

PERFIL METABÓLICO DE MUDAS DE ALFACE EM FUNÇÃO DA
VARIAÇÃO SAZONAL EM AMBIENTE PROTEGIDO EM REGIÃO DE
CLIMA TROPICAL

LIA MARA DA SILVA GOMES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
OUTUBRO – 2024

PERFIL METABÓLICO DE MUDAS DE ALFACE EM FUNÇÃO DA
VARIAÇÃO SAZONAL NO AMBIENTE PROTEGIDO EM REGIÃO DE
CLIMA TROPICAL

LIA MARA DA SILVA GOMES

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias
Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do
título de Mestra em Produção Vegetal

Orientadora: Cláudia Lopes Prins

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
OUTUBRO – 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

G633 Gomes, Lia Mara da Silva.

Perfil metabólico de mudas de alface em função da variação sazonal no ambiente protegido em região de clima tropical / Lia Mara da Silva Gomes. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

59 f. : il.

Bibliografia: 43 - 50.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2024.
Orientadora: Claudia Lopes Prins.

1. *Lactuca sativa* L.. 2. Metabólitos . 3. Estresses abióticos . I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

PERFIL METABÓLICO DE MUDAS DE ALFACE EM FUNÇÃO DA
VARIAÇÃO SAZONAL NO AMBIENTE PROTEGIDO EM REGIÃO DE
CLIMA TROPICAL

LIA MARA DA SILVA GOMES

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestra em Produção Vegetal”

Aprovada em 04 de Outubro de 2024

Comissão Examinadora:

Fábio Cunha Coelho (D.Sc., Fitotecnia- Produção Vegetal) – UENF

Glória Cristina da Silva Lemos (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF

Mylane dos Santos Barreto (D.Sc., Cognição e Linguagem) – IFF

Profa. Cláudia Lopes Prins (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF
(Orientadora)

DEDICO

Aos meus pais, Rozenilda Francisca (in memorian) e Antônio (in memorian) pelos ensinamentos. Às minhas filhas, Sthephany e Sthella pelo apoio. À minha irmã Rosimery, pelas orações, conselhos, incentivos e apoio para que eu chegasse até a conclusão deste trabalho. À toda minha família e amigos por todo apoio necessário.

"Se a educação por si só não tem o poder de transformar a sociedade, sem ela, a mudança também não ocorre." Paulo Freire

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelas bênçãos e proteção, por sempre segurar em minhas mãos e me guiar por todos os caminhos corretos;

À toda minha família por estarem me ajudando, incentivando a não desistir do meu sonho;

À minha orientadora profa. D.Sc. Cláudia Lopes Prins pelo apoio e orientação, que vem me acompanhando em toda a minha trajetória acadêmica na Agronomia, desde meus trabalhos de iniciação científica;

Às minhas amigas e colegas de laboratório Bruna de Mello e Leticia por toda contribuição na execução dos experimentos; e aos colegas de laboratório;

Ao Centro Estadual de Pesquisas em Agroenergia e Aproveitamento de Resíduos (CEPEAAR), da Estação Experimental da PESAGRO-Rio pelo apoio e por conceder espaço para o desenvolvimento do experimento;

À Faperj pelo fomento a esta pesquisa;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Geral	3
2.2 Específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. <i>Lactuca sativa</i> L. (alface)	4
3.2. Produção de mudas de hortaliças.....	6
3.3. Aspectos de qualidade em mudas de hortaliça.....	7
3.4. Metabólicos e resposta ao estresse abiótico	8
3.4.1. Teor de prolina.....	8
3.4.2. Peroxidação lipídica.....	10
3.4.3. Compostos fenólicos totais	12
3.4.4. Carboidratos	14
3.5. Ambiente protegido	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1. Avaliação dos metabólicos.....	19
4.1.1. Prolina.....	19
4.1.2. Avaliação da peroxidação lipídica.....	22
4.1.3. Avaliação dos compostos fenólicos totais.....	22
4.1.4. Avaliação dos carboidratos	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5.1. Teores de prolina	25
5.2. Peroxidação lipídica	27
5.3. Compostos fenólicos.....	31
5.4. Carboidratos.....	34
6. CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

RESUMO

GOMES, Lia Mara da Silva; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Outubro de 2024. Perfil metabólicos de mudas de alface em função da variação sazonal no ambiente protegido em região de clima tropical; Orientadora: D.Sc. Cláudia Lopes Prins.

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma das hortaliças folhosas mais amplamente cultivadas no Brasil, com uma demanda de mercado crescente devido à sua popularidade como alimento. O cultivo da alface, no entanto, exige condições ambientais específicas para seu desenvolvimento adequado, sendo a faixa entre 15°C e 20°C de temperatura, a ideal para sua germinação. Fora desse intervalo, há uma redução significativa na taxa de germinação e no crescimento das plântulas. A produção de mudas de alface geralmente é realizada em casa de vegetação, que oferecem um ambiente controlado e protegido. Contudo, o microclima da casa de vegetação pode variar com as estações do ano, influenciando diretamente o metabolismo da planta e sua resposta a estresses abióticos, como o estresse térmico. O presente estudo teve como objetivo verificar as respostas metabólicas da alface em diferentes estações do ano, avaliando o acúmulo de prolina, carboidratos, compostos fenólicos e a peroxidação lipídica. As análises foram realizadas em três grupos de alface (Lisa, Crespa e Americana), observando os efeitos das estações (verão, outono, inverno e primavera) no metabolismo dessas plantas. Os resultados indicaram variações significativas no teor de prolina, que foi maior durante o verão em comparação com as outras estações, indicando uma resposta ao estresse térmico. O acúmulo de carboidratos e compostos fenólicos também variou entre as estações, com destaque para a primavera, onde houve um aumento expressivo desses compostos, possivelmente devido a condições mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal. A peroxidação lipídica, indicador de estresse oxidativo, apresentou menores níveis durante o inverno e primavera, sugerindo que as plantas estavam em condições menos estressantes nessas épocas. O microclima da estufa e as variações sazonais influenciam diretamente o metabolismo da alface, afetando sua capacidade de lidar com o estresse abiótico. A prolina, os carboidratos e os compostos fenólicos são importantes indicadores dessa resposta adaptativa, sendo

o verão a estação mais desafiadora para o desenvolvimento da planta, e a primavera, a mais favorável.

Palavras-chaves: *Lactuca sativa* L.; metabólitos; estresses abióticos.

ABSTRACT

GOMES, Lia Mara da Silva; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; october 2024; Metabolite profile of lettuce seedlings as a function of seasonal variation in the protected environment in a tropical climate region; Advisor: D.Sc. Cláudia Lopes Prins.

Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is one of the most widely grown leafy vegetables in Brazil, with a growing market demand due to its popularity as a food. Growing lettuce, however, requires specific environmental conditions for its proper development, with the temperature range between 15°C and 20°C being ideal for its germination. Outside this range, there is a significant reduction in the germination rate and seedling growth. The production of lettuce seedlings is usually carried out in a greenhouse, which offers a controlled and protected environment. However, the microclimate of the greenhouse can vary with the seasons, directly influencing the plant's metabolism and its response to abiotic stresses, such as heat stress. The present study aimed to verify the metabolic responses of lettuce in different seasons of the year, assessing the accumulation of proline, carbohydrates, phenolic compounds and lipid peroxidation. The analyses were carried out on three groups of lettuce (Lisa, Crespa and Americana), observing the effects of the seasons (summer, fall, winter and spring) on the metabolism of these plants. The results indicated significant variations in proline content, which was higher during the summer compared to the other seasons, indicating a response to heat stress. The accumulation of carbohydrates and phenolic compounds also varied between the seasons, with spring standing out, where there was a significant increase in these compounds, possibly due to more favorable conditions for plant development. Lipid peroxidation, an indicator of oxidative stress, showed lower levels during the winter and spring, suggesting that the plants were under less stressful conditions during these seasons. The greenhouse microclimate and seasonal variations directly influence lettuce metabolism, affecting its ability to cope with abiotic stress. Proline, carbohydrates and phenolic compounds are important indicators of this adaptive

response, with summer being the most challenging season for plant development, and spring the most favorable.

Keywords: *Lactuca sativa* L.; metabolites; abiotic stresses.

1. INTRODUÇÃO

A alface é uma hortaliça folhosa, de amplo cultivo no Brasil, que produz cerca de 660 mil toneladas, com grande expectativa de aumento no consumo nos próximos anos. Dentre as hortaliças folhosas, a alface é a mais consumida, e possui diversas variedades de tipos roxas, crespa, lisa, americana (Zandonadi, 2022).

As principais regiões de produção comercial são Sudeste e o Sul, com cerca de 90% da produção, sendo Minas Gerais com produção de 49.742 t, Rio de Janeiro com produção de 98.327 t e São Paulo com produção de 268.139 t, segundo o último censo do IBGE (2017). No estado do Rio de Janeiro, a Região Serrana tem destaque na produção.

A produção de mudas caracteriza-se como uma etapa da cadeia produtiva de hortaliças com produtores especializados. A produção de mudas para o cultivo de hortaliças deve ser realizada em ambiente protegido, sendo uma alternativa favorável a propiciar microclima adequado (temperaturas amenas, baixa irradiação solar, umidade, circulação do ar) ao desenvolvimento das mudas, buscando reduzir os prejuízos e assim aumentar a qualidade da cultura.

As temperaturas ótimas para a germinação das sementes de alface variam entre 15°C e 20°C, e fora dessa faixa de temperatura, a taxa de germinação das sementes e o crescimento de plântulas podem ser prejudicados.

Em ambientes protegidos, o ar aquecido não se dissipa facilmente, levando ao aumento da temperatura interna em comparação ao ambiente externo (Silva et al., 2003); Rebouças et al., 2015) indicando que a temperatura dentro dessas estruturas pode ser até 9°C mais alta do que fora delas, especialmente em regiões tropicais, onde as temperaturas podem chegar a 50°C entre o meio-dia e às 14h (Furlan e Folegatti, 2002). Isso representa um desafio para as plantas, pois o excesso de calor pode prejudicar o crescimento.

Temperaturas superiores à faixa ótima causam diversas alterações nas plantas e ativam mecanismos de defesa ou adaptação, que têm custos metabólicos e resultam na redução do crescimento e produção (Hassan et al., 2021). Os efeitos da temperatura

elevada sobre a produção comercial de alface são conhecidos, tais como, o pendoamento, a antecipação da fase vegetativa, diminuição da cabeça e a produção de látex, tornando a comercialização inviável, pois libera sabor amargo nas folhas. Porém, há poucos estudos em relação à fase de mudas e as consequências sobre o desempenho após o transplântio.

Frequentemente, estudos sobre os efeitos do estresse por calor avaliam a resposta de plantas submetendo-as a um período abrupto de temperaturas elevadas, ou a uma exposição moderada, seguida de um período sob temperaturas adequadas e nova exposição ao estresse em câmaras de crescimento (Mittler et al., 2012). Em condições naturais como, por exemplo, no viveiro, o aumento da temperatura é gradual levando a propiciar termotolerância e, conseqüentemente, respostas diferentes das observadas em laboratório.

Identificar mecanismos chave de respostas de mudas de alface às alterações da temperatura e microclima em ambiente protegido, como as células vegetais respondem à diminuição ou ao aumento da concentração de compostos? Carboidratos, à fotossíntese, à abertura e fechamento de estômato, à respiração, à transpiração, é essencial para estabelecer práticas de manejo que proporcionem a estas mudas condições de adaptação às temperaturas elevadas no viveiro e no campo, especialmente quando a produção é realizada em regiões de clima tropical, como no Norte e Noroeste do Rio de Janeiro.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo foi verificar a resposta do metabolismo de mudas de alface às alterações do microclima da estufa em função das estações do ano.

