



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia



**ESTUDO DE PROCESSOS OTIMIZADOS NA AGRICULTURA EM AMBIENTES
CONTROLADOS**

Shirly Marleny Lara Pérez

Tese do Exame de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia
da Universidade Federal de São Carlos.

Orientadores:

Prof. Dr. Vanderlei Salvador Bagnato

Prof. Dra. Kate Cristina Blanco

bolsista CAPES

São Carlos - SP

2024

Dedico este trabalho à minha família que ficou com saudades de mim, para eu cumprir o sonho de ser cientista.

Agradecimentos

A vida é muito longa para fazer uma coisa só e um doutorado não é uma jornada solitária; embora sempre estamos, nunca estive verdadeiramente só.

Agradeço a minha família, por sempre me apoiar, e mesmo não entendendo, sempre torcendo para que tudo desse certo. A minha mãe, que sempre é e será meu porto seguro, meu motor e meu ponto fraco, por você eu faço tudo! Meus irmãos, que são meu coração na mão e minha alegria, mas também minha vontade diária de ser exemplo para vocês, e meu pai por sempre no seu jeito se orgulhar de mim. Sem vocês e todas suas orações eu não iria chegar até aqui.

A meus orientadores, Vanderlei Bagnato sempre com dedicação inalcançável e amor na pesquisa tem sido exemplo e motivação para afrontar os desafios, a Kate Blanco, pela oportunidade de aprender juntas, por todos os ensinamentos não só no laboratório, mas também na vida, com muita lealdade, humildade e nunca esquecendo os procedimentos. Obrigada pela jornada! Sou muita grata de ter o privilégio de ser aluna de vocês!

Ao Emmanuel, por toda nossa trajetória até hoje, por mostrar o caminho com palavras de apoio, e incentivo diário e por sempre vibrar em cada conquista

A meus amigos Jennifer e Lucas, sempre serão a família que construí em São Carlos, vocês aqueceram meu coração inúmeras vezes, de aqui para sempre. Obrigada!

Aos meus amigos, Yosthin por todos os ensinamentos e momentos, por acreditar no meu potencial até quando eu não acreditei, por sempre ter uma palavra de apoio e fazer parte dessa história. A minha Dalila uma amiga incondicional, sempre animando e alegrando meus dias, com a essência sempre intacta. A Meus amigos de role e muitas alegrias, Vicente, Amanda, Paulinha, Didi, Matheus, Larissa, Orlando e minha linda Danika, obrigada!

Ao CEFER e professores, sempre no fim do dia com a melhor animação e dedicação com os alunos, e para mim foi crucial pois sempre encontrei apoio para esquecer as correrias do dia. Eterna gratidão

Ao Laboratório de Biofotônica ambiental, que tive o prazer de ver nascer e pertencer. Alessandra, Kamila e Mariana obrigada por todo o apoio e parceria para a realização deste projeto. Ao Rafael você foi fundamental-essencial nesse trabalho, muito obrigada por todos os ensinamentos e palavras de encorajamento, os dias no laboratório com você com certeza

foram leves e felizes. A Bruna pelo aprendizado juntas, você foi a certeza que eu tive de querer ensinar o bonito que a ciência pode nos dar. E ao meu querido Matheus, por sempre ter ouvidos para escutar, entendimento e muito carinho envolvido! Obrigada!

Ao Rene, Lucas e Daniel do LAT. Pelo apoio técnico oferecido e que sempre estiveram dispostos a ajudar, muito obrigada por tudo.

Ao Programa de Pós-graduação em Biotecnologia (*PPG-Biotec*) da UFSCar, pela oportunidade.

A Claudia Pastega, secretária do *PPG-Biotec*, que sempre ajudou a resolver todos os problemas.

Aos membros da Banca examinadora por aceitarem participar o processo de avaliação deste trabalho.

Ao CEPOF, ao laboratório de Biofotônica, pela infraestrutura e apoio para a realização deste projeto.

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

Obrigada!

*Seja você quem for,
seja qual for a posição social que você tenha na vida,
a mais alta ou a mais baixa,
tenha sempre como meta muita força,
muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e fé,
que um dia você chega lá, de alguma maneira você chega lá.*

Ayrton Senna

*“Dentro de mim
morreram muitos tigres*

*os que ficaram
no entanto
são livres.”*

Lau Siqueira.
O guardador de sorrisos, Trema Edições, 1998

Sumario

1	CAPITULO I	9
1.1	Introdução	9
1.2	Revisão da Literatura.....	10
1.2.1	Produções vegetais em ambientes controlados	10
1.2.2	Característica do espectro de luz em ambientes de cultivo controlado ..	11
1.2.3	Sistema hidropônico em ambiente protegido	14
1.2.4	Sanidade do sistema de cultivo hidropônico	15
1.3	Objetivos.....	15
1.4	Objetivos específicos.....	16
2	CAPITULO II: Produção Vegetal em Sistemas Hidropônicos Usando Descontaminação de Fluidos de Circulação Fechada	17
2.1	Contextualização.....	17
2.2	Metodologia.....	17
2.2.1	Obtenção das mudas de alface.....	18
2.2.2	Análise de área foliar.....	18
2.2.3	Análise de pigmentos Fotossintéticos.....	18
2.2.4	Processo de liofilização de alface	19
2.2.5	Análise de composto Fenólico Total.....	19
2.2.6	Análise de capacidade antioxidante -DPPH.....	20
2.2.7	Analises de minerais	20
2.2.8	Dispositivo para cultivo de plantas em ambientes controlados.....	21
2.2.9	Análise estatística.....	22
2.2.10	Configuração experimental	23
2.3	Resultados e discussões	24
2.4	Conclusão Parcial	32
3	CAPÍTULO III : Estudo Do Comportamento Da Alface Mini Lisa Variando A Intensidade Da Luz, Fotoperíodos E Concentração De Nutrientes.	33

3.1	Contextualização.....	33
3.2	Metodologia.....	33
3.2.1	Plantio das sementes e desenvolvimento das mudas alface	34
3.2.2	Configuração experimental	34
3.3	Resultados e discussões	35
3.4	Conclusão parcial	45
4	CAPÍTULO IV: Bioestimulação e Perfis Fitoquímicos de Quatro Variedades de Alface em Luz Controlada de Baixa Intensidade: Otimizando Protocolos de Crescimento.....	47
4.1	Contextualização	; Error! Marcador no definido.
4.2	Metodologia.....	47
4.2.1	Seleção e obtenção das Mudas.....	47
4.2.2	Configuração experimental.	48
4.2.3	Ciclos de Fotoperíodo crescimento das plantas	48
4.2.4	Suplementação do cultivo hidropônico.....	48
4.3	Resultados e discussões	48
4.4	Conclusão parcial	60
5	CAPÍTULO V: O impacto da diversidade de luz nas respostas adaptativas das plantas.....	62
5.1	Contextualização.....	62
5.2	Metodologia.....	63
5.2.1	Configuração experimental	63
5.3	Resultados e discussões	65
5.4	Conclusão parcial	71
6	CAPITULO VI: Conclusões	73
7	Referencias	75

Lista de Figuras

- Figura 1. Espectro de absorção dos diferentes comprimentos de ondas na fotossíntese pelas clorofilas e a morfogênese pelo fitocromo, criptocromo e fototropina (Fonte: S. Dutta Gupta)..... 12
- Figura 2. (A) Vista frontal do equipamento de cultivo de vegetais. (B) Espectros máximos e mínimos das placas de LED. (C) Dentro da bandeja contendo a solução hidropônica com o sistema de descontaminação UV-C. Elaborado pela autora. 22
- Figura 3. Curva de crescimento de bactérias mesofílicas com (UV-C) e sem luz UV-C (N-UV-C) em fluido hidropônico na produção de alface em um sistema hidropônico interno. Elaborado pela autora..... 25
- Figura 4. (A) Área foliar (cm²) afetada pelo fotoperíodo e descontaminação da solução hidropônica em alface. Os resultados são mostrados pela média ± erro padrão. (B) Desenvolvimento das raízes afetado pelo uso do sistema de descontaminação UV-C (direita) e sem sistema UV-C (N-UV-C, esquerda) na solução hidropônica para um fotoperíodo de 20 horas. Elaborado pela autora. 26
- Figura 5. Efeito do fotoperíodo e descontaminação da solução hidropônica com (UV-C) e sem luz UV-C (N-UV-C) no (A) Níveis de clorofila. (B) Concentração de Car. Os resultados são mostrados pela média ± erro padrão. O asterisco (*) indica diferença significativa ($P \leq 0,05$, teste de Tukey). Elaborado pela autora 27
- Figura 6. Efeito do fotoperíodo e descontaminação da solução hidropônica com (UV-C) e sem luz UV-C (N-UV-C) no (A) Nível de compostos fenólicos totais. (B) Capacidade de eliminação do radical DPPH (%). Os dados são mostrados pela média ± erro padrão. O asterisco (*) indica diferença significativa e (**) denota diferença significativa com todos os dados ($P \leq 0,05$, teste de Tukey). Elaborado pela autora..... 28
- Figura 7. (A) Microminerais afetados pelo fotoperíodo e pela descontaminação com água da solução hidropônica. (B) Macro minerais são afetados pelo fotoperíodo e pela descontaminação com água da solução hidropônica. Os resultados são mostrados pela média ± erro padrão. (*) indica uma diferença significativa ($P \leq 0,05$, teste de Tukey); (-) a marca no mesmo grupo não indica uma diferença significativa. O Origin Pro-2016 determinou diferenças significativas entre os tratamentos para ANOVA..... 29
- Figura 8. Área de alfaces mini lisa em função dos fotoperíodos para diferentes condições experimentais. Os resultados são mostrados pela média ± desvio padrão. Elaborado pela autora 35

