpa	21
4.6	Colorimetria.....	22
4.7	Sólidos solúveis totais (SST)	22
4.8	Carotenoides.....	23
4.9	Preparo do extrato	23
4.10	Determinação dos compostos fenólicos	24
4.11	Sequestro do radical ABTS	25
4.12	Determinação da capacidade antioxidante DPPH	25
4.13	Avaliação das características produtivas	26
4.14	Análise destrutiva.....	27
4.15	Análise dos dados.....	28
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Características ambientais.....	29
5.2	Características fisiológicas	36
5.3	Características físico-químicas e bioquímicas	43
5.4	Características produtivas	50
5.5	Análise destrutiva.....	59
6.	CONCLUSÕES.....	66
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

LISTA DE TABELAS

TABELAS	Página
Tabela 1. Composição das soluções nutritivas utilizadas na fertirrigação ..	17
Tabela 2. Radiação PAR captada pelo sensor acima do dossel, SensorPAR-($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), radiação PAR captada pelo AccuPAR na base das plantas, AccuPAR-($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), coeficiente de transmissão-Tau, fração de radiação do feixe-Fb.....	35
Tabela 3. Análises da radiação fotossintética PAR-($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), taxa fotossintética A-($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa de transpiração E-($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática Gs-($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 na câmara subestomática Ci-($\mu\text{mol mol}^{-1}$), temperatura da câmara CA temp-($^{\circ}\text{C}$), temperatura da folha FL temp-($^{\circ}\text{C}$), eficiência de carboxilação - A/Ci ($\mu\text{mol CO}_2/ \mu\text{mol mol}^{-1}$), taxa de eficiência no uso da água EUA-($\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$).	40
Tabela 4. Teor de sólidos solúveis – SS (Brix $^{\circ}$); textura – T (Newton cm^2); croma – (C*); ângulo hue – (h $^{\circ}$).....	45
Tabela 5. Licopeno - ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$), β -caroteno - ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$), compostos fenólicos - FT ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$), atividade antioxidante – ABTS ($\mu\text{mol g}^{-1}$) e atividade antioxidante – DPPH ($\mu\text{mol g}^{-1}$)	49
Tabela 6. Produtividade comercial – Prod ¹ . (t ha^{-1}), e produtividade total de frutos por planta - PT (kg planta^{-1}), de tomates da variedade Fascínio, produzidos em ambientes protegidos tipo capela cobertos com Filme Agrícola (FA) e Policarbonato (PL).....	52
Tabela 7. Número de frutos comerciais por planta – NFC (unidade planta ⁻¹), produção comercial – PC (kg planta^{-1}), produção de frutos grandes – G (kg planta^{-1}), produção de frutos médios - M (kg planta^{-1}), produção de frutos pequenos – P (kg planta^{-1}), massa de frutos comerciais – MFC (g fruto^{-1}), massa total de frutos não comerciais - MNC (kg planta^{-1}) e percentagem de perda de frutos – Perda (%) da cultivar Fascínio, produzida nos ambientes protegidos cobertos com filme agrícola (FA) e policarbonato (PL)..	57
Tabela 8. Massa seca de folhas em gramas por planta – Massa Folhas (g. planta^{-1}), peso seco da massa de caules em gramas por planta – Massa Caules (g. planta^{-1}), área foliar em centímetros quadrados – Área Foliar – ($\text{cm}^2 \text{planta}^{-1}$), índice de área foliar -IAF-($\text{cm}^2 \text{planta}^{-1}/\text{cm}^2 \text{solo}$), altura de plantas (cm planta^{-1}), diâmetro de caule (cm planta^{-1})...	62

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICES	Página
Figura suplementar 1. Regressão para as médias das características físico-químicas e bioquímicas Cromo (A), Licopeno (B), Fenóis (C) e DPPH (D) para os ambientes de cultivo Filme Agrícola FA e Policarbonato PL e os espaçamentos entre plantas de tomateiro determinado Fascínio. Sinop, 2022. * significativo a 5% de probabilidade.....	78
Figura suplementar 2. Regressão para as médias das características Produção comercial (t. ha ⁻¹) (A) e Produção total (kg planta ⁻¹) (B) para os ambientes de cultivo Filme Agrícola FA e Policarbonato PL e os espaçamentos entre plantas de tomateiro determinado Fascínio. Sinop, 2022. * significativo a 5% de probabilidade.....	78
Figura suplementar 3. Regressão para as médias das características Número de frutos comerciais (A) e Produção comercial (B) para os ambientes de cultivo Filme Agrícola FA e Policarbonato PL e os espaçamentos entre plantas de tomateiro determinado Fascínio. Sinop, 2022. * significativo a 5% de probabilidade.....	79
Figura suplementar 4. Regressão para as médias das características Altura de planta (A) e Área foliar (B) para os ambientes de cultivo Filme Agrícola FA e Policarbonato PL e os espaçamentos entre plantas de tomateiro determinado Fascínio. Sinop, 2022. * significativo a 5% de probabilidade.....	79

LISTA FIGURAS

FIGURAS	Página
Figura 1. Delineamento experimental indicando os tratamentos, parcelas, plantas úteis e bordaduras.	14
Figura 2. Vista externa dos ambientes protegidos Filme agrícola (A) e Policarbonato (B).....	15
Figura 3. Detalhe do cano de alimentação da placa alveolar (A); placas sendo preenchidas com água (B).....	15
Figura 4. Esquema de circulação do filme de água pelo telhado de policarbonato alveolar	16
Figura 5. Produção das mudas (A); muda a ser transplantada (B); parcela implantada nos vasos (C).....	17
Figura 6. Tutoramento mexicano visão lateral (A); tutoramento mexicano visão longitudinal (B)	18
Figura 7. Monitoramento ambiental (A); Estação em relação às plantas (B).....	19
Figura 8. Ceptômetro AccuPAR, (A); Sensor quantum independente (B) ...	20
Figura 9. Avaliação da condição fisiológica com o aparelho IRGA, (A, B) ..	21
Figura 10. Amostra preparada para teste (A); Pré-teste (B); Teste (C)	22
Figura 11. Curva padrão de ácido gálico	24
Figura 12. Curva de calibração para o padrão Trolox	25
Figura 13. Curva padrão obtida a partir da % de inibição.....	26
Figura 14. Separação folhas e caules (A); mensuração da área foliar (B, C); análise do peso constante da massa seca (D)	28
Figura 15. Médias diárias de Radiação Global (A), Radiação PAR (B), Temperatura (C) e Umidade Relativa (E), e máximas, médias e mínimas para Temperatura (D) e Umidade relativa (F), para Ambiente Externo, Filme Agrícola e Policarbonato.....	32
Figura 16. Projeção bidimensional da análise PCA dos dados fisiológicos e compostos funcionais.....	50
Figura 17. Análise de agrupamento dos espaçamentos estudados.	53
Figura 18. Projeção bidimensional da análise PCA dos dados de produção e radiação PAR	64

RESUMO

VELOZO, Paulo Henrique de Oliveira. M.Sc. Universidade do Estado de Mato Grosso, Abril de 2022. **Modificações ambientais e sua influência na ecofisiologia, produção e qualidade de frutos de tomateiros na Amazônia Mato-Grossense.** Orientador: Santino Seabra Júnior. Coorientador: Marcio Roggia Zanuzo.

Os desafios encontrados no cultivo do tomateiro, somado às mudanças climáticas em curso, resultam na urgência em desenvolver tecnologias de controle ambiental a fim de aumentar a produtividade e qualidade dos frutos em condições de intensa disponibilidade de energia solar e alta temperatura. O presente estudo teve por objetivo avaliar os efeitos de um ambiente de cultivo, coberto com placas de policarbonato alveolar (PL), pelas quais foi aplicado um fluxo contínuo de água, e comparado a um ambiente convencional de cultivo coberto com filme agrícola (FA), sob as condições climáticas tropicais da Amazônia Mato-grossense. Em ambos os ambientes foram cultivados em vasos o híbrido Fascínio nos espaçamentos 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 e 0,6 m na linha de cultivo, durante os meses de junho a outubro de 2021. No ambiente PL foi verificada a redução de 42% da transmissividade da radiação global, 26% da radiação PAR, 1°C na temperatura ambiente média, 5°C na temperatura média das folhas e menor taxa de transpiração. No ambiente FA foi verificada maior taxa fotossintética, condutância estomática, concentração de fenóis, β -caroteno, cromaticidade mais elevada e maior produção de frutos pequenos. Frutos de maior diâmetro e maior massa média foram observados no ambiente PL, assim como maior produção de licopeno, atividade antioxidante, maior área foliar e altura de plantas. Com relação à umidade relativa média, produção total, produção comercial, número de frutos comerciais, % de perda, massa seca de folhas e caules, diâmetro de caules, teor de sólidos solúveis totais, textura e ângulo h° , não ocorreram diferenças significativas entre os ambientes. Com relação à produtividade comercial, não ocorreu diferença significativa entre os ambientes. O tratamento 0,2 m apresentou maior média de 144 t ha⁻¹ seguida pelo tratamento 0,3 m com 114 t ha⁻¹. O ambiente PL pode ser recomendado para regiões com alta incidência solar.

Palavras-chave: Cultivo protegido, Filme agrícola, Policarbonato, Temperatura, Tomaticultura.

ABSTRACT

VELOZO, Paulo Henrique de Oliveira. M.Sc. University of State of Mato Grosso, April 2022. **Environmental changes and their influence on ecophysiology, production, and quality of tomato fruits in the Mato Grosso Amazon.** Adviser: Santino Seabra Júnior. Co-Advisor: Marcio Roggia Zanuzo.

The challenges encountered in tomato cultivation, in addition to ongoing climate changes, result in the urgency of developing environmental control technologies in order to increase fruit productivity and quality under conditions of intense availability of solar energy and high temperature. The present study aimed to evaluate the effects of a cultivation environment, covered with alveolar polycarbonate (PL) plates, through which a continuous flow of water was applied, and compared to a conventional cultivation environment covered with agricultural film (AF), under the tropical climatic conditions of the Mato Grosso Amazon. In both environments, the Fascínio hybrid was cultivated in pots at 0,2 spacings; 0,3; 0,4; 0,5 and 0,6 m in the cultivation line, during the months of June to October 2021. In the PL environment, a reduction of 42% in the transmissivity of global radiation, 26% of PAR radiation, 1°C in temperature average environment, 5°C in the average temperature of the leaves and lower transpiration rate. In the FA environment, higher photosynthetic rate, stomatal conductance, concentration of phenols, β -carotene, higher chromaticity and higher production of small fruits were observed. Fruits with greater diameter and greater average mass were observed in the PL environment, as well as greater production of lycopene, antioxidant activity, greater leaf area and plant height. Regarding the average relative humidity, total production, commercial production, number of commercial fruits, % of loss, dry mass of leaves and stems, stem diameter, total soluble solids content, texture and h° angle, there were no significant differences between the environments. Regarding commercial productivity, there was no significant difference between environments. The 0,2 m treatment showed the highest average of 144 t ha⁻¹ followed by the 0,3 m treatment with 114 t ha⁻¹. The PL environment can be recommended for regions with high solar incidence.

Keywords: Protected cultivation, Agricultural film, Polycarbonate, Temperature, Tomatoculture.

1. INTRODUÇÃO

A busca por uma alimentação mais saudável, e a inclusão de hortaliças frescas no consumo diário, com o intuito de prevenir e combater doenças (SILVA; ORLANDELLI, 2019), exige uma oferta constante de produtos em todas as épocas do ano. O tomate *Solanum lycopersicum* L. pode ser incluído na classe de alimentos funcionais, rico em licopeno, minerais, fibras e vitaminas que exercem um efeito positivo na saúde (NAVARRO-GONZÁLESZ; PERIAGO, 2016). No entanto o tomateiro também é muito exigente no que concerne as condições ambientais. A temperatura ideal de cultivo pode variar entre 15 - 28 C^o, a luminosidade deve ser superior a 8,4 (Mj m⁻² d⁻¹), e a planta se adapta melhor a locais com altitude superior a 700 m, além de ser muito vulnerável a estresses abióticos (ROCHA et al., 2016; RAJA et al., 2020; EMBRAPA, 2022).

O relatório da FAO de 2021 sobre as mudanças climáticas indica fortemente que as alterações previstas para as próximas décadas resultarão em problemas crescentes na produção de alimentos, onde ajustes constantes na proteção das culturas serão ainda mais cruciais para atingir bons níveis produtivos (GULLINO et al., 2021).

Desta maneira o cultivo protegido tem trazido à tomaticultura importantes avanços, como o filme agrícola. Que se torna cada vez mais importante, por ser uma técnica agrícola que permite produzir com melhor rendimento e qualidade independente das condições ambientais (CHAHIDI; MECHAQRANE, 2022). O avanço nas tecnologias de cultivo protegido e dos métodos de controle ambiental tem impulsionado a produção de tomate, principalmente em períodos desfavoráveis (COSTA et al., 2015), devido ao uso de mecanismos eficientes de controle ambiental, que promovem uma condição otimizada ao desenvolvimento da cultura (CAVALCANTI et al., 2013).

O uso de estruturas de cultivo também interfere diretamente no fluxo de radiação solar que é transmitido para as culturas. A energia solar pode ser dividida em três espectros importantes, sendo estes, a radiação ultravioleta (UV), radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e radiação infravermelha

próxima (NIR). Dentre estas, a radiação PAR é imprescindível para o crescimento e desenvolvimento das plantas, e a radiação UV tem pouca influência sobre o aquecimento do ambiente (ABDEL-GHANY et al., 2012). Já, a radiação NIR pode ser considerada a principal fonte de calor, e deve ter sua transmissão reduzida em estufas implantadas em regiões tropicais, para evitar problemas de superaquecimento (MUTWIWA et al., 2017).

Embora existam técnicas para redução da temperatura interna das estufas agrícolas, todas apresentam efeitos colaterais indesejáveis (GODINHO, 2019), além de não se mostrarem completamente efetivas diante das condições climáticas do verão Amazônico, devido à alta umidade e temperatura do ar associadas a constante nebulosidade.

Diferentes materiais de cobertura já disponíveis para uso no cultivo protegido demonstram a capacidade de filtrar e difundir a intensidade luminosa, e promover uma condição térmica favorável ao cultivo, sendo a interação entre estes materiais e as plantas, o principal objeto de estudo ao longo dos anos (LAMNATOU; CHEMISANA, 2013). Dentre os materiais usados podemos destacar o policarbonato como um dos mais promissores, uma vez que estes polímeros termoplásticos recicláveis apresentam alta transmitância de luz, resistência a impactos, além de menor condutividade térmica comparada aos filmes plásticos e ao vidro (KWON et al., 2017; SANTOS et al., 2018).

Observando as propriedades da água, tem-se verificado a sua capacidade de filtragem da radiação infravermelha do sol (HOFFMANN, 2007). O uso de um filme de água fluindo por um telhado de policarbonato pode reduzir a carga térmica no interior de uma estufa em 4 – 5 °C sem reduzir drasticamente a radiação PAR e ao mesmo tempo bloquear via absorção e reflexão parte da radiação NIR (ABDEL-GHANY et al., 2012), com a vantagem de ser facilmente ativado ou desativado pelo acionamento de uma bomba, de maneira que o sistema pode ser automatizado para funcionar de acordo com as condições de temperatura e luminosidade diárias.

Diante do cenário de incertezas provocado pelas mudanças climáticas e a dificuldade de adaptar cultivares olerícolas sensíveis a climas tropicais, este estudo teve como objetivo avaliar um ambiente de cultivo coberto com placas de policarbonato alveolar (PL), pelas quais foi aplicado um fluxo contínuo de água, em contraste com um ambiente convencional de cultivo

coberto com filme agrícola (FA), sob as condições climáticas tropicais da Amazônia Mato-grossense.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do tomateiro

O tomateiro é uma planta perene de comportamento anual, com porte arbustivo e caule flexível coberto de pelos, possuindo muitas ramificações e se desenvolvendo de forma rasteira, semi-ereta ou ereta, de acordo com as podas e condução (CANDIAN, 2015). A planta pertencente à classe Dicotiledoneae, ordem Tubiflorae, família Solanaceae, e ao gênero *Solanum*, tendo seu centro de origem na estreita faixa costeira da América do Sul, entre os Andes e o oceano Pacífico (FILGUEIRA, 2008).

Esta hortaliça está presente na culinária e hábito de consumo de diferentes etnias, sendo consumida de forma *in natura* ou industrializada, com produção mundial estimada de 186,821 milhões de toneladas em 2020, em uma área de 5,051 milhões de hectares colhidos (FAO, 2021).

A China é o maior produtor mundial de tomate, com uma produção anual de 64,865 milhões de toneladas, ocupando uma área de 1,111 milhões de hectares. O Brasil está classificado como o 10º produtor mundial, com uma produção de 4 milhões de toneladas em uma área colhida de 55,597 mil hectares, uma redução na área cultivada de 22% em 10 anos.

Com relação à produtividade por área, ocorreu um incremento no rendimento maior que 14% no mesmo período. O Brasil atualmente ocupa a 5ª colocação em produtividade, superando China, Índia, Egito, Irã e México (FAO, 2021).

Para o ano de 2021 existe a estimativa no rendimento médio de 72 t/ha, mantendo o Brasil como um dos maiores produtores de tomate no mundo. O estado do Mato Grosso participa com apenas 0,09% da produção nacional, com uma produtividade média inferior a 20 t/ha (IBGE, 2021), evidenciando a necessidade de se estabelecer diretrizes para o cultivo, a fim de suprir a demanda local (NEVES et al., 2013).

Devido à necessidade de elevar a produtividade média no Estado a níveis mais próximos do índice nacional, tem sido implantado o cultivo de variedades de crescimento determinado, como alternativa para aumentar o rendimento médio produtivo da cultura, com a introdução de variedades adaptadas a climas mais quentes (YURI et al., 2016).

2.2 Importância econômica

Produzido em mais de uma centena de países, o tomate é a segunda hortaliça mais cultivada e consumida no mundo, está presente na dieta da população sob diversas formas, de saladas frescas a produtos industrializados como molhos e extratos (MOURA; GOLYNSKI, 2018; CONAB, 2019). No Brasil, os estados de Goiás e São Paulo são os maiores produtores, superando a marca de 1 milhão de toneladas produzidas em 2021, seguidos de Minas Gerais (553 mil toneladas), Paraná (221 mil toneladas) e Bahia (208 mil toneladas) o estado de Mato Grosso produziu cerca de 3.689 kg em uma área de 183 ha⁻¹, com rendimento médio de 20,158 kg ha⁻¹ no ano de 2021 (IBGE, 2021).

As exportações de tomates frescos ou resfriados superaram a marca de 9,6 bilhões de dólares e 7 milhões de toneladas no ano de 2020. Dentre os maiores exportadores mundiais estão México, com uma participação de 24,8%, Holanda 14,5%, Espanha 10,4%, Marrocos 8,75% e Turquia 7,41% que juntos respondem por mais de 66% de todas as exportações mundiais. O Brasil participa com menos de 1% deste mercado, sendo nossos maiores parceiros a Argentina e o Paraguai, que receberam mais de 92% do volume exportado. Outra desvantagem para o produtor brasileiro é o preço recebido pelo produto, em média inferior a US\$ 0,40 por kg, bem abaixo da média mundial, e do pago aos principais exportadores, onde foram observados valores superiores a US\$1,20 por kg (UN COMTRADE DATABASE, 2020).

2.3 Importância nutricional

O tomate é considerado um dos alimentos mais ricos em antioxidantes, sendo uma hortaliça rica em minerais, (β caroteno) precursor da

vitamina A, vitamina B1 (tiamina), B2 (riboflavina), B5 (niacina) e ácido ascórbico, além de possuir baixo valor calórico seu consumo fornece fibras, proteínas, carboidratos, (PEIXOTO et al., 2017).

A acidez presente no fruto é devido à presença do ácido cítrico, onde o pH pode variar de 4,0 a 4,5. O ambiente de cultivo tem grande influência na acidez, onde altas temperaturas promovem sua redução, enquanto temperaturas baixas e o déficit hídrico promovem o aumento da mesma (CANDIAN, 2015).

Dentre os carotenoides presentes no tomate podemos destacar o licopeno, composto por onze ligações conjugadas e duas ligações duplas não conjugadas. O licopeno é considerado o carotenóide que possui a maior capacidade sequestrante de radicais livres, possivelmente devido às duas ligações duplas não conjugadas, que lhe permite um maior poder reativo (BRAMLEY, 2000).

O licopeno é o principal responsável pela cor do tomate, que representa 83% dos pigmentos dos frutos, sendo sintetizado conforme o fruto vai amadurecendo (ENRÍQUEZ, 2013). Quando a clorofila se decompõe e os carotenoides se acumulam (PÉK et al., 2011), ele pode ser considerado uma substância fotoquímica e antioxidante com propriedades anticancerígenas, e 85% do licopeno presente na dieta humana vêm do tomate e de seus derivados, que são melhor absorvidos pelo corpo quando proveniente de alimentos processados pelo calor, sugerindo que o licopeno está ligado a partes insolúveis e fibrosas do tomate (BRAMLEY, 2000; DUMAS et al., 2003; SHAMI; MOREIRA, 2004; ABREU; BARCELOS, 2012).

No tomate, o ácido ascórbico + ácido dehidroascórbico formam a vitamina C, que também pode ter sua concentração muito afetada pela época de plantio, oferta luminosa, cultivar e adubação. Atualmente, devido a sua comprovada importância para a saúde e manutenção de uma alimentação saudável, sendo este um parâmetro usado para determinar a qualidade de um alimento (CANDIAN, 2015).

2.4 O tomate italiano (saladete) e seus fatores produtivos

No Brasil existem dois segmentos principais na tomaticultura, os tomates para processamento industrial, também chamado de tomates rasteiros, pelo fato de não serem tutorados, onde as variedades apresentam hábito de crescimento determinado, e outro importante segmento denominado, tomate para mesa, que necessita de tutoramento devido às variedades apresentarem o hábito de crescimento indeterminado ou semi-determinado, de maneira que a planta não suportaria a produção sem uma estrutura de apoio (EMBRAPA, 2019).

O tomateiro é uma planta exigente com relação ao ambiente de cultivo, embora a ótima germinação das sementes e o desenvolvimento das plantas ocorram na faixa de temperatura situada entre 15 – 25°C. A cultura em si suporta uma ampla variação térmica, 10 – 34°C, no entanto quando submetido a temperaturas muito baixas ou muito altas, as plantas tendem a reduzir a síntese de licopeno, pigmento que confere a coloração vermelha do fruto. Dessa forma, a faixa ótima de temperatura para o cultivo do tomateiro é de 21 – 28°C durante o dia e 15 – 20°C durante a noite, de maneira que a variação térmica na ordem de 6 – 8°C entre o dia e noite são desejáveis para o pleno desenvolvimento vegetal e dos frutos, com os maiores danos a produção ocorrendo em ambientes onde a temperatura supera os 35°C (EMBRAPA, 2019; EMBRAPA, 2022).