2.2 Específicos

- Avaliar o teor de prolina em três grupos de alface (Lisa, Crespa e Americana) sob as variações sazonais do microclima de estufa;
- Determinar a concentração de carboidratos em massa fresca foliar das mudas de alface ao longo das estações do ano (verão, outono, inverno e primavera);
- Analisar o acúmulo de compostos fenólicos nas folhas de alface em resposta às diferentes condições climáticas sazonais;
- Investigar o nível de peroxidação lipídica como um indicador de estresse oxidativo em mudas de alface cultivadas sob variações sazonais;
- Comparar as respostas metabólicas das diferentes cultivares de alface (Lisa, Crespa e Americana) frente às alterações de temperatura e outras condições climáticas ao longo das estações do ano.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. *Lactuca sativa* L. (alface)

A alface (*Lactuca sativa* L.) pertence à família Asteraceae, gênero *Lactuca*, onde já foram identificadas mais de 100 espécies. Originou-se de espécies silvestres, ainda encontradas em regiões de clima temperado, no sul da Europa e na Ásia Ocidental (Filgueira, 2008)

A alface é uma hortaliça folhosa com cultivo intensivo e de grande demanda de mercado (Santos, 2016). É uma planta herbácea que possui características delicadas, com caule diminuto, onde as folhas se prendem e crescem como rosetas podendo ser crespas ou lisas, com formação de cabeça, apresentando diversas colorações em vários tons de verdes ou roxas, de acordo com a cultivar. O sistema radicular é ramificado superficial e, como consequência, tem um acesso limitado ao solo quando é transplantado, explorando apenas a camada de 0 a 25 cm. O clima e época de plantio são favorecidos pelos dias longos e temperaturas amenas (Santos, 2016).

A alface é uma planta com alta sensibilidade há fatores climáticos, como fotoperíodo, intensidade de luz, concentração de dióxido de carbono (CO₂), sendo a temperatura uma grande influenciadora no seu crescimento e desenvolvimento (Sampaio, 2017). Por ser planta de clima temperado, é pouco adaptada a altas temperaturas e altas luminosidades, as quais interferem diretamente na redução do ciclo e antecipação da fase reprodutiva, ou seja, interferindo na expressão do potencial genético da cultura (Luz et al., 2010).

A cultura da alface responde às temperaturas amenas prolongando o ciclo de desenvolvimento vegetativo, quando cultivada na faixa de temperatura entre 15 e 20°C diurna e entre 7°C e 15°C noturna; as temperaturas elevadas estimulam o pendoamento, e à medida que ocorrem dias mais longos o processo é acelerado, tornando a alface com sabor amargo e imprópria para o consumo (Luz et al., 2010).

As condições climáticas sob as quais a muda é produzida afetam sobremaneira o desenvolvimento da planta adulta. Ao longo dos anos os fitomelhoristas, desenvolveram cultivares adaptadas ao plantio também durante a primavera e o verão,

resistentes ao pendoamento precoce, tornando possível plantar e colher alface de boa qualidade ao longo do ano (Filgueira, 2007).

A alface é classificada em seis grupos distintos (Quadro 1), de acordo com as características das folhas e como se reúnem, ou não, para a formação de cabeça.

Os maiores países produtores e consumidores de alface são os Estados Unidos, China, Espanha e Itália. No Brasil é a folhosa mais produzida, destacando o estado de São Paulo como o maior produtor, seguido do Rio de Janeiro e Minas Gerais (Hortibrasil, 2013). O cultivo de alface apresenta grande expressão na Olericultura do estado do Rio de Janeiro, os principais municípios produtores de alface do estado do Rio de Janeiro são Teresópolis, Petrópolis, São José do Rio Preto e Nova Friburgo, localizados na Região Serrana, (Zandonadi, 2022).

Quadro 1. Grupos de alface.

Grupo	Características
Romana	Apresenta folhas alongadas, duras, com nervuras claras e protuberantes, não formando cabeças imbricadas (Ex: CV SVR2755). Adaptação ao clima tropical e subtropical. A alface romana é uma variedade de alface que se destaca por ser resistente ao calor e ao pendoamento precoce.
Lisa	As folhas são lisas, mais ou menos delicadas, não formando uma cabeça repolhuda, mas uma roseta de folhas. (Ex: CV Litorânea). Adapta-se bem em clima quente.
Crespa	As folhas são bem consistentes, crespas e soltas, não formando cabeça. A cultivar típica é a norte-americana Grand Rapids, tradicional. Há novas cultivares (Ex: CV Verônica, Marisa e Solaris). A alface crespa se desenvolve bem em climas amenos, com temperaturas entre 10°C e 24°C. Temperaturas muito altas podem causar o florescimento precoce, o que prejudica a formação da cabeça da alface.
Repolhuda lisa	Apresenta cabeças com folhas tenras, lisas, de cor verde clara e com

ou repolhuda manteiga	aspecto oleoso. (Ex: CV Babá de verão, Áurea). A alface repolhuda lisa se desenvolve melhor em climas amenos.
Repolhuda crespa ou alface americana	Apresenta cabeça crespa, folhas com nervuras salientes e imbricadas, semelhantes ao repolho. (Ex CV Moana, Delícia). A alface americana se desenvolve melhor em clima ameno, com temperaturas entre 15°C e 20°C.
Alface roxa	As folhas são delicadas e com aspecto “arrepinado”. São as cultivares Salad Bowl, Greenbowl Mila, Roxame, Salad Bowl Roxa e Rubi. A alface mimosa roxa se adapta bem em climas amenos e frios desde que receba sol.

Fonte: Boletim técnico informativo Pesagro-Rio (1998).

3.2. Produção de mudas de hortaliças

Os sistemas de produção de mudas é uma das etapas mais importantes no sistema produtivo de hortaliças, porque permite a obtenção de mudas de alta qualidade, estabelece relações com a cadeia produtiva de hortaliças e prepara a planta para o estágio produtivo com máxima eficiência (Borne, 1999).

A fase de produção de mudas influencia diretamente no desempenho final da planta, tanto do ponto de vista nutricional como produtivo (Carmello, 1995), pois a obtenção de mudas de qualidade está associada a fatores que vão desde a qualidade das sementes até aspectos relacionados aos insumos, como substratos (Franzin et al., 2005), volume de recipientes (Silva et al., 2000b), nutrição (Higuti, 2010), e a fatores abióticos como luz, água e temperatura. Os fatores de estresse ambiental podem refletir negativamente provocando mudanças bioquímicas nas mudas, resultando em uma considerável redução de produção. A relação entre os processos bioquímicos e ambientais permite a compreensão da importância do desenvolvimento de novas técnicas e práticas para a produção de mudas de hortaliças (Almeida, 2018).

3.3. Aspectos de qualidade em mudas de hortaliça

Sementes com alto potencial fisiológico desempenham um papel crucial na agricultura, pois são fundamentais para garantir uma germinação rápida e eficiente (Franzin et al., 2005). A escolha de sementes de alta qualidade não apenas favorece a produção de mudas vigorosas, mas também assegura um excelente estabelecimento das plântulas no solo. Esse processo é vital, pois um bom início é determinante para o sucesso da cultura e, por consequência, para a obtenção de uma alta produtividade. Além disso, sementes com elevado potencial fisiológico são indispensáveis para promover uma germinação uniforme, o que impacta diretamente no desempenho inicial das plantas (Sampaio, 2017). Quando as plântulas emergem de maneira homogênea, elas competem de forma mais eficaz por recursos como luz, água e nutrientes, resultando em um crescimento mais robusto e saudável. Portanto, investir em sementes de qualidade é um passo essencial para garantir não apenas a saúde das plantas, mas também a sustentabilidade e a rentabilidade das atividades agrícolas.

A qualidade das mudas é um fator crucial para o sucesso no cultivo de plantas, a avaliação de qualidade deve levar em consideração fatores como sanidade das mudas, sendo um dos critérios principais tendo em vista que a presença de patógenos ou pragas pode comprometer o desenvolvimento da planta (MAPA, 2018). Além disso, a análise das características morfológicas como parte aérea e do sistema radicular é fundamental, pois ambas influenciam diretamente a capacidade de adaptação da muda ao ambiente em que será transplantada.

As condições sob as quais as mudas são produzidas, como a quantidade do substrato, a irrigação, a luminosidade e a nutrição podem impactar o desenvolvimento e a resistência das plantas (Silva et al., 2000a).

Práticas de condicionamento, como aclimação e manejo da irrigação são essenciais para preparar as mudas para as condições do ambiente externo (Santos, 2021).

Variáveis bioquímicas e fisiológicas, especialmente de tolerância a estresses e térmico e hídrico, também são consideradas na determinação da qualidade. O estresse

térmico é um fator que merece atenção especial na avaliação na qualidade das mudas, um fator crucial para o sucesso no cultivo, pois plantas que apresentam maior resistência a essas condições tendem a ter desempenho superior, especialmente em situações de estresse. Isso se reflete em variáveis como taxa de fotossíntese, eficiência no uso da água e a capacidade de manutenção.

As sementes de alface são sensíveis às condições do ambiente, ou fatores externos, como oxigênio, água e temperatura, exercendo influência sobre a germinação das sementes. A temperatura merece mais atenção, pois é responsável pelo atraso na emergência de plântulas e, conseqüentemente, pela má qualidade na produção de mudas (Sampaio, 2017).

A produção de mudas de alface com alta produção e qualidade é realizada em casa de vegetação, pois, permite condições de cultivo mesmo em condições adversas como, altas temperaturas, umidade relativa, excesso de chuvas, ataque de pragas e doenças. O ambiente protegido é uma técnica empregada para propiciar condições de desenvolvimento da cultura, pois protege o cultivo da influência dos fatores climáticos, sendo utilizada como protetor dos ventos fortes, servindo como quebra ventos, protegendo contra a radiação excessiva, chuvas intensas e em regiões tropicais protege dos efeitos da baixa umidade (Faria Junior e Hora, 2018).

Entre os aspectos fisiológicos indicativos de qualidade das mudas está a tolerância ao estresse térmico e hídrico, que conforme Leskovar et al. (2008) é um indicador importante na qualidade das mudas. Uma boa adaptação a períodos de seca e às variações de temperatura pode ser determinante para a sobrevivência e o crescimento das plantas.

3.4. Metabólicos e resposta ao estresse abiótico

3.4.1. Teor de prolina

A prolina é um aminoácido com propriedades hidrofílicas, o que significa que ela tem afinidade por água. Quando acumulada em altas concentrações no citoplasma das células, a prolina atua como um soluto osmoprotetor, ajudando a manter o

equilíbrio osmótico sem causar alterações nas estruturas celulares ou no metabolismo da planta. A biossíntese da prolina é diretamente dependente da luz, conforme destacado por Silveira (2019).

O estresse térmico atua na estrutura e nas funções das membranas tilacoides dentro do cloroplasto, diminuindo o conteúdo de clorofila e a fotossíntese, acarretando prejuízos à integridade da membrana, tendo como resultado a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS). A prolina exerce um papel vital na defesa das plantas, especialmente nos sistemas fotossintéticos, como os cloroplastos (Mansinhos et al., 2022). O acúmulo de prolina nas células auxilia na estabilização de proteínas e membranas celulares, prevenindo tanto a desidratação quanto a interrupção dos processos metabólicos.

Além disso, a prolina atua como antioxidante, reduzindo os danos causados pelo estresse oxidativo, cuja função é essencial para proteger os mecanismos da fotossíntese, assegurando que a planta mantenha seu funcionamento eficiente mesmo em condições adversas (Ramos, 2019). Estudos mostram que o acúmulo de prolina está diretamente ligado à capacidade da planta de tolerar condições extremas, como altas temperaturas (Szabados; Saviouré, 2010). Com o estresse das altas temperaturas, a prolina também auxilia na estabilização das membranas celulares e na proteção de enzimas essenciais para a fotossíntese, reduzindo os danos causados pelo calor excessivo (Ashraf; Foolad, 2007).

As altas temperaturas interferem significativamente no metabolismo das plantas, especialmente em mudas, que são mais sensíveis a flutuações extremas de temperatura.

Ramos (2019) destacou que o calor excessivo afeta diretamente a fotossíntese, comprometendo a atividade enzimática e a integridade das membranas celulares, o que pode levar à redução do crescimento e produtividade das hortaliças. O estudo sobre o aumento de prolina em mudas de hortaliças sob estresse térmico tem sido estudado a fim de direcionar uma resposta para mitigar os efeitos adversos do estresse térmico e garantir a sobrevivência das plantas (Verbruggen; Hermans, 2008).

Além do estresse térmico, o estresse hídrico é outro fator limitante para o desenvolvimento das plantas, as quais possuem mecanismo de adaptação para

tolerarem à seca. Como o aminoácido, possuem propriedades hidrofílicas, onde ocorre a ligação entre as proteínas hidrofílicas que propiciam aumento da solubilidade e evitam que as proteínas sejam desnaturadas, permitindo ajustar o conteúdo osmótico por meio da membrana, justificando a quantificação de prolina a fim de avaliar plantas tolerantes a seca (Carvalho et al., 2018).