- Figura 9. Massa fresca de alface mini lisa em gramas em função dos fotoperíodos para diferentes condições experimentais. Resultados apresentados pela média \pm desvio padrão. * indica diferença significativa em relação ao grupo L24-1. Elaborado pela autora 36
- Figura 10. Imagens tiradas no dia da coleta para alface mini lisa em suas três concentrações para as condições experimentais. (A) fotoperíodo de 20 h, (B) fotoperíodo de 18 h. Elaborado pela autora. 37
- Figura 11. Avaliação do efeito de (A) Conteúdos de Chl-a, (B) Conteúdos de Chl-b. (C) Compostos fenólicos totais. (D) Capacidade antioxidante pelo DPPH da alface mini lisa em função dos fotoperíodos para diferentes condições experimentais. Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Elaborada pela autora..... 38
- Figura 12. Grupos de Car em função dos fotoperíodos para diferentes condições experimentais alface mini lisa. Resultados apresentados pela média \pm desvio padrão. Elaborado pela autora 39
- Figura 13. Macrominerais e microminerais regulado por diferentes intensidades de luz, fotoperíodos e concentração da solução nutritiva. (A) Conteúdo total de N, P, K, Ca, Mg e S (g.kg^{-1}). (B) Conteúdo total de B, Cu, Mn, Zn e Fe (mg.kg^{-1}). Resultados apresentados pela média \pm desvio padrão. Elaborado pela autora 41
- Figura 14. Análise multivariada de componentes principais com correlações entre tratamentos e análises. (A) Biplot da PCA indicando respostas distintas na alface mini lisa com diferentes tratamentos de crescimento e variáveis. Biomassa, TPC (composto fenólico total), Chl-a, Chl-b, carotenoide (Car) e DPPH (capacidade antioxidante). B) Biplot da PCA para tratamentos e minerais. Elaborado pela autora. 42
- Figura 15. Aspecto visual das quatro variedades de alface (Lisa, Crispa, Roxa, Romana) sob três diferentes fotoperíodos (24, 18 e 12 horas). Elaborado pela autora 50
- Figura 16. (A) Massa Fresca e Raízes em gramas para 30 dias. (B) Área alcançada em 30 dias para 4 espécies de alface com três fotoperíodos. Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. * Denota uma diferença significativa com todos os dados ($P \leq 0,05$, teste de Tukey). Elaborado pela autora..... 51
- Figura 17. Efeito dos três tratamentos de fotoperíodo para quatro variedades de alface no (A) Conteúdo de compostos fenólicos totais (mg. g^{-1}). (B) Capacidade antioxidante em porcentagem (%). Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Elaborado pela autora 53

- Figura 18. Macrominerais: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S) e microminerais: Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn) de quatro variedades de alface sob três fotoperíodos. A) Alface Lisa, B) Alface Crespa, C) Alface Roxa e D) Alface Romana. Elaborado pela autora. 55
- Figura 19. A) Estrutura general da câmara B) Estruturadas placas de LEDs para crescimento de plantas. B) espectros de luz de irradiância absoluta dos LED. Elaborada pela autora. 64
- Figura 20. (A) Area em cm^2 para diferentes intervalos de luz (1A-3B) em alface lisa. (B) Massa fresca em gramas para alface lisa para diferentes intervalos de luz (1A-3B). Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Letras não compartilhadas são estatisticamente diferentes. Elaborado pela autora. 66
- Figura 21. (A) Conteúdo de clorofila-A (Chl-a) e clorofila-B (Chl-b) para alface Lisa. (B) Conteúdo de carotenoides para alface Lisa. Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Letras não compartilhadas são estatisticamente diferentes. Elaborado pela autora. 67
- Figura 22. A) Conteúdo de compostos fenólicos totais em mg.g^{-1} B) Capacidade antioxidante pela eliminação de radicais de DPPH em (%) para diferentes parâmetros de luz (1A-3B). Os dados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Letras não compartilhadas são estatisticamente diferentes. Elaborado pela autora. 68

Lista de tabelas

Tabela 1. Configuração experimental para os horários de fotoperíodo, incluindo as respectivas concentrações e intensidades de luz. Elaborada pela autora.....	35
Tabela 2. Conteúdo dos pigmentos clorofila-A (Chl-a), clorofila-B (Chl-b) e Carotenoides (Car) em três fotoperíodos para quatro variedades de alface. Os dados são apresentados como média desvio padrão. ** significa diferença com os demais grupos. Elaborado pela autora.....	52
Tabela 3. Condições experimentais de iluminação para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Elaborada pela autora.	65

Lara Perez, Shirley M. Estudo de processos otimizados na agricultura em ambientes controlados. 2024. Tese (Programa de Pós-graduação em Biotecnologia) – UFSCar, São Carlos, 2024

Resumo

O cultivo de plantas em ambientes controlados proporciona condições ideais para o seu desenvolvimento, resultando em taxas de crescimento, rendimento superiores e qualidade do produto. Para obter sucesso no crescimento das culturas, é essencial considerar uma série de parâmetros, incluindo fotoperíodos, intensidade de luz, concentração de nutrientes, temperatura e umidade relativa do ambiente. Além disso, o controle microbiológico é fundamental em sistemas hidropônicos. Esses fatores são cruciais para melhorar a produtividade e a qualidade das colheitas. O objetivo principal desse estudo foi otimizar o crescimento de vegetais, especificamente a espécie *Lactuca sativa* (alfaces) considerando variáveis específicas do processo como a suplementação fotônica com diodos emissores de luz (LEDs), fotoperíodos, controle microbiológico e concentração de nutrientes. Para isso, foram realizadas quatro Capítulos distintos: (I) aprimoramento da qualidade microbiológica em soluções hidropônicas, (II) concentração da solução nutritiva hidropônica e otimização dos fotoperíodos de luz, (III) redução do tempo necessário para alcançar a fase adulta da planta e (IV) análise da suplementação fotônica com entrega fracionada de dose de energia e variações nos comprimentos de onda após a otimização dos parâmetros. A avaliação do estudo incluiu análises fitoquímicas e qualitativas, nas quais foram calculadas áreas, massas, concentrações de pigmentos, compostos fenólicos e capacidade antioxidante. Além dos teores de micronutrientes e macronutrientes. Os resultados mostraram que no Capítulo (II) a aplicação de sistema de descontaminação ultravioleta - C (UV-C) na solução hidropônica acelerou o crescimento das plantas, mantendo valores nutricionais comparáveis ou superiores aos dos grupos sem esse sistema. No capítulo (III) a combinação de baixa intensidade de luz e longos fotoperíodos, como 18 e 20 horas, resultou em melhorias no conteúdo de pigmentos fotossintéticos, ganho de biomassa e área, compostos fenólicos e capacidade antioxidante. No capítulo (IV), os resultados permitiram desenvolver um novo protocolo de crescimento, que reduziu o ciclo de crescimento convencional que é de 8 a 10 semanas, para apenas 4 semanas de desenvolvimento da planta na fase adulta. E por fim o capítulo (V) os resultados do estudo sobre a suplementação fotônica em regimes de luz fracionada e distribuído equilibradamente de diferentes comprimentos de onda, aumentou gradual os nutrientes ao longo do ciclo de crescimento da planta, melhorando a área e massa das alfaces. Em conclusão, os resultados indicam que é possível cultivar alfaces em apenas quatro semanas, mantendo os níveis nutricionais e fisiológicos equivalentes aos alcançados em cultivos indoors tradicionais, requerem normalmente um período de 50 dias. Essa eficiência foi obtida utilizando fotoperíodos prolongados de 18 h com baixa intensidade de luz. Além disso, o efeito espectral da luz mostrou-se crucial para o crescimento funcional das plantas, destacando a importância de diferentes comprimentos de ondas e da distribuição ao longo do ciclo de desenvolvimento da planta.

Palavras chaves: Suplementação fotônica, LED, fracionada, ambientes controlados, hidroponia, alface, otimização, biofotônica ambiental.

Lara Perez, Shirly M. Study of optimized processes in agriculture in controlled environments. 2024. Thesis (Programa de Pós-graduação em Biotecnologia - UFSCar, São Carlos, 2024).

Abstract

Cultivating plants in controlled environments offers ideal conditions for their development, leading to superior growth rates, yields, and product quality. To successfully grow crops, it is essential to consider various parameters, including photoperiods, light intensity, nutrient concentration, temperature, and relative humidity. Additionally, microbiological control is crucial in hydroponic systems. These factors are vital for enhancing crop productivity and quality. The primary aim of this study was to optimize the growth of vegetables, specifically the species *Lactuca sativa* (lettuce), by considering specific process variables such as photonic supplementation with light-emitting diodes (LEDs), photoperiods, microbiological control, and nutrient concentration. To achieve this, four distinct chapters were developed: (II) enhancement of microbiological quality in hydroponic solutions, (III) optimization of nutrient solution concentration and light photoperiods, (IV) reduction of the time required to reach the plant's adult phase, and (V) analysis of photonic supplementation with fractional energy dose delivery and wavelength variations after parameter optimization. The study evaluation included phytochemical and qualitative analyses, where areas, masses, pigment concentrations, phenolic compounds, and antioxidant capacity were calculated, along with micronutrient and macronutrient content. The results indicated that in Chapter (II), applying an ultraviolet-C (UV-C) decontamination system in the hydroponic solution accelerated plant growth while maintaining nutritional values comparable to or superior to those of the groups without this system. In Chapter (III), the combination of low light intensity and long photoperiods, such as 18 and 20 hours, improved photosynthetic pigment content, biomass gain, area, phenolic compounds, and antioxidant capacity. Chapter (IV) enabled the development of a new growth protocol that reduced the conventional growth cycle from 8-10 weeks to just 4 weeks for the plant to reach the adult phase. Finally, in Chapter (V), the results of the study on photonic supplementation in fractionated light regimes, evenly distributed across different wavelengths, gradually increased nutrients throughout the plant's growth cycle, enhancing the area and mass of the lettuces. In conclusion, the results indicate that it is possible to cultivate lettuce in just four weeks while maintaining nutritional and physiological levels equivalent to those achieved in traditional indoor cultivation, which typically requires 50 days. This efficiency was achieved by using prolonged photoperiods of

18 hours with low light intensity. Furthermore, the spectral effect of light proved crucial for plants' functional growth, highlighting the importance of different wavelengths and their distribution throughout the plant's development cycle.