Nas regiões de clima tropical, durante quase todo o ano, a temperatura e a umidade relativa do ar, excedem os níveis ótimos para o desenvolvimento do tomateiro 25°C e 60% respectivamente. Além de chuvas torrenciais, pragas de insetos e doenças, de maneira que as condições ambientais são uma das principais restrições para a produção de hortaliças nos trópicos (MAX et al., 2009).

O grupo de tomate Saladete, também designado como tomate Italiano, apresenta dupla aptidão, sendo recomendado para o consumo “*in natura*” e processamento, seus frutos são alongados 7 a 10 cm, com diâmetro reduzido 3 a 5 cm, biloculares, com polpa espessa e coloração vermelha intensa, tem potencial para produzir frutos graúdos e valorizados. O tomate Saladete, não exige tutoramentos e desbrotas, tornando seu cultivo mais fácil e menos oneroso pela redução de mão de obra, além de apresentarem ciclo mais curto e maior rusticidade (MACHADO et al., 2007).

2.5 Radiação Fotossintética

A luz apresenta uma influência determinante no crescimento, desenvolvimento e produção das culturas, executando papel essencial na realização da fotossíntese e fixação de CO₂ (CALIMAN et al., 2005; OTONI et al., 2012).

Para a produção mínima de fotoassimilados, necessários a manutenção da maioria das hortaliças comerciais, entre elas o tomateiro, é necessária a incidência de radiação global na ordem de 8,4 (Mj m⁻² d⁻¹), estabelecido como limite trófico para o desenvolvimento normal das culturas (ANDRIOLO, 2000; BECKMANN et al., 2006; EMBRAPA, 2022).

A incidência da radiação global é influenciada pela posição do sol e dinâmica atmosférica, envolvendo fatores como pressão do ar, umidade e nebulosidade, ou seja, é dependente do período do ano, e dos fatores climáticos (TERAMOTO; ESCOBEDO, 2012). Para a região norte do estado do Mato Grosso, que apresenta a estação chuvosa definida entre os meses de outubro a abril, e seca entre maio a setembro, a radiação global média diária varia de 16,34 a 19,22 Mj m⁻² d⁻¹ para o período seco e chuvoso respectivamente (SOUZA et al., 2016).

A radiação global que atinge a terra pode ser dividida de acordo com o comprimento de onda, mensurado em nanômetros (nm): a radiação ultravioleta (UV) atinge a faixa de (200 a 400 nm) e corresponde somente por 5% da radiação global; a radiação fotossintética ativa ou (PAR) sigla em inglês para (Photosynthetically Active Radiation) se encontra na faixa de (400 a 700 nm) e corresponde por cerca de 45% da radiação global; já a radiação infravermelha, ou (NIR) sigla em inglês para (Near Infrared) é a principal responsável pelo aquecimento do ambiente com comprimento de onda variando de (700 nm a 2500 nm) e corresponde a 50% de toda a radiação global (ABDEL-GHANY et al., 2012; KEMPKE et al., 2008).

Aproximadamente 80% da NIR incidente não pode ser usada para fotossíntese, além disso, 50% desta energia é prontamente refletida pelas culturas e absorvida pelos elementos de construção das estruturas da casa de vegetação, o que causa o aquecimento do ambiente (KEMPKE et al., 2008).

Desta forma, a radiação infravermelha é a maior responsável pelo aquecimento do ambiente de cultivo (STANGHELLINI et al., 2011).

Caso seja possível filtrar somente a radiação (NIR) pode-se reduzir a carga térmica e ainda fornecer toda a radiação (PAR) necessária ao desenvolvimento das plantas, otimizando a condição térmica para fotossíntese, transpiração e conseqüentemente menor uso de água no cultivo (STANGHELLINI et al., 2011).

2.6 Cultivo protegido

Em locais onde o clima apresenta condições irregulares ou desfavoráveis, a estratégia mais adequada para manter a constância na produção consiste no cultivo sob ambiente protegido (SUBIM et al., 2020). A presença de uma cobertura causa uma mudança nas condições climáticas internas do ambiente. Essas mudanças podem provocar impacto no crescimento, produção e qualidade da cultura cultivada, algumas delas prejudiciais às plantas, forçando o produtor a desempenhar um papel mais ativo com relação ao monitoramento e intervenções no ambiente protegido (BAKKER, 1995).

Nesse ambiente de cultivo controlado as plantas são colocadas no limite do seu potencial produtivo, de maneira que o manejo inadequado do mesmo pode provocar a redução da produtividade, ao invés otimizar o potencial genético garantido pelas cultivares (VIDA et al., 2004). Um exemplo a ser citado são as regiões tropicais, onde a produção em estufas é frequentemente prejudicada pelo excesso de radiação solar, que resulta em altas temperaturas e níveis de umidade relativa desfavoráveis ao desenvolvimento das hortaliças comerciais (MUTWIWA et al., 2017).

Logo, a eficiência de sistemas de produção em ambientes protegidos está ligada a fatores externos como temperatura e umidade, além dos fatores internos como material de cobertura, telas de sombreamento, e mecanismos de controle climático das casas de vegetação (VOLTAN et al., 2011). Todavia, a utilização de pigmentos e outros compostos agregados aos plásticos de cobertura são importantes para reduzir o efeito da radiação excessiva sobre os cultivos. No entanto, a redução da temperatura interna dos

ambientes ainda não foi alcançada com o uso destes materiais (MUTWIWA et al., 2017).

Portanto, o uso de tecnologias que gerenciem a entrada da energia luminosa associada ao controle térmico é de grande valia para o desenvolvimento da agricultura tropical, não somente no aspecto de produtividade como também no uso eficiente e sustentável dos recursos para a produção de alimentos, de maneira que o controle ativo da Radiação Infravermelha próxima ou (NIR), abre possibilidades de produzir alimentos mais saudáveis e ecologicamente amigáveis.

2.7 Materiais de cobertura

A descoberta do polietileno na década de 1930 e seu progressivo uso como insumo na agricultura a partir de 1950 revolucionou a produção de hortaliças no mundo todo, uma vez que o extensivo uso deste polímero na cobertura de estruturas destinadas a produção de hortaliças, permitiu a oferta destes produtos em todas as épocas do ano, devido a possibilidade de superar as adversidades climáticas e maximizar a produtividade das plantas (PURQUEIRO; TIVELLI, 2006).

O polietileno utilizado em estruturas de casas de vegetação tornou possível o cultivo de plantas com elevado valor comercial em regiões onde o clima é instável. Estes materiais utilizados na cobertura são fundamentais no auxílio do controle das variações da temperatura durante o inverno e da incidência dos raios ultravioleta (SUBIM et al., 2020). No entanto, este polímero apresenta limitações no que diz respeito ao controle de temperatura durante o verão. Embora já existam filmes foto-seletivos com tratamentos anti (UV-A) e (UV-B), anti-poeira, anti-embaçante, térmico, difusor de luz e soluções para redução da incidência solar, como o branqueamento pela aplicação de óxido de cálcio hidratado, ou mesmo tintas de sombreamento com a finalidade de reduzir a (NIR), invariavelmente estes tratamentos trazem como consequência reduzir significativamente a intensidade da radiação global e fotossinteticamente ativa (PAR). A redução da radiação solar no interior dos ambientes protegidos em relação ao ambiente externo, devido à reflexão e a

absorção da luz pelo material de cobertura podem ser superiores a 35% (BECKMANN et al., 2006). Este comportamento reflete negativamente no rendimento da cultura explorada (ANDRADE et al., 2011; MUTWIWA et al., 2017). Também podem ser usadas telas externas para o sombreamento das estruturas, promovendo uma redução na carga térmica em até 20% no interior das estruturas, no entanto, esta estratégia promove a redução da radiação PAR em até 55% e global em 71% (STANGHELLINI et al., 2011; ABDELGHANY et al., 2015; PAULA et al., 2017).

O estudo de diversos materiais para cultivo protegido, como filmes plásticos coloridos contendo pigmentos absorventes e de interferência, foram conclusivos em determinar que estes materiais podem ser usados para causar um efeito de resfriamento em casas de vegetação (HOFFMANN; WAAIJENBERG, 2002). No entanto, cada condição de clima e ângulo de incidência da radiação solar necessita de um determinado material específico, e ainda grande parte dos materiais verificados atua reduzindo a radiação (PAR) assim como a (NIR), o que não é vantajoso para o desenvolvimento das plantas. Ainda assim, os autores esperam que em um futuro próximo novos materiais com perfis “inteligentes” possam se adaptar às condições locais e reduzir a temperatura interna da estufa durante períodos de alta irradiação.

Para solucionar tais problemas têm-se utilizado novos materiais e polímeros para cobertura de ambientes protegidos, como o policarbonato. Este material combina um alto nível de resistência mecânica, baixo peso, transmitância maior que 70% além de proteção contra a degradação provocada por raios UV (SANTOS et al., 2018).

Outra vantagem do policarbonato é sua capacidade de converter a radiação solar direta em radiação difusa. A radiação difusa, por ser multi-direcional, tem maior capacidade de penetração na vegetação, promovendo uma maior eficiência fotossintética por atingir diferentes estratos do dossel da cultura, provocando menos sombras nas porções inferiores do cultivo (HOLCMAN, 2009).

As placas de policarbonato apresentam em sua estrutura alveolar espaços que garantem uma menor transmissão térmica da energia externa recebida. Este espaço pode ser preenchido com um filme de água, que quando

circulado por toda a cobertura do ambiente, desempenha a função de filtro da radiação infravermelha, como descrito por Hoffmann, (2007).

Desta maneira, o policarbonato na cobertura dos ambientes de produção gera benefícios, como o bloqueio da maior parte da radiação UV indesejável, além de gerar maiores níveis de radiação difusa e ajudar na redução da carga térmica no interior das estufas (KWON et al., 2017; SUBIN et al., 2020).

2.8 Fotooxidação e fotoinibição no tomateiro

A fonte primária de energia na biosfera é a luz, que é convertida em energia química via fotossíntese (LARCHER, 2000). As folhas são os principais órgãos fotossintetizantes, sendo sua interação com a luz de extrema importância para a eficiência do processo, neste aspecto, induzir o maior contato possível das folhas com a luz solar promoveria um maior desempenho fotossintético (NASCIMENTO, 2015).

No entanto, a eficiência de conversão decresce gradualmente com o aumento do fluxo de radiação solar acima do ótimo, de maneira que a superexposição da planta à luz também pode provocar sérios danos aos tecidos (RADIN et al., 2003), de maneira que o excesso de luz pode afetar o crescimento vegetal e levar a redução da produtividade (ARAÚJO; DEMINICIS, 2009).

A fotooxidação é um processo irreversível e ocorre quando os pigmentos receptores de luz ficam muito tempo excitados (STREIT et al., 2005), quando a energia armazenada na clorofila não é dissipada para a síntese de carboidratos e o elétron absorvido acaba sendo transferido para o O_2 formando um superóxido O_2^- , que pode destruir os pigmentos (AHMAD et al., 2008).

O oxigênio molecular (O_2) embora necessário para o desempenho das funções celulares, inevitavelmente leva a formação de variações reativas de O_2 ou (ROS) sigla em inglês para (*reactive oxygen species*) (MAREK, 2018). Esta transformação ocorre em eventos metabólicos como a respiração aeróbica, fotossíntese e fotorrespiração, que ocorrem principalmente nas mitocôndrias e cloroplastos (BARBOSA et al., 2014).

O ROS pode atravessar membranas celulares e migrar a diferentes compartimentos da célula, causando diversas lesões a uma série de moléculas, sendo capaz de romper a membrana do núcleo e provocar danos ao DNA (MAREK, 2018).

A fotoinibição ocorre quando o excesso de excitação promovido pela luz nas moléculas pigmentadas chega ao centro de reação do fotossistema II, levando a sua inativação. Em casos prolongados de excitação podem ocorrer danos ao sistema, devido à perda da proteína envolvida na transferência de elétrons, no entanto, diferentemente da fotooxidação, esse dano pode ser restaurado (TAIZ e ZEIGER, 2017).

Altas temperaturas também afetam negativamente o crescimento, a sobrevivência e o rendimento das plantas, sendo a fotossíntese um dos processos biológicos mais sensíveis ao estresse térmico. A assimilação de carbono, que depende da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), é um dos principais sítios sensíveis ao estresse térmico na fotossíntese (WANG et al., 2015). As espécies reativas de oxigênio ROS podem clivar diretamente ou modificar a Rubisco, tornando-a mais suscetível à proteólise (FELLER et al., 2008).

Desta maneira, em regiões com grande oferta de radiação solar, a superexposição à luz pode ser um obstáculo à total expressão produtiva de determinadas culturas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O ensaio foi conduzido na área experimental da Embrapa Agrossilvipastoril que fica localizada no município de Sinop - MT, com latitude 11°52'12.62" S e longitude 55°35'54.61" N. Possui altitude média de 370 metros do nível do mar. O tipo climático é classificado como Am – clima tropical de monções (KÖPPEN; GEIGER, 1928), com alternância entre a estação das chuvas e a estação seca, com chuvas concentradas no verão (outubro a abril). A precipitação média anual é de 1900 mm e a temperatura média é de 26°C (ALVARES et al., 2013).

O município de Sinop está localizado no centro norte do estado de Mato Grosso, região da Amazônia legal, às margens da BR 163, e possui área total de 3.941,958 km² (IBGE, 2021). Essa cidade é resultado da política de ocupação da Amazônia legal brasileira, desenvolvida pelo governo federal na década de 1970.

3.2 Instalação e condução do experimento

3.2.1 Tratamentos e delineamento experimental

No presente estudo foram avaliados dois ambientes de cultivo, estufas cobertas com filme agrícola (FA) e policarbonato (PL) e cinco espaçamentos entre plantas (0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 m) dispostos em linhas simples, espaçados 1,25 m entre linhas. O estudo seguiu um delineamento experimental em blocos casualizados em arranjo fatorial (2x5) com 5 repetições com oito plantas cada, totalizando 400 plantas (Figura 1).

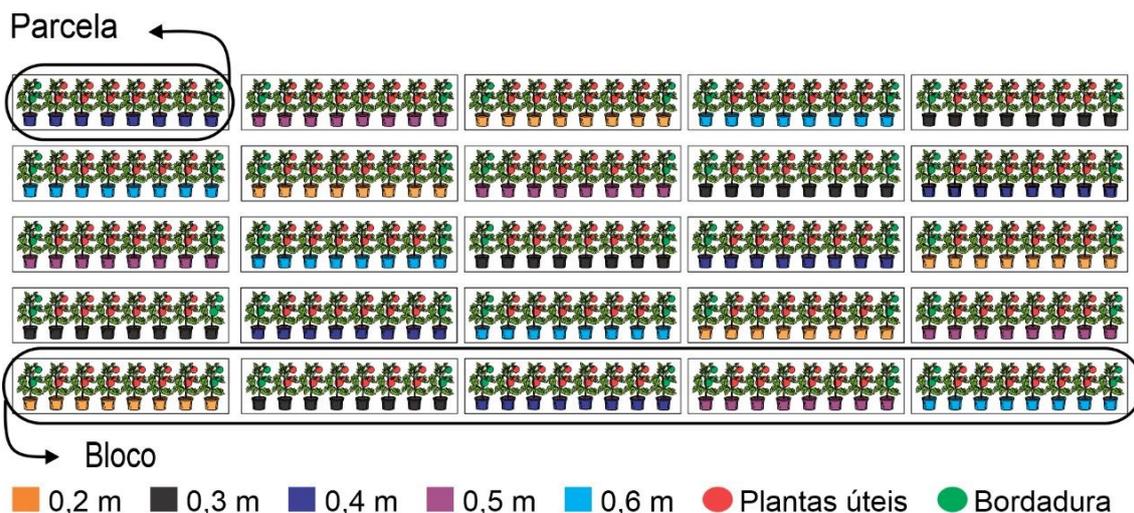


Figura 1. Delineamento experimental indicando os tratamentos, parcelas, plantas úteis e bordaduras.

Os espaçamentos (0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 m) corresponderam, respectivamente, às populações de 40,000; 26,666; 20,000; 16,000 e 13,332 plantas ha^{-1} .

3.2.2 Descrição dos ambientes

Os ambientes estudados possuíam telhados tipo duas águas (Figura 2), com dimensões de 6,40 m x 20,00 m, com pé direito de 3,5 m e altura central de 4,8 m, sendo o fechamento lateral realizado com tela termo refletora Aluminet® com 30% de sombreamento.

O ambiente filme agrícola (FA) foi coberto com filme agrícola de polietileno transparente de 150 μm . O ambiente policarbonato (PL) foi coberto com placas transparentes de policarbonato alveolar duplo de 10 mm. Tanto o filme agrícola como o policarbonato possuía tratamento UV-A e UV-B para impedir sua degradação pela radiação solar.

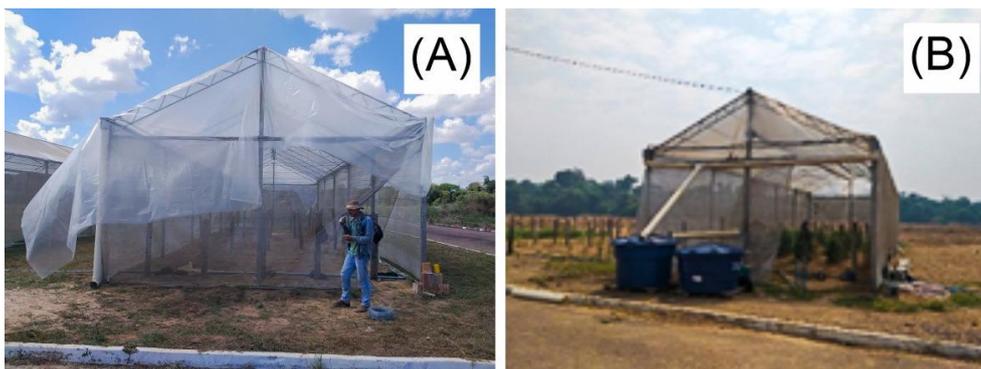


Figura 2. Vista externa dos ambientes protegidos filme agrícola (A); Policarbonato (B).

Ainda no ambiente PL (Figura 3) era aplicado um fluxo contínuo de água que circulava pelo interior das placas de policarbonato alveolar e retornava as caixas d'água situadas à frente da estrutura utilizada como reservatório (Figura 4). O sistema era acionado automaticamente por um *timer*, programado para ligar uma bomba a cada quinze minutos, que dessa maneira, reiniciava continuamente o ciclo da água pelas placas desde o amanhecer ao pôr do sol.



Figura 3. Detalhe do cano de alimentação da placa alveolar (A); placas sendo preenchidas com água (B).

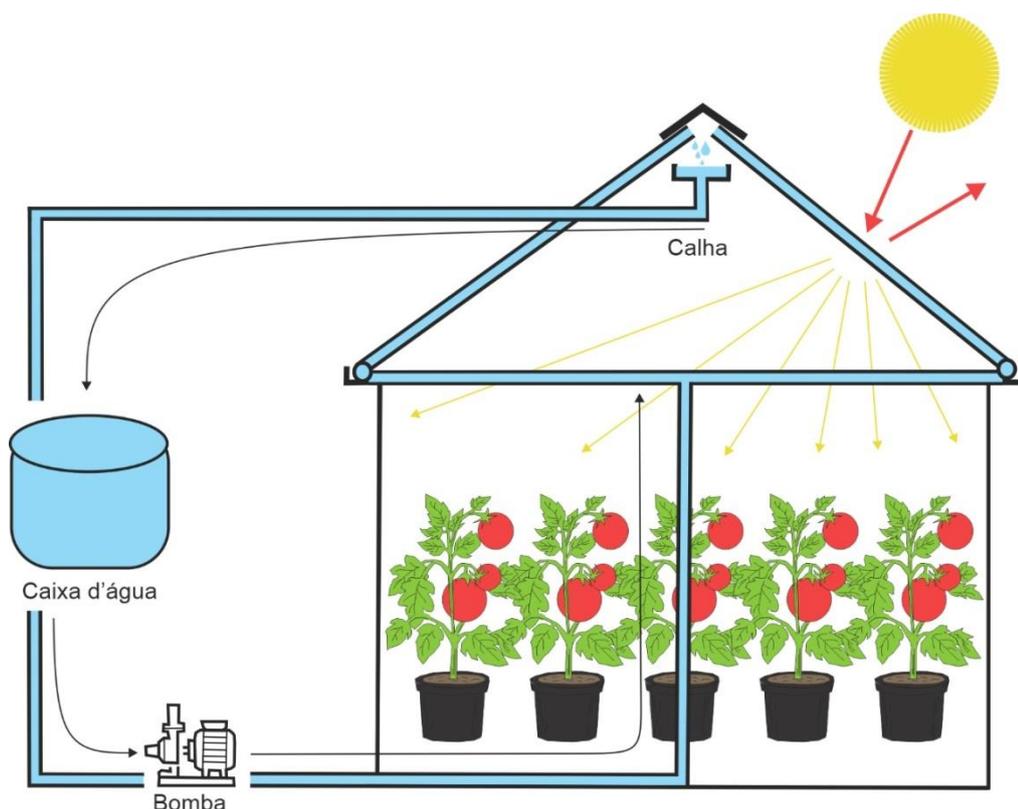


Figura 4. Esquema de circulação do filme de água pelo telhado de polícarbonato alveolar.

3.2.3 Implantação, condução e manejo do cultivo do tomateiro

Foi utilizado o híbrido de tomate (*Lycopersicon esculentum*) cv. Fascínio. Esta cultivar possui hábito de crescimento determinado e fruto do tipo saladete, muito aceito no mercado de consumo fresco. As mudas foram produzidas em casa de vegetação com cobertura de filme agrícola de 150 μm com tratamento anti UV-A e UV-B.

Foram utilizadas bandejas de poliestireno (Figura 5 A) expandido com 128 células em formato de pirâmide invertida contendo substrato comercial Carolina[®]. A semeadura foi realizada no dia 20 de maio de 2021, e o transplante (Figura 5 B) das mudas foi realizado 30 dias após a germinação (DAG). No dia 22 de junho de 2021, as mudas foram transplantadas para vasos de 5 litros da Nutriplan[®] (Figura 5 C) contendo uma mistura de 50% de substrato comercial Carolina[®] e 50% de casca de arroz carbonizada.