Os estudos de Carvalho, et al. (2018), consideraram as diferentes cultivares de alface submetidas ao estresse hídrico e os teores de prolina variaram entre cultivares submetidas ao estresse hídrico, pois quando as plantas são submetidas a severo estresse hídrico, ocorre um aumento do teor de prolina, onde maiores teores de prolina contribuem para um maior ajuste osmótico, e tendem a diminuir a sensibilidade das plantas ao estresse hídrico.

É amplamente reconhecido que o aumento da prolina é uma resposta comum em plantas sob condições de estresse salino, com elevações significativas nas concentrações desse composto nos tecidos vegetais. Diversos estudos destacam essa resposta adaptativa em diferentes espécies, como alface cultivada em sistema hidropônico (Marques, 2020), pimentão (Silveira, 2019) e tomates cultivados em ambiente protegido (Tonhate, 2018).

3.4.2. Peroxidação lipídica

Os efeitos das altas temperaturas induzem o estresse oxidativo na planta, quando a planta se encontra em situação de estresse, com menor redução do dióxido de carbono (CO_2) formando substâncias reativas com o oxigênio oxidativo (O_2) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) gerando danos à parede celular da planta (peroxidação de lipídios de membrana).

O estresse por temperatura atua sobre o fotossistema II que é mediado pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio, levando ao estresse oxidativo, pois o excesso na concentração de espécies reativas de oxigênio nas células vegetais desencadeia processos peroxidativos ocorrendo perda de eletrólitos pela célula, e

consequente degradação das membranas por meio da peroxidação lipídica e oxidação de proteínas (Queiroz et al., 2002).

Os radicais livres são moléculas altamente reativas que podem causar danos às células e são formados como resposta a vários fatores estressantes. Esses fatores incluem radiações ultravioleta e iônicas. A exposição à luz UV ou a radiações ionizantes podem danificar o DNA e outras moléculas nas células, levando à formação de radicais livres (Resende, 2006).

Fatores químicos, desordens nutricionais, como a falta ou excesso de nutrientes, e a redistribuição de íons metálicos, como ferro e cobre, dentro da célula, podem desencadear a formação de radicais livres. Esses íons metálicos podem participar de reações químicas que geram radicais livres. Fatores mecânicos eventuais, como impacto osmótico, quando há mudança repentina na concentração de solutos ao redor das células, mudanças drásticas de temperatura e pressão também podem induzir o estresse oxidativo, levando à geração de radicais livres. (Paim, 2020).

Esses radicais livres, por sua vez, podem iniciar uma cascata de reações oxidativas que danificam lipídios, proteínas e DNA dentro das células, cujos efeitos nocivos são combatidos pelo organismo que ativa processos antioxidativos, que envolvem a produção de moléculas e enzimas antioxidantes. Esses antioxidantes neutralizam os radicais livres, evitando ou limitando os danos celulares. Portanto, o equilíbrio entre os processos de formação de radicais livres e neutralização de radicais livres é essencial para a saúde celular e para a proteção contra danos causados por estresse ambiental e fisiológico. (Brito, 2016).

Em estudos que investigam o papel dos antioxidantes durante a germinação das sementes foi observado que os mecanismos que protegem as células contra o oxigênio ativado (ou espécies reativas de oxigênio) são, em sua maioria, enzimáticos. Isso significa que as enzimas desempenham um papel fundamental na defesa das sementes contra o estresse oxidativo (Resende, 2006).

Esses sistemas enzimáticos incluem várias enzimas específicas, como a superóxido dismutase (SOD), catalase, peroxidase, glutathione redutase, ascorbato peroxidase e o sistema de reciclagem do ascorbato. Cada uma dessas enzimas

contribui para neutralizar os radicais livres e outras moléculas reativas que poderiam danificar as células durante a germinação.

Essas enzimas formam um sistema de proteção que impede a deterioração das sementes. Por exemplo, a SOD é particularmente importante porque ela converte o radical superóxido, uma espécie reativa de oxigênio altamente prejudicial, em peróxido de hidrogênio, que é menos danoso e pode ser posteriormente decomposto por outras enzimas, como a catalase.

De acordo com (Resende, 2006), a presença da enzima SOD em sementes secas pode desempenhar um papel crucial na limitação do dano por peroxidação lipídica (danos aos lipídios das membranas celulares) após a embebição das sementes, que é o processo de absorção de água. Isso é importante porque, ao contrário de sementes que já estão hidratadas, as sementes secas podem não ser capazes de sintetizar ou ativar essa enzima rapidamente após a embebição. Portanto, a SOD já presente nas sementes secas ajuda a proteger as sementes durante essa fase crítica da germinação, antes que o sistema enzimático completo esteja ativo.

Segundo Queiroz et al., (2002), as espécies reativas de oxigênio (EROs) possuem alta toxicidade e podem reagir com as biomoléculas, como lipídios, proteínas e ácidos provocando a peroxidação lipídica. Segundo Tonhate (2018), durante o cultivo de tomate em estufas, foram observadas elevadas temperaturas durante todo o ciclo, acarretando desbalanço metabólico nas plantas e, por consequência, gerando EROs e estresse oxidativo.

3.4.3. Compostos fenólicos totais

A alface possui fotoquímicos que incluem os compostos fenólicos que possuem propriedades antioxidantes e que fazem parte do metabolismo secundário, sendo as hortaliças influenciadas pela ação antioxidante dos compostos bioativos e pelos fatores genéticos e as condições ambientais (Martins et al., 2023).

Os compostos fenólicos são pertencentes a uma classe de substâncias químicas, podendo possuir estruturas simples ou complexas, derivadas dos

aminoácidos fenilalanina e da tirosina, possuindo em sua estrutura química pelo menos um anel aromático com um ou mais grupos hidroxilas. Os flavonoides (antocianinas, flavonóis, e isoflavonas) e não flavonoides (ácidos fenólicos) fazem parte dos compostos fenólicos.

Os ácidos fenólicos derivados da cumarina, taninos e flavonoides atuam como redutores sequestrantes de radicais livres sendo encontrados com estruturas variadas nos vegetais, e tem sido alvo de grande interesse de estudos por possuírem propriedades benéficas à saúde (Ferrera et al., 2016).

Os compostos fenólicos são importantes para as plantas por suas propriedades antioxidantes e pela proteção contra estresses ambientais. Entretanto, a quantidade desses compostos pode variar significativamente dependendo de vários fatores, como sazonalidade, a época do ano em que a planta é cultivada, pois diferentes estações apresentam variações em luz solar, temperatura, e umidade (Martins, 2023).

As plantas expostas a diferentes temperaturas podem produzir diferentes níveis de compostos fenólicos. Em geral, temperaturas extremas (muito altas ou muito baixas) podem induzir a produção desses compostos como um mecanismo de defesa (Negrão et al., 2021).

A quantidade de água disponível para a planta também influencia a produção de compostos fenólicos. Estresse hídrico, ou seja, tanto a falta quanto o excesso de água, pode levar a mudanças significativas na produção desses compostos, poluentes no ar, como ozônio e dióxido de enxofre, bem como estressar as plantas e resultar em uma maior produção de compostos fenólicos como resposta defensiva (Pan et al., 2018).

Os danos mecânicos quando a planta sofre danos físicos, como cortes ou quebras, podem aumentar a produção de compostos fenólicos para proteger os tecidos danificados e evitar infecções. Quando a planta é atacada por fungos, bactérias ou outros patógenos, ela pode aumentar a produção de compostos fenólicos como parte de sua resposta imunológica.

As práticas agrícolas adotadas em cada sistema, como o manejo da irrigação, o controle de pragas, e a proteção contra danos mecânicos, têm um impacto direto sobre

as condições de crescimento das plantas e, conseqüentemente, sobre a quantidade de compostos fenólicos produzidos (Martins, 2023).

3.4.4. Carboidratos

Os carboidratos compreendem uma grande categoria de solutos compatíveis que incluem hexoses, dissacarídeos, açúcares alcoólicos e complexos, os quais são acumulados durante os estresses.

Os açúcares nas plantas têm um papel multifuncional: além de servirem como reserva de energia e fornecerem a energia necessária para processos induzidos por altas temperaturas, os açúcares agem como moléculas de sinalização. Isso significa que os açúcares podem desencadear uma série de reações bioquímicas dentro da planta (Koch, 2004).

O aumento dos níveis de açúcar ativam certas proteínas, como a cinase MAK, a cinase caseína, a trealose-6-fosfato e a cinase de proteína TOR. Essas proteínas são enzimas que desempenham papéis cruciais na divisão celular e no crescimento das células. Ao ativá-las, os açúcares ajudam a acelerar a transição da planta do estágio de crescimento vegetativo (quando a planta está focada no crescimento de folhas e raízes) para o estágio de crescimento reprodutivo (quando a planta começa a produzir flores e sementes).

Na alface, essa transição mais rápida para o estágio reprodutivo, influenciada pelos açúcares, pode resultar no processo em que a planta forma um caule floral, geralmente sinalizando o fim do ciclo de vida da planta, os açúcares desenvolvem papéis fundamentais na divisão e no crescimento vegetativo celular, acelerando a taxa de transição do crescimento reprodutivo na alface (Qin et al., 2020).

De acordo com um estudo realizado por Qin et al. (2020), foi observado que, em alfaces, algumas proteínas importantes, como a cinase MAK, a cinase caseína, a trealose-6-fosfato e a cinase de proteína TOR, estão ligadas ao metabolismo da sacarose e apresentam um aumento significativo quando as temperaturas estão elevadas. Além disso, os níveis de açúcares solúveis, como sacarose, glicose e frutose, também mudam durante o processo de pendoamento sob essas altas temperaturas.

Isso indica que as plantas reagem ao calor aumentando a produção dessas proteínas, o que ajuda a regular o metabolismo do amido e da sacarose.

Os carboidratos, como o amido e a sacarose, desempenham papéis essenciais nas plantas. Eles não apenas fornecem a energia necessária para o crescimento e desenvolvimento, mas também servem como matérias-primas para a construção de tecidos vegetais, como folhas, caules e raízes. Quando a planta é exposta a altas temperaturas, a regulação dessas proteínas associadas ao metabolismo dos carboidratos é crucial para manter o equilíbrio energético e estrutural, permitindo que a planta continue a crescer e se desenvolver mesmo em condições adversas (Ruan, 2014).

Em um estudo realizado com melão, as plantas submetidas às diferentes temperaturas apresentaram respostas distintas dos valores dos açúcares foliares redutores: glicose e sacarose (Carvalho, 2015).

3.5. Ambiente protegido

A expressão "cultivo protegido" se refere a um conjunto de práticas e tecnologias empregadas pelos produtores para garantir um cultivo mais seguro, aplicável a diversas culturas, incluindo hortaliças. O cultivo em ambiente protegido é caracterizado pela capacidade de controlar um ou mais fatores climáticos, permitindo uma condução mais segura e protegida das plantas por meio de técnicas e tecnologias específicas (Campagnol et al., 2015).

Ambientes protegidos possibilitam o cultivo de plantas mesmo quando as condições externas não são favoráveis ao desenvolvimento da cultura.

A utilização de estruturas de cultivo protegido faz-se necessária, pois cria um ambiente controlado favorecendo o desenvolvimento das mudas, onde o ambiente externo pode ser controlado através de manejo da irrigação, ventilação no interior da casa de vegetação, além de fornecer ambiente interno ideal para o desenvolvimento das plantas (Castoldi et al., 2011).

De acordo com Faria (2018), para que a utilização da estrutura de proteção seja eficiente e cumpra a sua finalidade deve ser levado em consideração o local em que a estrutura será instalada, clima da região, qual tipo de cobertura utilizar e a cultura que será produzida.

Em ambientes protegidos, o aumento da temperatura do ar é o principal desafio de manejo em regiões de clima tropical e subtropical com verões quentes. Reduzir a temperatura é essencial para manter um controle climático que favoreça o desempenho das culturas e proporcione condições confortáveis de trabalho para as pessoas. Uma das formas mais eficazes de diminuir a diferença de temperatura entre o ambiente protegido e o externo é melhorar a ventilação (Furlan e Folegatti 2002).

A evapotranspiração em ambiente protegido geralmente é menor do que no exterior devido à redução da radiação solar e da ação dos ventos. Nessa condição, o déficit de vapor d'água é mais baixo, o que afeta o crescimento e a produção de forma indireta, influenciando a temperatura foliar, a condutância estomática e, especialmente, reduzindo a área foliar. A transpiração desempenha um papel importante no transporte de nutrientes para as folhas e outros órgãos por meio da seiva do xilema (Bandeira et al., 2011).