Keywords: Photon supplementation, LED, fractionated, controlled environments, hydroponics, lettuce, optimization, environmental biophotonics.

1 CAPÍTULO I

1.1 Introdução

Diversas estratégias para aprimorar a eficiência no cultivo de plantas, visando atender às demandas de consumo suficiente para a sociedade estão sendo desenvolvidas. O emprego da iluminação artificial na agricultura tem sido adotado desde a década de 1990, com o propósito de aprimorar, otimizar o crescimento e o desenvolvimento nutricional das plantas. As tecnologias baseadas em LEDs (diodos emissores de luz) oferecem eficácia, custo e capacidade de fornecer comprimentos de onda específicos, viabilizando sistemas de cultivo em ambientes controlados e promover o uso eficiente da luz artificial na agricultura (Van Ieperen 2016)(Kobayashi, Amore, and Lazaro 2013)

As culturas em estufas evoluíram para sistemas de agricultura de ambiente controlado (CEA, do inglês *controlled environment agriculture*), permitindo avanços ainda maiores na agricultura como e desenvolvimento de os sistemas de ambiente controlado com uso de luz artificial (CEALs, do inglês *controlled environments with artificial lighting*). Esse sistema tem como objetivo produzir um crescimento mais rápido, uniforme e com qualidade nutricional para um número menor de áreas. A facilidade no controle da luz também favorece a otimização do processo, uma vez que cada tipo de cultura tem exigências específicas. Esse controle viabiliza a produção em qualquer parte do mundo, pois permite ajustar a fonte de luz artificial conforme necessário, sem depender da luz solar e em ambientes controlados.

Os CEALs têm outras vantagens, como o controle de parâmetros como a temperatura, a umidade, a concentração de dióxido de carbono (CO₂) e o fotoperíodo, entre outros. Os ambientes fechados e protegidos podem evitar a invasão de pragas e agentes patogênicos. Além disso, o controle ótimo das condições ambientais em CEAL é importante para alcançar maior eficiência dos recursos utilizados na produção, especialmente a eficiência na entrega de luz (H. A. Ahmed, Yu-Xin, and Qi-Chang 2020a).

As Nações Unidas preveem que até 2050 mais de dois terços dos nove mil milhões de pessoas do mundo viverão em áreas urbanas. Esse crescimento aumenta, há a necessidade de produzir alimentos frescos, de fácil acesso à população, mantendo a segurança alimentar e minimizando o uso de agrotóxicos. As câmeras de crescimento surgem como uma boa alternativa para atender essas demandas populacional (Shamshiri et al. 2018).

Apesar do aumento considerável nos últimos anos do uso de LEDs na agricultura e principalmente no setor da horticultura, com variabilidade das diferentes espécies vegetais ainda não está bem estabelecido modelos específicos e parâmetros gerais de iluminação otimizados para diferentes estágios de desenvolvimento da planta. Portanto, este trabalho visa otimizar o crescimento de alface (*Lactuca sativa*) (alface) através de vários fatores: com ajuste de intensidade de luz, fotoperíodos, sanidade microbiológica, concentração de nutrientes e otimização do tempo de cultivo.

Esta tese apresenta quatro capítulos experimentais onde o capítulo II teve como objetivo avaliar a eficácia de um sistema de descontaminação utilizando UV-C em soluções hidropônicas durante a recirculação de nutrientes na hidroponia no crescimento de alface crespa. O capítulo III abordou a otimização da interação entre intensidade de luz e fotoperíodo, em conjunto com concentrações de solução nutritiva caracterizadas como altas ou médias concentrações para alfaces de variedade mini lisa, O capítulo IV estuda novas estratégias para avaliar o desenvolvimento de quatro variedades de alface Lisa, Crespa, Roxa e Romana) em um sistema hidropônico sob diferentes fotoperíodos (24, 18 e 12 horas de luz) com intensidades de luz reduzidas ($100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), visando reduzir o ciclo de crescimento convencional de 8 a 10 semanas para um ciclo acelerado de 4 semanas. E por fim o ultimo capitulo V, este capítulo explora o impacto de diferentes entregas de luz fracionada para o crescimento da alface.

1.2 Revisão da Literatura

1.2.1 Produções vegetais em ambientes controlados

A produção em campo aberto evoluiu de cultivos exclusivamente protegidos para cultivos cada vez mais tecnológicos, utilizando luz natural ou artificial. A estufa moderna funciona como um sistema, por isso também é conhecida como CEA. Esse termo começou a ser usado na década de 1960 (Lynn Garcia et al. 2023). Este sistema surgiu da necessidade de facilitar a produção agrícola próxima ao consumidor, além de outras vantagens como a redução do consumo de energia, e produção ao longo do ano independente das estações. Esse é um fator limitante nos métodos convencionais, com o objetivo de ter condições ótimas de crescimento para a produção de culturas hortícolas de qualidade e protegidas de agentes externos como pragas, animais e climas, entre outros (Shamshiri et al. 2018). A produção de

vegetais em ambientes controlados tem um impacto positivo significativo na economia devido ao uso consciente da água e à captura de carbono. Esses sistemas de cultivo permitem uma gestão eficiente dos recursos hídricos, reduzindo o desperdício e garantindo a sustentabilidade (Muhie 2022).

1.2.2 Característica do espectro de luz em ambientes de cultivo controlado

Entre os diversos fatores ambientais que desempenham um papel significativo no crescimento e desenvolvimento das plantas, a luz desempenha um papel central no ciclo de vida vegetal. Além de servir como fonte de energia para o processo de fotossíntese, a luz funciona como um estímulo que desencadeia uma variedade de respostas fisiológicas e bioquímicas nas plantas, as quais demonstram sensibilidade à intensidade, qualidade e duração da luz incidente.

A radiação fotossintética ativa (PAR) é uma medida usada na agricultura de modo geral, principalmente na parte de horticultura para quantificar as intensidades de luz, suas unidades são dadas por $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, o que significa densidade do fluxo de f\u00f3tons fotossint\u00e9ticos (PPF, do ingl\u00eas *photosynthetic photon flux*). O PAR compreende o espectro de luz entre 400 e 700 nm, que s\u00e3o os comprimentos de onda em que as mol\u00e9culas auxiliares da fotoss\u00edntese s\u00e3o ativadas, sendo as plantas capazes de utiliz\u00e1-las (Figura 1) (Xu 2018).

A disponibilidade de um ambiente com luz adequado \u00e9 fundamental para o crescimento das plantas. O espectro incidente e a densidade do PPF s\u00e3o os dois principais fatores que influenciam o desenvolvimento das plantas em resposta \u00e0s condi\u00e7\u00f5es de ilumina\u00e7\u00e3o. As plantas utilizam essencialmente as faixas infravermelha, vermelha e azul do espectro de luz, que conduzem \u00e0 fotoss\u00edntese e regulam numerosos processos de desenvolvimento e adapta\u00e7\u00e3o. Os espectros de absor\u00e7\u00e3o t\u00edpicos dos fotorreceptores fotossint\u00e9ticos e morfog\u00eanicos mais comuns s\u00e3o mostrados na Figura 1 (Ibaraki 2017).

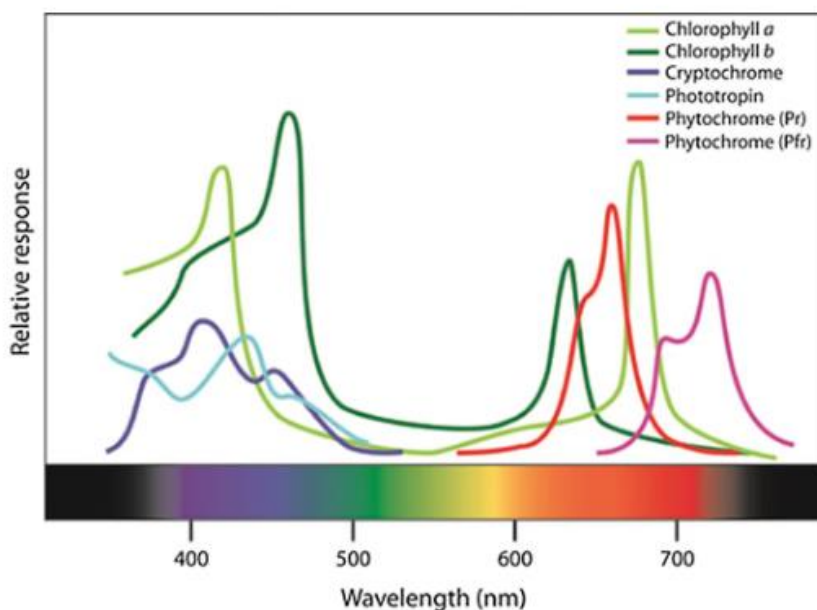


Figura 1. Espectro de absorção dos diferentes comprimentos de ondas na fotossíntese pelas clorofilas e a morfogênese pelo fitocromo, criptocromo e fototropina (Fonte: S. Dutta Gupta)

A iluminação artificial na horticultura evoluiu para o uso de diodos emissores de Luz (LEDs), fontes de luz semicondutoras que têm a capacidade de fornecer fótons com mais precisão comparada a outras lâmpadas elétricas contemporâneas, além de possibilitar o controle de um intervalo de comprimento de onda e da intensidade da luz para o processo fotossintético (Mitchell et al. 2015).