Figura 5. Produção das mudas (A); Muda a ser transplantada (B); Parcela implantada nos vasos (C).

Os vasos foram instalados sobre tijolos dentro de calhas de lona em declive, de maneira a captar o excedente de solução nutritiva e direcioná-la para fora do ambiente protegido.

A irrigação e adubação foram realizadas através da aplicação de solução nutritiva (Tabela 1) com auxílio de tubos de gotejamento autocompensante, instaladas logo acima dos vasos. Inicialmente foi aplicado 1 L de solução por vaso, ampliando gradativamente o volume até 2,7 L por vaso no estágio de plena frutificação. Foi utilizada a solução nutritiva recomendada por Furlani et al., (2004). O controle de pragas e doenças foi realizado de acordo com as recomendações convencionais para a cultura.

Tabela 1. Composição das soluções nutritivas utilizadas na fertirrigação.

SOLUÇÃO A	g 1000 L⁻¹
Nitrato de Cálcio	750
Conmicros® Standard	25
SOLUÇÃO B1	
Nitrato de Potássio	450
MAP	200
Sulfato de Magnésio	400
SOLUÇÃO B2	
Nitrato de Potássio	450
MAP	100
Sulfato de Magnésio	400
Sulfato de Potássio	150
MKP	150

Foi usada a solução A + B1 até o aparecimento dos primeiros frutos, e a partir de então foi usada à solução A + B2.

O tutoramento foi realizado pelo método denominado “mexicano” (Figura 6). Neste método as plantas são conduzidas verticalmente entre fitilhos dispostos horizontalmente nos dois lados das linhas e elevados à medida que as hastes crescem. As colheitas foram realizadas semanalmente durante um período compreendido entre 24 de agosto a 22 outubro de 2021.



Figura 6. Tutoramento mexicano visão lateral (A); Tutoramento mexicano visão longitudinal (B).

4. AVALIAÇÕES

4.1 Monitoramento das variáveis ambientais

As condições ambientais de cada estrutura de cultivo foram monitoradas de agosto a novembro de 2021 por meio de estações meteorológicas ONSET[®] HOBO[®] U30 Station (Figura 7 A, B). As leituras foram realizadas a cada 15 minutos para obtenção dos dados de radiação fotossinteticamente ativa, radiação global, temperatura e umidade relativa. Os dados foram compilados em médias diárias, e posteriormente para fins de comparação, os dados de Radiação Global e Radiação fotossinteticamente ativa foram convertidos para MJ m⁻² dia⁻¹. De maneira que a radiação global foi convertida de W m⁻² para MJ m⁻² dia⁻¹ ao multiplicar a média diária pelo fator de conversão de 0,0864 (PINTO et al., 2010) e a RFA utilizando-se a fórmula de conversão conforme THIMIYAN e HEINS, (1983) usando a média diária segundo as equações 1 e 2:

$$Rg \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1} = (\sum Rg \text{ Wm}^2) * 0,0864 \quad (1)$$

$$RFA MJ m^{-2} dia^{-1} = \frac{\{[(\sum RFA \mu mol s^{-1} m^{-2}) * t(s)]/4,57\}}{10^6}$$

Onde: $\sum Rg$ é a somatória das médias da radiação global em Watts.

$\sum RFA$ é a somatória das médias da radiação fotossinteticamente ativa em micromol.

t (s) é o tempo em segundos da coleta dos dados.

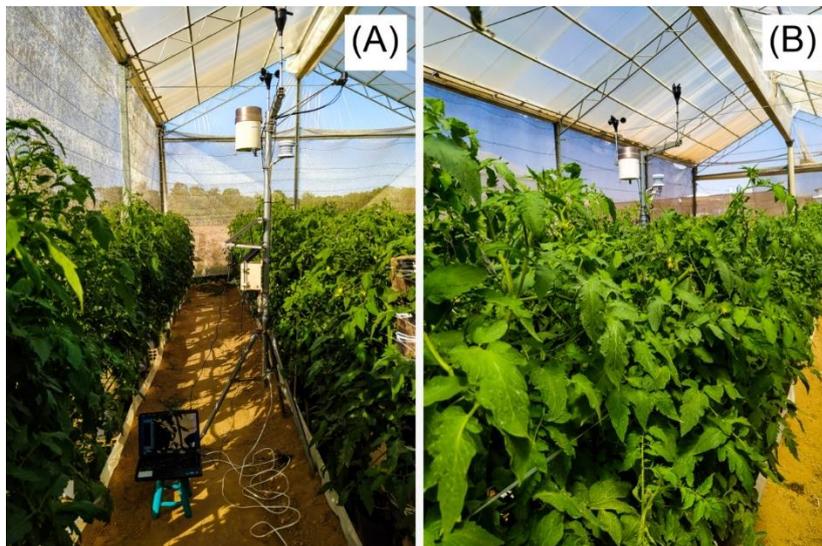


Figura 7. Monitoramento ambiental (A); Estação em relação às plantas (B).

4.2 Monitoramento da incidência de radiação PAR

Para avaliar a incidência da radiação PAR acima do dossel, SensorPAR-($\mu mol s^{-1} m^{-2}$), radiação PAR na base das plantas, AccuPAR-($\mu mol s^{-1} m^{-2}$), coeficiente de transmissão-Tau, fração de radiação do feixe-Fb, no interior das casas de vegetação e no interior do dossel foram realizadas medidas de densidade de fluxo de fótons fotossintéticos, com um ceptômetro (AccuPAR LP-80, Decagon Devices, Inc.), composto por um sensor quantum independente e uma sonda de 86,5 x 2 cm, ao longo da qual estão dispostos 80 sensores quantum (amplitude de 0 -2500 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ e resolução de 1 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$). A sonda quantum foi posicionada na base da segunda planta de cada espaçamento, logo acima dos vasos. O sensor foi posicionado entre as linhas de plantio sobre um tripé para ficar no mesmo nível do dossel das plantas

(Figura 8 A, B). Foram realizadas seis coletas durante o desenvolvimento da cultura, entre as 08:00 e as 14:00 horas, quando a incidência de radiação externa ultrapassava os 1000 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).



Figura 8. Ceptômetro AccuPAR (A); Sensor quantum independente (B).

4.3 Avaliação das características fisiológicas

Para a avaliação da condição fisiológica das plantas foi utilizado o equipamento IRGA (infrared Gas Analyser), da marca ADC[®] (BioScientific Ltd.) modelo LCpro-SD (Figura 9), para mensurações dos parâmetros de Radiação PAR – IRGA ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), taxa fotossintética – A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa de transpiração – E ($\text{nmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática - Gs ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 na câmara subestomática – Ci ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), temperatura da câmara – CT ($^{\circ}\text{C}$), temperatura da folha – FT ($^{\circ}\text{C}$), eficiência de carboxilação - A/Ci ($\mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol mol}^{-1}$) e taxa de eficiência no uso da água – EUA, ($\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$). Foram realizadas seis coletas durante o desenvolvimento da cultura, entre as 08:00 e as 14:00 horas, quando a incidência de radiação externa ultrapassava os 1000 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).



Figura 9. Avaliação da condição fisiológica com o aparelho IRGA (A, B).

4.4 Atributos de qualidade de frutos

As avaliações dos atributos físico-químicos e bioquímicos foram realizadas nos frutos quando as plantas atingiram o período de plena colheita, no dia 20 de setembro de 2021 durante a 5ª colheita, sendo separados por parcela cinco frutos maduros (estágio 6 de maturação) de tamanho e peso padronizados, acondicionados em embalagens identificadas, e imediatamente enviados ao laboratório, onde foram higienizados por imersão em água clorada e água destilada.

Na sequência foram realizadas as análises de textura – T (N) e a leitura das coordenadas de cor para posterior cálculo dos índices de croma – C^* e ângulo *hue* – h° . As amostras foram então trituradas em um multiprocessador Philco® e separadas em triplicatas. Para a avaliação do teor de sólidos solúveis – SS (Brix°) foram usadas amostra frescas, já para a realização das análises de Licopeno - L ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$), β -caroteno – βC ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$), Fenóis totais – FT ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) e atividade antioxidante pelos métodos – DPPH ($\mu\text{mol g}^{-1}$) e - ABTS ($\mu\text{mol g}^{-1}$) foram usadas amostras congeladas.

4.5 Firmeza de polpa

A firmeza de polpa foi analisada por meio da pulsão nos frutos em lados equidistantes na região equatorial dos frutos com o auxílio de uma ponteira de 6 mm até a profundidade de 20 mm utilizando o analisador de textura da marca Stable Micro System[®] modelo TA XT Plus (Figura 10), configurado para velocidade de pré-teste 10 mm/s; velocidade de teste 1,5 mm/s e velocidade de pós-teste de 10 mm/s. Para realizar este teste foi retirada a cutícula dos frutos.

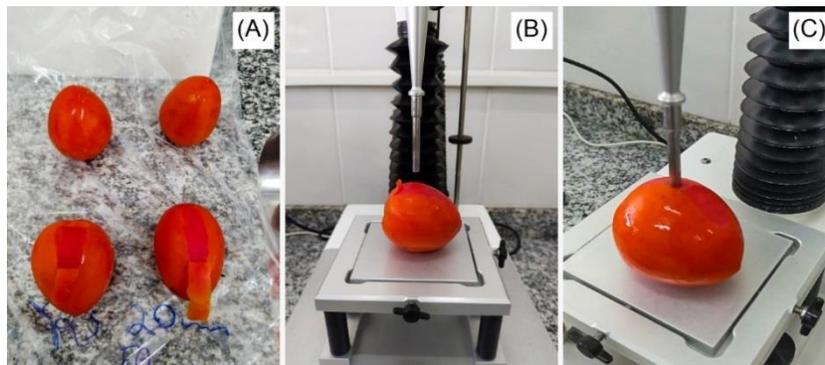


Figura 10. Amostra preparada para teste (A); Pré-teste (B); Teste (C).

4.6 Colorimetria

Para a mensuração das coordenadas de cor foi utilizado o colorímetro da marca HUNTER LAB[®], modelo Color Quest XE, sendo as leituras realizadas no espaço de cor L*a*b*. Em posse destes dados foram realizados os cálculos de cromaticidade - (C*) e o ângulo de tonalidade (h*) de acordo com as equações 3 e 4:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3)$$

E o ângulo Hue - (h*) de acordo com a equação 2:

$$h^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) * \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad (4)$$

Onde: a* e b* = são as coordenadas de cor fornecidas pelo aparelho.

4.7 Sólidos solúveis totais (SST)

O teor de sólidos solúveis totais, expresso em °Brix, foi medido com a utilização de um refratômetro da marca ATAGO® modelo PAL- BX/RI.

4.8 Carotenóides

A determinação do Licopeno e β -caroteno foi realizada segundo o procedimentos descritos por (NAGATA; YAMASHITA 1992). Uma alíquota (1 g) da polpa descongelada foi misturada com 10 ml da solução de acetona/hexano (4:6), agitada por 16 horas a 4°C. A solução sobrenadante das amostras foi lida em absorbância no espectrofotômetro THERMO SCIENTIFIC® modelo Evolution 160 UV-VIS nos comprimentos de onda de 663, 645, 505 e 453 nm. Os teores de carotenoides (mg 100 g⁻¹ m. f.) foram obtidos pelas fórmulas 5 e 6:

$$C_{lyc} = \frac{-0,0458 \cdot A_{663} + 0,0204 \cdot A_{645} + 0,372 \cdot A_{505} - 0,0806 \cdot A_{453}}{P} \quad (5)$$

$$C_{car} = \frac{0,216 \cdot A_{663} - 1,22 \cdot A_{645} - 0,304 \cdot A_{505} + 0,452 \cdot A_{453}}{P} \quad (6)$$

Onde: A_{663} ; A_{645} ; A_{505} e A_{453} = são os comprimentos de onda observados no espectrofotômetro;

P = massa total da amostra usada para extração.

4.9 Preparo do extrato

Para extração sequencial dos compostos, 2 g da amostra descongelada foram depositadas em tubos falcon de 15 ml, acrescentou-se 10 ml de metanol a 50% que foi agitado no vórtex por 1 minuto e acondicionado em abrigo da luz por 60 minutos em temperatura ambiente. Na sequência, a mistura foi centrifugada por 15 minutos e o sobrenadante reservado em balões volumétricos de 25 ml protegidos da luz. Ao resíduo no tubo falcon foram acrescentados 10 ml de acetona a 70%, agitado no vórtex por 1 minuto, e mantido no escuro por mais 1 hora, centrifugado por 15 minutos e separado o

sobrenadante em um balão volumétrico de 25 ml juntamente com o outro extrato, que foi completado com água destilada.

4.10 Determinação dos compostos fenólicos

A análise foi realizada de acordo com o método de Folin-Ciocalteu (PIRES, 2017). Em balões volumétricos de 5 ml, contendo 2/3 ml de água destilada, foram adicionadas alíquotas de 100 µl do extrato; 500 µl do reagente Folin-Ciocalteu; 500 µl de carbonato de sódio a 25% e completado o volume com água destilada. Após 1 hora de repouso foram realizadas as leituras das absorbâncias em espectrofotômetro THERMO SCIENTIFIC® modelo Evolution 160 UV-VIS a 760 nm.

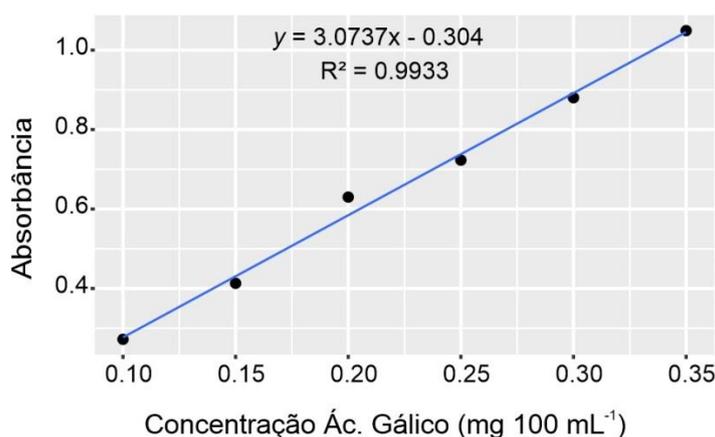


Figura 11. Curva padrão de ácido gálico.

O cálculo do teor de fenólicos totais, expresso em mg. 100 g⁻¹ de amostra foram determinados pela equação 7:

$$Fenois (mg\ 100\ g^{-1}) = \frac{\left[\left(\frac{A_{760} + b}{a_x} \right) * 5 * Vol_1 \right]}{P * Vol_2} \quad (7)$$

Onde: A_{760} comprimento de onda observado no espectrofotômetro;

Vol_1 = volume total da amostra mais extratores usados;

Vol_2 = volume total do extrato pronto usado na reação;

P = peso da amostra usada para extração;

a_x e b = valores da equação a partir da curva padrão.

4.11 Sequestro do radical ABTS

O sequestro do radical 2,29-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonicacid) (ABTS) foi determinado segundo (RE et al., 1999). Uma alíquota do filtrado (30 µl) foi misturada com 3 ml da solução etanólica radical ABTS 70 µM. A mistura foi deixada em repouso por 6 min e a leitura da absorbância feita no espectrofotômetro THERMO SCIENTIFIC® modelo Evolution 160 UV-VIS a 734 nm. Uma curva de Trolox foi utilizada para calibrar o ensaio. Os resultados foram expressos em mg de Trolox equivalente por g de fruto (mg TE g⁻¹).

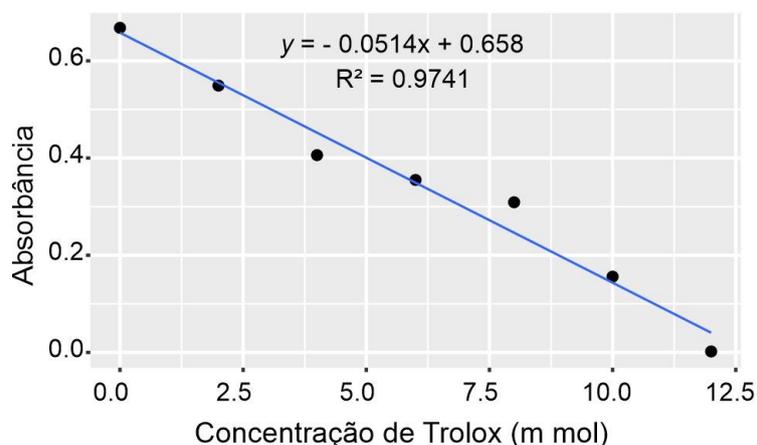


Figura 12. Curva de calibração para o padrão Trolox.

O sequestro do radical ABTS foi obtido segundo a fórmula 8:

$$\text{Sequestro ABTS (\%)} = \frac{Abs_i - Abs_a}{Abs_i} * 100 \quad (8)$$

Onde : Abs_i = absorbância inicial da solução;

ABTS 70 µM; Abs_a = absorbância da amostra após 6 min de incubação com extrato;

4.12 Determinação da capacidade antioxidante DPPH

O sequestro do radical 2,2-Diphenyl-picrylhydrazyl (DPPH) foi determinado segundo procedimento descrito por Brand- Williams et al., (1995), adaptado por Rufino et al., (2007). Uma alíquota (100 µl) do filtrado foi

misturada com 3,9 ml da solução metabólica de DPPH 60 µM. A mistura foi deixada em repouso por 1 hora. A leitura da absorbância foi feita a 515 nm no espectrofotômetro THERMO SCIENTIFIC® modelo Evolution 160 UV-VIS. Um controle da solução DPPH 60 µM foi preparado substituindo o extrato 100 µl por metanol e o decaimento da absorbância a 515 nm foi convertido em porcentagem, calibrado a partir da curva padrão. Os resultados foram expressos em mg de Trolox equivalente por 100 g do fruto (mg TE 100g⁻¹).

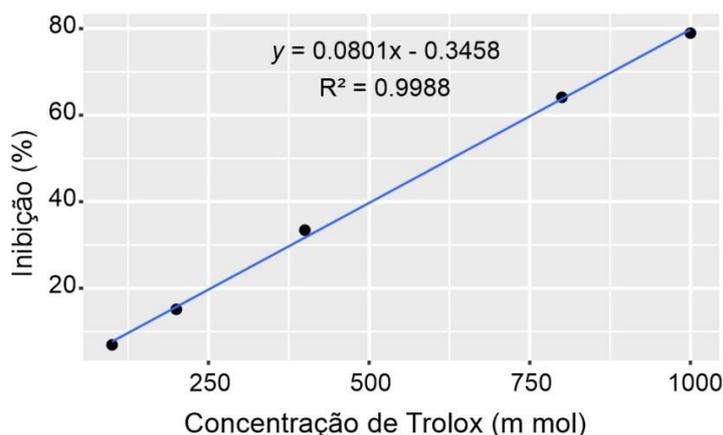


Figura 13. Curva padrão obtida a partir da % de inibição.

O sequestro do radical DPPH foi obtido segundo a fórmula 9:

$$\text{Sequestro DPPH (\%)} = \frac{Abs_i - Abs_a}{Abs_i} * 100 \quad (9)$$

Onde : Abs_i = absorbância inicial da solução;

Abs_a = é a absorbância da mistura após 60 min de incubação;

4.13 Avaliação das características produtivas

Foram colhidas as seis plantas centrais de cada parcela para avaliar as características produtivas. Quando os tomateiros apresentaram frutos no estágio 6 de maturação (coloração vermelha intensa) foi iniciada a colheita. Com auxílio de paquímetro, cada fruto teve seu diâmetro mensurado em mm para classificação do calibre. Também foi realizada a pesagem individual em balança semi-analítica, além disso, foi contabilizado o número total de frutos.

Os resultados das análises foram utilizados para determinar: produtividade comercial – Prod¹. (t ha⁻¹), produtividade total de frutos por planta - PT (kg planta⁻¹); número de frutos comerciais por planta – NFC (uni. planta⁻¹); produção comercial – PC (kg planta⁻¹); produção de frutos grandes FG (kg planta⁻¹); produção de frutos médios FM (kg planta⁻¹); produção de frutos pequenos FP (kg planta⁻¹); massa de frutos comerciais – MFC (g fruto⁻¹); massa total de frutos não comerciais – MNC (kg planta⁻¹) e percentagem de perda de frutos – Perda (%). A classificação dos frutos (comercial e não comercial) foi realizada conforme as características de diâmetro (pequeno, médio e grande) e constatação visual de danos (PBMH, 2003).

4.14 Análise destrutiva

Para a análise destrutiva do desenvolvimento, foi mensurada a produção de massa seca das folhas (g planta⁻¹); massa seca dos caules (g planta⁻¹) e área foliar das plantas (cm² planta⁻¹), altura de planta (cm planta⁻¹), diâmetro de caule (cm planta⁻¹) onde a quarta planta de cada tratamento foi cortada rente à base no final do ciclo produtivo aos 130 (DAG). As plantas colhidas foram levadas ao laboratório e separadas em folhas e caules (Figura 11 A). As folhas frescas foram imediatamente mensuradas pelo aparelho Li-Cor Modelo Li-3100, (Li-Cor Inc., NE, EUA), (Figura 11 B, C), fornecendo a área foliar em cm², e depois armazenadas em sacos de papel identificados. Os caules foram picados e armazenados em sacos de papel identificados. O material foi seco em estufas de ventilação forçada a 65°C por 72 horas e posteriormente foram pesados em balança de precisão (Figura 11 D). O procedimento foi repetido até atingirem o peso constante.

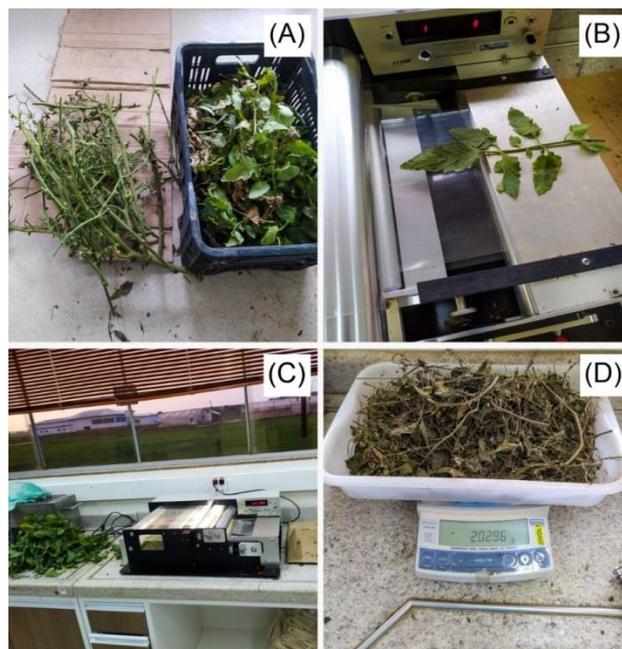


Figura 14. Separação folhas e caules (A); mensuração da área foliar (B, C); análise do peso constante da massa seca (D).