O cultivo realizado em ambientes com estruturas protegidas pode reduzir os efeitos negativos da alta temperatura e luminosidade, típicos das regiões tropicais, possibilitando a produção de diferentes cultivares de alface (Lima, 2018). A produção de folhosas em cultivo protegido também tem atraído o interesse dos produtores especialmente, porque algumas espécies enfrentam limitações em determinadas regiões e épocas do ano.

O cultivo em ambiente protegido, por sua vez, tem permitido uma produção de qualidade ao longo de todo o ano. Embora o cultivo em ambiente protegido seja importante para a olericultura no Brasil, ainda há falta de resultados de pesquisas que possam apoiar o uso potencial dessa tecnologia em diferentes regiões climáticas do país (Lima, 2018).

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Unidade de Apoio à Pesquisa UENF/PESAGRO e Laboratório de Fitotecnia do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da UENF no município de Campos dos Goytacazes.

As mudas foram produzidas em bandejas (128 células) preenchidas com substrato comercial para hortaliças, com irrigação através de sistema automatizado, a cada duas horas, por dois minutos, foi necessário realizar ajustes na frequência da irrigação de acordo com estação. Após a emissão das primeiras folhas definitivas foi realizada aplicação semanal de solução nutritiva comercial (Florisol®) de acordo com a recomendação do fabricante.

Foram realizados quatro experimentos nos meses de fevereiro, maio, julho e setembro correspondente às estações verão, outono, inverno e primavera, sob delineamento experimental em blocos casualizados com quatro repetições.

Foram produzidas mudas dos grupos de alface, isto é, lisa, crespa e americana, cultivares Moana, Delícia e Litorânea, respectivamente. A parcela foi composta por um conjunto de quatro linhas para cada cultivar de alface, utilizando-se seis células, totalizando 24 mudas, de forma que uma bandeja comportou três parcelas, a alface roxa foi semeada na bordadura (Figura1).

A colheita foi realizada pela manhã, 21 dias após a semeadura (Figura 2). As mudas foram levadas para o laboratório onde foram lavadas em água corrente para retirar todo o excesso de substrato e dispostas em papel toalha para retirar o excesso de umidade. Após a limpeza das mudas foram feitos buquês compostos com seis mudas de cada cultivar, enrolados em papel alumínio e devidamente identificados.

Os cubinhos de alumínio foram submersos em nitrogênio líquido e, em seguida, foram acondicionadas em ultra-freezer, para a determinação do estado bioquímico e metabólicos das partes aéreas das mudas (Figura 3).

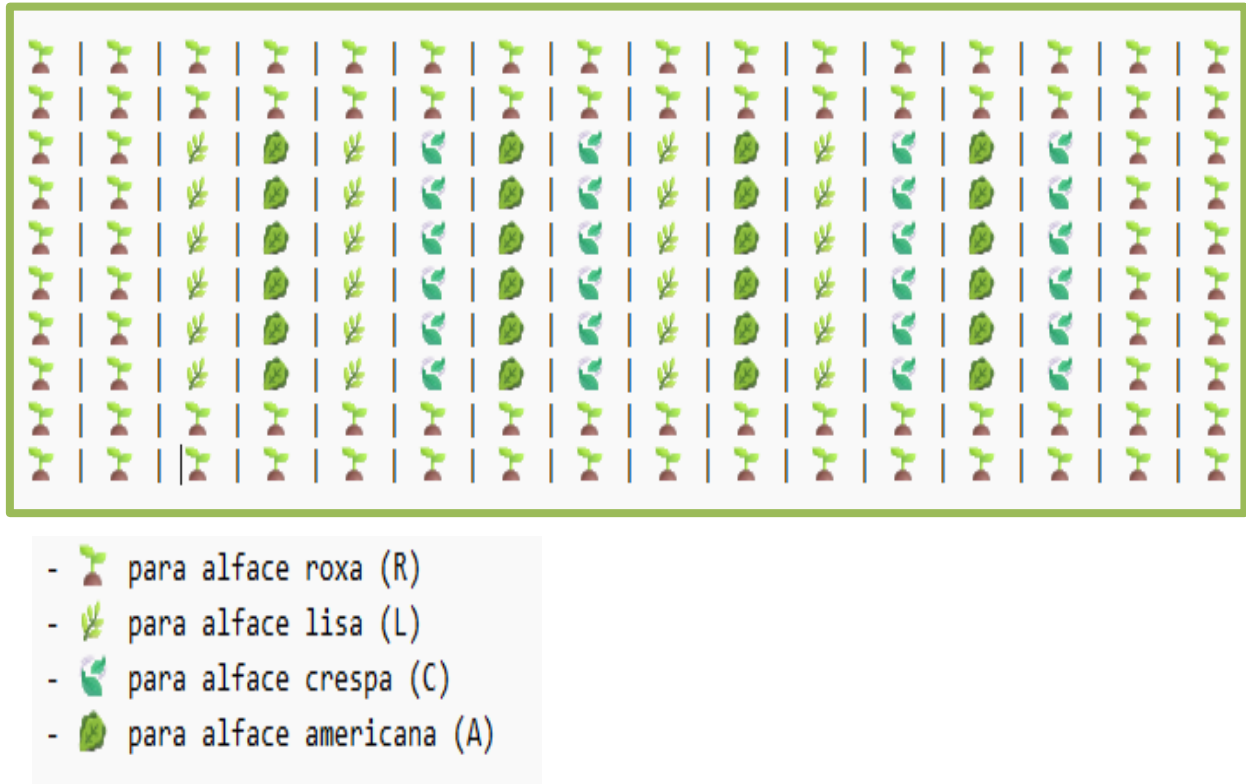


Figura 1. Disposição da sementeira das quatro cultivares de alface.



Figura 2. Mudas de cultivar de alface com 21 dias após a sementeira.



Figura 3. Higienização das mudas e acondicionamento em ultra-freezer, (A) lavagem das mudas; (B) secagem das mudas; (C) formação de buquês enrolados; (D) buquês enrolados em papel alumínio; (E) imersão dos rolos no nitrogênio; (F) acondicionamento em ultra-freezer.

4.1. Avaliação dos metabólicos

4.1.1. Prolina

Para avaliação do teor de prolina, o processo de quantificação foi conduzido em baixa temperatura a fim de evitar a degradação enzimática. Foi utilizado 1 g (definida em testes preliminares) de amostra de matéria fresca pesada em balança analítica e, em seguida, a amostra foi colocada no almofariz, adicionando-se 5 mL de ácido sulfosalicílico, sendo macerado com auxílio de um pistilo de cerâmica até obter um material homogeneizado (Figura 4).



Figura 4. Homogeneizado da amostra.

Em seguida, o macerado foi submetido à filtração com utilização de filtro de papel Whatmann 2, e após a filtração, foi acrescentado 2 mL de ninhidrina e 2 mL de ácido acético e 2 ao filtrado que foi levado ao banho-maria por 25 minutos a 90°C (Figura 5), sendo retirado e colocado em banho de gelo por 15 minutos, e em temperatura ambiente. Na sequência foi acrescentado 4 mL de tolueno e levado ao vortex por 15 a 20 segundos, em seguida, foi pipetado 1 mL da mistura e colocado em cubetas de acrílico para realização da leitura no espectrofotômetro a 520 nm (Figura 6).

As indicações para a determinação do teor de prolina foram adaptadas de acordo com a metodologia proposta por Bates et al. (1973), com algumas alterações significativas. O tempo de incubação em banho-maria foi reduzido de uma hora para vinte e cinco minutos, e a temperatura foi ajustada de 100°C para 90°C.

A concentração de prolina mg/g massa fresca ou mg/g MF em cada amostra foi calculada por meio de equação de regressão, estimada a partir de curva padrão de prolina.

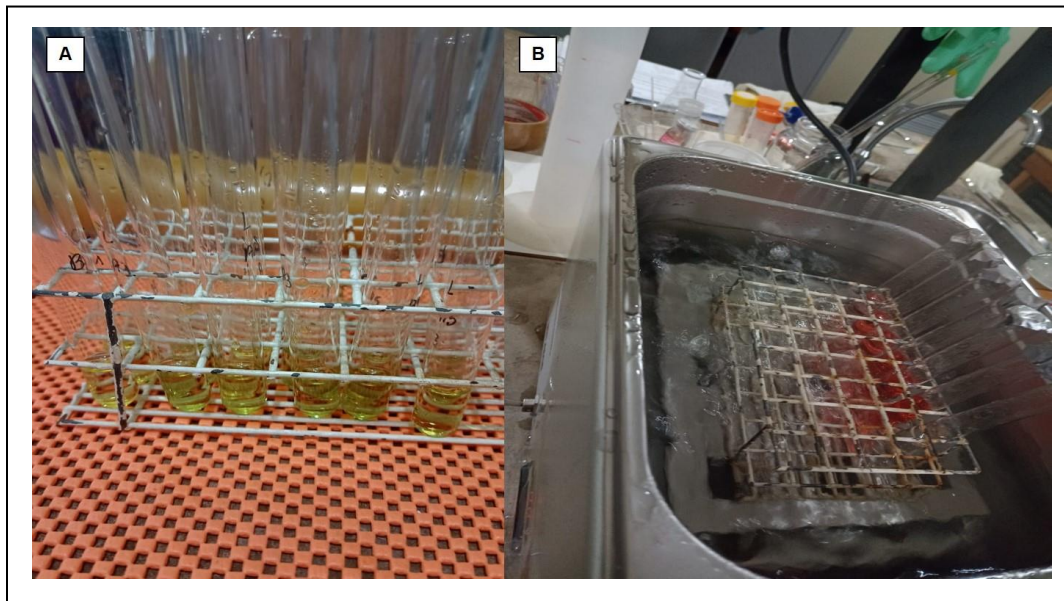


Figura 5. A) Amostras em tubos; B) Amostras em banho-maria.



Figura 6. A) amostras em banho de gelo; B) amostras em temperatura ambiente; C) leitura no espectrofotômetro.

4.1.2. Avaliação da peroxidação lipídica

A quantificação da peroxidação lipídica da membrana é realizada mediante a determinação dos produtos de reação com ácido tiobarbitúrico (TBARS). Para tanto, uma balança analítica foi utilizada para pesar 1 g da amostra de matéria fresca, previamente estabelecida em testes preliminares.

A amostra foi colocada em um almofariz, onde foram adicionados 3 mL de ácido tricloroacético. A seguir, procedeu-se a maceração das amostras com um pistilo de cerâmica. O sobrenadante resultante do material macerado foi transferido para tubos apropriados, os quais foram submetidos à centrifugação por 20 minutos a 150 rpm.

Após a centrifugação, 1 mL do sobrenadante foi transferido para um tubo de ensaio, ao qual foram adicionados 1 mL de ácido tricloroacético e 100 mL de uma solução de BHT a 4% em etanol. O material resultante foi submetido a um aquecimento a 95°C por 30 minutos e, em seguida, resfriado em uma geladeira até atingir a temperatura ambiente, momento em que foi realizada a leitura.

A quantificação dos produtos de oxidação foi realizada segundo o método descrito por (Davenport et al. 2003), utilizando a curva padrão de malondialdeído (MDA) para a determinação da concentração de TBARS.

4.1.3. Avaliação dos compostos fenólicos totais

O processo de quantificação dos compostos fenólicos totais foi realizado de acordo com o método de Folin-Ciocalteu. Para tal, uma balança de precisão foi utilizada para pesar 1g de amostra de matéria fresca, a amostra foi colocada em um almofariz, onde foram adicionados 5 mL de metanol. A seguir procedeu a maceração das amostras com auxílio de um pistilo de cerâmica.

O sobrenadante resultante do material macerado foi transferido para tubos apropriados, os quais foram submetidos à centrifugação por 10 minutos a 10.000 rpm.

Após a centrifugação foi transferido 0,2 mL do sobrenadante para tubos de ensaio e adicionados 2 mL de água e 0,1mL do reagente Folin-Ciocalteu. Após aguardar três minutos, foram acrescentados 0,75 mL de carbonato (Na_2CO_3) e 1 mL de água, a mistura foi homogeneizada e incubada por uma hora em temperatura ambiente.

A determinação do teor dos compostos fenólicos totais foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Zhou et al. (2021). O teor de compostos fenólicos totais será calculado como equivalente ácido gálico em mg por g de massa fresca.