Os LEDs emitem comprimentos de onda estreitos que variam do ultravioleta C (UV-C) ao infravermelho de 1000 nm, o que permite a seleção de comprimentos de onda específicos, correspondentes à absorbância dos fotorreceptores da planta (Morrow 2008) e, portanto, contribui para processos vitais específicos da planta. Desse modo, a introdução de LEDs oferece a possibilidade de controlar o crescimento, desenvolvimento e metabolismo das plantas adaptando os parâmetros de luz. No entanto, em sistemas hortícolas, é difícil encontrar um equilíbrio entre as necessidades naturais das plantas e as opções tecnológicas baseadas em propósitos comerciais. Os principais objetivos da indústria hortícola têm sido obter produtos vegetais de alta qualidade e produtivos com custos mínimos (van Ieperen 2016). Por tanto, os vegetais frequentemente são cultivados em condições que não correspondem a padrões de qualidade nutricional esperados.

Em habitats naturais, as plantas possuem uma fisiologia de acordo com as variações no espectro e na intensidade de energia do sol (van Ieperen 2016) e são capazes de se adaptar

às condições de iluminação artificial considerando os limites de tolerância natural. Sistemas inovadores que utilizam luz têm levado a várias opções de iluminação, além de controlar especificidades como comprimento de onda e intensidade. (van Ieperen 2016) No entanto, a funcionalidade do LED depende de conhecimentos específicos em fotofísica, fotobiologia, fisiologia vegetal e tecnologia para operação adequada. Os espectros de luz devem ser cuidadosamente proporcionados para obter as respostas desejadas das plantas (Mitchell et al. 2012). Portanto, as aplicações fotônicas na horticultura estão intimamente interligadas com o conhecimento da fotomorfogênese das plantas que é sua a resposta à luz, e desempenha um papel crucial na adaptação das plantas ao ambiente e nas interações planta-ambiente. Além disso, a manipulação da fotomorfogênese tem sido explorada em agricultura e horticultura para melhorar a produção de culturas, induzir a floração, controlar a arquitetura das plantas e aumentar a resistência a estresses ambientais.

Os LEDs vermelhos e azuis representam a combinação mais eficaz para promover o crescimento e desenvolvimento de várias culturas folhosas, incluindo a alface. Esses dois espectros de luz têm demonstrado eficácia em estimular o crescimento das plantas, aumentar a taxa fotossintética e favorecer a acumulação de biomassa (Naznin et al. 2019a). Além disso, estudos recentes destacaram o potencial do LED branco suplementar como uma fonte luminosa eficaz para melhorar tanto a taxa de crescimento quanto a eficiência no uso da luz em plantas de alface cultivadas em ambientes controlados

(H. A. Ahmed, Yu-Xin, and Qi-Chang 2020b). A radiação ultravioleta (UV-A), é a principal componente da radiação ultravioleta na natureza, tem sido associada a melhorias na abertura dos estômatos e na absorção de monóxido de carbono (CO_2), resultando em incrementos nas taxas fotossintéticas e de transpiração das plantas. Contudo, a exposição à radiação UV também pode induzir a produção de produtos secundários, como os compostos fenólicos, embora possa inibir acúmulo de biomassa em plantas de alface (H. A. Ahmed, Yu-Xin, and Qi-Chang 2020b).

Estudos recentes têm investigado os efeitos da luz verde sobre as respostas fisiológicas e morfológicas das plantas, incluindo processos como a fotossíntese e a fotomorfogênese. A luz verde, por apresentar menor taxa de absorção na parte superior das folhas, mas pode estimular a fotossíntese na região inferior da planta, devido à maior transmitância de energia luminosa. A complementação de LEDs verdes, com os LEDs vermelhos e azuis tem sido associada, e demonstrando o crescimento promissor da alface, enquanto a manipulação das características da luz verde demonstrou efeitos benéficos no

crescimento e pigmentação das plantas (Son and Oh 2015). No entanto, evidências conclusivas sobre o papel essencial da luz verde no crescimento e desenvolvimento das plantas ainda são limitadas e necessita de mais investigações.

1.2.3 Sistema hidropônico em ambiente protegido

A hidroponia é uma alternativa cada vez mais popular na agricultura tradicional oferece uma variedade de benefícios. Ao permitir que vegetais sejam cultivados sem solo, essa técnica otimiza o ambiente de cultivo, fornecendo às plantas quantidades ideais de nutrientes e um clima consistente (Khan, Purohit, and Vadsaria 2020). Ao contrário da agricultura convencional, que depende do solo, a hidroponia utiliza soluções ricas em nutrientes em um meio aquoso para sustentar o crescimento das plantas.

A hidroponia é abordagem inovadora e tem chamado a atenção de agricultores ao redor do mundo, pois permite um uso mais eficiente dos recursos e pode ajudar a reduzir os impactos ambientais. Especificamente, a hidroponia pode levar a uma maior eficiência no uso da água, na aplicação de fertilizantes e até na redução ou eliminação de certos pesticidas agrícolas (Pomoni et al. 2023).

O cultivo hidropônico requer cuidados de sanidade com a saúde das plantas, principalmente em relação ao sistema radicular. A alta densidade e uniformidade genética das plantas, a baixa diversidade biológica e a circulação de soluções nutritivas favorecem a disseminação de patógenos e o desenvolvimento de epidemias, fazendo com que os produtores recorram a defensivos químicos (fungicidas e bactericidas) ou ao descarte total da produção (Ikeda, Koohakan, and Jaenaksorn 2002).

Estima-se que, cultivos de verduras e flores produzidas em sistemas hidropônicos em diferentes países, por exemplo, Brasil, Canadá, EUA, França são suscetíveis a epidemias de podridão de raiz causada por *Pythium*, de moderada a severa. A podridão de raiz causada por *Pythium spp* é ubíqua e frequentemente destrutiva na maioria das plantas cultivadas nesses sistemas, incluindo alface, rúcula, pepino, tomate, pimentão e espinafre (Resh 2013). Uma vez que essas plantas compartilham a mesma solução de nutrientes, doenças transmitidas pela água podem se espalhar rapidamente de uma planta para outra, contaminando toda a cultura (Ikeda, Koohakan, and Jaenaksorn 2002) (Sharma et al. 2018). A saúde das raízes está diretamente relacionada à melhor absorção de nutrientes, ao bom desenvolvimento da cultura durante o ciclo e à vida útil do produto. (Sutton et al. 2006).

1.2.4 Sanidade do sistema de cultivo hidropônico

A CEA utiliza um ambiente controlado de fatores como temperatura, umidade, intensidade de luz e fotoperíodo, pH e concentração da solução de nutrientes para culturas hidropônicas. As culturas sem solo foram inicialmente projetadas para prevenir doenças transmitidas pelo solo; no entanto, novas doenças características dessas culturas têm surgido. Embora a hidroponia promova o cultivo de plantas a partir de soluções de nutrientes balanceadas conhecidas por sua segurança de produção, também apresenta riscos de contaminação para a solução de nutrientes via substrato (suporte radicular). (Dankwa, Machado, and Perry 2020)

Vários microrganismos, incluindo as bactérias patogênicas, se desenvolvem mais rapidamente quando se tem uma água rica em nutrientes. (Sperber 1983). Os microrganismos podem se adaptar a condições climáticas adversas na agricultura, como as diferentes temperaturas e o frio (Goel 2022). As cargas microbianas não patogênicas elevadas também contribuem para a competição por nutrientes, reduzindo a qualidade nutricional e a disponibilidade das plantas. Conseqüentemente, a qualidade da água desempenha um papel essencial no desenvolvimento das raízes e das folhas. O tipo e a altura do substrato são ferramentas críticas para reduzir a perda de produtividade (J. Vallance, F. Déniel, G. LeFloch, L. Guérin-Dubrana, D. Blancard 2019). A irradiação UV-C tem sido utilizada para descontaminar alimentos diretamente em diversas suas superfícies (Perez et al. 2022; Corrêa et al. 2020). Essa radiação também pode ser aplicada com água circulante como sistema de lavagem para inativar grandes quantidades de microrganismos (Oliveira et al. 2019). A luz UV-C é absorvida por proteínas e ácidos nucleicos (pirimidina e purinas) que causam danos e rearranjos nos componentes celulares, frequentemente levando à ruptura celular (Zwicker et al. 2019).

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste estudo é otimizar o crescimento de alface (*Lactuca sativa*) (alface) através de vários fatores: com ajuste de intensidade de luz, fotoperíodos, sanidade microbiológica, concentração de nutrientes e otimização do tempo de cultivo.

1.4 Objetivos específicos

1. Descontaminar o fluido hidropônico e otimizar o processo de produção de alfaces.
2. Analisar o impacto diferentes fotoperíodos (24,20,18,12 h), intensidades de luz (138 e 168 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) e concentração de nutrientes na solução hidropônica para a alface variedade mini lisa.
3. Otimizar o tempo de crescimento de variedades de alface (Crespa, Romana, Roxa e Lisa) dentro de um ambiente controlado.
4. Analisar diferentes espectros de luz de LEDs (660 nm, 530 nm, 470 nm, e 400nm nas respostas adaptativas das plantas, mediante análises de avaliação fisiológicas da planta
5. Avalias os parâmetros fisiológicos da planta de alface (massa fresca; comprimento de raiz, área foliar e aspecto morfológico) para todas as configurações de fotoperíodo e intensidade de luz.
6. Determinar o teor de clorofila total, compostos fenólicos do extrato e capacidade antioxidante da planta para todas as configurações do cultivo hidropônico em ambientes controlados.
7. Quantificação dos minerais das alfaces através das técnicas de Espectrofotometria de absorção atômica, colorimetria, titulometria, colorimetria de metavanadato, turbidimetria e semi-micro-Kjeldahl para todo o cultivo realizado em ambientes controlados

2 CAPÍTULO II: Produção Vegetal em Sistemas Hidropônicos Usando Descontaminação de Fluidos de Circulação Fechada

2.1 Contextualização

A presença de microrganismos na produção hidropônica de alfaces pode ter efeitos tanto benéficos quanto prejudiciais ao vegetal. A sanidade desse sistema é fundamental no cultivo hidropônico em sistema controlados. Embora alguns microrganismos promovam o crescimento das plantas ao produzir antibióticos naturais, outros podem ser vetores de doenças, comprometendo a saúde das plantas e o rendimento da produção. A contaminação proveniente de práticas de manejo inadequadas e do ambiente pode levar a infecções e ao crescimento limitado das plantas devido à competição microbiana pelos nutrientes da solução. Além disso, a recirculação de fluidos ricos em nutrientes no sistema hidropônico pode facilitar a disseminação de microrganismos patogênicos entre as plantas, exacerbando esses problemas.