4.15 Análise dos dados

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade, análise de variância (teste F) e as médias comparadas pelo teste de Scott Knott com $p < (0,05)$, e para as características de ambientes e espaçamentos entre plantas, regressão linear e polinomial com auxílio do Software SISVAR[®] Pt-BR versão 5.8 (FERREIRA, 2019).

Para análise dos componentes principais PCA (principal component analysis) foi utilizado o software R (TEAM, R. C. R, 2014) e pacotes Tidyverse (WICKHAM et al., 2019), Factoextra (KASSAMBARA; MUNDT, 2020) e stats.

Para a análise de cluster foi utilizado o software R (TEAM, R. C. R, 2014) e pacote FactoMineR (LÊ et. al., 2008).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características ambientais

A radiação solar incidente no Ambiente Externo (AE) foi reduzida pelas coberturas dos ambientes protegidos Filme Agrícola (FA) e Policarbonato (PL), apresentando, em média, a transmissividade de 69 e 58% para Radiação Global (RG) e 81 e 74% para radiação fotossinteticamente ativa (PAR), respectivamente (Figura 15 A, B).

Essa redução na RG é relatada em outras pesquisas usando o cultivo protegido, onde foi verificado 75% de transmissividade em estufa tipo capela, e 76% e 62% de transmissividade em estufa tipo arco cobertas com filme agrícola (REIS et al., 2012; MUTWIWA et al., 2017). Para estruturas cobertas com policarbonato foi observado 69% de transmissividade da RG para lâminas de camada dupla com 8 mm (ABDEL-GHANY et al., 2015).

A mesma dinâmica ocorre com a radiação PAR, onde Beckmann et al., (2006) observaram transmissividade de 87% sob o filme agrícola. Enquanto para cobertura de policarbonato com placas de 8 mm foi verificado a transmissividade de 71%. E de 63 e 27% para placas de 2 e 4 mm respectivamente, e ainda 85% de transmissividade utilizando chapas sólidas (ABDEL-GHANY et al., 2015; KWON et al., 2017; SUBIN et al., 2020).

Pode-se afirmar que ambos os ambientes de cultivo analisados transmitiram um volume significativamente menor de radiação solar para o interior das estruturas, 31% e 42% menos RG, e 19% e 26% menos PAR para os ambientes FA e PL, respectivamente em relação ao AE, comprovando que de fato o ambiente protegido, independentemente de sua cobertura e formato, provoca uma redução na incidência solar para o interior da estrutura. Como já observado por outros autores, como Radin et al., (2003); Caliman et al., (2005); Mutwiwa et al., (2017); Moreno-Teruel et al., (2021). De fato, a transmissividade da RG é muito influenciada pela posição do sol e da estrutura em relação à latitude, estação do ano, presença de aerossóis na atmosfera e acúmulo de poeira (TERAMOTO; ESCOBEDO, 2012).

As temperaturas médias (Figura 15 C) observadas para os ambientes PL e FA de 26,5 e 26,7°C, respectivamente, foram inferiores a

verificada no AE de 27,2°C. Normalmente, verificamos no interior das casas de vegetação temperaturas superiores às observadas no ambiente externo. Isto ocorre principalmente devido à limitação na troca dos gases internos, provocado pelo fechamento parcial das paredes com telas, como relatado por (CALIMAN et al., 2005; CAVALCANTI et al., 2013; MUTWIWA et al., 2017).

No início do cultivo, a diferença na temperatura média diária entre o AE e os ambientes FA e PL foi maior. A elevada umidade relativa no interior das estruturas devido à irrigação e transpiração das plantas, somado ao maior fluxo de ar e troca entre o ambiente protegido e o ambiente externo contribuíram para este resultado.

Com o crescimento das plantas, elas se tornaram barreiras e reduziram a ventilação natural principalmente a partir dos 70 dias, aumentando a temperatura interna (Figura 15 C). Este comportamento também foi observado por Holcman et al., (2017), que verificaram temperaturas máximas e mínimas, muito próximo às mensuradas no ambiente externo. Ainda pode-se afirmar que ocorreram diferenças pouco significativas entre as temperaturas médias (Figura 15 C) durante o desenvolvimento da cultura. Porém, o AE apresentou média superior à observada no cultivo protegido.

Ao verificar-se as médias das temperaturas mínimas (Figura 15 D), não ocorreram diferenças significativas entre os ambientes FA 20,16°C, PL 20,18°C e AE 20,21°C. Este resultado já era esperado, visto que estes valores foram coletados durante a madrugada, período em que as coberturas têm pouca influência sobre a temperatura interna dos ambientes protegidos.

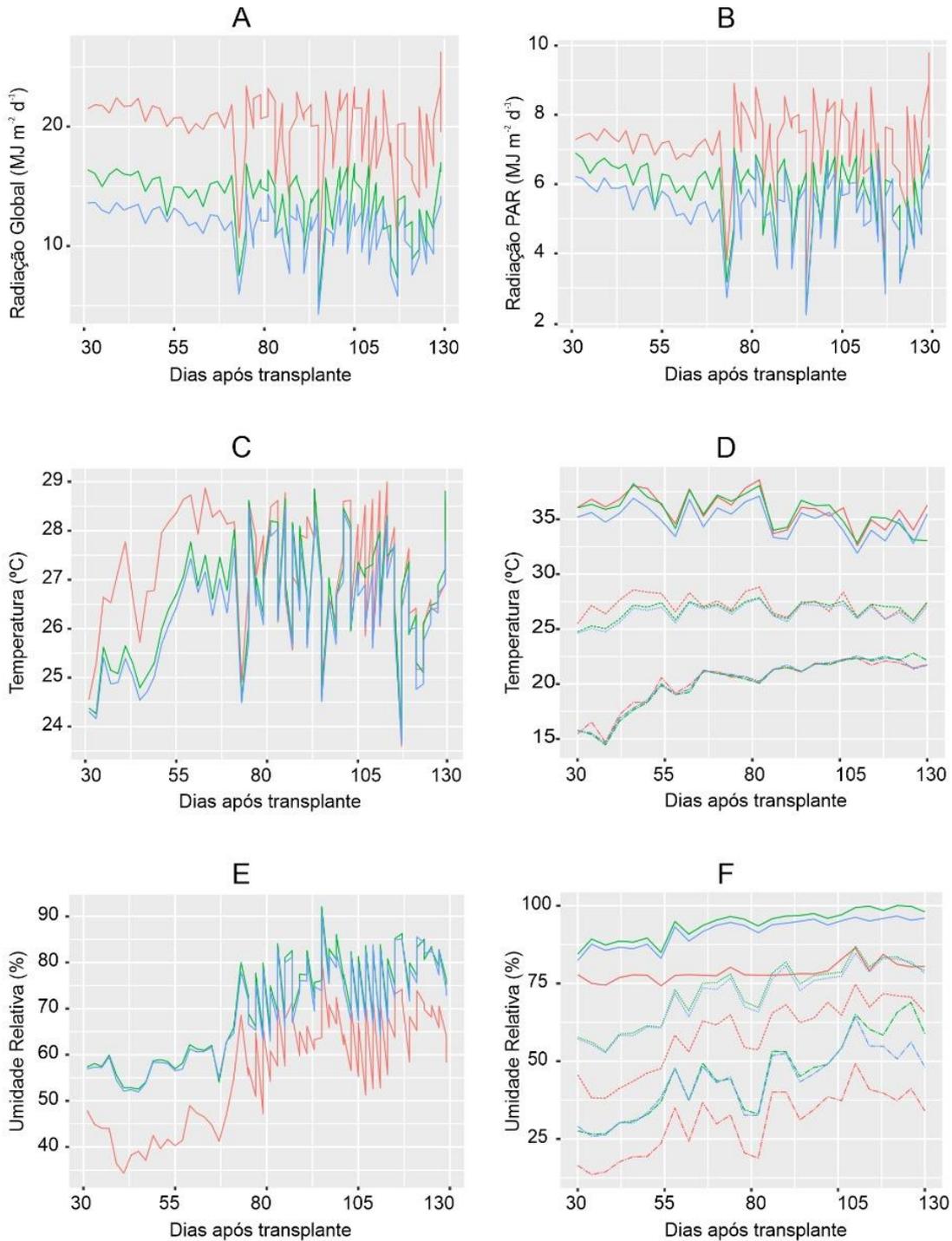
As temperaturas máximas no ambiente PL 34,9°C foram inferiores as verificadas nos ambientes FA 35,7°C e AE 35,9°C que não divergiram entre si (Figura 15 D). Os ambientes PL e AE divergiram 1°C entre si, e os ambientes PL e FA 0,8°C, indicando pouca interferência das coberturas dos ambientes de cultivo em relação à média da temperatura máxima entre eles, e entre eles e a temperatura externa.

Quando analisada a máxima temperatura registrada durante todo o período avaliado, observamos resultados absolutos de PL 37,8°C; FA 38,7°C e AE 39,8°C, com menos de 2°C de amplitude máxima entre o ambiente PL e o AE, e menos de 1°C entre o ambiente PL e o FA (Figura 15 D).

A amplitude térmica, ou seja, a diferença entre as médias diurnas e noturnas no interior dos ambientes de cultivo ultrapassou os 14°C para o ambiente PL e os 15°C para o ambiente FA, com picos superiores a 20°C para ambos os ambientes. Amplitudes muito maiores aos 4,4°C encontrado por Max et al., (2009) mas inferiores aos 22,6°C e 27,2°C observados por Marek (2018), em dois anos consecutivos de cultivo.

A umidade relativa (Figura 15 E) se manteve acima do limite de 40% dentro dos ambientes de cultivo, considerado ideal para o desenvolvimento das hortaliças (HOLCMAN et al., 2017). Média superior ao AE, devido à transpiração da cultura, que eleva a umidade nos ambientes internos (MORENO-TERUEL et al., 2021). Não houve diferença significativa entre os ambientes FA e PL, porém, ambos atingiram médias 18% superiores ao observado no AE, valor acima dos 10% de variação encontrado na literatura (CALIMAN et al., 2005; MAX et al., 2009).

Com relação à amplitude da umidade (Figura 15 F), foi verificada uma variação média de 51% a 90% durante todo o período avaliado, com extremos de 20% a 100%, valores similares à variação de 55% a 95% encontrada por Marek (2018) e aos 73% a 88% observado por Max et al., (2009). A grande variação da UR pode ser explicada pelo período de implantação do experimento, realizado durante a transição entre as estações seca e chuvosa.



— Ambiente Externo — Filme Agrícola — Policarbonato - - - Mínima ··· Média — Máxima

Figura 15. Médias diárias de Radiação Global (A), Radiação PAR (B), Temperatura (C) e Umidade Relativa (E), e máximas, médias e mínimas para Temperatura (D) e Umidade relativa (F), para Ambiente Externo, Filme Agrícola e Policarbonato.

Ao avaliar a distribuição da radiação PAR acima e no interior do dossel das plantas cultivadas em cada ambiente (Tabela 2) foi observado que

no ambiente PL ocorreu uma redução significativa na transmissividade da radiação PAR acima do dossel em relação ao ambiente FA, de em média 32%.

Esta redução foi superior à diferença verificada pelas estações meteorológicas, podendo ter relação com o horário das coletas feitas pelo AccuPAR, em relação a média diária fornecida pelas estações. As mensurações realizadas com o AccuPAR foram feitas durante o período de maior irradiação solar, indicando que neste período pode ter ocorrido uma maior interação entre a incidência solar e a cobertura de policarbonato preenchida com um fluxo contínuo de água. A irradiação solar no interior de uma casa de vegetação apresenta uma considerável redução em comparação ao ambiente externo, decorrente da reflexão e absorção promovida pela cobertura (SANTOS et al., 2013).

Já a radiação PAR mensurada na base das plantas, sugere que não ocorreu diferença significativa para os ambientes nos espaçamentos mais adensados, indicando um comportamento de interceptação da cobertura foliar semelhante entre os ambientes. No entanto, nos espaçamentos 0,5 e 0,6 m pode-se verificar uma infiltração maior de energia luminosa, com destaque para o ambiente FA, que apresentou valores mais que 50% superiores aos registrados no ambiente PL (Tabela 2).

O coeficiente de transmissão (τ) aferido apontou que o volume de radiação PAR que atravessa todo o dossel das plantas apresentou valor significativamente maior de fótons de luz chegando à base dos espaçamentos 0,5 e 0,6 m do ambiente FA, quando comparados aos espaçamentos 0,2, 0,3 e 0,4 m no mesmo ambiente. Este volume maior de fótons, entretanto, não foi verificado no ambiente PL.

Nos espaçamentos 0,5 e 0,6 m do ambiente FA, as plantas não ocuparam todo o espaço disponível para o seu crescimento, ou seja, existia uma oferta luminosa maior que a necessidade de cada planta para realizar suas funções metabólicas. A interceptação de aproximadamente toda a luz incidente com um mínimo de auto sombreamento proporciona o máximo valor da taxa de crescimento da cultura (FAGUNDES et al., 2001). Desta forma, pode-se inferir que no ambiente FA os espaçamentos mais adensados 0,2, 0,3 e 0,4 m aproveitaram mais a energia luminosa, enquanto nos espaçamentos menos adensados 0,5 e 0,6 m esta energia foi desperdiçada.

Ao verificar-se a fração de radiação do feixe solar (F_b), que analisa o volume de radiação PAR diretamente recebida pelo AccuPAR na base das plantas, pode-se observar que esta radiação foi 50% superior para todos os espaçamentos testados no ambiente FA em relação ao PL, indicando fortemente uma maior disponibilidade de radiação direta no ambiente FA em comparação ao PL. Logo, a tendência da disponibilidade de radiação PAR no interior do dossel foi 50% superior no ambiente FA.

Tabela 2. Radiação PAR captada pelo sensor acima do dossel, SensorPAR-($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), radiação PAR captada pelo AccuPAR na base das plantas, AccuPAR-($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), coeficiente de transmissão-Tau, fração de radiação do feixe-Fb.

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Amb. (A)	Fcal		CV (%)
		F.A.	P.L.			Trat. (T)	(A)x(T)	
SensorPAR	0,2	1166,94aA	802,44aB	984,69a	119,698*	0,017 ^{ns}	0,237 ^{ns}	9,69
	0,3	1168,77aA	794,22aB	981,50a				
	0,4	1159,66aA	816,11aB	987,89a				
	0,5	1203,05aA	758,44aB	980,75a				
	0,6	1183,77aA	802,66aB	993,22a				
	Média	1176,44A	794,77B					
AccuPAR	0,2	95,39bA	59,77aA	77,58b	34,770*	10,024*	4,247*	30,42
	0,3	95,77bA	55,39aA	75,58b				
	0,4	97,11bA	77,66aA	87,38b				
	0,5	234,83aA	102,78aB	168,80a				
	0,6	218,11aA	79,88aB	148,99a				
	Média	148,24A	75,10B					
Tau	0,2	0,08bA	0,07aA	0,08a	5,407*	7,206*	1,748*	33,25
	0,3	0,08bA	0,07aA	0,07a				
	0,4	0,08bA	0,09aA	0,09a				
	0,5	0,19aA	0,13aB	0,16b				
	0,6	0,18aA	0,10aB	0,14b				
	Média	0,12A	0,09B					
Fb	0,2	0,48aA	0,20aB	0,34a	96,145*	0,228 ^{ns}	0,514 ^{ns}	22,42
	0,3	0,46aA	0,18aB	0,32a				
	0,4	0,47aA	0,23aB	0,35a				
	0,5	0,51aA	0,16aB	0,34a				
	0,6	0,49aA	0,23aB	0,36a				
	Média	0,48A	0,20B					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado. ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

5.2 Características fisiológicas

Nos parâmetros fisiológicos, os dados obtidos pelo IRGA (Tabela 3) mostraram diferença significativa entre os ambientes, para todos os fatores analisados, evidenciando que as plantas cultivadas no ambiente FA e PL enfrentaram situações distintas. Também foram encontradas interações significativas entre os espaçamentos testados para os fatores, taxa fotossintética (A) e eficiência do uso da água (EUA).

A radiação PAR verificada pelo aparelho IRGA, apresentou no ambiente PL média de 532,6 ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) até 50% inferior aos 1012,8 ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$) verificado no ambiente FA. Esta redução na radiação PAR acompanhou uma tendência de redução no fluxo de fótons, de acordo com as variações das alturas de coleta no ambiente PL. As estações meteorológicas mostraram uma redução de 26% neste ambiente em comparação ao ambiente externo, em seguida no sensor AccuPAR ao nível do dossel das plantas, o fluxo de radiação foi 33% inferior ao ambiente externo. Já através do IRGA, verificou-se uma redução de 50%, o AccuPAR nas bases das plantas verificou uma redução de 93%, desta forma podemos inferir que o fluxo de radiação manteve uma tendência constante de redução no ambiente PL conforme se aproximou do solo, esta mesma tendência não foi observada no ambiente FA.

A taxa fotossintética (A) foi 18% superior no ambiente FA em comparação ao PL. Podemos observar que os espaçamentos 0,2 e 0,3 m no ambiente FA apresentaram médias superiores aos seus respectivos espelhos no ambiente PL. Dentro do ambiente PL os espaçamentos 0,2 e 0,3 m foram inferiores aos espaçamentos 0,4, 0,5 e 0,6 m. Provavelmente devido a menor disponibilidade luminosa oferecida no ambiente, somado ao maior adensamento e conseqüente alto sombreamento das plantas.

A qualidade e intensidade da luz que incidiu sobre a planta interferiu diretamente na taxa fotossintética, sendo que, os ambientes FA e PL apresentaram valores de 8,76 e 7,17 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), respectivamente. Essa taxa fotossintética se mostrou muito próxima aos 8,61 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) verificados por Morales et al., (2015) e bem enquadrada entre outras taxas verificadas na literatura, 5,70; 5,68; 10; 12,15 e 19,21 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

(HACHMANN et al., 2015; ROCHA et al., 2016; SHAHEEN et al., 2016; NAZIR et al., 2017).

A taxa de transpiração (E) no ambiente FA se manteve em média 52% superior à observada no ambiente PL, não ocorrendo diferenças entre os espaçamentos. A transpiração promovida pela planta é a principal responsável por manter a temperatura estável nas folhas (MORALES et al., 2015; SHAHEEN et al., 2016)

As taxas de transpiração observadas no ambiente FA de 7,86 ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) estão bem próximas as 6,24; 7,17 e 7-10 ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) verificadas ao analisar plantas sob estresse hídrico (MORALES et al., 2015; ROCHA et al., 2016; MAREK, 2018). Enquanto as taxas encontradas no ambiente PL de 3,74 ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ficaram mais próximas das taxas 2,03 e 3,22 ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) observadas em tomateiros cultivados em altas temperaturas (SHAHEEN et al., 2016; NAZIR et al., 2017). Uma vez que a disponibilidade hídrica e temperatura foram semelhantes entre os ambientes, esta diferença na taxa de transpiração pode estar relacionada à maior ou menor necessidade da planta em controlar a temperatura foliar em função da incidência luminosa em cada ambiente.

Os dados para condutância estomática (Gs) observados neste ensaio de 0,13 e 0,23 ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para os ambientes PL e FA, respectivamente, estão de acordo com os encontrados na literatura para a cultura (HACHMANN et al., 2015). Estes índices variaram conforme a hora do dia, e para diferentes genótipos de tomateiro (ROCHA et al., 2016; MAREK, 2018).

Para o fator condutância estomática (Gs) o ambiente FA foi 41% superior ao ambiente PL, não ocorrendo diferença entre os espaçamentos. O comportamento semelhante da condutância estomática (Gs), taxa de assimilação líquida (A) e taxa de transpiração foliar (E) já é esperado, pois, a abertura estomática está ligada a assimilação líquida de CO_2 e a perda de água por transpiração (HACHMANN et al., 2015).

A concentração interna de CO_2 na câmara subestomática (C_i) acompanhou a maior taxa fotossintética (A) e a maior condutância estomática (Gs), apresentando valor 5% superior no ambiente FA em relação ao PL. Ao

avaliar-se a eficiência da carboxilação, ou seja, a eficiência no processo de fixação do carbono pelas plantas (Tabela 3) determinado pelo índice (A/Ci) verificou-se que o ambiente FA foi 16% mais eficiente na fixação de CO₂ em comparação ao PL, e uma condutância estomática (Gs) 41% superior em comparação direta, diferenças superiores a 50% já foram observadas para o índice (A/Ci) em plantas do híbrido Conquistador (MAREK, 2018).

A temperatura da câmara de aferição (CA) e temperatura da folha (FL) apresentaram tendências similares, no entanto, a temperatura da folha apresentou média 12% mais alta no ambiente FA em comparação ao ambiente PL, de 42,8 e 37,4°C respectivamente. A alta temperatura verificada nas folhas, principalmente no ambiente FA, contribuiu diretamente para a menor eficiência da enzima Rubisco nas plantas, como descrito por Feller et al., (2008) e Wang et al., (2015). Mesmo observado um fluxo de radiação PAR 50% superior, o ambiente FA apresentou uma reduzida margem de ganho do índice (A/Ci), o que infere uma menor capacidade de carboxilação por volume de energia PAR recebida no ambiente FA em relação ao PL.

A aferição da temperatura da folha (FL) também é um importante indicador, para calibrar o manejo da água e verificar o estresse hídrico de plantas cultivadas em estufas plásticas (MORALES et al., 2015). Diferentes genótipos de tomate apresentam diferentes temperaturas foliares (FL), e plantas com menor temperatura na folha (FL) apresentaram maior eficiência no uso da água (EUA) (NAZIR et al., 2017).

A temperatura da folha variou de 42,8 a 37,4°C para os ambientes FA e PL, respectivamente, indicando que a alta incidência de radiação no interior dos ambientes, tem relação direta com a maior temperatura verificada na folha. Os valores observados são próximos dos 40,87 a 35,03°C encontrados por Rocha et al., (2016) e superiores aos 35,08 a 26,68°C e 27,82 a 30,35°C observados por Morales et al., (2015) e Nazir et al., (2017), avaliando diferentes genótipos de tomate em cultivo protegido.