4.1.4. Avaliação dos carboidratos

Para o procedimento da quantificação dos teores de carboidratos foi pesado 1g de matéria fresca em balança de precisão, a amostra foi colocada em um almofariz, e macerada com auxílio de pistilo de cerâmica em água. O sobrenadante resultante do macerado foi colocado em tubos apropriados os quais foram submetidos à centrifugação por 60 minutos a 1000 rpm.

Após a centrifugação foi retirada uma alíquota de 1 mL do sobrenadante que foi transferido para tubos de ensaio aos quais foram adicionados 3 mL de ácido sulfúrico concentrado, em seguida, sendo resfriado em banho de gelo por 2 minutos.

A determinação da concentração dos carboidratos seguiu a metodologia proposta por Albalasmeh et al. (2013).

Os dados foram submetidos à análise de variância e quando verificado efeitos significativos dos fatores ou interações foi realizado o teste de comparação de médias Tukey a 5%

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas médias no ambiente externo (Tabela 1) foram menores que as temperaturas no interior da casa de vegetação (Tabela 2).

Tabela 1. Temperaturas médias (°C) no ambiente externo durante as quatro estações em 2023

TEMPERATURAS EXTERNAS - 2023		
TEMPERATURAS	MÁX (°C)	MIN (°C)
VERÃO	37,8	21,3
OUTONO	32,1	14,4
INVERNO	35,4	13,2
PRIMAVERA	35,5	18,4

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2023).

Tabela 2. Temperaturas médias (Cº) no ambiente interno durante as quatro estações em 2023. A temperatura foi mesurada por um termômetro digital no interior da casa de vegetação

TEMPERATURAS INTERNAS - 2023		
TEMPERATURAS	MÁX (°C)	MIN (°C)
VERÃO	46,1	20,3
OUTONO	42,3	15,9
INVERNO	38,6	13,7
PRIMAVERA	45,8	17,2

Temperaturas internas mensuradas diretamente no ambiente protegido utilizando um termômetro digital, garantindo o acompanhamento preciso das variações de temperatura.

5.1. Teores de prolina

Observa-se que durante o verão os teores de prolina atingem o valor mais elevado, cerca de 2,903 mg/g MF. Este resultado é consistente com a literatura, que descreve a acumulação de prolina como um dos principais mecanismos de resposta das plantas ao estresse abiótico, particularmente ao estresse térmico e hídrico, ambos acentuados durante a estação mais quente do ano (Ashraf e Foolad, 2007; Ribeiro et al., 2021). No inverno, os níveis de prolina se mantiveram intermediários (2,324 mg/g MF), sem diferença estatística significativa em relação ao verão, mas superior ao outono e primavera. As estações de outono e primavera apresentaram os menores teores de prolina (1,951 e 1,742 mg/g MF, respectivamente), ambos sem diferenças estatísticas.

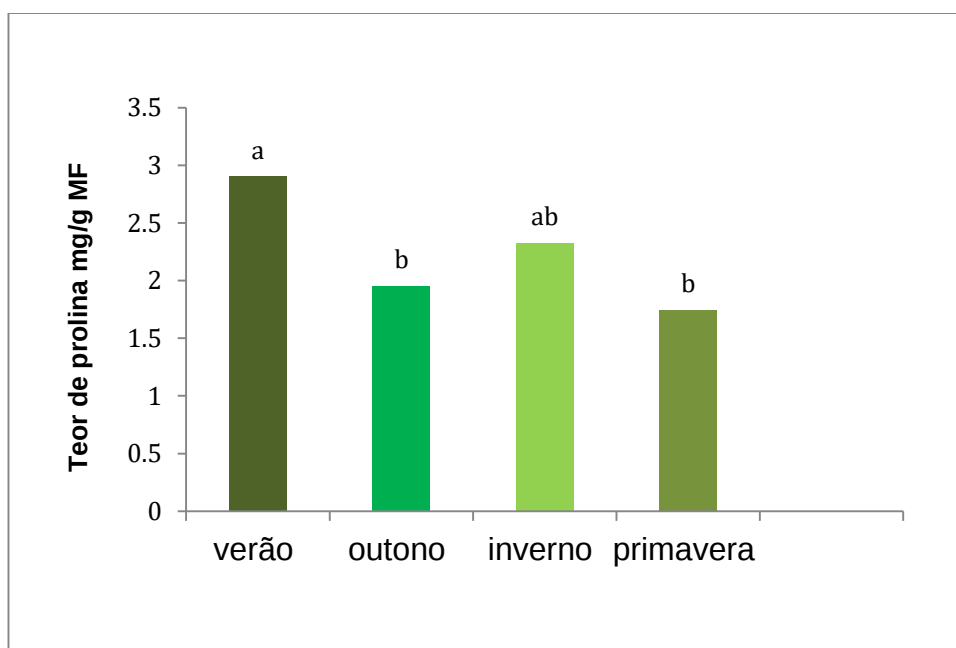


Figura 7. Teor de prolina em mudas de alface produzidas em diferentes estações do ano. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si.

O teor de prolina variou entre 1.742 mg/g MF e 2.903 mg/g MF, observando-se um incremento do metabólico conforme o aumento de estresse térmico. Havendo diferença significativa, no verão onde há um aumento de temperatura, o teor de prolina

foi superior às demais estações sendo um possível indicativo de adaptação da planta ao estresse térmico, conforme a Figura 7.

Durante o verão, os teores de prolina foram os mais altos, com média de 2,903 mg/g MF. A prolina é um aminoácido que desempenha um papel central na resposta das plantas ao estresse ambiental, principalmente em condições adversas como a seca, temperaturas extremas e salinidade. A sua função está associada à osmoproteção, regulação do equilíbrio osmótico das células, além de atuar como antioxidante, protegendo as plantas contra o estresse oxidativo (Ribeiro et al., 2021). Os resultados obtidos sobre os teores de prolina em mudas de alface ao longo das quatro estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera) revelam variações sazonais marcantes.

Esses resultados estão de acordo com estudos que mostram que o calor excessivo pode induzir o acúmulo de prolina, mesmo em condições em que o estresse hídrico não é predominante. Segundo Ashraf e Foolad (2007), a prolina é comumente acumulada em resposta a altas temperaturas para ajudar na estabilização de proteínas e membranas celulares, funcionando também como um eliminador de espécies reativas de oxigênio (ROS) causadas pelo calor.

Os teores de prolina diminuíram no experimento de outono, com uma média de 1,951 mg/g MF. Esta redução pode estar associada ao fato de o outono ser uma estação de transição, com temperaturas mais amenas e menor necessidade de resposta ao estresse térmico. A diminuição no acúmulo de prolina pode indicar que as condições ambientais estão menos adversas, o que reduz a demanda por mecanismos de defesa metabólicos.

Já os níveis de prolina no inverno apresentaram uma recuperação em relação ao outono, com média de 2,324 mg/g MF. No inverno, os níveis de prolina se mantiveram intermediários (2,324 mg/g MF), sem diferença estatística significativa em relação ao verão, mas superior ao outono e primavera. Essa tendência pode estar associada à resposta das plantas ao estresse por baixas temperaturas, que também desencadeia o acúmulo desse osmólito para proteção celular (Misra e Gupta, 2006).

Este aumento pode ter ocorrido devido ao aumento da temperatura na casa de vegetação, quando ocorreu um aumento de 3°C em comparação com o ambiente externo. Na primavera, os níveis de prolina foram os mais baixos, com uma média geral

de 1,742 mg/g MF. Era de se esperar uma queda, já que a primavera oferece condições climáticas mais favoráveis para o crescimento, com temperaturas amenas e boa disponibilidade de água. Tendo uma necessidade de mecanismos de defesa como a prolina menor.

Esse comportamento é descrito por (Misra e Gupta, 2006), que observaram que a prolina tende a diminuir quando as plantas se encontram em condições ideais de crescimento. Os resultados deste estudo estão em concordância com a literatura existente sobre a prolina em plantas. De acordo com Ashraf e Foolad (2007), o acúmulo de prolina ocorre frequentemente em resposta ao estresse abiótico, como altas temperaturas no verão e frio intenso no inverno.

Os resultados observados no verão, com os níveis mais altos de prolina, são consistentes com estudos que mostram que o estresse térmico induz o acúmulo de prolina como forma de proteger as plantas dos efeitos prejudiciais do calor excessivo (Mansinhos et al., 2022).

Entretanto, a queda nos níveis de prolina observada na primavera reflete um ambiente menos adverso, permitindo que a planta redirecione seus recursos para o crescimento vegetativo em vez de investir em respostas ao estresse. Este padrão sazonal de acúmulo de prolina é amplamente documentado na literatura (Ashraf; Foolad, 2007).

5.2. Peroxidação lipídica

Conforme o teste de Tukey constatou-se que houve interação significativa entre o fator os grupos de alface e estações do ano para a variável peroxidação lipídica (Tabela 3).

De acordo com os resultados obtidos sobre a peroxidação lipídica em mudas de alface nos diferentes grupos de alface (lisa, crespa e americana) e sazonalidade estudados (Outono, Inverno, Primavera, verão), é possível observar algumas variações significativas que merecem discussão. A peroxidação lipídica, medida pelo malondialdeído (MDA), é uma forma de avaliar o dano causado às membranas celulares devido ao estresse oxidativo. O processo é intensificado por condições

ambientais adversas, como temperaturas extremas e alta exposição à luz solar (Oliveira, 2022).

Tabela 3. Efeito de grupo de alface dentro das estações para peroxidação lipídica (MDA) g⁻¹ de matéria fresca

Grupo	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Lisa	0.0151 ^{Aa}	0.0110 ^{Bab}	0.0102 ^{Aab}	0.0105 ^{Ab}
Crespa	0.0131 ^{Aa}	0.0105 ^{Ba}	0.0114 ^{Aa}	0.0104 ^{Aa}
Americana	0.0129 ^{Aab}	0.0171 ^{Aa}	0.0111 ^{Ab}	0.0102 ^{Ab}

Efeito de grupos de alface dentro das estações onde na vertical são os grupos de alface e na horizontal as estações. Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical não diferem entre si, médias seguidas da mesma letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tuckey 5%).

Durante o verão, os níveis de MDA foram elevados na alface Lisa, que apresentou o valor mais alto (0,01508760 g MDA/g de matéria fresca). Isso sugere que a alface Lisa é mais suscetível ao estresse oxidativo causado pelas altas temperaturas e pela radiação solar intensa. As variedades de alface crespa e americana apresentaram médias semelhantes. O estudo de Oliveira (2022) destaca que, em condições de calor excessivo, a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) aumenta nas plantas, promovendo a peroxidação lipídica. A alface Crespa e Americana também foram afetadas, mas em menor grau, possivelmente devido a uma maior capacidade de tolerância ao calor e mecanismos de defesa antioxidantes mais eficientes. No outono, para a alface americana, registrou-se o maior valor de malondialdeído (MDA) atingido 0,0171 g, superando tanto os valores observados nas outras estações quanto os dos demais grupos nesse período. Este resultado indica uma resposta acentuada ao estresse ambiental, possivelmente associada à transição das condições climáticas e ao aumento das oscilações térmicas características da estação. Nos demais períodos, os níveis de MDA deste grupo permaneceram baixos e comparáveis aos dos outros grupos, sugerindo que a sensibilidade observada seja específica ao outono. (Oliveira, 2022). (Segundo Almeida (2016), as mudanças sazonais podem influenciar significativamente os mecanismos antioxidantes das

plantas. A alface Lisa e Crespa parecem se adaptar melhor a essa transição, apresentando menor estresse oxidativo, enquanto a Americana enfrenta mais dificuldades para ajustar seu metabolismo às novas condições.

No experimento de inverno, a alface crespa apresentou uma estabilidade notável dos níveis de malondialdeído (MDA) ao longo das estações, com variações restritas à faixa de 0,0104 a 0,0131 g. A ausência de diferenças estatísticas relevantes entre as estações para este grupo sugere uma maior resiliência fisiológica frente às flutuações sazonais, possivelmente decorrente de características anatômicas ou metabólicas que conferem maior eficiência nos mecanismos antioxidantes.

Na primavera, os níveis de MDA entre as variedades foram bastante semelhantes, com valores próximos de 0,010 g.