Diante desse cenário, o objetivo do capítulo II foi descontaminar o fluido hidropônico e otimizar o processo de produção de alfaces. Para isso, investigamos a aplicação de luz UV-C como método de descontaminação nas soluções hidropônicas durante a recirculação de nutrientes.

Esse capítulo resultou em pedido de patente e publicação científica.

Patente: Otimização do processo de hidroponia com o uso de luz uv em fluidos hidropônicos. Número de depósito: BR 10 2020 026173 8
Publicação na revista: Scientific Reports – Nature intitulada “*Enhanced vegetable production in hydroponic systems using decontamination of closed circulating fluid*” doi: 10.1038/s41598-023-50974-9.

2.2 Metodologia

Nesta seção foram descritas as configurações e os parâmetros específicos para avaliação do cultivo hidropônico em ambiente controlado. As análises realizadas foram os parâmetros fisiológico da planta como área foliar massa fresca e comprimento das raízes. Quantificou os pigmentos clorofila, carotenoides compostos fenólicos e capacidade antioxidante.

Analizou a composição química em minerais para as plantas de alface cultivada em sistema hidropônico em ambiente controlado. Todas essas análises e medidas foram realizados em todos os quatros capítulos dessa tese.

2.2.1 Obtenção das mudas de alface

As mudas de alface crespa paletizadas da variedade "Veneranda" (*Lactuca sativa* var. *crispa*) foram adquiridas de um produtor de mudas de vegetais registrado no Registro Nacional de Sementes e Mudanças (RENASSEM SP - 16678/2018). As sementes foram semeadas em uma bandeja com 200 células de polipropileno (16 mL/célula) preenchidas com um substrato de fibra de coco e fertilizadas por fertirrigação. Foram utilizadas mudas de alface com 37 dias após semeadura. Essas condições iniciais (37 dias) foram estabelecidas para permitir a observação do efeito de variações em plantas adultas. As mudas foram cultivadas em campo aberto e com luz solar (período inicial introduzido em uma câmara de crescimento interno) para serem transplantadas sob um ambiente controlado até o período de colheita final, que foi calculado para cada grupo para que uma altura máxima fosse alcançada.

2.2.2 Análise de área foliar

A área foliar das amostras foi medida por fotografia digital para determinação da área total, com base no protocolo de “Área Foliar Fácil: Análise automatizada de imagens digitais para medição rápida e precisa da área foliar”(Easlson and Bloom 2014) e analisadas pelo Software gratuito ImageJ (version 1.53K,. National Institutes of Health, USA), com um número amostral de n=5.

2.2.3 Análise de pigmentos Fotossintéticos

O conteúdo de pigmentos como Clorofila-A (*Chl-a*), Clorofila-B (*Chl-b*), e carotenoides (Car) foi medido calorimetricamente de acordo com Wellburn (Wellburn 1994). A quantificação dos pigmentos foram realizadas adicionando 0,1 g de massa fresca

de amostra em um tubo Falcon de 15 mL contendo 10 mL de Dimetil Sulfoxido (DMSO) e em seguida incubados por 24h a 70°C. A absorbância do extrato foi determinada por um espectrofotômetro de absorvância molecular no ultravioleta visível (UV-Vis) (Cary UV-Vis50, Varian) através da densidade óptica (OD) em 669 nm (OD669), 645nm (OD645) e 480 nm (OD480). O teor de pigmento foi calculado utilizando as Equações 1, 2 e 3, que são para os conteúdos de *Chl a*, *Chl b* e *Car total*, respectivamente::

$$Chl\ a = (12,19 * A_{665}) - 3,45 * A_{649} \quad (Eq. 1)$$

$$Chl\ b = (21,99 * A_{649}) - 5,32 * A_{665} \quad (Eq. 2)$$

$$Total\ Car = \frac{1000 * A_{480} - 2,14Chla - 70,16Chlb}{220} \quad (Eq. 3)$$

2.2.4 Processo de liofilização de alface

Para preservar as propriedades e estruturas químicas das amostras, especialmente para análises realizadas após os dias de colheita, foi realizado o processo de liofilização, um processo que envolve a sublimação da água, permitindo sua transição direta do estado sólido para o gasoso sem passar pelo estado líquido. Esse método é particularmente eficaz na manutenção das propriedades e estruturas químicas, especialmente em análises realizadas após os dias de colheita e/ou que requerem a extração de água.

As amostras foram inicialmente armazenadas individualmente em sacos plásticos e congeladas em um ultrafreezer a -80°C (Thermoscientific TSX Series) pelo menos 24 horas. Após essa etapa de pré-tratamento, as amostras foram submetidas à liofilização no equipamento L300 Terroni por mais 24 horas. Posteriormente, elas foram armazenadas em um dessecador para preservar o estado liofilizado.

2.2.5 Análise de composto Fenólico Total

O extrato foi preparado com 250 mg de massa seca (amostra liofilizada) diluída em 10 mL de metanol e água (MeOH:água) na proporção de 70:30 v/v 20 min centrifugada a 4400 rpm e filtrada em funil Kitassato com o auxílio de uma bomba de vácuo (ECO 740 Biomec) (Nicolle et al. 2004). Posteriormente, alíquota de 1 mL da amostra transferidas para um tubo de ensaio e diluída com 10 mL de água destilada. Em seguida 1,5 mL de reagente de Folin

Ciocalteu (Sigma) foram então adicionados e incubados em temperatura ambiente por 5 min. Após foram adicionados 4 mL de bicarbonato de sódio (Na₂CO₃) a 20% (m/m), ajustado com água destilada até 35 mL, agitado e deixado em repouso 30 min em temperatura ambiente. A absorvância da amostra foi medida em 765 nm em espectrofotômetro UV-Vis contra branco, ou seja, água destilada (Madaan et al. 2011).

2.2.6 Análise de capacidade antioxidante -DPPH

O extrato foi preparado com 0,050 g de amostra liofilizada diluída em 20 mL (MeOH:água) na proporção de 50% v/v, em seguida foi colocado por 1 minuto em banho maria com temperatura de 80°C depois 1 h de agitação e por fim filtrado em funil Kitassato utilizando papel filtro quantitativo com o auxílio de uma bomba de vácuo (ECO 740 Biomec) (Nicolle et al. 2004).

A atividade eliminadora de radicais livres de todos os extratos foi avaliada por 1, 1-difenil-2-picril-hidroxi-la (DPPH). A concentração de DPPH foi de 0,1 mM em metanol, dos quais 100 µL foi adicionado a 50 µL da solução dos extratos da alface. As mantidas em repouso em temperatura ambiente por 30 minutos. A absorvância foi então medida a 515 nm em um espectrofotômetro UV-Vis (Kim et al. 2016a). A atividade de eliminação de radicais foi calculado de acordo a Equação 4.

$$\text{atividade de eliminação de radicais dpph (\%)}: \left[1 - \frac{A_1}{A_0}\right] \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

onde A₁= absorvância da amostra e A₀= solução de metanol DPPH, respectivamente.

2.2.7 Análises de minerais

Os protocolos utilizados foram desenvolvidos por Malavolta et al. (MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; DE OLIVEIRA 1989) para determinar a composição química dos minerais das plantas cultivadas em ambientes controlados. Um conjunto de técnicas foram utilizadas para determinar a composição químicas dos minerais presente nas alfaces. Essas análises foram terceiradas para o laboratório Athenas Consultoria Agrícola E Laboratório Ltda foram usadas para diferentes minerais

- Espectrofotometria de absorção atômica para Sódio (Na), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Potássio (K).
- Colorimetria do alumínio: Alumínio (Al)
- Titulometria de nitrato de prata: Cloro (Cl)
- Colorimetria de metavanadato: Fósforo (P)
- Turbidimetria com sulfato de bário: Enxofre (S)
- Semi-micro-Kjeldahl: Nitrogênio (N)

2.2.8 Dispositivo para cultivo de plantas em ambientes controlados

O equipamento C4 Home Farming Hidroponic System (HFS), AC110V ou 220V (seletor de comutação) - 50Hz/60Hz, 163W, 1495mm X 600mm X 686mm (Dimensões), a Vista Principal do Equipamento é mostrada na Figura 2 A. A câmara interna possui 3 espaços ou prateleiras para o cultivo de vegetais, e a última prateleira é usada para a germinação e crescimento de mudas.

As prateleiras da câmara contêm uma placa de LED nas cores vermelha (660 nm), azul (440 nm) e branco (500-600 nm) quente na proporção de 4:1:1 (Figura 2 B). Os picos de emissão dos LEDs picos em 440 nm e 660 nm, foram medidos por espectro radiômetro acomplado a uma fibra óptica mostrados na Figura 2B (UV/SR-VIS High OH content, 200 - 1100 nm, Ocean Optics, USA).