Desta forma, a maior temperatura foliar verificada no ambiente FA (Tabela 3) foi a grande responsável pelos maiores índices de transpiração (E), o maior tempo de abertura dos estômatos, e maior troca gasosa. De acordo com Marek (2018), as variações na transpiração estão relacionadas às

alterações na temperatura da folha, o que nos leva a identificar o motivo dos maiores índices de condutância estomática (G_s), taxa fotossintética (A) e consequente carboxilação (A/C_i) no ambiente FA, uma vez que, existe uma forte correlação positiva entre a taxa de transpiração (E) e a taxa de condutância estomática (G_s), e uma correlação negativa entre a taxa de transpiração (E) e a eficiência do uso da água (EUA) (SHAHEEN et al., 2016).

Quanto à eficiência do uso da água (EUA), verificou-se uma menor eficiência do ambiente FA 1,14 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) em comparação ao PL 1,93 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) para todos os tratamentos, com exceção do 0,2 m no ambiente FA que não diferiu do seu espelho no ambiente PL, provavelmente devido à proteção da incidência luminosa direta promovida pelo auto-sombreamento. A (EUA) é caracterizada como a quantidade de água transpirada por uma cultura para a produção de uma quantidade de matéria seca, logo, as culturas que conseguem produzir uma maior quantidade de matéria seca por volume de água transpirada, podem ser consideradas mais eficientes (ROCHA et al., 2016). Outros trabalhos apresentaram (EUA) semelhantes 0,97, 1,05 e 1,85 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) (MORALES et al., 2015; ROCHA et al., 2016; SHAHEEN et al., 2016; NAZIR et al., 2017).

A (EUA) também está relacionada ao tempo de abertura dos estômatos, uma vez que, durante a abertura estomática, a água também é perdida (CONCENÇO et al., 2007). No ambiente FA podemos verificar uma taxa fotossintética (A) até 44% superior ao PL. No entanto, uma eficiência no uso da água (E) até 54% inferior. Desta maneira, a partir dos dados obtidos podemos presumir que o incremento da incidência luminosa dentro do ambiente FA promoveu uma maior atividade metabólica nas plantas, que, no entanto, exigiu uma maior taxa transpiratória e, portanto, uma menor eficiência no uso da água.

Tabela 3. Análises da radiação fotossintética – PAR ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), taxa fotossintética – A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa de transpiração – E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática – Gs ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 na câmara subestomática – Ci ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), temperatura da câmara – CT ($^{\circ}\text{C}$), temperatura da folha – FT ($^{\circ}\text{C}$), eficiência de carboxilação - A/Ci ($\mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol mol}^{-1}$), taxa de eficiência no uso da água – EUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$).

Variáveis	Trat.	Ambientes			Média	Amb. (A)	Fcal		CV (%)
		F.A.	P.L.	Trat. (T)			(A)x(T)		
PAR ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$)	0,2	940,50aA	457,22aB	698,86a	176,850*	1,240 ^{ns}	0,628 ^{ns}	12,80	
	0,3	1036,00aA	515,44aB	775,72a					
	0,4	1094,27aA	547,94aB	821,11a					
	0,5	970,66aA	591,89aB	781,27a					
	0,6	1023,00aA	550,94aB	786,97a					
	Média	1012,88A	532,69B						
A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	0,2	9,25aA	5,75bB	7,50a	10,830*	1,761*	4,249*	16,51	
	0,3	9,76aA	5,42bB	7,59a					
	0,4	8,02aA	7,95aA	7,99a					
	0,5	9,55aA	8,84aA	9,19a					
	0,6	7,21aA	7,92aA	7,56a					
	Média	8,76A	7,17B						
E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	0,2	8,20aA	3,63aB	5,91a	204,894*	1,315 ^{ns}	0,792 ^{ns}	13,58	
	0,3	7,58aA	2,85aB	5,21a					
	0,4	7,33aA	4,06aB	5,69a					
	0,5	8,15aA	4,08aB	6,11a					
	0,6	8,08aA	4,09aB	6,08a					
	Média	7,86A	3,74B						

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado. ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

“TABELA continuação”

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Fcal		CV (%)	
		F.A.	P.L.		Amb. (A)	Trat. (T)		(A)x(T)
Gs (mol m⁻² s⁻¹)	0,2	0,240aA	0,120aB	0,180a	45,140*	0,991 ^{ns}	1,090*	21,38
	0,3	0,230aA	0,086aB	0,158a				
	0,4	0,226aA	0,160aA	0,193a				
	0,5	0,240aA	0,156aB	0,198a				
	0,6	0,226aA	0,156aB	0,191a				
	Média	0,232A	0,136B					
Ci (μmol mol⁻¹)	0,2	303,55aA	284,44aA	294,00a	4,619*	1,029 ^{ns}	0,467 ^{ns}	7,02
	0,3	281,16aA	266,55aA	273,86a				
	0,4	285,77aA	269,33aA	277,55a				
	0,5	278,83aA	280,50aA	279,66a				
	0,6	289,27aA	260,66aA	274,97a				
	Média	287,72A	272,29B					
CT (°C)	0,2	41,57aA	35,40bB	38,48b	350,128*	2,818*	2,654*	1,83
	0,3	42,29aA	36,70aB	39,49a				
	0,4	42,09aA	37,22aB	39,66a				
	0,5	41,55aA	37,52aB	39,53a				
	0,6	41,62aA	37,65aB	39,63a				
	Média	41,82A	36,90B					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado. ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

“TABELA continuação”

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Fcal Amb. (A)	Trat. (T)	(A)x(T)	CV (%)
		F.A.	P.L.					
FT (°C)	0,2	42,83aA	37,67aB	40,25a	282,545*	0,276 ^{ns}	0,263 ^{ns}	2,18
	0,3	42,37aA	37,35aB	39,86a				
	0,4	42,66aA	37,40aB	40,03a				
	0,5	42,86aA	37,46aB	40,16a				
	0,6	43,31aA	37,35aB	40,33a				
	Média	42,81A	37,44B					
A/Ci ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \mu\text{mol mol}^{-1}$)	0,2	0,033aA	0,020aB	0,026a	5,383*	1,136 ^{ns}	3,491*	21,96
	0,3	0,036aA	0,020aB	0,028a				
	0,4	0,030aA	0,026aA	0,028a				
	0,5	0,033aA	0,033aA	0,033a				
	0,6	0,023aA	0,030aA	0,026a				
	Média	0,031A	0,026B					
EUA ($\mu\text{mol CO}_2 / \text{mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$)	0,2	1,16aA	1,61aA	1,38a	52,590*	1,099 ^{ns}	1,166*	19,40
	0,3	1,35aB	1,95aA	1,43a				
	0,4	1,10aB	1,96aA	1,53a				
	0,5	1,18aB	2,16aA	1,65a				
	0,6	0,90aB	1,97aA	1,67a				
	Média	1,14B	1,93A					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado. ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

5.3 Características físico-químicas e bioquímicas

Os ambientes e os espaçamentos não proporcionaram diferenças no teor de sólidos solúveis e na textura dos frutos de tomate (Tabela 4). Os altos teores de sólidos solúveis obtidos, acima de 4,40 °Brix atestaram a qualidade dos frutos. Frutos com teor de sólidos solúveis acima de 3,0 °Brix são adequados para o mercado de mesa (SCHWARZ et al., 2013). Os valores de sólidos solúveis verificados para os tratamentos FA 4,58 e PL 4,47, foram superiores aos 4,00 °Brix encontrados em frutos de tomate italiano para o processamento e aos 4,27 °Brix verificados em frutos colhidos maduros do híbrido Fascínio (MONTEIRO et al., 2008; QUEZADO-DUVAL et al., 2018; TRENTO et al., 2021).

A textura não variou com os tratamentos neste trabalho, esta mesma tendência foi observada por Heine et al., (2015) que também não encontrou variação na firmeza dos frutos cultivados em diferentes espaçamentos. Segundo Borguini; Silva, (2009) tomates produzidos e manejados de maneira adequada tendem a não diferir com relação à textura. Estes autores ainda encontraram valores entre 8,85 e 10,28 (N) cm² com relação à textura de frutos cultivados em sistema orgânico e convencional para as cultivares Carmem e Débora. Valores próximos a estes foram observados nos ambiente FA e PL de 8,22 e 8,08 (N) cm² respectivamente, e também próximos aos dados encontrados por Choi et al., (2008) e Tolesa; Workneh, (2017) de 10 (N) cm², mas superiores à média encontrada por Bello et al., (2020) de 5,62 (N) cm² para tomate variedade caqui.

Houve diferença significativa entre os tratamentos para a variável croma. Além disso, para esta variável, a interação entre tratamentos e espaçamento foi significativa. As médias mais elevadas, ou seja, a maior saturação da cor foi observada no ambiente FA e nos maiores espaçamentos de ambos os ambientes (Figura suplementar 1 A). De acordo com Borguine (2002) quanto maior a saturação do croma mais intensa é a cor. Neste sentido, verificou-se maior saturação da cor no ambiente e nos espaçamento que receberam maior carga luminosa, de maneira a sugerir que a maior oferta de radiação solar pode estar relacionada a uma maior saturação da cor, uma vez

que também pode-se verificar um menor valor do croma no ambiente PL, e nos espaçamentos onde os frutos ficaram menos expostos à luminosidade, ou seja nos espaçamentos 0,2 e 0,3 m em ambos os tratamentos. No entanto, valores de croma também são influenciados pelo estágio de maturação dos frutos, de maneira que a maior oferta luminosa pode ter acelerado o processo de maturação no ambiente FA e nos espaçamentos mais distantes. Segundo Pék et al., (2011) a evolução da cor vermelhas em frutos de tomate é mais acelerada sob a exposição a irradiação solar total.

Os valores de saturação encontrados neste ensaio de 47,57 e 46,23 para os ambientes FA e PL, respectivamente, podem estar relacionados ao ponto de colheita, uma vez que os frutos foram colhidos bem maduros quando apresentavam uma coloração vermelha intensa. Outros trabalhos apresentaram valores para o croma de 35,39 a 36,61 para frutos comerciais (BORGUINI; SILVA, 2009).

Sobre o ângulo hue, não ocorreram diferenças significativas para nenhum dos fatores analisados, onde verificou-se médias de 42,35° e 41,79° para os ambientes FA e PL. Ainda podemos afirmar que para frutos maduros de tomate, o menor ângulo de tonalidade indica maior intensidade da cor vermelha. Os resultados obtidos por Kasampalis; Tsouvaltzis; Siomos, (2020) que ao analisar frutos em três estágios, sendo eles, verde, laranja e vermelho, encontraram ângulos hue de 99,02°, 72,06° e 52,32°, respectivamente. Desta maneira, podemos concluir que, o ângulo hue encontrado em nosso estudo aponta fortemente para frutos vermelho intenso.

Ainda podemos afirmar que o ponto de colheita definido para o estudo está de acordo com a maturação ideal do fruto, segundo Tolesa; Workneh, (2017) o maior ângulo de tonalidade indica o menor índice de desenvolvimento da cor fisiológica, ou seja, o fator hue é inversamente proporcional aos estádios de maturação do fruto. Esta correlação foi confirmada por seu trabalho, onde frutos colhidos em três estágios diferentes de maturação alcançaram ângulos hue de 45° ao final do armazenamento de 21 dias. Este valor ficou muito próximo às médias de 42,35° e 41,79° encontrados nos frutos colhidos frescos em nosso estudo, indicando a cor vermelho intenso. Outros resultados também foram encontrados, como no trabalho conduzido por Guimarães et al., (2020)

onde os frutos de tomate ensacados com TNT logo após o pegamento, apresentaram valores superiores a 64,85° para a variedade Compack, no entanto, esta resposta pode estar relacionada ao ponto de colheita.

Tabela 4. Teor de sólidos solúveis – SS (Brix°); textura – T (Newton cm²); cromagem – (C*); ângulo hue – (h°).

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Fcal			CV (%)
		F.A.	P.L.		Amb. (A)	Trat. (T)	(A) x (T)	
SS (Brix°)	0,2	4,50aA	4,42aA	4,46a				
	0,3	4,44aA	4,40aA	4,42a				
	0,4	4,57aA	4,59aA	4,58a	2,396 ^{ns}	0,924 ^{ns}	0,533 ^{ns}	5,89
	0,5	4,69aA	4,50aA	4,59a				
	0,6	4,73aA	4,44aA	4,58a				
	Média	4,58A	4,47A					
T (N)	0,2	8,23aA	8,26aA	8,24a				
	0,3	7,21aA	8,08aA	7,64a				
	0,4	7,82aA	8,00aA	7,91a	0,105 ^{ns}	0,557 ^{ns}	0,707 ^{ns}	15,39
	0,5	9,07aA	7,60aA	8,34a				
	0,6	8,80aA	8,45aA	8,62a				
	Média	8,22A	8,08A					
C*	0,2	46,19bA	45,47bA	45,83b				
	0,3	46,56bA	45,39bA	45,97b				
	0,4	47,35bA	46,75aA	47,05a	18,530*	7,711*	1,309*	2,34
	0,5	48,63aA	46,99aB	47,81a				
	0,6	49,11aA	46,55aB	47,83a				
	Média	47,57A	46,23B					
h°	0,2	42,62aA	41,17aA	41,89a				
	0,3	42,12aA	42,20aA	42,16a				
	0,4	41,53aA	41,87aA	41,70a	1,920 ^{ns}	0,582 ^{ns}	0,687 ^{ns}	3,4
	0,5	43,04aA	42,19aA	42,61a				
	0,6	42,46aA	41,53aA	41,99a				
	Média	42,35A	41,79A					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado; ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

Os tomates produzidos em ambientes diferentes (FA e PL) e diferentes espaçamentos apresentaram diferença significativa à (p>0,05) para os teores de licopeno, β-caroteno, fenóis totais e atividade antioxidante ABTS e DPPH (Tabela 5).

Os tomates cultivados no ambiente FA no espaçamento 0,2 m e no ambiente PL no espaçamento 0,3 m foram os que apresentaram maiores teores de licopeno, ocorrendo uma tendência dos tomates produzidos no ambiente PL apresentarem um teor cerca de 17% maior que os produzidos no ambiente FA (Figura complementar 1 B). A concentração de licopeno presente no tomate varia de acordo com a estação do ano, estágio de maturação, variedade, manejo da produção e do armazenamento, valores de 1,10 (mg 100g⁻¹) e 0,85 (mg 100g⁻¹) já foram observados em frutos cultivados na primavera e inverno respectivamente (MORITZ; TRAMONTE, 2006).

Os níveis de licopeno encontrados nos ambientes FA e PL, 0,51 e 0,62 (mg 100g⁻¹), respectivamente, são próximos aos verificados por outros autores 0,49 a 0,70 (mg 100g⁻¹) indicando a capacidade de ambos os ambientes de cultivo, na ambiência adequada para síntese de licopeno (CHOI et al., 2008; FATTORE et al., 2016).

A temperatura tem influência crucial na síntese de licopeno pelo fruto de tomate durante seu amadurecimento, temperaturas inferiores a 12°C inibem a biossíntese de licopeno, e acima de 32°C interrompem completamente o processo (DUMAS et al., 2003; ROSALES et al., 2006). Outro fator que influencia no teor de licopeno é a luz solar direta sobre o fruto, que pode promover o seu aquecimento em até 10°C em comparação com frutos sombreados, e uma redução de 21 a 28% no teor de licopeno (PÉK et al., 2011). Condições de estresse devido a temperatura e luminosidade no cultivo de tomate cereja sob ambiente protegido proporcionaram redução no teor de licopeno, apresentando valores decrescentes na ordem de 0,63 a 0,48 (mg 100g⁻¹) (ROSALES et al., 2006). Desta maneira, podemos afirmar que a maior incidência de radiação verificada no ambiente FA teve ação direta nos níveis de licopeno observados neste estudo. Assim como o espaçamento aplicado, também desempenhou um papel fundamental nos resultados, onde o menor espaçamento 0,2 m promoveu um sombreamento uniforme sobre os frutos e dessa forma permitiu maiores níveis de licopeno, já no ambiente PL foi a cobertura de policarbonato somado ao fluxo de água que desempenhou este papel. Com exceção do espaçamento 0,2 m todos os outros espaçamentos apresentaram maiores níveis de licopeno em comparação ao ambiente FA.

Uma média superior a 18% de β -caroteno foi observado no ambiente FA em relação à média do ambiente PL. Segundo Pék et al., (2011) temperaturas do ambiente maiores que 30°C favorecem a maior produção de β -caroteno em detrimento do licopeno, que tem sua síntese anulada a partir dos 32°C, enquanto o β -caroteno pode ser sintetizado em temperaturas de até 38°C. Desta forma, podemos inferir que os mesmos fatores que inibiram a produção de licopeno no ambiente FA, como maior luminosidade e temperatura dos frutos diretamente atingidos pela radiação solar, também promoveram a maior concentração de β -caroteno nos frutos produzidos neste ambiente. De fato, não foi verificada uma diferença significativa entre os espaçamentos dentro dos ambientes, mas podemos observar uma tendência positiva e crescente no nível de β -caroteno em relação ao maior distanciamento entre plantas.

O teor de fenóis nos frutos produzidos no ambiente FA foram superiores aos verificados no ambiente PL. Os espaçamentos 0,2 e 0,3 m no ambiente FA apresentaram valores de 29,88 e 27,43 ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) respectivamente, enquanto o espaçamento 0,2 m no espaçamento PL apresentou valor de 25,32 ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$), demonstrando a tendência de maior produção de fenóis no ambiente FA (Figura suplementar 1 C). O perfil genético e os fatores ambientais são determinantes na acumulação de fenóis e flavonóides, o conteúdo destes compostos apresentam uma relação direta com o aumento da temperatura e da intensidade luminosa (ROSALES et al., 2006).

O teor de compostos fenólicos também pode ser positivamente afetado pela menor disponibilidade de água e alta temperatura, devido a sua aplicação na eliminação de radicais (ROS) (LI; SHUKLA; DU, 2021). Dessa forma, o menor teor de fenóis, em média 18% inferior, observado no ambiente PL, indica um menor estresse ambiental.

Como a produção de flavonoides requer luz (DUMAS et al., 2003), não é surpreendente encontrar maiores níveis desta substância 25 ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) no ambiente FA, que comprovadamente recebeu uma carga luminosa maior em comparação ao ambiente PL de 20 ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$). Valores muito parecidos aos aproximados 25 ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) encontrados por Abreu; Barcelos, (2012) que ao avaliar o tomate Débora, verificou que a atividade antioxidante total pode ser maior ou menor que a soma da atividade antioxidante de cada composto

avaliado, além de variar com as concentrações dos extratos e solventes utilizados, sendo o licopeno o principal composto antioxidante presente no tomate.

A capacidade antioxidante pelos métodos ABTS e DPPH apresentaram maiores valores para frutos produzidos no ambiente PL 1,92 e 22.82 ($\mu\text{mol g}^{-1}$) e em relação ao FA 1,51 e 14.08 ($\mu\text{mol g}^{-1}$), respectivamente. Frutas tropicais podem apresentar índices de ABTS na polpa fresca entre 6,3 a 153 ($\mu\text{mol g}^{-1}$) (RUFINO et al., 2010). O tomate da variedade pêssego, cultivado na região de Letícia na Colômbia apresentou valores de 15,2 ($\mu\text{mol g}^{-1}$) (CALDERÓN et al., 2011). Para o índice de DPPH, Rosales et al., (2006) encontraram valores de 42, 60 e 82% de eliminação dos radicais livres por grama de peso fresco para tomate cereja, valores superiores às médias de 1,97 e 3,65% (dados não apresentados) para os ambientes FA e PL, respectivamente. De acordo com a regressão polinomial (Figura suplementar 1 D) pode ser verificado um maior teor de DPPH nos espaçamentos mais adensados de ambos os ambientes de cultivo. Vieira (2016) observou valores de 71,49 e 27,89% para purê de tomate com e sem a casca respectivamente, indicando que a maior concentração do DPPH está na casca. O experimento ainda pôde indicar o ambiente PL como uma ferramenta a ser usada na produção de alimentos funcionais, devido ao maior teor de licopeno e antioxidantes verificado nos frutos produzidos neste ambiente.

Tabela 5. Licopeno - (mg. 100g⁻¹), β-caroteno¹ - (mg. 100g⁻¹), compostos fenólicos - Fenóis (mg. 100g⁻¹), atividade antioxidante – ABTS (μmol g⁻¹) e atividade antioxidante - DPPH (μmol g⁻¹).

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Fcal			CV (%)
		F.A.	P.L.		Amb. (A)	Trat. (T)	(A)x(T)	
Licopeno (mg 100g ⁻¹)	0,2	0,72aA	0,64aA	0,68a				
	0,3	0,51bB	0,70aA	0,60a				
	0,4	0,51bB	0,67aA	0,59a	11,093*	5,959*	2,368*	21,17
	0,5	0,41bB	0,60aA	0,50b				
	0,6	0,39bA	0,49aA	0,44b				
	Média	0,51B	0,62A					
β-caroteno¹ (mg 100g ⁻¹)	0,2	0,29aA	0,27aA	0,28a				
	0,3	0,30aA	0,26aA	0,28a				
	0,4	0,29aA	0,26aA	0,28a	6,960*	1,149 ^{ns}	0,678*	28,75
	0,5	0,38aA	0,26aB	0,32a				
	0,6	0,39aA	0,29aA	0,34a				
	Média	0,33A	0,27B					
Fenóis (mg 100g ⁻¹)	0,2	29,88aA	25,32aA	27,60a				
	0,3	27,43aA	21,66aA	24,54a				
	0,4	24,71aA	19,75aA	22,23b	10,825*	2,846*	0,308*	22,51
	0,5	22,27aA	20,20aA	21,23b				
	0,6	24,41aA	17,35aB	20,88b				
	Média	25,74A	20,86B					
ABTS (μmol g ⁻¹)	0,2	1,46aA	1,77aA	1,62a				
	0,3	1,36aA	1,45aA	1,41a				
	0,4	1,35aB	2,05aA	1,70a	10,751*	2,463 ^{ns}	2,168*	25,97
	0,5	1,39aB	2,38aA	1,88a				
	0,6	1,97aA	1,97aA	1,97a				
	Média	1,51B	1,92A					
DPPH (μmol g ⁻¹)	0,2	19,58aB	38,15aA	28,87a				
	0,3	17,91aB	25,21bA	21,56b				
	0,4	8,51bB	17,19cA	12,85c	34,771*	16,726*	3,592*	28,38
	0,5	9,32bB	17,35cA	13,34c				
	0,6	15,09aA	16,19cA	15,64c				
	Média	14,08B	22,82A					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado; ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott (p<0,05), ¹Transformação $\sqrt{\bar{x}}$.