As condições climáticas desta estação, caracterizadas por temperaturas moderadas e uma quantidade equilibrada de luz solar, são ideais para o crescimento das plantas, permitindo que elas operem com um mínimo de estresse oxidativo (Oliveira, 2022). Nesse período, o equilíbrio entre a produção de radicais livres e a capacidade antioxidante das plantas parece ser melhor controlado, o que resulta em baixos níveis de MDA para todas as variedades de alface.

Entre os tipos das alfaces analisadas, a alface Lisa demonstrou ser a mais vulnerável ao estresse oxidativo no verão, possivelmente devido a uma menor capacidade de adaptação ao calor extremo. Já a alface Americana, embora tenha apresentado maior resistência durante o verão, mostrou-se mais sensível no outono. A alface Crespa, por outro lado, exibiu uma resposta mais consistente ao longo das estações, com variações menores nos níveis de MDA, o que pode indicar uma maior resiliência às mudanças climáticas (Oliveira, 2022).

Esses resultados confirmam estudos anteriores que mostram que diferentes variedades de alface possuem capacidades antioxidantes e tolerâncias ao estresse ambiental variadas. As variedades com mecanismos antioxidantes mais eficazes tendem a apresentar menores níveis de peroxidação lipídica e, conseqüentemente, são menos suscetíveis aos danos causados pelas condições ambientais adversas (Oliveira, 2021).

Os dados indicaram que há uma clara interação entre os grupos de alface e as condições sazonais no que diz respeito à peroxidação lipídica. A variedade Lisa parece

ser mais vulnerável durante o Verão, a Crespa apresenta maior peroxidação lipídica durante o verão. Por outro lado, a variedade Americana destaca-se por apresentar o valor mais elevado durante o Outono, possivelmente devido ao estresse associado às baixas temperaturas. Este comportamento diferencial pode ser atribuído às características fisiológicas de cada variedade, que respondem de forma distinta às condições ambientais específicas de cada estação.

A peroxidação lipídica está diretamente relacionada com a degradação de ácidos nas membranas celulares, provocada por condições de estresse, como temperaturas extremas, excesso de luz, ou deficiência hídrica, que comprometem a integridade celular e o funcionamento das plantas (Mittler, 2002).

Os resultados indicam que cada cultivar pode ter mecanismos de resistência ou suscetibilidade diferentes a esses fatores, possivelmente, devido a variações de temperatura e maior disponibilidade de luz. Por fim, a alface Crespa apresenta maior sensibilidade durante o verão, o que pode estar relacionado com o aumento da intensidade luminosa e das temperaturas. Esses resultados são consistentes com pesquisas recentes que mostram como diferentes cultivares de plantas possuem distintas capacidades de lidar com variações sazonais de estresse ambiental (Santos, 2021; Lima et al., 2020; Oliveira et al., 2022).

Em estudos que investigam o papel dos antioxidantes durante a germinação das sementes, foi observado que os mecanismos que protegem as células contra o oxigênio ativado (ou espécies reativas de oxigênio) são, em sua maioria, enzimáticos. Isso significa que as enzimas desempenham um papel fundamental na defesa das sementes contra o estresse oxidativo (Resende, 2006).

Esses resultados estão de acordo com estudos que mostram que diferentes tipos de alface têm diferentes capacidades de combater o estresse oxidativo, dependendo da sua variedade e da estação do ano (Silva et al., 2020). Alfases com melhores mecanismos antioxidantes conseguem neutralizar mais facilmente os radicais livres, prevenindo danos celulares e promovendo um crescimento mais saudável.

5.3. Compostos fenólicos

O estudo analisou os teores de compostos fenólicos em mudas de alface em diferentes épocas do ano, verão, outono, inverno e primavera. As plantas apresentaram variação nos valores de compostos fenólicos entre 6.701163 mg EAG.g⁻¹ de matéria fresca no verão e 18.856080 mg EAG.g⁻¹ de matéria fresca na primavera (Figura 8).

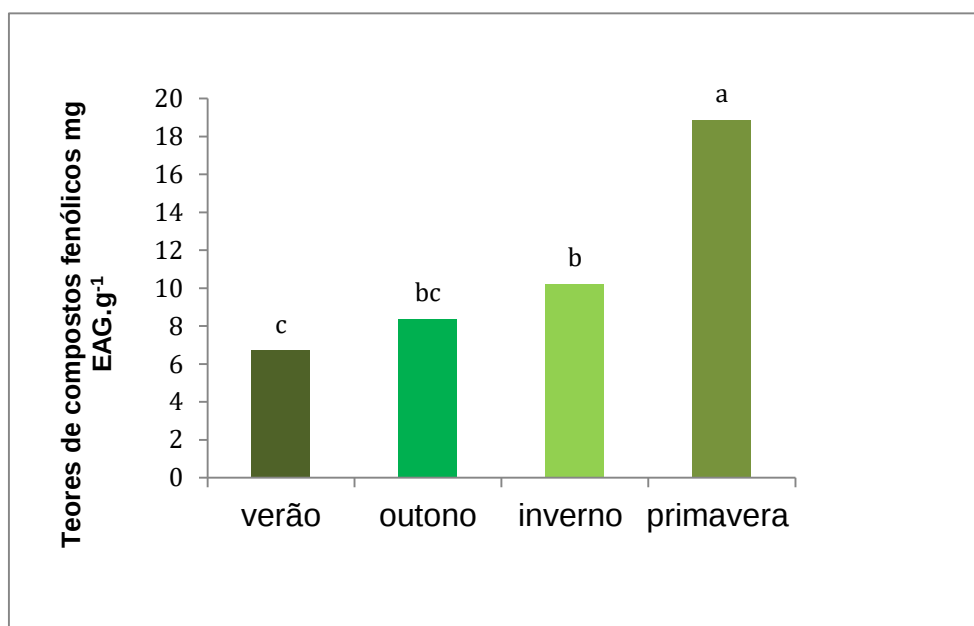


Figura 8. Teores de compostos fenólicos em mudas de alface segundo as estações do ano. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si.

De acordo com os resultados para teores de compostos fenólicos em mudas de alface, foi observado variações significativas ao longo das estações.

A primavera apresentou o maior teor de compostos fenólicos, alcançando aproximadamente 18 mg EAG.g⁻¹ de matéria fresca, indicando superioridade em relação às demais estações.

O inverno, com cerca de 10 mg EAG.g⁻¹ de matéria fresca, ficando em segundo lugar, com valor significativamente inferior à primavera, mas superior ao verão e ao outono. O outono, por sua vez não diferiu estatisticamente do inverno, mas também não apresentando diferença significativa em relação ao verão, demonstrando um comportamento intermediário. Por fim, o verão apresentou o menor teor de compostos

fenólicos, aproximadamente $6 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$, sendo significativamente inferior às demais estações. Os compostos fenólicos desempenham um papel essencial na defesa das plantas contra estresses ambientais, atuando como antioxidantes naturais.

No cultivo de mudas de alface, os teores desses compostos variam ao longo das estações do ano, refletindo a adaptação da planta às diferentes condições climáticas. As variações sazonais, como mudanças na temperatura, intensidade de luz e umidade, afetam diretamente a produção de compostos fenólicos, resultando em diferentes teores nas folhas da alface (Souza, 2023).

Durante o verão, o teor de compostos fenólicos foi relativamente baixo ($6.701163 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$). Isso pode ser explicado pelas condições de temperatura elevadas e alta radiação solar, que aumenta o nível do estresse oxidativo nas plantas. Arbos et al. (2010) afirmam que o aumento da temperatura no verão pode causar danos aos tecidos das mudas, e levar à inibição da produção de compostos fenólicos, já que o objetivo metabólico da planta está voltado para a sobrevivência em condições adversas. Negrão (2021) também destaca que, sob calor extremo, a manutenção da hidratação é priorizada, o que pode afetar a biossíntese de compostos antioxidantes como os compostos fenólicos.

No experimento de outono, o teor de compostos fenólicos aumentou para $8.369650 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$, o que sugere que as condições climáticas mais amenas favorecem a produção dessas substâncias. De acordo com Arbos et al. (2010), as temperaturas moderadas e a redução da intensidade da luz estimulam a produção de compostos secundários, como os compostos fenólicos, que auxiliam na proteção contra o estresse oxidativo. Negrão (2021) reforça que essa estação é propícia para o acúmulo de compostos antioxidantes, já que a planta está em um estado metabólico mais equilibrado, não sofrendo tanto com os extremos climáticos.

No experimento de inverno, o teor de compostos fenólicos aumentou ainda mais, atingindo $10.216212 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$. Esse aumento pode ser atribuído ao fato de que, em condições de frio, as plantas produzem mais compostos fenólicos para se defender de possíveis danos causados pelo estresse térmico. Segundo Ray et al. (2024), as temperaturas mais baixas induzem a ativação de vias biossintéticas ligadas à defesa antioxidante, resultando em maior produção de fenólicos. Arbos et al. (2010) acrescentam que, durante o inverno, as plantas ajustam seu metabolismo para lidar

com temperaturas mais baixas, o que inclui o aumento na produção de substâncias que ajudam na manutenção da integridade celular.

No experimento de outono e no experimento inverno sugere que essas estações oferecem condições que estimulam as defesas antioxidantes nas plantas. Conforme Santos et. al. (2019), estudos corroboram com o achado nesta pesquisa, onde mostram que temperatura baixa é um dos fatores que induzem a produção de compostos fenólicos. No estudo em questão, observou-se que durante períodos com temperaturas mínimas, como 13,2°C no inverno e 14,4°C no outono houve um aumento na síntese desses compostos, reforçando a relação entre o frio e a maior produção de fenólicos nas plantas.

Foi possível observar um maior teor de compostos fenólicos no experimento na primavera com uma média de 18.856080 mg EAG.g⁻¹ e ainda um equilíbrio ideal entre o período com temperatura mínima de 17,2°C com boa luminosidade criando condições favoráveis para o metabolismo das plantas. Segundo Arbos et al. (2010), o aumento da radiação solar e as mudanças na temperatura podem induzir a produção de antioxidantes, incluindo os compostos fenólicos, como forma de proteger os tecidos vegetais contra o aumento de radicais livres. Negrão (2021) afirma que essa fase de crescimento acelerado nas mudas de alface está diretamente relacionada à maior produção de metabólicos secundários, sendo os fenólicos um dos principais compostos envolvidos.

A época do ano em que a planta é cultivada pode afetar a produção de compostos fenólicos, pois diferentes estações apresentam variações em luz solar, temperatura, e umidade. As plantas expostas a diferentes temperaturas podem produzir diferentes níveis de compostos fenólicos. Foi possível verificar que as mudas de alface cultivadas na primavera apresentaram um teor de compostos fenólicos de 18.56 mg EAG.g⁻¹ de matéria fresca, esse valor é próximo ao encontrado por Negrão (2021).

De acordo com Negrão, (2021) em um estudo que analisou a composição fenólica de diferentes hortaliças consumidas no Brasil, incluindo leguminosas e vegetais, a alface apresentou um dos maiores teores de compostos fenólicos entre as plantas analisadas, com um valor de 1690 mg de equivalentes de ácido gálico por grama (mg EAGg-1). Este valor é uma medida da concentração de compostos fenólicos na alface, indicando uma quantidade significativa desses antioxidantes.

No estudo realizado por Arbos et al. (2010), foram analisados os níveis de compostos fenólicos totais em diferentes hortaliças, incluindo alface, rúcula e almeirão, cultivadas tanto em sistemas orgânicos quanto convencionais. As plantas de alface, em particular, apresentaram uma variação nos valores de compostos fenólicos totais, indo de 91,22 mg EAG/100g a 108,72 mg EAG/100g de amostra fresca.

No estudo de Negrão et al. (2021) foi analisada a influência de diferentes sistemas de cultivo na produção de compostos bioativos e atividade antioxidante em alface (*Lactuca sativa*). Esse estudo revelou que o sistema de cultivo pode ter um papel importante na acumulação de compostos como fenólicos, mostrando que, em ambientes mais controlados, os níveis desses compostos tendem a serem maiores. O estudo de Negrão et al. (2021) corroboram com os resultados encontrados no presente trabalho, onde mostra um pico de compostos fenólicos na primavera. Negrão et al. (2021), destacaram ainda que condições favoráveis de cultivo podem promover maior acúmulo de compostos bioativos. A primavera (Figura 8), representa um período em que as condições climáticas podem ter sido mais adequadas, tal como a um ambiente de cultivo otimizado, favorecendo o acúmulo de fenólicos.