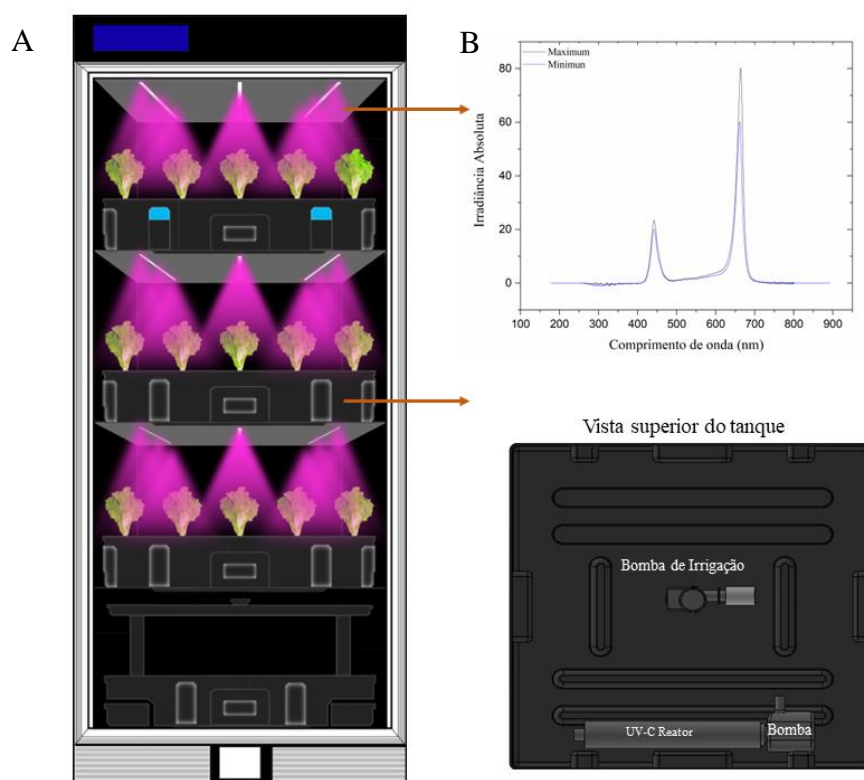


Figura 2. (A) Vista frontal do equipamento de cultivo de vegetais. (B) Espectros máximos e mínimos das placas de LED. (C) Dentro da bandeja contendo a solução hidropônica com o sistema de descontaminação UV-C. Elaborado pela autora.

A segunda Seta faz parte da composição da bandeja ou reservatório de água, possui internamente por uma bomba de fertirrigação que transporta nutrientes para as plantas e um sistema de descontaminação de luz ultravioleta para auxiliar no controle microbiológico (Figura 2 C). Essa câmara de cultivo em ambiente controlado foi utilizada para desenvolvimento dos Capítulos II, III e IV dessa pesquisa.

2.2.9 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise através do teste ANOVA de um fator. O nível de significância adotado foi de 5% ($p < 0,05$) e os resultados são apresentados como média e desvio padrão.

Uma análise de componentes principais multiparamétrica (PCA, *do inglês Principal Component Analysis*) avaliou a influência dos parâmetros testados tanto na classificação quanto na diferenciação das amostras de alface para diferentes fotoperíodos e concentrações. A análise PCA é uma poderosa análise de dados multivariados que facilita a redução de dimensionalidade e a extração de características de conjuntos de dados de alta dimensão. O

objetivo é identificar os fatores mais influentes, chamados de componentes principais, que representam a máxima variância em um conjunto de dados.

2.2.10 Configuração experimental

Os experimentos com alface Crespa foram conduzidos em uma câmara de crescimento indor detalhada na sessão 2.2.8, com as condições climáticas controladas, temperatura (18-20°C), umidade (60%), e suplementação de luz de LEDs com intensidade 90 $\mu\text{mol.m}^{-2}$. O momento da colheita foi estabelecido de acordo com a distância máxima a ser alcançada; portanto, o tempo de colheita foi o tempo necessário para que as amostras atingissem 17 cm, que era o espaço de crescimento disponível (distância entre o suporte e a iluminação superior) na câmara de cultivo.

Os parâmetros utilizados foram diferentes tempos de fotoperíodo: i) 20 h luz/4 h escuro e ii) 18 h luz/6 h escuro. A solução nutritiva foi mantida em 2 mS.cm^{-1} para condutividade elétrica (CE) equivalente à temperatura ambiental e pH de 5,5-6,3. A solução nutritiva utilizada neste estudo é composta por 7,30% em massa de Nitrogênio (N), 12,62% em massa de Potássio (K_2O), 3,97% em massa de Cálcio (Ca), 2,39% em massa de Enxofre (S), 0,01% em massa de Boro (B), 0,01% em massa de Cobre (Cu), 0,05% em massa de Ferro (Fe), 0,01% em massa de Manganês (Mn), 0,06% em massa de Zinco (Zn), 0,05% em massa de Níquel (Ni), 1,80% em massa de Magnésio (Mg), 7,19% em massa de Fósforo (P_2O_5) (Plenan Ferti®) e o ferro foi suplementado em 6% em massa (Biolchim®).

Em seguida, o desenvolvimento da alface foi avaliado por meio de um sistema de descontaminação de água hidropônica contendo um reator de luz UV-C constantemente ligado (24 h). Adicionalmente, um grupo controle, ou seja, que não recebeu luz UV-C também foi avaliado.

O sistema de descontaminação UV-C (Figura 2C) é composto por uma cuba hidropônica, lâmpada UV-C (SUNSUN - CUV305) e uma bomba que circula a água adicionada na bandeja contendo a solução hidropônica. As características do sistema incluíam uma potência de luz UV-C de 5 W, capacidade de descontaminação do reator de 400 L/h, fluxo da bomba de 400 L/h e pressão da bomba de 2.0 mca. A dose de luz aplicada foi de 6.12 mJ/cm^2 e a intensidade luminosa foi de 90 $\mu\text{mol.m}^{-2}$.

2.3 Resultados e discussões

A curva de quantificação microbiana (Figura 3) foi elaborada em intervalos de 24 h ao longo de 168 h, revelando padrões de crescimento consistentes e tendências de proliferação, independentemente se a luz UV-C foi aplicada simultaneamente com a produção vegetal ou de forma independente. Durante a fase inicial da curva de crescimento microbiano (fase exponencial), observou-se uma redução significativa na inclinação quando a luz UV-C foi utilizada. Essa redução contrastou com a rápida proliferação bacteriana observada na ausência de luz UV-C (N-UV-C) durante os dois primeiros dias da curva.(Badi 2023) .

A população microbiana atingiu seus níveis máximos (2,9 e 4,5 Log UFC/mL) quando exposta e não exposta à luz UV-C, respectivamente. Esse fenômeno pode ser atribuído a fatores limitantes que afetam o crescimento. No entanto, na fase estacionária, observada na curva sem luz UV-C, houve um intervalo entre os dias 4 e 7, com algumas células se multiplicando (7 dias) enquanto outras pereciam em um período semelhante (entre os dias 4 e 6). Essa dinâmica não foi observada na curva de luz UV-C, onde a taxa de morte celular excedeu a de proliferação. A curva tratada com UV-C exibiu uma fase de morte microbiana encurtada em três dias, significando uma perda irreversível da capacidade de divisão celular em um ambiente mantendo níveis específicos de sais, quantidade de água e temperatura favoráveis ao crescimento microbiano. Os dados sugerem que a exposição à luz UV-C prejudicou o crescimento e a sobrevivência dos microrganismos, resultando em uma diminuição na fase exponencial, uma restrição no tamanho máximo da população e uma fase de morte mais curta, todos significativos em aplicações de controle de microrganismos.

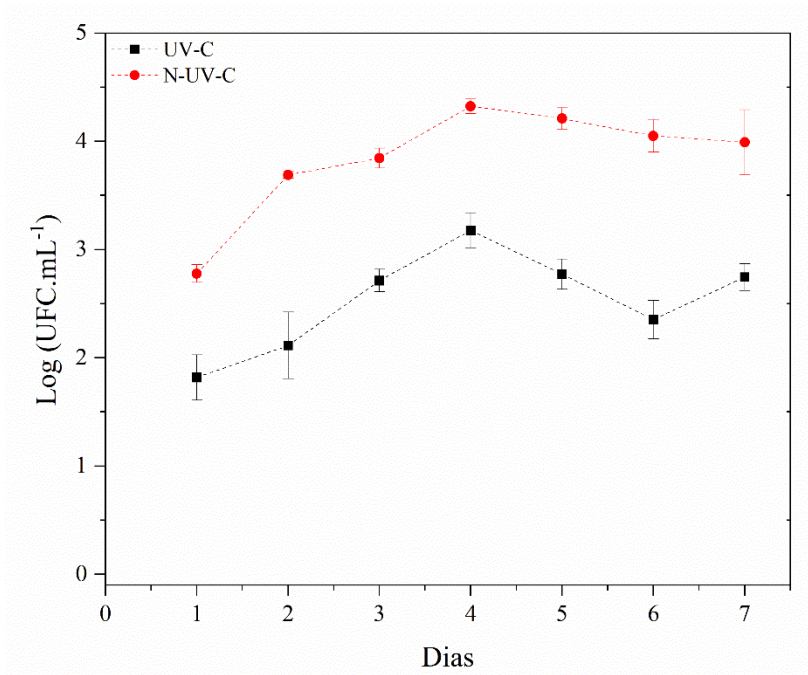


Figura 3. Curva de crescimento de bactérias mesofílicas com (UV-C) e sem luz UV-C (N-UV-C) em fluido hidropônico na produção de alface em um sistema hidropônico interno. Elaborado pela autora

A colheita da alface foi realizada quando cada grupo atingiu uma altura de aproximadamente 17 cm (máxima na câmara de crescimento), sendo avaliado o impacto do sistema de descontaminação UV-C. O grupo com um fotoperíodo de 20 horas, que atingiu esse nível em 30 dias com o sistema de descontaminação UV-C (20 h-UV-C), em oposição aos 38 dias necessários para o grupo sem o sistema UV-C (20 h-NUV-C). No caso do experimento com fotoperíodo de 18 horas, o grupo com o sistema de descontaminação UV-C (18 horas-UV-C) levou 28 dias para alcançar a altura alvo, enquanto o grupo sem o sistema (18 horas-NUV-C) exigiu 48 dias. Este é um resultado importante, mostrando na época da colheita a importância da qualidade microbiológica da solução hidropônica.