Ao analisar os dados da PCA (Figura 16) a PCA 1 explicou 47,2% das variâncias, enquanto a PCA 2 explica 14,3%, logo, 61,5% das variâncias podem ser explicadas pelos componentes principais.

A variabilidade da PCA 1 é explicada principalmente pela variável atividade antioxidante (ABTS), inversamente proporcional as variáveis, taxa fotossintética (A), índice de betacaroteno (βcaroteno) e croma (C*). Na PCA 2 as variáveis condutância estomática (Gs), taxa de transpiração (E), temperatura da

folha (FT), radiação fotossintética (PAR) e concentração de fenóis (Fenóis) é inversamente proporcional à atividade antioxidante (ABTS) e ao teor de licopeno (Licopeno). A variabilidade da ABTS é encontrada principalmente no quadrante no ambiente PL, enquanto a variabilidade do β caroteno, A e C* está localizado no ambiente FA.

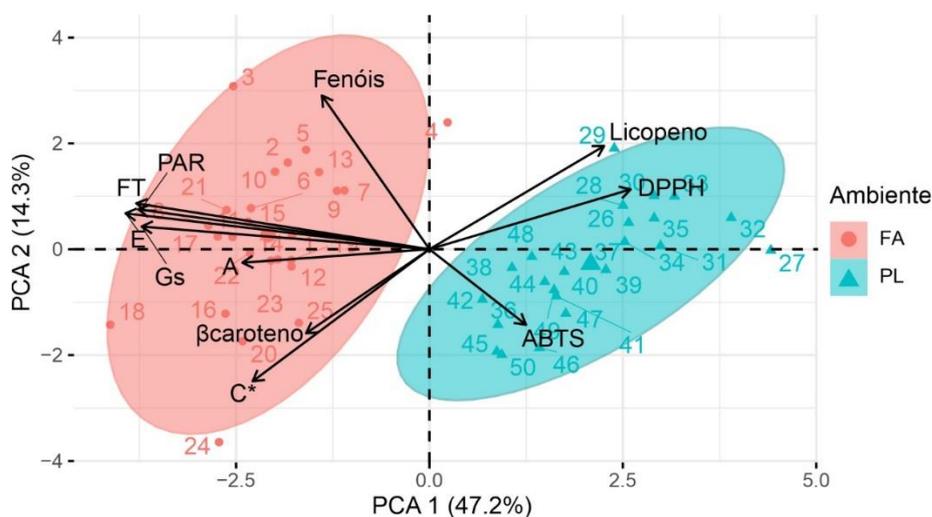


Figura 16. Projecção bidimensional da análise PCA dos dados fisiológicos e compostos funcionais.

5.4 Características produtivas

O tomateiro é uma planta muito exigente com relação às condições nutricionais e ambientais de cultivo, sendo muito complexo alcançar sua plena capacidade produtiva. No entanto, ambos os ambientes analisados neste estudo demonstraram sua aptidão em desempenhar um controle ambiental adequado ao desenvolvimento da cultura, com destaque para o fator espaçamento, que ao permitir um maior adensamento das plantas promoveu uma produtividade em média 54% superior (Tabela 6).

A produtividade por área apresentou um ganho de até 57% para plantas cultivadas no espaçamento 0,2 m em relação ao espaçamento 0,6 m mesmo com uma produção por planta 22% inferior. Este resultado ocorreu devido ao reduzido espaço disponível para as plantas se desenvolverem, uma vez que, em espaços mais compactos ocorre a sobreposição e sombreamento das folhas, aumentando a competição por luz e reduzindo a eficiência fotossintética, conseqüentemente há redução no desempenho individual, que,

no entanto, é superado pelo maior número de indivíduos na mesma área. Resultados semelhantes foram observados em cultivo hidropônico por Maboko et al., (2017) e Cardoso et al., (2018), e em cultivo a campo por Wanser et al., (2017) e Shanmukhi et al., (2018). Desta maneira, pode-se observar uma ordem significativa decrescente de produtividade por área, conforme foram ampliados os espaçamentos, (Figura suplementar 2 A) e uma ordem inversa na produtividade individual por planta.

Não houve diferença estatística entre os ambientes pelo teste de Scott-Knott à 5%, tanto para produtividade comercial por ha^{-1} , quanto para produtividade total por planta, todavia, existe uma tendência de melhores resultados em relação à produtividade no ambiente FA. Isso pode ser explicado pela maior oferta de energia luminosa disponível para as plantas, que possibilita um maior desempenho de seus processos fisiológicos e bioquímicos neste ambiente, como resultado ocorre uma pequena diferença na produtividade comercial por ha^{-1} , e produtividade total por planta. Holcman et al., (2017) verificaram resultados semelhantes em seu estudo analisando diferentes filmes agrícolas.

A produção total por planta apresentou diferença significativa entre os espaçamentos, evidenciando a menor produção unitária por planta quando cultivadas adensadas tanto no ambiente PL quanto no FA (Figura complementar 2 B). Quando comparados os desdobramentos dos tratamentos entre os ambientes, foram observados o maior e o menor resultado, respectivamente nos tratamentos 0,5 m e 0,2 m, do ambiente PL. Enquanto o tratamento 0,5 m foi superior no ambiente PL em relação ao ambiente FA no fator produção total por planta, o tratamento 0,2 m do ambiente PL foi inferior ao tratamento FA no mesmo fator.

Na média dos ambientes o espaçamento 0,2 m, apresentou produtividade total de $4,8 \text{ kg planta}^{-1}$, resultado 15% inferior ao espaçamento 0,3 m $5,7 \text{ kg planta}^{-1}$ e 30% inferior ao espaçamento 0,6 m, que alcançou $6,9 \text{ kg planta}^{-1}$, resultado superior ao verificado por Zucatto; Sandri, (2017), que observaram uma produção de $5.5 \text{ kg planta}^{-1}$ utilizando o espaçamento de 0,6 m para o cultivo em vasos.

Tabela 6. Produtividade comercial – Prod¹. (t ha⁻¹), e produtividade total de frutos por planta - PT (kg planta⁻¹), de tomates da variedade Fascínio, produzidos em ambientes protegidos tipo capela cobertos com Filme Agrícola (FA) e Policarbonato (PL).

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Fcal			CV (%)
		F.A.	P.L.		Amb. (A)	Trat. (T)	(A) x (T)	
Prod ¹ . (t. ha ⁻¹)	0,2	155,44aA	133,88aA	144,63a	0,716 ^{ns}	25,858*	1,300 ^{ns}	19,48
	0,3	113,29bA	116,67aA	114,98b				
	0,4	100,03bA	83,94bA	91,99c				
	0,5	73,19cA	85,47bA	79,33c				
	0,6	66,41cA	65,24bA	65,82d				
	Média	101,67A	97,04A					
PT (kg planta ⁻¹)	0,2	5,444bA	4,213cB	4,829c	2,424 ^{ns}	23,207*	4,116*	9,32
	0,3	5,765bA	5,644bA	5,704b				
	0,4	6,730aA	6,175bA	6,453a				
	0,5	6,378aB	7,165aA	6,771a				
	0,6	7,007aA	6,866aA	6,937a				
	Média	6,265	6,013					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; (*) houve diferença significativa do fator analisado; (^{ns}) não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). ¹Considerando uma população de ²40.000; ³26.666; ⁴20.000; ⁵16.000 e ⁶13.332 plantas ha⁻¹.

O agrupamento dos espaçamentos analisados de acordo com os dados de produção (produção comercial por ha⁻¹, massa de frutos comerciais, número de frutos comerciais, produção de frutos G, produção de frutos M, produção de frutos P e perda de produção) usados na análise de cluster separou os tratamentos em 2 grupos (Figura 17).

No agrupamento à esquerda é notada maior semelhança entre os espaçamentos FA 0,3 e FA 0,5 m que ficaram próximos do FA 0,2 m. Também ocorreu semelhança entre os espaçamentos PL 0,3 e PL 0,4 m, e a maior dissimilaridade ocorreu no espaçamento PL 0,2 m em relação ao grupo. Os espaçamentos FA 0,4 e PL 0,5 m com leve redução na similaridade máxima, estão agrupados a direita, também pode ser notada semelhança com o espaçamento PL 0,6 m e menor proximidade com ao espaçamento FA 0,6 m que compreendem o mesmo grupo.

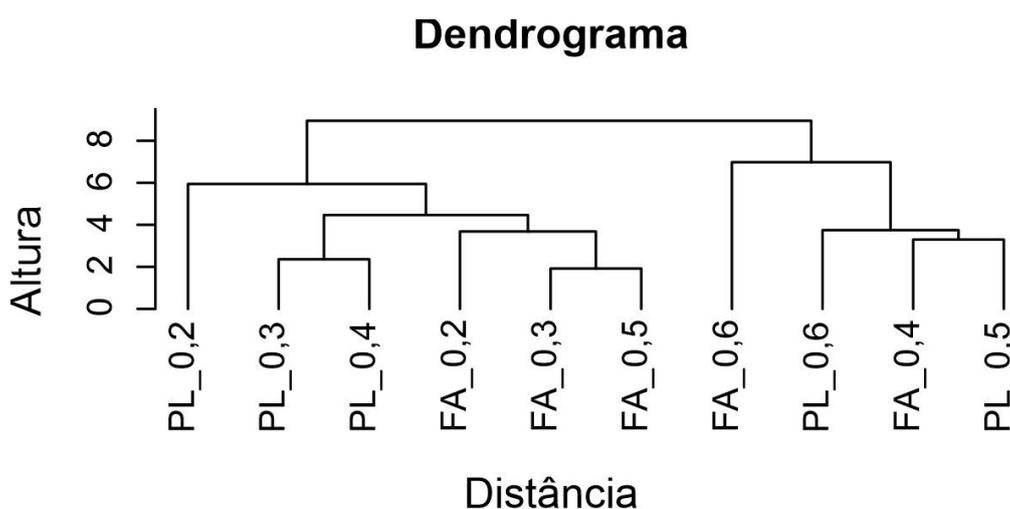


Figura 17. Análise de agrupamento dos espaçamentos estudados.

De acordo com os fatores produtivos, número de frutos comerciais (NFC), produção comercial (PC), produção de frutos médios (FM), massa de frutos não comerciais (MNC) e porcentagem de perdas o ambiente de cultivo não proporcionou diferenças entre os ambientes FA e PL (Tabela 7). Esta tendência de não apresentar aumento no desempenho produtivo foi observada no cultivo do tomate e pepino cultivados em estufas com coberturas de policarbonato e vidro (KWON et al., 2017).

Em relação ao número de frutos comerciais por planta, o espaçamento 0,2 m no ambiente PL apresentou uma média inferior se comparado aos outros espaçamentos submetidos ao mesmo ambiente (Figura suplementar 3 A), porém, não diferiu do espaçamento 0,2 m no ambiente FA. Estes resultados podem ser novamente atribuídos à menor oferta de energia luminosa disponível para as plantas no menor espaçamento estudado. Hachmann et al., (2014) constatou uma significativa redução no número de frutos com a redução do espaçamento entre plantas, sendo esta verificação atribuída como resposta à maior competição entre plantas. No entanto, frutos não comerciais foram encontrados em menor número no espaçamento 0,2 m cultivado sob ambiente PL. O adensamento e a redução na luminosidade parecem ter uma influência positiva sobre a produção de frutos comerciais por ha. Superando a maior produção individual por planta verificada nos maiores espaçamentos (Figura suplementar 3 B).

Também devemos ressaltar que ocorreu uma alteração nos dados obtidos no espaçamento 0,4 m do ambiente PL, que apresentou uma produção significativamente inferior de frutos comerciais em comparação ao espaçamento 0,4 m no ambiente FA. Porém, esta situação pode ser atribuída a maior produção de frutos não comerciais, e não a menor produção de frutos em si, como pode ser constatado na porcentagem de perda, que não apresentou nenhum resultado significativamente diferente entre ambientes ou espaçamentos. Todavia, demonstra uma tendência claramente superior de perda no espaçamento 0,4 m do ambiente PL em relação a todos os outros espaçamentos, o que pode ser atribuído a um pontual ataque de predadores.

Outros fatores apresentaram diferença significativa no resultado, como a produção de frutos grandes, que se mostrou 23% superior no ambiente PL, e a produção de frutos pequenos, que foi 43% superior no ambiente FA em relação ao ambiente PL (Tabela 7).

Podemos presumir que no ambiente PL ocorreu um melhor aproveitamento de fotoassimilados para o desenvolvimento de frutos grandes, em detrimento de frutos pequenos. Este direcionamento de recursos e energia para os frutos maiores também refletiu na massa de frutos comerciais, que foi

significativamente maior no ambiente PL em média 4,5% superior em relação ao observado no ambiente FA.

Sabendo que a interação planta, ambiente, radiação está muito relacionada à época do ano e as condições atmosféricas durante o período de cultivo, mais estudos devem ser realizados a fim de encontrar o grau de interferência ótimo na radiação solar, de maneira a ser benéfico à produção de frutos grandes, sem comprometer a produtividade.

Tabela 7. Número de frutos comerciais por planta – NFC (unidade planta⁻¹), produção comercial – PC (kg planta⁻¹), produção de frutos grandes – FG (kg planta⁻¹), produção de frutos médios - FM (kg planta⁻¹), produção de frutos pequenos – FP (kg planta⁻¹), massa de frutos comerciais – MFC (g fruto⁻¹), massa total de frutos não comerciais - MNC (kg planta⁻¹) e percentagem de perda de frutos – Perda (%) da cultivar Fascínio, produzida nos ambientes protegidos cobertos com filme agrícola (FA) e policarbonato (PL).

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Fcal			CV (%)
		F.A.	P.L.		Amb. (A)	Trat. (T)	(A) x (T)	
NFC (unidade planta ⁻¹)	0,2	38,53aA	31,99bA	35,26b	2,082 ^{ns}	5,234*	1,560*	15,36
	0,3	42,73aA	42,63aA	42,68a				
	0,4	49,23aA	40,36aB	44,79a				
	0,5	44,96aA	49,39aA	47,18a				
	0,6	47,76aA	45,26aA	46,51a				
	Média	44,64A	41,93A					
PC (kg planta ⁻¹)	0,2	3,886aA	3,347bA	3,616b	0,247 ^{ns}	5,241*	1,594 ^{ns}	17,05
	0,3	4,248aA	4,375bA	4,312a				
	0,4	5,001aA	4,197bA	4,599a				
	0,5	4,574aA	5,342aA	4,958a				
	0,6	4,981aA	4,893aA	4,937a				
	Média	4,538A	4,431A					
FG (kg planta ⁻¹)	0,2	1,072aA	1,290aA	1,181a	8,555*	1,206 ^{ns}	0,479*	31,64
	0,3	1,115aA	1,468aA	1,291a				
	0,4	1,279aA	1,465aA	1,372a				
	0,5	1,205aB	1,874aA	1,540a				
	0,6	1,328aA	1,708aA	1,518a				
	Média	1,200B	1,561A					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado; ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

“TABELA continuação”

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Amb. (A)	Fcal		CV (%)
		F.A.	P.L.			Trat. (T)	(A) x (T)	
FM (kg planta ⁻¹)	0,2	2,351aA	1,805bA	2,078b	1,890 ^{ns}	3,945*	1,793*	20,31
	0,3	2,574aA	2,543aA	2,558a				
	0,4	3,110aA	2,358bB	2,734a				
	0,5	2,678aA	3,074aA	2,876a				
	0,6	2,944aA	2,839aA	2,891a				
	Média	2,731A	2,524A					
FP (kg planta ⁻¹)	0,2	0,462aA	0,250aA	0,356a	23,147*	1,551 ^{ns}	0,327*	40,71
	0,3	0,534aA	0,340aA	0,437a				
	0,4	0,611aA	0,373aA	0,492a				
	0,5	0,690aA	0,392aB	0,541a				
	0,6	0,709aA	0,345aB	0,527a				
	Média	0,601A	0,340B					
MFC (g fruto ⁻¹)	0,2	101,05aA	104,56aA	102,80a	5,982*	0,555 ^{ns}	0,214 ^{ns}	6,72
	0,3	98,53aA	103,49aA	101,01a				
	0,4	102,52aA	104,89aA	103,70a				
	0,5	100,75aA	108,46aA	104,60a				
	0,6	102,43aA	107,93aA	105,18a				
	Média	101,05B	105,86A					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado; ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

“TABELA continuação”

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Fcal			CV (%)
		F.A.	P.L.		Amb. (A)	Trat. (T)	(A) x (T)	
MNC (kg planta ⁻¹)	0,2	1,558aA	866bB	1,212b	1,286 ^{ns}	5,506*	1,539*	27,25
	0,3	1,516aA	1,269bA	1,392b				
	0,4	1,728aA	1,978aA	1,853a				
	0,5	1,803aA	1,822aA	1,813a				
	0,6	2,026aA	1,972aA	1,999a				
	Média	1,726A	1,582A					
Perda %	0,2	29,37aA	21,33aA	25,35a	1,141 ^{ns}	0,670 ^{ns}	0,984 ^{ns}	29,25
	0,3	27,19aA	22,98aA	25,08a				
	0,4	26,17aA	31,69aA	28,93a				
	0,5	29,22aA	25,48aA	27,35a				
	0,6	30,48aA	28,89aA	29,68a				
	Média	28,49A	26,07A					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado; ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

5.5 Análise destrutiva

As massas de folhas, caules e diâmetro dos caules, não foram influenciadas pelos tratamentos do presente estudo (Tabela 8). Resultados semelhantes foram encontrados por Mutwiwa et al., (2017) quando compararam ambientes protegidos tratados ou não, com uma tinta especial de sombreamento, composta por pigmentos refletivos de infravermelho próximo (NIR), e também por Stanghellini et al., (2011) para a biomassa de rosas produzidas sob material refletivo de (NIR) onde foi observado que a redução na intensidade luminosa no interior das estruturas de cultivo parece não exercer influência sobre a massa seca produzida.

Quando verificado apenas os espaçamentos utilizados, no ambiente PL, os espaçamentos 0,2 e 0,6 m apresentaram massa seca foliar inferiores aos demais, embora não tenham sido significativamente diferentes do ambiente FA com mesmo espaçamento. Esta diferença foi observada no espaçamento 0,4 m, que se apresentou significativamente maior no ambiente PL, no entanto, a diferença no peso seco das folhas não pôde ser correlacionada a uma maior área foliar do espaçamento 0,4 m dentro do mesmo ambiente PL, e nem a uma menor área foliar do espaçamento 0,4 m dentro do ambiente FA. Da mesma maneira, o menor peso seco de folhas no espaçamento 0,6 m no ambiente PL não refletiu em menor área foliar média mensurada no mesmo espaçamento, o que pode ser resultado da adaptação morfológica das plantas a um ambiente sombreado, onde o aumento da área foliar não implicou no acúmulo de massa seca para este fim.

Plantas com área foliar reduzida foram observadas no espaçamento 0,2 m, em ambos os ambientes. Este comportamento se estendeu até o espaçamento 0,3 m no ambiente FA, uma vez que ocorreu uma média significativamente inferior aos demais espaçamentos. Esta maior competição por espaço nos espaçamentos mais adensados, culminaram em uma menor área foliar total, e menor massa seca no espaçamento 0,2 m no ambiente PL.

Sobre a média da variável área foliar, esta foi inferior no ambiente FA em comparação ao PL. Este resultado pode ser explicado pela maior disponibilidade luminosa oferecida no ambiente FA, que inibiu a expansão da

área foliar. Segundo Radim et al., (2003) folhas que crescem expostas ao sol são menores e mais espessas. De acordo com González et al., (2019) folhas de videira cultivadas em ambientes com baixa radiação PAR se mostraram mais finas e com maior superfície, além de uma maior concentração de pigmentos (clorofila e carotenóides) por unidade de folha, porém com biomassa semelhante às cultivadas a pleno sol.

Para o fator área foliar, os espaçamentos 0,2 e 0,6 m não apresentaram diferença significativa entre os ambientes FA e PL, diferente do que ocorreu com os espaçamentos 0,3, 0,4 e 0,5 m. Como também pode ser verificado na regressão que apresentou tendência linear no ambiente FA e polinomial no ambiente PL (Figura suplementar 4 A). Desta maneira, podemos presumir que estes são os limites espaciais para que a incidência de radiação provoque interferência morfológica na área foliar, ou seja, plantas cultivadas muito próximas provocam alto sombreamento, e plantas cultivadas a 0,6 m ou mais distantes não demonstraram interferência significativa pela cobertura com filtro de radiação, já que encontraram espaço suficiente para captação da radiação luminosa.

Quando analisamos o índice de área foliar, foi verificado a mesma tendência entre os ambientes já discutida para a área foliar, onde o índice foi significativamente maior no ambiente PL em relação ao FA. Lopes et al., (2011) encontraram índices de até 4,05 no auge do desenvolvimento da cultivar SM 16, valor muito próximo as médias de 3,90 e 5,07 verificadas neste estudo para os ambientes FA e PL, respectivamente. Enquanto Huilipang (2019), encontrou índices de 1,23, 1,39 e 1,64 para plantas da variedade Mykonos de hábito determinado, cultivadas a pleno sol e sob diferentes telas de cobertura respectivamente. Já Reis et al., (2013) verificaram índices de 2,82 para o híbrido Letícia cultivado sob estufa coberta com filme agrícola. Este índice de área foliar, em média 23% superior no ambiente PL em relação ao FA, pode ser considerado uma adaptação morfológica desenvolvida pelas plantas em resposta a menor incidência de radiação PAR no ambiente.

Ainda podemos verificar que no ambiente FA não ocorreu diferença significativa entre os espaçamentos testados, enquanto no ambiente PL esta diferença ocorreu entre os espaçamentos 0,2 e 0,3 m que foram até 50%

superiores aos espaçamentos 0,4, 0,5 e 0,6 m, indicando novamente que a competição por espaço somado a menor incidência luminosa induziu a um maior índice de área foliar.

Ainda podemos verificar uma tendência inversamente proporcional do índice de área foliar em relação a área foliar, enquanto as menores áreas foliares por planta foram mensuradas nos espaçamentos mais adensados, muito provavelmente devido à grande competição por espaço, também foram nestes espaçamentos onde encontramos os maiores índices de área foliar. E quando comparamos a grande densidade de folhas, e a incidência luminosa na base das plantas, observamos uma alta interceptação de radiação solar, ou seja, um alto aproveitamento da luminosidade disponível.