No trabalho de Pan et al. (2018) verificou-se o impacto do aumento de CO₂ e altas temperaturas na fotossíntese e no metabolismo de compostos secundários em tomateiros. Eles descobriram que o aumento de CO₂, combinado com temperaturas altas, melhora a fotossíntese e, conseqüentemente, a produção de compostos bioativos. Esse achado está alinhado com os resultados observados na (Figura 8) onde a primavera por ser uma estação de transição, apresentou maior teor de compostos fenólicos, a temperatura moderada e a exposição de luz favoreceram a fotossíntese e por consequência aumentou a produção de compostos fenólicos.

5.4. Carboidratos

Os resultados demonstram variações significativas nos teores de carboidratos (mg de glicose/g de massa fresca foliar) ao longo das diferentes estações do ano. Onde a primavera apresentou maior acúmulo de carboidratos, com 0,04756667 mg de glicose/g de massa fresca foliar, diferindo estatisticamente das demais estações pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O inverno demonstrou valor intermediário (0,03568067 mg

de glicose/g de massa fresca foliar), não diferindo significativamente da primavera, mas apresentando tendências de aumento em comparação ao verão (0,03190733 mg de glicose/g de massa fresca foliar) e ao outono (0,02802080 mg de glicose/g de massa fresca foliar), conforme apresentado na Figura 9, os quais analisados estatisticamente pelo teste de comparação de médias Tukey a 5% confirmaram diferenças significativas entre as estações (letras a, ab, b e b).

Estas variações nos teores de carboidratos podem estar ligadas a mudanças sazonais nos fatores ambientais que afetam o metabolismo das plantas, como luz, temperatura e disponibilidade hídrica.

O aumento da irradiação solar e da temperatura na primavera promove maior taxa de fotossíntese, o que explica o maior acúmulo de carboidratos. A alta atividade fotossintética resulta em maior produção de glicose, que é armazenada nas folhas na forma de carboidratos solúveis.

Apesar das temperaturas mais baixas no inverno, as plantas podem acumular carboidratos como uma forma de adaptação ao estresse térmico. No inverno, o metabolismo é reduzido, mas há maior tendência para a alocação de carboidratos em órgãos de armazenamento (Zhang et al., 2020; Rosa et al., 2021).

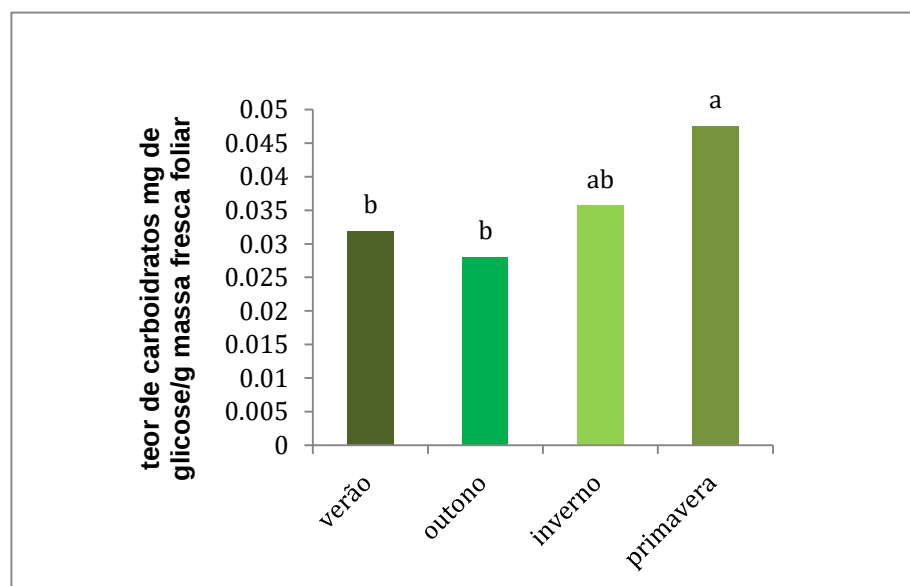


Figura 9. Teores de carboidrato em mudas de alface em diferentes estações do ano. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si.

De acordo com Larcher (2003), o acúmulo de carboidratos é fundamental para a sobrevivência das plantas em condições adversas. Embora o verão ofereça uma alta incidência de luz solar, observou-se que as plantas acumularam menos carboidratos nessa estação em comparação com a primavera. Essa diferença pode estar associada ao estresse térmico causado pelas temperaturas mais elevadas no verão, que afetam negativamente a capacidade das plantas de armazenar carboidratos.

Embora o verão forneça mais horas de luz solar, a primavera, apesar de ter uma menor quantidade de luz, pode apresentar condições mais favoráveis para o acúmulo de carboidratos. As temperaturas mais amenas e menos estressantes na primavera permitem que as plantas realizem a fotossíntese de forma mais eficiente, sem o impacto negativo do calor excessivo, o que pode explicar o maior acúmulo de carboidratos nessa estação.

Em condições de calor extremo, as plantas enfrentam dificuldades para manter a eficiência fotossintética devido à maior transpiração e ao fechamento estomático, o que limita a absorção de CO_2 . Segundo Taiz e Zeiger (2017), a produção de carboidratos é reduzida pelo estresse térmico que afeta a atividade enzimática envolvida na fotossíntese, o que explica os menores níveis de carboidratos no verão. Entretanto, os resultados demonstram que no outono, a redução da atividade fotossintética, devido à diminuição da luz e da temperatura.

A temperatura mencionada no outono refere-se à redução da intensidade e da duração da luz solar, assim como há queda gradual das temperaturas à medida que o clima se torna mais ameno. Essas condições afetam diretamente a atividade fotossintética das plantas. Com menos luz disponível, o processo de fotossíntese é reduzido, já que as plantas dependem da luz solar para converter dióxido de carbono e água em glicose (carboidrato) e oxigênio. Além disso, temperaturas mais baixas podem diminuir a eficiência das enzimas envolvidas na fotossíntese, desacelerando o metabolismo da planta (Taiz e Zeiger, 2017).

No estudo realizado por Carvalho (2015) foram mensuradas as concentrações médias de açúcares redutores (glicose e frutose) e não redutores (sacarose) nas folhas de plantas de melão submetidas a diferentes regimes de temperatura. As médias obtidas indicaram que as plantas submetidas a temperaturas mais elevadas apresentaram concentrações médias de glicose de aproximadamente 3,5 mg/g de

matéria fresca, enquanto aquelas em temperaturas mais baixas tiveram médias em torno de 2,1 mg/g de matéria fresca e as concentrações médias de frutose, de maneira similar, foram mais altas em plantas sob temperaturas elevadas, atingindo cerca de 4,0 mg/g de matéria fresca, comparadas a 2,3 mg/g de matéria fresca nas condições de temperatura mais amena.

A sacarose em relação aos açúcares não redutores, mostrou uma resposta inversa, com concentrações médias mais elevadas em plantas sob temperaturas mais baixas, em torno de 5,2 mg/g de matéria fresca, enquanto que sob temperaturas mais elevadas, essa média foi de 3,8 mg/g de matéria fresca.

Os dados de Carvalho, (2015) corroboram com os achados desta pesquisa onde mostram como as temperaturas afetam o acúmulo de açúcares específicos (Figura 7), enquanto reflete os carboidratos totais nas folhas ao longo das estações. Ambos os estudos sugerem que condições climáticas influenciam fortemente o acúmulo de carboidratos nas plantas, com valores mais altos em estações ou condições de temperaturas elevadas (como no verão e na primavera).

No entanto, os valores absolutos de Carvalho et al., (2018) para açúcares específicos (glicose, frutose e sacarose) são menores do que os valores totais de carboidratos conforme observado na Figura 7, uma vez que os carboidratos totais incluem uma gama mais ampla de açúcares e compostos relacionados.

Segundo Qin et al. (2020), em estudo com alface, foram identificadas proteínas (cinase MAK, a cinase caseína, a trealose-6-fosfato e a cinase de proteína TOR) relacionadas ao metabolismo da sacarose sob temperaturas altas que foram significativamente aumentadas e os teores de açúcares solúveis. As proteínas sofreram alterações durante o pendoamento sob altas temperaturas nas folhas de alface.

6. CONCLUSÕES

As variações sazonais do microclima da estufa influenciaram diretamente no metabolismo das mudas de alface onde o teor de prolina foi alterado no verão e reduzido na primavera. Entretanto, devido ao calor excessivo, a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) favoreceu o aumento da peroxidação lipídica nas plantas no verão e no outono. Logo, as mudas sofreram maiores danos nas suas membranas revelando um indicador de estresse oxidativo em mudas de alface.

O maior teor de compostos fenólicos foi encontrado na estação da primavera onde foi observado um equilíbrio ideal entre o período com temperatura mínima de 17,2°C e boa luminosidade criando condições favoráveis para o metabolismo das plantas, no entanto no verão o teor de compostos fenólicos foi relativamente baixo. Esse resultado pode ser explicado pelas condições de temperaturas elevadas e alta radiação solar, levando a um aumento no nível do estresse oxidativo nas plantas.

Os carboidratos ao longo das variações de temperatura apresentou maior acúmulo de açúcares na primavera e um menor acúmulo de açúcares no outono, onde a intensidade luminosa é menor afetando a fotossíntese.

Dos metabólicos estudados, a variável peroxidação lipídica foi a que apresentou interação significativa entre os fatores grupos de alface e estações do ano.

Das cultivares estudadas (lisa, crespa e americana), a alface lisa apresentou o valor mais alto de MDA/g durante o verão, com isso pode-se concluir que a alface lisa é mais suscetível ao estresse oxidativo causado pelas altas temperaturas e pela radiação solar intensa. As variedades de alface Crespa e Americana apresentaram médias semelhantes, ou seja, também foram afetadas, mas em menor grau, possivelmente devido a uma maior capacidade de tolerância ao calor e mecanismos de defesa antioxidantes mais eficientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albalasmeh, A. A., Berhe, A. A., Ghezzehei, T. A (2013) A new method for rapid determination of carbohydrate and total carbon concentrations using UV spectrophotometry. *Carbohydr Polymers*, 97: 253-261, Life and Environmental Sciences, University of California, Merced, United States.
- Almeida, E. J. (2018) Ecofisiologia de hortaliças. In: Dias, J. P. T. (org.) *Ecofisiologia de culturas agrícolas*. 1. ed. Belo Horizonte: EdUEMG, cap. 4, p. 45–59.
- Araujo, A. F. (2016) Mudanças sazonais e sua influência no metabolismo das plantas cultivadas. *Agricultural Research Journal*, 33 (2): 128–137.
- Arbos, K. A., Freitas, R. J. S., Stertz, S. C., Dornas, M. F. (2010) Atividade antioxidante e teor de fenólicos totais em hortaliças orgânicas e convencionais. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30: 501–506.
- Ashraf, M., Foolad, M. R. (2007) Papéis da Glicina Betaína e Prolina na Melhoria da Resistência ao Estresse Abiótico de Plantas. *Environmental and Experimental Botany*, 59: 206–216. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>. Acesso em: 14 maio 2025.
- Bandeira, G. R. L., Pinto, H. C. dos S., Magalhães, P. S., Aragão, C. A., Queiroz, S. O. P. de, Souza, E. R., Seido, S. L. (2011). Manejo de irrigação para cultivo de alface em ambiente protegido. *Horticultura brasileira* 29: 237-241.
- Bates, L. S. (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39: 205–207.
- Borne, H. R. (1999) *Produção de mudas de hortaliças*. Guaíba-RS: Editora Agropecuária. 189 p.
- Brito, A. E. D. A. (2016) Crescimento e metabolismo bioquímico em mudas de dendê *Elaeis guineensis* Jacq. na variedade Deli x Lamé acometidas a diferentes concentrações de alumínio. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém.
- Callegari, O., Santos, H. S., Scapim, C. A. (2008) Variações do ambiente e de práticas culturais na formação de mudas e na produtividade da alface (*Lactuca sativa* L. cv. Elisa). *Acta Scientiarum. Agronomy*, 23: 1117–1122. DOI:

<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v23i0.2568>.

Campagnol, R., Mello, S. C., Pinheiro, R. R. (2015) *Cultivo de hortaliças em ambiente protegido*. Curitiba: SENAR/PR. Disponível em: https://issuu.com/programahortimais/docs/cutivo_em_ambiente_protegido. Acesso em: 14 maio 2025.

Carmello, Q. A. C. (1995) Nutrição e adubação de mudas hortícolas. In: Minami, K. (Org.). *Produção de mudas de alta qualidade*. São Paulo: T.A. Queiroz, p. 27–37.