Os resultados apresentados demonstram que o sistema de descontaminação acelerou significativamente o crescimento das plantas em comparação com o grupo que não recebeu luz UV-C. Essa aceleração representou pelo menos 20 dias para um fotoperíodo de 18 h e oito dias para um fotoperíodo de 20 h. A redução no tempo necessário para o crescimento pode ser atribuída a fatores intrínsecos no desenvolvimento das plantas com redução microbiana. A análise da área foliar total (Figura 4A) não revelou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Especificamente, para o fotoperíodo de 20 h, os valores da área foliar foram de $1160 \pm 357 \text{ cm}^2$ com luz UV-C e $979 \pm 75 \text{ cm}^2$ sem luz UV-C. O grupo

submetido ao fotoperíodo de 20 h com UV-C apresentou a maior área foliar. Por outro lado, para o fotoperíodo de 18 h, os valores da área foliar foram de $1211 \pm 172 \text{ cm}^2$ para sem luz UV-C (NUV-C) e $1177 \pm 58 \text{ cm}^2$ com luz UV-C.

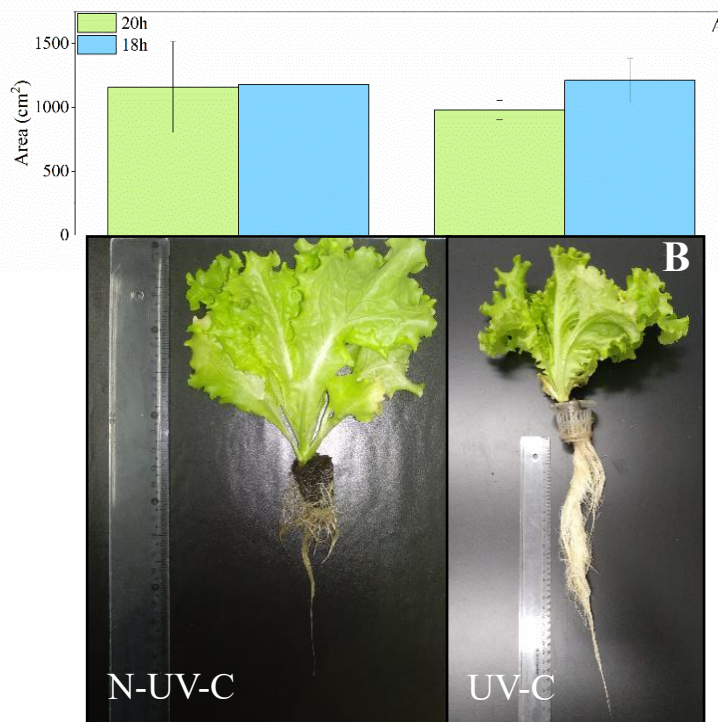


Figura 4. (A) Área foliar (cm^2) afetada pelo fotoperíodo e descontaminação da solução hidropônica em alface. Os resultados são mostrados pela média \pm erro padrão. (B) Desenvolvimento das raízes afetado pelo uso do sistema de descontaminação UV-C (direita) e sem sistema UV-C (N-UV-C, esquerda) na solução hidropônica para um fotoperíodo de 20 horas. Elaborado pela autora.

Esses resultados, assim como a literatura, indicam que a exposição ao UV-C pode estimular o crescimento das plantas, possivelmente devido à redução da carga microbiana em um ambiente mais favorável (Runia 1994a). Os resultados apresentados na Figura 4B demonstram que a implementação do sistema de descontaminação UV-C resultou em um desenvolvimento radicular aprimorado, abrangendo aspectos de crescimento, limpeza e número de fios radiculares. É importante destacar que as amostras submetidas à descontaminação UV-C no fluido hidropônico não tiveram mudanças significativas nas taxas de crescimento das partes aéreas das plantas. Isso indica indiretamente a ausência de efeitos significativos de estresse deste procedimento nas plantas.

Os resultados apresentados na Figura 5.A indicam que a estimulação mais eficaz da clorofila ocorreu no grupo com o sistema de descontaminação UV-C e fotoperíodo de 20 h quando comparado ao grupo de 18 h com UV-C. Os valores respectivos obtidos foram $0,61 \pm 0,03 \text{ mg.g}^{-1}$ e $0,38 \pm 0,05 \text{ mg.g}^{-1}$, enquanto os fotoperíodos sem descontaminação UV-C resultaram em valores de $0,40 \pm 0,07 \text{ mg.g}^{-1}$ para 20 h e $0,33 \pm 0,11 \text{ mg.g}^{-1}$ para 18 h. Em relação à *Chl-b*, não foram observadas diferenças significativas entre as condições. No entanto, o maior valor, foi registrado para o grupo de 20 h com UV-C $0,13 \pm 0,03 \text{ mg.g}^{-1}$, e enquanto o menor valor, $0,09 \pm 0,04 \text{ mg.g}^{-1}$, foi relatado para o grupo de 18 h sem UV-C.

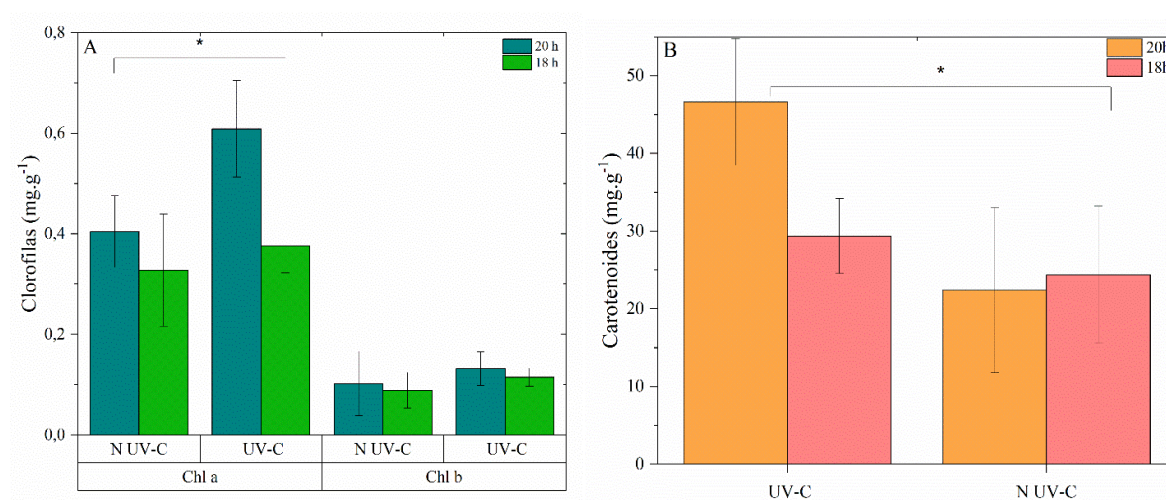


Figura 5. Efeito do fotoperíodo e descontaminação da solução hidropônica com (UV-C) e sem luz UV-C (N-UV-C) no (A) Níveis de clorofila. (B) Concentração de Car. Os resultados são mostrados pela média \pm erro padrão. O asterisco (*) indica diferença significativa ($P \leq 0,05$, teste de Tukey). Elaborado pela autora

Esses resultados sugerem que a exposição ao sistema de descontaminação UV-C, especialmente sob um fotoperíodo de 20 h, promoveu uma maior concentração de clorofila nas plantas. A clorofila desempenha um papel crucial na fotossíntese, sendo responsável por absorver a luz e convertê-la em energia. O aumento na concentração de *Chl-a* indica um potencial aumento na eficiência fotossintética das plantas expostas à luz UV-C. Por outro lado, a *Chl-b* não foi significativamente afetada, sugerindo que ela pode não responder da mesma forma que a *Chl-a* à exposição à luz UV-C. Portanto, o sistema de descontaminação UV-C pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a eficiência fotossintética das plantas. De acordo com a Figura 5.B, todos os valores de Car foram significativamente diferentes do grupo de 20 h com UV-C, cujo conteúdo foi de $47 \pm 8 \text{ mg.g}^{-1}$.

Na Figura 6.A, O maior teor de compostos fenólicos totais ($10 \pm 0,7 \text{ mg.g}^{-1}$) foi observado no grupo de 20 h sem UV-C. O grupo de 20 h com UV-C apresentou valores de $10,10 \pm 0,69 \text{ mg.g}^{-1}$, sem diferença estatisticamente significativa. Para os grupos de 18 h, as alfaces que passaram pela descontaminação da solução hidropônica exibiram um teor mais elevado de compostos fenólicos totais, com um valor de $6,99 \pm 0,06 \text{ mg.g}^{-1}$.