Com relação à altura de planta, o ambiente policarbonato apresentou médias superiores ao tratamento filme agrícola em todos os espaçamentos testados, (Figura suplementar 4 B) o que pode ser explicado pela menor incidência de radiação infravermelha promovida pelo telhado de policarbonato com fluxo contínuo de água, que estimulou o alongamento das plantas. Meijer et al., (2021) observaram o alongamento do caule em tomateiros expostos a baixos índices de radiação infravermelha vermelha distante. Otoni et al., (2012) também verificaram um aumento linear na altura das plantas em função do maior sombreamento.

Ao analisarmos o desdobramento da altura de plantas dentro dos espaçamentos no ambiente FA podemos verificar que os espaçamentos 0,5 e 0,6 m apresentaram médias inferiores aos demais espaçamentos, isto pode ter ocorrido devido a maior área lateral disponível para o crescimento e captação luminosa, desestimulando o seu estiolamento.

Os tratamentos não influenciaram no parâmetro diâmetro de caule (Tabela 8).

Tabela 8. Massa seca de folhas em gramas por planta – Massa Folhas (g. planta⁻¹), peso seco massa de caules em gramas por planta – Massa Caules (g. planta⁻¹), área foliar em centímetros quadrados – Área Foliar – (cm² planta⁻¹), índice de área foliar - IAF-(cm² planta⁻¹/cm² solo), altura de plantas (cm planta⁻¹), diâmetro de caule (cm planta⁻¹).

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Amb. (A)	Fcal		CV (%)
		F.A.	P.L.			Trat. (T)	(A) x (T)	
Massa Folhas (g. planta⁻¹)	0,2	128,47aA	128,69bA	128,58a	0,010 ^{ns}	1,775*	2,497*	17,35
	0,3	151,63aA	145,68aA	148,65a				
	0,4	127,28aB	165,17aA	146,22a				
	0,5	149,52aA	151,11aA	150,31a				
	0,6	146,26aA	115,93bA	131,09a				
	Média	140,63A	141,31A					
Massa Caules (g. planta⁻¹)	0,2	92,41aA	77,07aA	84,74a	1,623 ^{ns}	0,215 ^{ns}	0,908 ^{ns}	21,91
	0,3	93,16aA	83,24aA	88,20a				
	0,4	87,44aA	90,70aA	89,07a				
	0,5	88,19aA	95,21aA	91,70a				
	0,6	101,69aA	81,58aA	91,60a				
	Média	92,58A	85,54A					
Área Foliar (cm² planta⁻¹)	0,2	13139bA	16081bA	14610b	13,273*	6,131*	0,984*	23,51
	0,3	15257bB	23595aA	19426a				
	0,4	19621aB	26251aA	22936a				
	0,5	19743aB	26147aA	22945a				
	0,6	23390aA	24209aA	23800a				
	Média	18230B	23257A					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado; ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

“TABELA continuação”

Variáveis	Trat.	Ambientes		Média	Amb. (A)	Fcal		CV (%)
		F.A.	P.L.			Trat. (T)	(A) x (T)	
IAF (cm ² planta ⁻¹ /cm ² solo)	0,2	5,25aA	6,43aA	5,84a	11,930*	8,208*	0,991*	26,71
	0,3	4,06aB	6,29aA	5,18a				
	0,4	3,92aA	5,25bA	4,58b				
	0,5	3,15aA	4,18bA	3,67b				
	0,6	3,11aA	3,22bA	3,17b				
	Média	3,90B	5,07A					
Altura de Planta (cm planta ⁻¹)	0,2	116,40aB	154,40aA	135,40a	42,592*	3,390*	0,150*	16,15
	0,3	115,60aB	154,40aA	135,00a				
	0,4	122,20aB	151,60aA	136,90a				
	0,5	94,00bB	135,00aA	114,50b				
	0,6	92,40bB	134,60aA	113,50b				
	Média	108,12B	146,00A					
Diâmetro de Caule (cm planta ⁻¹)	0,2	11,20aA	11,40aA	11,30a	1,744 ^{ns}	0,828 ^{ns}	0,464 ^{ns}	23,35
	0,3	12,40aA	12,20aA	12,30a				
	0,4	13,40aA	10,40aA	11,90a				
	0,5	13,80aA	12,40aA	13,10a				
	0,6	13,80aA	12,80aA	13,30a				
	Média	12,92A	11,84A					

FA- Filme agrícola; PL- Policarbonato; * Houve diferença significativa do fator analisado; ^{ns} Não houve diferenças significativas dentro do fator analisado. Letras iguais minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem significativamente entre os espaçamentos de plantas e os ambientes pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

Na figura 18 pode ser observado que a PCA 1 explica 38,5% das variâncias enquanto a PCA 2 explica 31%, logo, 69,5% das variâncias podem ser explicadas pela análise dos componentes principais.

A variabilidade da PCA 1 é explicada principalmente pelas variáveis eficiência do uso da água (EUA), massa de frutos comerciais (MFC) e produção de frutos comerciais grandes (FG), inversamente proporcional as variáveis radiação PAR na base das plantas (AccuPAR), produção de frutos comerciais pequenos (FP), produção de frutos comerciais médios (FM) e produção total de frutos comerciais (PC). Na PCA 2 a variável radiação PAR acima do dossel (Sensor PAR) é inversamente proporcional ao índice de área foliar (IAF). Os ambientes avaliados estão posicionados em quadrantes opostos mostrando a variabilidade dos dados encontrados em cada uma das estruturas de cultivo.

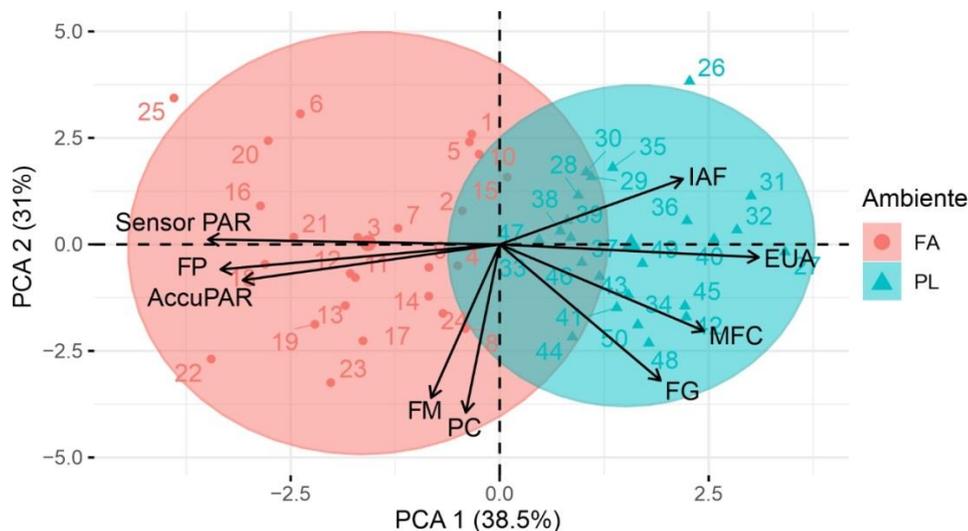


Figura 18. Projeção bidimensional da análise PCA dos dados de produção e radiação PAR.

A produção de hortaliças em casas de vegetação localizadas em regiões tropicais ainda demanda de mais estudos para se encontrar o material de cobertura e o método de resfriamento adequado a cada situação, a fim de melhorar o micro clima e o crescimento das plantas (MUTWIWA et al., 2017).

O desenvolvimento de materiais e métodos bloqueadores de (NIR) sem afetar a transmissão da radiação (PAR), parece ser o caminho mais

promissor no aperfeiçoamento de ambientes de cultivo destinados a produção de diversas espécies vegetais, em climas considerados quentes e úmidos.

Ainda podemos afirmar que a maior taxa fotossintética verificada no ambiente FA, não promoveu maior acúmulo de biomassa e nem uma produção significativamente superior em comparação ao ambiente PL, demonstrando que a cobertura com policarbonato pode oferecer uma condição de desenvolvimento adequada às necessidades da cultura do tomateiro, com o benefício da redução no uso da água, e sem prejuízo significativo ao desempenho produtivo.

6. CONCLUSÕES

O ambiente coberto com filme agrícola permitiu uma maior transmissão de radiação Global e PAR, apresentando frutos com maior concentração de β -caroteno, fenóis e saturação da cor vermelha.

O ambiente de cultivo coberto com policarbonato preenchido com um fluxo contínuo de água foi eficiente na redução da carga luminosa e temperatura das folhas. Os frutos produzidos neste ambiente apresentaram maior teor de licopeno e maior capacidade antioxidante. As plantas cultivadas sob a cobertura de policarbonato apresentaram maior índice de área foliar, altura de plantas, produção de frutos grandes e maior massa de frutos comerciais. A cobertura de policarbonato pode ser recomendada para regiões com alta incidência solar.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-GHANY, A. M.; AL-HELAL, I. M.; ALZHRANI, S. M.; ALSADON, A. A.; ALI, I. M.; ELLEITHY, R. M. Covering materials incorporating radiation-preventing techniques to meet greenhouse cooling challenges in arid regions: a review. **The Scientific World Journal**, v. 2012, p, 906360-906360, 2012.
- ABDEL-GHANY, A. M.; PICUNO, P.; AL-HELAL, I.; ALSADON, A.; IBRAHIM, A.; SHADY, M. Radiometric characterization, solar and thermal radiation in a greenhouse as affected by shading configuration in an arid climate. **Energies**, v. 8, n. 12, p. 13928-13937, 2015.
- ABREU, W. C.; BARCELOS, M. D. F. P. Atividade antioxidante total da polpa de tomate submetida ao processamento térmico doméstico em diferentes tempos. **Journal of Health Sciences**, v. 14, n. 2, 2012.
- AHMAD, P. SARWAT, M. SHARMA, S. Reactive oxygen species, antioxidants and signaling in plants. **Journal of Plant Biology**, v. 51, n. 3, p. 167-173, 2008.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDRADE, J. W. S.; FARIAS JÚNIOR, M.; SOUSA, M. A.; ROCHA, A. C. Utilização de diferentes filmes plásticos como cobertura de abrigos para cultivo protegido. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá-PR, v. 33, n. 3, p. 437-443, 2011.
- ANDRIOLO, J.L. Fisiologia da produção de hortaliças em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v. 18, p. 26- 33, suplemento, 2000.
- ARAÚJO, S. A. C.; DEMINICIS, B. B. Fotoinibição da fotossíntese. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 7, p. 463-472, 2009.
- BAKKER, J. C. Greenhouse climate control: Constraints and limitations. **Acta horticulturae**, v. 399, p. 25-33, 1995.
- BARBOSA, M. R.; SILVA, M. M. D. A.; WILLADINO, L.; ULISSES, C.; CAMARA, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, n. 44, p. 453-460, 2014.
- BECKMANN, M. Z.; DUARTE, G. R. B.; PAULA, V. A. D.; MENDEZ, M. E. G. PEIL, R. M. N. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 86-92, Santa Maria: 2006.
- BELLO, T. B.; COSTA, A. G.; SILVA, T. R. D.; PAES, J. L.; De OLIOVEIRA, M. V. Tomato quality based on colorimetric characteristics of digital images. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 567-572, 2020.

BRAMLEY, P. M. Is lycopene beneficial to human health?. **Phytochemistry**, v. 54, n. 3, p. 233-236, 2000.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. L. W. T. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT-Food science and Technology**, v. 28, n. 1, p. 25-30, 1995.

BORGUINI, R. G. **Tomate (*Lycopersicum esculentum* mill) orgânico: o conteúdo nutricional e a opinião do consumidor**. 2002. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

BORGUINI, R. G.; SILVA, M. V. Características físico-químicas e sensoriais do tomate (*Lycopersicon esculentum*) produzido por cultivo orgânico em comparação ao convencional. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 16, n. 4, p. 355-361, 2009.

CALDERÓN, J. C.; CALDERÓN, J. L.; HERNÁNDEZ, E. G.; VILLANOVA, B. G. Antioxidant capacity, phenolic content and vitamin C in pulp, peel and seed from 24 exotic fruits from Colombia. **Food research international**, v. 44, n. 7, p. 2047-2053, 2011.

CALIMAN, F. R. B.; SILVA, D. J. H. D.; FONTES, P. C. R.; STRINGHETA, P. C.; MOREIRA, G. R.; CARDOSO, A. A. Avaliação de genótipos de tomateiro cultivados em ambiente protegido e em campo nas condições edafoclimáticas de Viçosa. **Horticultura Brasileira**, v. 23, n. 2, p. 255-259, abr.-jun. Brasília: 2005.

CANDIAN, J. S. **Tipos de condução de hastes na produção e na qualidade de mini tomate em manejo orgânico**. 2015. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CARDOSO, F. B.; MARTINEZ, H. E. P.; SILVA, D. J. H. D.; MILAGRES, C. D. C.; BARBOSA, J. G. Yield and quality of tomato grown in a hydroponic system, with different planting densities and number of bunches per plant. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, p. 340-349, 2018.

CAVALCANTI, S. D.; LUCENA, A. C.; SANTOS, L. S.; GUISELINI, C.; MENEZES, D. Efeito do ambiente protegido na produção de tomate nas condições climáticas do recife. In: **XVIII CBA e VII Reunião Latino Americana de Agrometeorologia**, Belém, 2013.

CHAHIDI, L. O.; MECHAQRANE, A. Greenhouse Design Selection in Moroccan Climatic Conditions. In: **WITS 2020**, Springer, Singapore, p. 639-648, 2022.

CHOI, S. T.; TSOUVALTZIS, P.; LIM, C. I.; HUBER, D. J. Suppression of ripening and induction of asynchronous ripening in tomato and avocado fruits subjected to complete or partial exposure to aqueous solutions of 1-methylcyclopropene. **Postharvest Biology and Technology**, v. 48, n. 2, p. 206-214, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Tomate: Análise dos indicadores da produção e comercialização no mercado mundial Brasileiro e Catarinense**, Brasília, Conab. Compêndio de estudos, v. 1, 2019.

CONCENÇO, G.; FERREIRA, E. A.; SILVA, A. A.; FERREIRA, F. A.; VIANA, R. G.; D'ANTONINO, L.; VARGAS, L.; FIALHO, C. M. T. Uso da água em biótipos de azevém (*Lolium multiflorum*) em condições de competição. **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 449-455, 2007.

COSTA, E., SANTO, T. L., SILVA, A. P., SILVA, L. E., OLIVEIRA, L. C., BENETT, C. G., & BENETT, K. S. Ambientes e substratos na formação de mudas e produção de frutos de cultivares de tomate cereja. **Horticultura Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 110-118, 2015.

DUMAS, Y.; DADOMO, M.; Di LUCCA, G.; GROLIER, P. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 83, n. 5, p. 369-382, 2003.

EMBRAPA. **Cultivo do tomateiro em sistema de plantio direto de hortaliças (SPDH)**, Circular Técnica 168, Brasília, 2019.

EMBRAPA. **A cultura do tomate**, Brasília, 2022.

ENRÍQUEZ, J. L. **Estudio del efecto de la calidad de luz sobre la síntesis y la acumulación de licopeno en frutos de tomate cultivados en invernadero**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências dos Alimentos) – Universidade autónoma de Querétaro, Querétaro – México.

FAGUNDES, J. L.; SILVA, S. C. D.; PEDREIRA, C. G. S.; CARNEVALLI, R. A., Carvalho, C. A. B. D.; SBRISSIA, A. F.; PINTO, L. F. D. M. Índice de área foliar, coeficiente de extinção luminosa e acúmulo de forragem em pastagens de *Cynodon* spp. sob lotação contínua. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 187-195, 2001.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Production quantities of Tomatoes by country**, 2021.

FATTORE, M.; MONTESANO, D.; PAGANO, E.; TETA, R.; BORRELLI, F.; MANGONI, A.; ALBRIZIO, S. Carotenoid and flavonoid profile and antioxidant activity in “Pomodoro Vesuviano” tomatoes. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 53, p. 61-68, 2016.

FELLER, U.; ANDERS, I.; MAE, T. Rubiscolytics: fate of Rubisco after its enzymatic function in a cell is terminated. **Journal of experimental botany**, v. 59, n. 7, p. 1615-1624, 2008.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS. **Revista brasileira de biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**, 3 ed. Viçosa: UFV, 2008. 412p.

FURLANI, P.R.; FAQUIN, V.; ALVARENGA, M. A. R. **Produção em Hidroponia. Tomate: produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia**, 1 ed. Lavras: UFLA, Cap. 8, p. 191-212, 2004.

GHOULEM, M.; EL MOUEDDEB, K.; NEHDI, E.; BOUKHANOUF, R.; CALAUTIT, J. K. Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. **Biosystems Engineering**, n. 183, p. 121-150, 2019.

GODINHO, N. C. **Utilização de permutadores de calor ar-solo na climatização de estufas agrícolas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Eletromecânica) – Universidade da Beira Interior, Covilhã.

GONZÁLEZ, C. V.; JERÉZ, D. N.; JOFRÉ, M. F.; GUEVARA, A.; PRIETO, J.; MAZZA, C.; GIORDANO, C. V. Blue light attenuation mediates morphological and architectural acclimation of *Vitis vinifera* cv. Malbec to shade and increases light capture. **Environmental and Experimental Botany**, v. 157, p. 112-120, 2019.

GUIMARÃES, M. A. S.; NASCIMENTO, A. R.; JUNIOR, L. C. C.; Da SILVA, F. A. Efeito do ensacamento na qualidade e incidência de danos em frutos de tomate mesa do tipo “Compack”. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, 2020.

GULLINO, M. L.; ALBAJES, R.; AI-JBOORY, I.; ANGELOTTI, F.; CHAKRABORTY, S.; STEPHENSON, T. Scientific review of the impact of climate change on plant pests. - A global challenge to prevent and mitigate plant pest risks in agriculture, forestry and ecosystems. **FAO on behalf of the IPPC Secretariat**, Rome, 2021.

HACHMANN, T. L.; ECHER, M. D. M.; DALASTRA, G. M.; VASCONCELOS, E. S.; GUIMARÃES, V. F. Cultivo do tomateiro sob diferentes espaçamentos entre plantas e diferentes níveis de desfolha das folhas basais. **Bragantia**, v. 73, n. 4, p. 399-406, 2014.

HACHMANN, T. L.; LORENZONI, M. Z.; SOUZA, Á. H. C. D.; SERON, C. D. C.; DALASTRA, G. M.; ECHER, M. D. M. Curso diário dos índices de trocas gasosas de duas cultivares de tomateiro. In: **Encontro Internacional de Produção Científica UniCesumar (IX EPCC)**, n. 9, p. 4-8, 2015.

HEINE, A. J. M.; MORAES, M. O. B.; PORTO, J. S.; SOUZA, J. R.; REBOUÇAS, T. N. H.; SANTOS, B. S. R. Número de haste e espaçamento na produção e qualidade do tomate. **Scientia plena**, v. 11, n. 9, 2015.

HOFFMANN, S.; WAAIJENBERG, D. Design, construction and maintenance of greenhouse structures. **Acta Horticulturae**, n. 7, v. 10, p. 202-210, 2002.

HOFFMANN, G. Principles and working mechanisms of water-filtered infrared-A (wIRA) in relation to wound healing. **GMS Krankenhaushygiene Interdisziplinär**, n. 2, v. 2, 2007.

HOLCMAN, E. **Microclima e produção de tomate tipo cereja em ambientes protegidos com diferentes coberturas plásticas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

HOLCMAN, E.; SENTELHAS, P. C.; MELLO, S. Da C. Cherry Tomato Yield in Greenhouses with Different Plastic Covers. **Ciência Rural**, v. 47, n. 10, 2017.

HUILIPANG, Á. A. U. **Producción y calidad del tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) en respuesta al tipo de fertilización y la cobertura con mallas sombra**. 2019. Dissertação (Mestrado em Produção e Proteção Vegetal). Universidade de Concepción. 74 f. Chillán-Chile.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE**. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola Safra 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE**: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas ano civil 2021.

KASAMPALIS, D. S.; TSOUVALTZIS, P.; SIOMOS, A. S. Chlorophyll fluorescence, non-photochemical quenching and light harvesting complex as alternatives to color measurement, in classifying tomato fruit according to their maturity stage at harvest and in monitoring postharvest ripening during storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. 161, p. 111036, 2020.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. Package 'factoextra': Extract and visualize the results of multivariate data analyses. **CRAN- R Package**, p. 84, 2020.

KEMPKES, F.; STANGHELLINI, C.; HEMMING, S.; DAI, J. Cover materials excluding near infrared radiation: Effect on greenhouse climate and plant processes. **Acta Horticulturae**, v. 797, p. 477-482, 2008.

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

KWON, J. K.; KHOSHIMKHUJAEV, B.; LEE, J. H.; YU, I. H.; PARK, K. S.; CHOI, H. G. Growth and yield of tomato and cucumber plants in polycarbonate

or glass greenhouses. **Horticultural Science and Technology**, v. 35, n. 1, p. 79-87. 2017.

LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fresnel lenses, NIR-and UV-blocking materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 271-287, 2013.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**, Tradução: Prado, C. H. B. A. São Carlos, SP, RiMa Artes e Textos, 2000, p. 41-57.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Environment International**, v. 25, n. 1, p. 1–19, 2008.

LI, B.; SHUKLA, M. K.; DU, T. Combined environmental stresses induced by drip irrigation positively affect most solar greenhouse grown tomato fruit quality. **Scientia Horticulturae**, v. 288, p. 110334, 2021.

LOPES, W. D. A.; NEGREIROS, M. Z. D.; DOMBROSKI, J. L. D.; RODRIGUES, G. S. D. O.; SOARES, A. M.; ARAÚJO, A. D. P. Análise do crescimento de tomate 'SM-16' cultivado sob diferentes coberturas de solo. **Horticultura brasileira**, v. 29, n. 4, p. 554-561, 2011.

MABOKO, M. M.; PLOOY, C. P. D.; CHILOANE, S. Yield of determinate tomato cultivars grown in a closed hydroponic system as affected by plant spacing. **Horticultura Brasileira**, v. 35, n. 2, p. 258–264, 2017.

MACHADO, A. Q.; ALVARENGA, M. A. R.; FLORENTINO, C. E. T. Produção de tomate italiano (saladete) sob diferentes densidades de plantio e sistemas de poda visando ao consumo *in natura*, **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 2, p. 149-153, 2007.

MAREK, J. **Efeitos fisiológicos e metabólicos em tomateiros por estrobilurinas e carboxamidas**. 2018. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Centro-Oeste, 149 f. Guarapuava.

MAX, J. F.; HORST, W. J.; MUTWIWA, U. N.; TANTAU, H. J. Effects of greenhouse cooling method on growth, fruit yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in a tropical climate. **Scientia Horticulturae**, v. 122, n. 2, p. 179-186, 2009.