Carvalho, C. A. C. (2015) Impacto do estresse térmico e de CO₂ no crescimento inicial e fisiologia do meloeiro. 56 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró-RN.

Carvalho, L. M., Araújo, S. B., Carvalho, H. W. L., Carvalho, C. G. P. (2018) Proline content of sunflower cultivars in the Brazilian semiarid region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53 (8): 970–973.

Castoldi, R., Charlo, H. C. O., Vargas, P. F., Ito, L. A., Braz, L. T. (2011) Cultivo protegido de hortaliças: do plantio à colheita. *Horticultura Brasileira*, 29 (3): 276–281. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362011000300008>.

Davenport, S. B., Gallego, S. M., Benavides, M. P., Tomaro, M. L. (2003) Behaviour of antioxidant defense system in the adaptive response to salt stress in *Helianthus annuus* L. cells. *Plant Growth Regulation*, 40: 81–88.

Faria Junior, M. J. A., Hora, R. C. (2018) Cultivo protegido. In: Brandão Filho, J. U. T., Freitas, P. S. L., Berian, L. O. S., Goto, R. (Orgs.). *Hortaliças-fruto*. Maringá: EDUEM, p. 451–487. ISBN: 978-65-86383-01-0. DOI: <https://doi.org/10.7476/9786586383010.0016>.

Ferrera, T. S., Heldwein, A. B., Santos, C. O., Somavilla, J. C., Sautter, C. K. (2016) Substâncias fenólicas, flavonoides e capacidade antioxidante em erva-mate sob diferentes coberturas do solo e sombreamentos. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, 18 (2): 588–596. DOI: https://doi.org/10.1590/1983-084X/15_197.

Filgueira, F. A. R. (2007) *Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças*. 3. ed. Viçosa: UFV. 401 p.

Filgueira, F. A. R. (2008) *Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças*. 3. ed. Viçosa: UFV. 421 p.

- Franzin, S. M., Menezes, N. L., Garcia, D. C., Santos, O. S. (2005) Efeito da qualidade das sementes sobre a formação de mudas de alface. *Horticultura Brasileira*, 23 (2): 193–197. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/jVyz5j6dDDPcGscrPJQjwdw/>. Acesso em: 14 maio 2025.
- Furlan, R. A., Folegatti, M. V. (2002). Distribuição vertical e horizontal de temperaturas do ar em ambientes protegidos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6 (1): 93–100.
- Hassan, M. U., Chattha, M. U., Khan, I., Chattha, M. B., Barbanti, L., Aamer, M., IQBAL, M. M., Nawaz, M., Mahmood, A., ALI, A., Aslam, M. T. (2021). Heat stress in cultivated plants: nature, impact, mechanisms, and mitigation strategies—a review. *Plant Biosystems*, 155 (2): 211–234. DOI: <https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1727987>.
- Higuti, O. (2010) Produção de mudas de abóbora com diferentes doses de nitrogênio e potássio. *Bragantia*, 69 (2): 377–380.
- Hortibrasil (2013) Alfaces em números: novidades no mercado. *Frutas e Hortaliças Frescas*, São Paulo, Disponível em: http://hortibrasil.org.br/jnw/index.php?option=com_content&view=article&id=1131:alfaceemnumero&catid=64:frutas-ehortalicasfrescas&Itemid=82. Acesso em: 10 fev. 2022.
- IBGE (2017) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo agropecuário Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuario.html>.
- INMET (2023) Instituto Nacional de Meteorologia. Dados históricos anuais – Ano 2023 (Automática). Dados de temperaturas em Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 27 de abril de 2024.
- Koch, K. E. (2004). Sucrose metabolism: regulatory mechanisms and pivotal roles in sugar sensing and plant development. *Current Opinion in Plant Biology*, 7 (3): 235–246, 2004. doi:10.1016/j.pbi.2004.03.014.
- Larcher, W. (2003). *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Rima Artes e Textos.
- Leskovar, D. I. et al. (2008) Aba to enhance water stress tolerance of vegetable

transplants. *Acta Horticulturae*, 782: 253–256.

Lima, M. S. S. (2018) Índices morfofisiológicos de alface, produzidas em diferentes substratos em ambiente protegido. 2018. 37 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Paragominas, Paragominas.

Luz, J. M. Q., Queiroz, A. A., Carreon, R. (2010) Aplicação foliar de fertilizantes organominerais em cultura de alface. *Horticultura Brasileira*, 28 (3): 373–377.

Mansinhos, I. et al. (2022) Impact of temperature on phenolic and osmolyte contents in in vitro cultures and micropropagated plants of two Mediterranean plant species, *Lavandula viridis* and *Thymus lotocephalus*. *Plants (Basel)*, 11 (24): 3516. doi:10.3390/plants11243516.

Marcelino, A. G. L., Barbosa, R.(2023) Compostos fenólicos e capacidade antioxidante de diferentes partes de hortaliças. *SLACAN* - Simpósio Latino-Americano de Ciência de Alimentos e Nutrição, Campinas. Disponível em: <https://proceedings.science/slacan-2023/trabalhos/compostos-fenolicos-e-capacidade-antioxidante-de-diferentes-partes-de-hortalicas?lang=pt>. Acesso em: 13 maio 2025.

Marques, I. C. S. Óxido nítrico como agente amenizador do estresse salino em alface semi-hidropônica. (2020) 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

Martins, L. M. et al. (2023) Teor de fitoquímicos em alface rubra cultivada em sistemas orgânico, convencional e hidropônico. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, 16 (8): 8996–9009.

Melo, R. A., Carvalho, R. F., Gomes, M. T. (2020) Oxidative stress and physiological responses of lettuce under different seasonal conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (7): 1834–1842. doi:10.1021/acs.jafc.9b06834.

Misra, N., Gupt A, A.(2006) Effect of salinity and different nitrogen sources on the activity of antioxidant enzymes and indole alkaloid content in *Catharanthus roseus* seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 162 (1): 54–64.

Mittler, R. (2012) Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance in plants. *Trends in Plant Science*, v. 7, n. 9, p. 405–410. doi:10.1016/S1360-1385(02)02312-9.

Mittler, R., Fink, A., Goloubino, F. F. P. (2012) How do plants feel heat? Trends in Biochemical Sciences, 37 (3): 118–125.

Negrão, R. O. S. (2021) Cultivo de alface americana (*Lactuca sativa* L.) em sistema de produção hidropônico e convencional no município de Benevides, Pará. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém.

Oliveira, W. A. S. (2022) Impacto das condições ambientais no estresse oxidativo das plantas: uma análise de cultivares de alface. Journal of Plant Stress Physiology, 45(1): 102-112.

Paim, B. T. (2020) Efeito da aplicação de estresse hídrico sob a qualidade de alface (*Lactuca sativa* L.). 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas.

Pan, C., Ahammed, G. J., Li, X., Shi, K. (2018) Elevated CO₂ improves photosynthesis under high temperature by attenuating functional limitations to energy fluxes, electron transport, and redox homeostasis in tomato leaves. Frontiers in Plant Science, 9, artigo 1739.

Pesagro-Rio. (1998) Produção e pesquisa do “agrobio” e de caldas alternativas para controle de pragas e doenças. Niterói. Disponível em: https://legacy.agroecologiaemrede.org.br/acervo/arquivos/P116_2005-06-21_142553_350.pdf. Acesso em: 14 maio 2025.

Qin, X., Li, P., Lu, S., Sun, Y., Meng, L., Hão, J., Fan, S. (2020) Phosphoproteomic analysis of lettuce (*Lactuca sativa* L.) reveals starch and sucrose metabolism functions during bolting induced by high temperature. PLoS ONE, 15(12), e0244198.

Queiroz, C. G., Garcia, Q. S., Filho, J. P. L. (2002) Atividade fotossintética e peroxidação de lipídios de membrana em plantas de aroeira-do-sertão sob estresse hídrico e após reidratação. Brazilian Journal of Plant Physiology, 14 (1): 59-63.

Ramos, L. (2019) Efeito do estresse térmico em plantas de hortaliças. Revista de Botânica Aplicada, 15 (1): 112-119.

Ray, A., Kundu, S., Mohapatra, S. S., Sinha, S., Khoshru, B., Keswani, C., Mitra, D. (2024) Uma visão sobre o papel dos fenólicos na tolerância ao estresse abiótico em

plantas: perspectiva atual para um ambiente sustentável. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 18: 64-79. doi:10.22207/JPAM.18.1.09.

Rebouças, P. M., Dias, I. F., Alves, M. A., Barbosa, F. F. J. A. D. (2015) Radiação solar e temperatura do ar em ambiente protegido. *Revista Agrogeoambiental*, 7 (2): 115-125.

Resende, M. D. L. (2006) Alterações fisiológicas e bioquímicas durante a germinação de sementes de café (*Coffea arabica* L.) cv. Rubi. 119 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Rosa, M., Prado, C., Podazza, G., Interdonato, R., González, J. A., Hilal, M., Prado, F. E. (2021) Carbohydrate metabolism in plants under drought stress. In: Ahmad, P., Ahanger, M. A. (Orgs.). *Plant Metabolites and Regulation Under Environmental Stress*. London: Academic Press, p. 143-162. doi:10.1016/B978-0-12-817955-5.00007-8.

Ruan, Y. L. (2014) Sucrose metabolism: gateway to diverse carbon use and sugar signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 65:33-67. doi:10.1146/annurev-arplant-050213-040251.

Sampaio, F. M. S. (2017) Tolerância ao estresse térmico em sementes de alface em função do tratamento com selênio. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Santos, A. P. (2016) Características agronômicas e qualidade da alface (*Lactuca sativa* L.) sob fertilização orgânica e mineral. 114 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Santos, M. (2021) Produção de biofertilizantes e sua influência na produção de mudas de alface. Universidade do Estado da Bahia – Departamento de Ciências Humanas, Campus IX.

Silva, A. C. R., Fernandes, H. S., Martins, S. R., Silva, J. B., Schiedeck, G., Armas, E. (2000a) Produção de mudas de alface com vermicompostos em diferentes tipos de bandeja. *Horticultura Brasileira*, Brasília, 18: 512-513.

Silva, E. T., Byllardt, L. V. B., Gomes, S., Wolf, G. D. (2003) Comportamento da temperatura do ar sob condições de cultivo em ambiente protegido. *Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais*, 1 (1): 51-54.

Silva, V. F., Bezerra, N. F., Negreiros, M. Z., Pedrosa, J. F. (2000b) Comportamento de cultivares de alface em diferentes espaçamentos sob temperatura e luminosidade elevadas. *Horticultura Brasileira*, Brasília, 18 (3): 183-187.

Silveira, F. F. (2019) Efeito da aplicação exógena de L-prolina e da suplementação luminosa no desenvolvimento e produção de pimentão. Dissertação (Mestrado em Ciências – Fitotecnia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

Souza, A. S. N. (2023) Influência da cultivar e da estação do ano (inverno e verão) em compostos bioativos em quatro cultivares de alface vermelha (*Lactuca sativa* L.). Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Porto Alegre.

Szabados, L., Savouré, A. (2010) A proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15 (2): 89-97.

Taiz, L., Zeiger, E. (2017) Fisiologia vegetal. 5. ed. Porto Alegre: Artmed. Cap. 7, 14. 918 p.

Tonhate, R. (2018) L-prolina no alívio do estresse térmico em tomateiro produzido em ambiente protegido. 51 f. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

Verbruggen, N., Hermans, C. (2008) Proline accumulation in plants: a review. *Amino Acids*, 35 (4): 753-759.

Zandonadi, F. (2022) O cinturão verde que alimenta o Rio de Janeiro. *Conexão Safra*. Disponível em: <https://conexaosafra.com/agro-rio-de-janeiro/o-cinturao-verde-que-alimenta-o-rio-de-janeiro/>. Acesso em: 24 ago. 2023.

Zhang, Y., Liu, Z., Zhang, Y., Liu, P., Qin, Z. (2020) Adaptation of plants to environmental stress through carbohydrate metabolism reprogramming. *Current Opinion in Plant Biology*, 55: 101-106. doi:10.1016/j.pbi.2020.04.006.

Zhou, W., Liang, X., Li, K., Dai, P., Li, J., Liang, B., Sun, C., Lin, X. (2021) Metabolomics analysis reveals potential mechanisms of phenolic accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.) induced by low nitrogen supply. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158: 446-453.