MEIJER, D.; MEISENBURG, M.; VAN LOON, J. J.; DICKE, M. Effects of low and high red to far-red light ratio on tomato plant morphology and performance of four arthropod herbivores. **Scientia Horticulturae**, v. 292, p. 110645. 2021.

MONTEIRO, C. S.; BALBI, M. E.; MIGUEL, O. G.; PENTEADO, P. D. S.; HARACEMIV, S. M. C. Qualidade nutricional e antioxidante do tomate “tipo italiano”. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 19, n. 1, p. 25-31, 2008.

MORALES, R. G. F.; RESENDE, L. V.; BORDINI, I. C.; GALVÃO, A. G.; REZENDE, F. C. Characterization of tomato plants subjected to water deficit. **Scientia Agraria**, v. 16, n. 1, p. 9-17, 2015.

MORENO-TERUEL, M. D. L. Á.; MOLINA-AIZ, F. D.; PEÑA-FERNÁNDEZ, A.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, A.; VALERA-MARTÍNEZ, D. L. The effect of diffuse film covers on microclimate and growth and production of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in a mediterranean greenhouse. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 860, 2021.

MORITZ, B.; TRAMONTE, V. L. C. Biodisponibilidade do licopeno. **Revista de Nutrição**, v. 19, n. 2, p. 265-273, 2006.

MUTWIWA, U. N.; TANTAU, H. J.; VON ELSNER, B.; MAX, J. F. Effects of a near infrared-reflecting greenhouse roof cover on the microclimate and production of tomato in the tropics. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 19, n. 3, p. 70-79, 2017.

MOURA, L. E.; GOLYNSKI, A. Critical points of industrial tomato from field to processing. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 521-525, 2018.

NAGATA, M.; YAMASHITA, I. Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi**, v. 39, n. 10, p. 925-928, 1992.

NASCIMENTO, D. S. **Influência do tipo de cobertura na produtividade do tomate em estufa**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônoma) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Lisboa.

NAVARRO-GONZÁLEZ, I.; PERIAGO, M. J. El tomate, ¿alimento saludable y/o funcional?. **Revista Española de Nutrición Humana y Dietética**, v. 20, n. 4, p. 323-335, 2016.

NAZIR, A.; SHAHEEN, M. R.; AYYUB, C. M.; HUSSAIN, R.; SARWER, N.; IMRAN, M.; JAWAD, Y. Exploring the better genetic options from indigenous material to cultivate tomato under high temperature regime. **J. Appl. Bot. Food Qual**, v. 90, p. 339-345, 2017.

NEVES, S.M.A.S.; SEABRA JUNIOR, S.; ARAÚJO, K.L.; SOARES NETO, E.R.; NEVES, R.J.; DALLACORT, R.; KREITLOW, J.P. Análise climática aplicada à cultura do tomate na região Sudoeste de Mato Grosso: subsídios ao desenvolvimento da agricultura familiar regional. **Ateliê Geográfico**, v. 7, n. 2, p. 97-115, 2013.

OTONI, B. D. S.; MOTA, W. F. D.; BELFORT, G. R.; SILVA, A. R. S.; VIEIRA, J. C. B.; ROCHA, L. D. S. Produção de híbridos de tomateiro cultivados sob diferentes porcentagens de sombreamento. **Revista Ceres**, v. 59, n. 6, p. 816-825, 2012.

PAULA, R. D. C. M.; SILVA, A. G.; COSTA, E.; BINOTTI, F. F. S. Monitoramento de variáveis micrometeorológicas em diferentes ambientes protegidos no período de inverno. **Revista de agricultura neotropical**, v. 4, n. 5, p. 103-109, 2017.

PBNH. Programa Brasileiro para Modernização da Horticultura. **Normas de classificação do tomate**. Centro de Qualidade em Horticultura, CQH/CEAGESP. São Paulo (CQH. Documentos, 26). 2003.

PEIXOTO, J. V. M.; MORAES, E. R.; PEIXOTO, J. L. M.; NASCIMENTO, A. R.; NEVES, J. G. Tomaticultura: Aspectos morfológicos e propriedades físico-químicas do fruto. **Revista Científica Rural**, v. 19, n. 1, p. 96-117, 2017.

PÉK, Z.; SZUVANDZSIEV, P.; NEMENYI, A.; HELYES, L.; LUGASI, A. The effect of natural light on changes in antioxidant content and color parameters of vine-ripened tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruits. **HortScience**, v. 46, n. 4, p. 583-585, 2011.

PINTO, L. I. C.; COSTA, M. H.; DINIZ, L. M. F.; SEDIYAMA, G. C.; PRUSKI, F. F. Comparação de produtos de radiação solar incidente à superfície para a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, p. 469-478, 2010.

PIRES, J. S. Ensaio em microplaca de substâncias redutoras pelo método do Folin-Ciocalteu para extratos de algas. **ResearchGate**, Instituto de Biociências. Universidade de São Paulo. 2017.

PURQUERIO, L. F. V.; TIVELLI, S. W. Manejo do ambiente em cultivo protegido. **Manual Técnico de Orientação**, Campinas, 11 p, 2006.

QUEZADO-DUVAL, A. M.; TEIXEIRA, A. D. O.; MEGGUER, C.; da SILVA, C. J.; PONTES, N. D. C.; BASÍLIO, E. Desempenho agrônômico e de qualidade de frutos de híbridos de tomate para processamento industrial sob irrigação subterrânea. **Embrapa Hortaliças-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2018.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; REISSER JUNIOR, C.; BARNI, N. A.; MATZENAUER, R.; DIDONÉ, I. A. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 9, p. 1017-1023, 2003.

RAJA, V.; QADIR, S. U.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. Impact of drought and heat stress individually and in combination on physio-biochemical parameters, antioxidant responses, and gene expression in *Solanum lycopersicum*. **3 Biotech**, v. 10, n. 208, p. 1-18, 2020.

RE, R.; PELLEGRINI, N.; PROTEGGENTE, A.; PANNALA, A.; YANG, M.; RICE-EVANS, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation

decolorization assay. **Free radical biology and medicine**, v. 26, n. 9-10, p. 1231-1237, 1999.

REIS, L. S.; SOUZA, J. L. D.; AZEVEDO, C. A.; LYRA, G. B.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; de LIMA, V. L. Componentes da radiação solar em cultivo de tomate sob condições de ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 739-744, 2012.

REIS, L. S.; AZEVEDO, C. A., ALBUQUERQUE, A. W.; JUNIOR, J. F. S. Índice de área foliar e produtividade do tomate sob condições de ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 4, p. 386-391, 2013.

ROCHA, D. K. MACIEL, G. M.; JUNIOR, E. F. F.; JÚNIOR, C. S. M.; NOGUEIRA, G. G. S.; ALMEIDA, R. S. Seleção de genótipos de tomateiro submetidos ao estresse hídrico em função da expressão de características fisiológicas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 2, p. 80-84, 2016.

ROSALES, M. A.; RUIZ, J. M.; HERNÁNDEZ, J.; SORIANO, T.; CASTILLA, N.; ROMERO, L. Antioxidant content and ascorbate metabolism in cherry tomato exocarp in relation to temperature and solar radiation. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86 n. 10, p. 1545-1551, 2006.

RUFINO, M. D. S. M.; ALVES, R. E.; BRITO, E. S.; MORAIS, S. M.; SAMPAIO, C. D. G.; PÉREZ-JIMENEZ, J.; SAURA-CALIXTO, F. D. Metodologia científica: determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre DPPH. **Embrapa Agroindústria Tropical-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2007.

RUFINO, M. S. A.; ALVES, R. E.; BRITO, E. S.; JIMÉNEZ, J. P.; CALIXTO, F. S.; MANCINI-FILHO, J. Bioactive compounds and antioxidant capacities of 18 non-traditional tropical fruits from Brazil. **Food chemistry**, v. 121, n. 4, p. 996-1002, 2010.

SANTOS, M. C.; JORGE, M. F.; SILVA, L. D.; SOUZA, J. L.; FERREIRA-JÚNIOR, R. A.; LYRA, G. B. Coeficiente de extinção da luz em dossel de tomate cereja cultivado em ambiente protegido. In: **XVIII CBA e VII Reunião Latino Americana de Agrometeorologia**, Belém, 2013.

SANTOS, J. C. P. D.; FERNANDES, M. R.; LIMA, R. C. A. D.; TEMP, M. S. Comportamento ótico de vidros e policarbonatos translúcidos frente à radiação solar. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 23, 2018.

SCHWARZ, K.; RESENDE, J. T. V.; PRECZENHAK, A. P.; PAULA, J. T.; FARIA, M. V.; DIAS, D. M. Desempenho agrônômico e qualidade físico-química de híbridos de tomateiro em cultivo rasteiro. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 3, p. 410-418, 2013.

SHAHEEN, M. R.; AYYUB, C. M.; AMJAD, M.; WARAICH, E. A. Morpho-physiological evaluation of tomato genotypes under high temperature stress conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 8, p. 2698-2704, 2016.

SHAMI, N. J. I. E.; MOREIRA, E. A. M. Licopeno como agente antioxidante. **Revista de Nutrição**, v. 17, n. 2, p. 227-236, 2004.

SHANMUKHI, C. H.; REDDY, M. L. N.; DORAJEE RAO, A.V.D.; ANJI-BABU, P. Flowering and yield in processing tomato varieties as influenced by planting density and fertigation. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 2, p. 3481-3485, 2018.

SILVA, V. S.; ORLANDELLI, R. C. Desenvolvimento de alimentos funcionais nos últimos anos: uma revisão. **Revista Uningá**, v. 56, n. 2, p. 182-194, 2019.

SOUZA, A. P.; ZAMADEI, T.; MONTEIRO, E. B.; CASAVECCHIA, B.; H. Transmissividade atmosférica da radiação global na região Amazônica de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4 (suppl), p. 639-648, 2016.

STANGHELLINI, C.; DAI, J.; KEMPKES, F. Effect of near-infrared-radiation reflective screen materials on ventilation requirement, crop transpiration and water use efficiency of a greenhouse rose crop. **Biosystems engineering**, v. 110, p. 261-271, 2011.

STREIT, M. N.; CANTERLE, P. L.; CANTO, M. W.; HECKTHEUER, L. H. H. As Clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 748-755, 2005.

SUBIN, M. C.; KARTHIKEYAN, R.; PERIASAMY, C.; SOZHARAJAN, B. Verification of the greenhouse roof-covering-material selection using the finite element method. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 357-366, 2020.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**, 6. ed., Artmed, 2017, p. 171-200.

TEAM, R. C. R development core team. r: A language and environment for statistical computing. **foundation for statistical computing**, Vienna, Austria, 2014.

TERAMOTO, E.T. e ESCOBEDO, J.F. Evolução diurna e anual da frequência das coberturas de céu em Botucatu/SP. **Energia na agricultura**, v. 27, n. 1, p. 37-52, 2012.

THIMIJJAN, R. W.; HEINS, R. D. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. **HortScience**, v. 18, n. 6, p. 818-822, 1983.

TOLESA, G. N.; WORKNEH, T. S. Influence of storage environment, maturity stage and pre-storage disinfection treatments on tomato fruit quality during

winter in KwaZulu-Natal, South Africa. **Journal of food science and technology**, v. 54, n. 10, p. 3230-3242, 2017.

TRENTO, D. A.; ANTUNES, D. T.; JÚNIOR, F. F.; ZANUZO, M. R.; DALLACORT, R.; JÚNIOR, S. S.. Desempenho de cultivares de tomate italiano de crescimento determinado em cultivo protegido sob altas temperaturas. **Nativa**, v. 9, n. 4, p. 359-356, 2021.

UN COMTRADE DATABASE. **ONU**, 2020.

VIDA, J. B.; ZAMBOLIM, L.; TESSMANN, D. J.; BRANDÃO FILHO, J. U. T.; VERZIGNASSI, J. R.; CAIXETA, M. P. Manejo de doenças em cultivos protegidos. **Fitopatologia brasileira**, v. 29, n. 4, Brasília, 2004

VIEIRA, M. C. D. S. **Investigação dos compostos bioativos em tomates (*Lycopersicon esculentum* L.) após o processamento térmico**, 2016. Dissertação (Mestrado em Horticultura). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas. 49 f. Botucatu.

VOLTAN, D. S.; BARBOSA, R. Z.; PEREA MARTINS, J. E. M.; ZIMBACK R. L. Análise da distribuição espacial da temperatura do ar em uma casa de vegetação. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 19. Botucatu. **Anais**, São Paulo: SGeA, 2011.

ZUCATTO, A.; SANDRI, M. Â. Produção de tomate em função do volume do recipiente de cultivo. In: **Mostra Técnico-Científica-MTC**, (IFRS) SICIT. 2017.

WAMSER, A. F.; VALMORBIDA, J.; SUZUKI, A.; HAHN, L.; MUELLER, S.; BECKER, W. F.; ENDER, M. M.. Planting density and arrangement for the mechanized spraying of vertically staked tomatoes. **Horticultura Brasileira**, v. 35, p. 519-526, 2017.

WANG, G.; KONG, F.; ZHANG, S.; MENG, X.; WANG, Y.; MENG, Q. A tomato chloroplast-targeted DnaJ protein protects Rubisco activity under heat stress. **Journal of experimental botany**, v. 66, n. 11, p. 3027-3040, 2015.

WICKHAM, H.; AVERICK, M.; BRYAN, J.; CHANG, W.; MCGOWAN, L.; FRANÇOIS, R.; GROLEMUND, G.; HAYES, A.; HENRY, L.; HESTER, J.; KUHN, M.; PEDERSEN, T.; MILLER, E.; BACHE, S.; MÜLLER, K.; OOMS, J.; ROBINSON, D.; SEIDEL, D.; SPINU, V.; ... YUTANI, H. Welcome to the Tidyverse. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019.

YURI, J. E.; COSTA, N. D.; RESENDE, G. M.; FERREIRA, T. D.; SILVA, M. C.. Produção de genótipos de tomate tipo salada em duas épocas de plantio. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 6, p. 1056-1064, 2016. ISSN 1982-7679 (On-line) Fortaleza, CE, INOVAGRI.

APÊNDICE

Material Suplementar

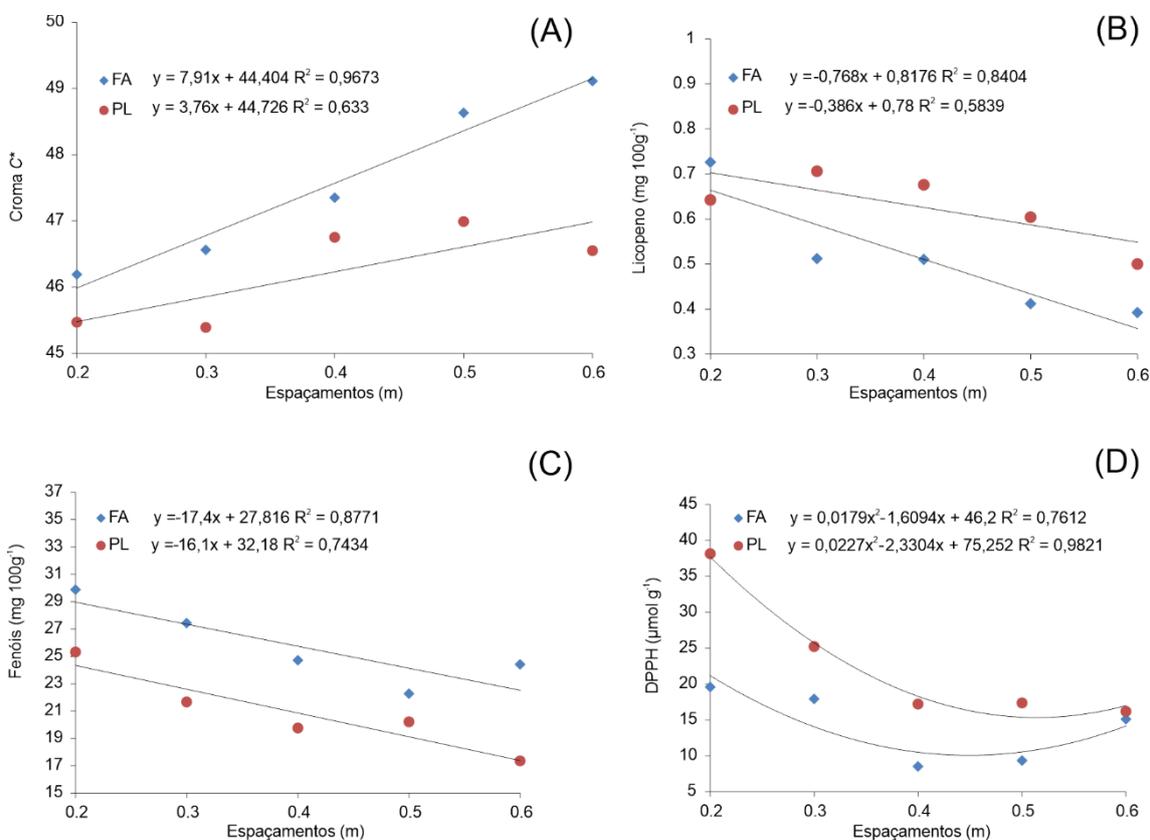


Figura suplementar 1. Regressão para as médias das características físico-químicas e bioquímicas Croma (A), Licopeno (B), Fenóis (C) e DPPH (D) para os ambientes de cultivo Filme Agrícola FA e Policarbonato PL e os espaçamentos entre plantas de tomateiro determinado Fascínio. Sinop, 2022. * significativo a 5% de probabilidade.

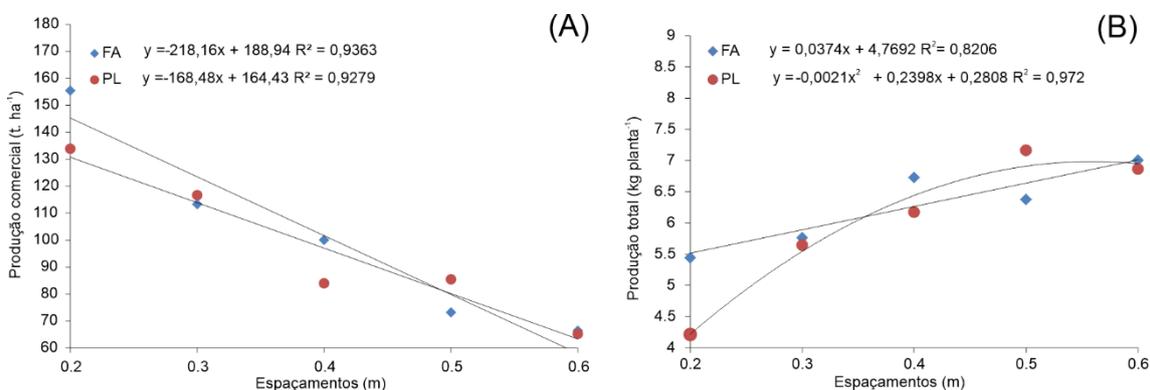


Figura suplementar 2. Regressão para as médias das características Produção comercial (t. ha⁻¹) (A) e Produção total (kg planta⁻¹) (B) para os ambientes de cultivo Filme Agrícola FA e Policarbonato PL e os espaçamentos entre plantas de tomateiro determinado Fascínio. Sinop, 2022. * significativo a 5% de probabilidade.

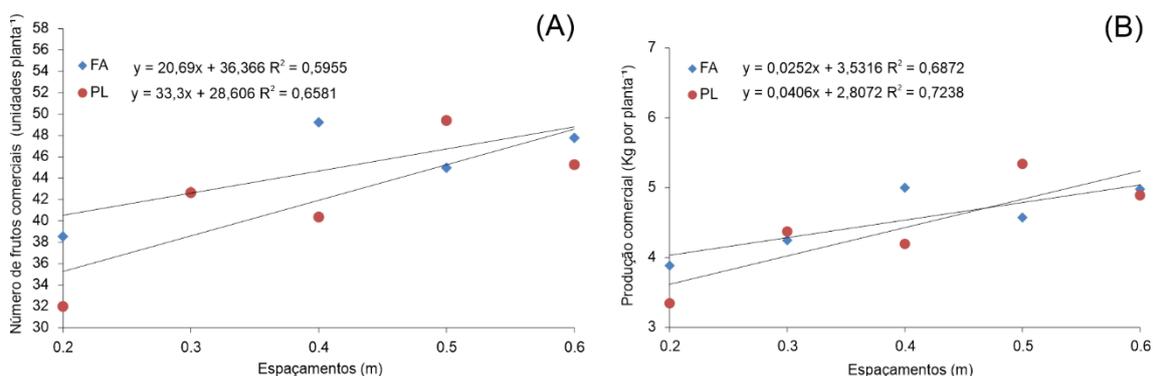


Figura suplementar 3. Regressão para as médias das características Número de frutos comerciais (A) e Produção comercial (B) para os ambientes de cultivo Filme Agrícola FA e Policarbonato PL e os espaçamentos entre plantas de tomateiro determinado Fascínio. Sinop, 2022. * significativo a 5% de probabilidade.

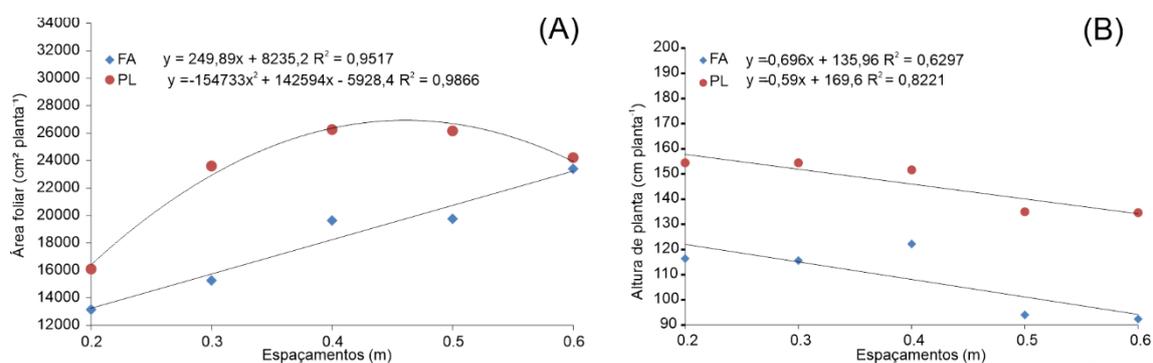


Figura suplementar 4. Regressão para as médias das características Área foliar (A) e Altura de planta (B) para os ambientes de cultivo Filme Agrícola FA e Policarbonato PL e os espaçamentos entre plantas de tomateiro determinado Fascínio. Sinop, 2022. * significativo a 5% de probabilidade.