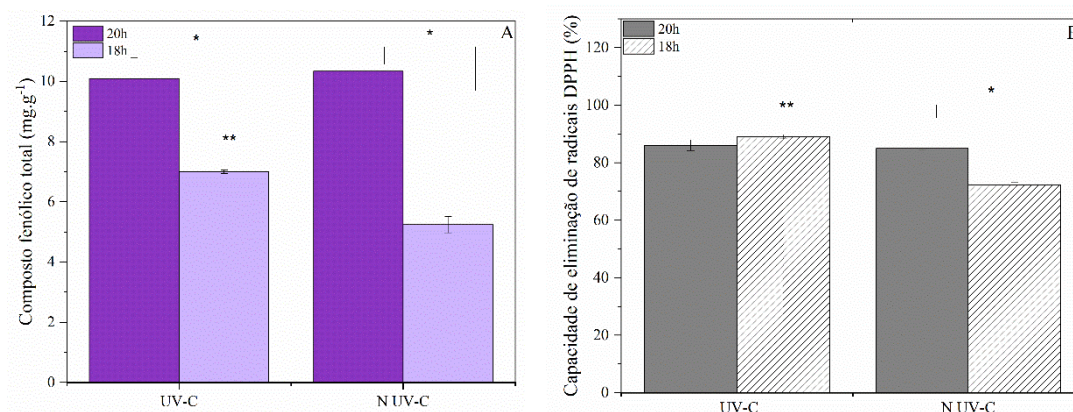


Figura 6. Efeito do fotoperíodo e descontaminação da solução hidropônica com (*UV-C*) e sem luz UV-C (*N-UV-C*) no (A) Nível de compostos fenólicos totais. (B) Capacidade de eliminação do radical DPPH (%). Os dados são mostrados pela média \pm erro padrão. O asterisco (*) indica diferença significativa e (**) denota diferença significativa com todos os dados ($P \leq 0,05$, teste de Tukey). Elaborado pela autora.

Em relação à capacidade antioxidante (DPPH), os sistemas que empregaram a descontaminação da solução hidropônica demonstraram valores mais altos. O maior valor de $89,1 \pm 0,7\%$ foram relatado para 18 h com UV-C, seguido pelo valor de $86 \pm 1\%$ para 20 h com UV-C. Apenas os grupos 20 h com UV-C/20 h sem UV-C não apresentaram diferença estatística (Figura 6.B).

Os macrominerais e microminerais são apresentados na Figura 7. De acordo com os resultados, o sistema de descontaminação UV-C não teve impacto na absorção de nutrientes. Os resultados indicam que o tratamento com UV-C, especialmente sob um fotoperíodo de 20 h, afetou positivamente os níveis de Car, a capacidade antioxidante e a concentração de compostos fenólicos totais nas plantas, sem prejudicar a absorção de minerais essenciais. Isso sugere que o uso de luz UV-C pode ser uma estratégia eficaz para aumentar a qualidade nutricional e antioxidante das plantas cultivadas em hidroponia (Choi, Yoo, and Kang 2015).

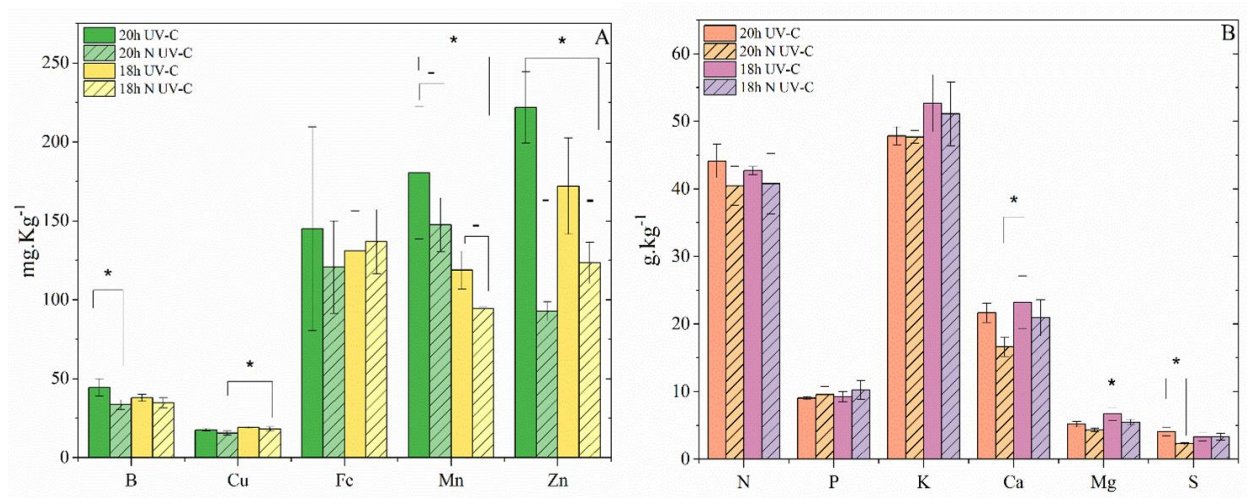


Figura 7. (A) Microminerais afetados pelo fotoperíodo e pela descontaminação com água da solução hidropônica. (B) Macro minerais são afetados pelo fotoperíodo e pela descontaminação com água da solução hidropônica. Os resultados são mostrados pela média \pm erro padrão. (*) indica uma diferença significativa ($P \leq 0,05$, teste de Tukey); (-) a marca no mesmo grupo não indica uma diferença significativa. O Origin Pro-2016 determinou diferenças significativas entre os tratamentos para ANOVA

Discussões

A qualidade microbiológica da solução nutritiva desempenha um papel vital no crescimento das plantas, uma vez que bactérias e fungos podem competir pela absorção de nutrientes, reduzindo disponibilidade para as plantas. Além disso, esses microrganismos podem ser patogênicos para plantas, podem proliferar na solução nutritiva, representando um desafio significativo em sistemas hidropônicos. A redução de bactérias na solução hidropônica oferece vantagens potenciais para o crescimento das plantas, mitigando o acúmulo de metabólitos resultantes da proliferação microbiana em tais ambientes (Bazyar Lakeh et al. 2013). Um excesso desses metabólitos pode induzir diversos efeitos adversos no desenvolvimento das plantas, incluindo a absorção prejudicada de nutrientes devido à acidez elevada decorrente de ácidos orgânicos microbianos; obstrução do sistema radicular causada por exopolissacarídeos; encurtamento do caule devido ao excesso de etileno; inibição do crescimento bactéria promotoras de crescimento vegetal por metabólitos tóxicos e antibióticos; e disponibilidade limitada de ferro para o desenvolvimento vegetal devido à produção de sideróforos microbianos. Esses resultados, juntamente com a literatura científica estabelecida, sugerem que a exposição ao UV-C pode estimular o crescimento das

plantas, potencialmente devido a uma carga microbiana reduzida dentro de um ambiente mais propício (Runia 1994b)(Czarnek et al. 2023).

Por outro lado, a área foliar total pode não ser significativamente afetada pelo tratamento com UV-C, a menos que haja variações significativas no fotoperíodo ou em outros fatores ambientais. O sistema de UV-C acelerou o crescimento, resultando em plantas mais altas em menos tempo (Saran and DAmico 2023). Além disso, melhorou o desenvolvimento das raízes, tornando-as mais eficientes na absorção de nutrientes e água (González et al. 2023). Esses resultados estão em conformidade com a literatura, que mostra que a exposição à luz UV-C pode estimular o crescimento das plantas e reduzir a carga microbiana no sistema radicular.

A fotossíntese ocorre com a conversão de energia luminosa em energia química devido à produção de carboidratos a partir de dióxido de carbono e água com a ajuda da clorofila (o pigmento verde das plantas) em energia luminosa (Scheer 2013). A clorofila permite que as plantas capturem a energia necessária para o desenvolvimento do tecido, e uma baixa densidade de clorofila pode resultar em deficiência de nitrogênio nas folhas das plantas, dada a estreita conexão entre o nitrogênio e a atividade fotossintética (RABINOWITCH and GOVINDJEE 1965). A redução bacteriana de nitrogênio, um nutriente essencial para o crescimento dos organismos (Zhang et al. 2018a), pode levar a uma diminuição das moléculas de clorofila, afetando conseqüentemente a atividade fotossintética e a produção de biomassa (RABINOWITCH and GOVINDJEE 1965).

Os valores de *Chl-a* de $0,38 \pm 0,02 \text{ mg.g}^{-1}$ e os valores de *Chl-b* de $0,14 \pm 0,08 \text{ mg.g}^{-1}$, foram relatados por Song et al. (2020a) (Song et al. 2020a) em um cultivo de alface crespa exposta a uma intensidade luminosa de $150 \mu\text{mol.cm.s}^{-1}$, o qual corrobora com os valores obtidos neste estudo, apesar da menor intensidade de luz utilizada.

Outro estudo relatou a produção de alface crespa por meio de um sistema hidropônico, com valores de 0,1-0,2 mg.g^{-1} de conteúdo de clorofila (Sapkota, Sapkota, e Liu 2019), que são compatíveis, ou mais elevados quando comparado com o sistema de descontaminação por UV-C utilizado no presente estudo.

Car são pigmentos fotossintéticos importantes, pois absorvem diferentes comprimentos de onda das clorofilas, servindo como um acessório para a fotossíntese. Eles também protegem as células, evitando o excesso de energia das clorofilas excitadas reagindo como antioxidantes. (Delgado-Vargas, Jimenez, and Paredes-Lopez 2010) (Khawas et al. 2014). O estímulo luminoso mais significativo observado de 20 h para 18 h pode ter interferido na

produção desses pigmentos, uma vez que eles geralmente absorvem luz na região espectral do sol de irradiância máxima (Frank 2010). Os teores de Car obtidos neste estudo foram mais elevados em 20 h UV-C, seguidos por 18 h UV-C.

Tais valores são elevados em comparação com aqueles encontrados na literatura - em ambientes controlados com intensidade de luz de $200 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, o teor total de Car foi de $0,202 \pm 0,005 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. (Naznin et al. 2019b). Outros teores foram encontrados em culturas variando de 1.810 a 2.760 $\mu\text{g}/100 \text{ g}$ de peso seco em amostras cultivadas em hidroponia . (Mou 2009), mostrando que o pigmento de Car em condições semelhantes para amostras de alface é maior quando um sistema UV-C é usado para controle microbiológico.

O teor de compostos fenólicos totais para os grupos de 18 h foi melhor para alfaces que descontaminaram a solução hidropônica, com valores de $6,99 \pm 0,06 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, os quais foram semelhantes aos da alface iceberg comprada em um supermercado local no Colorado, EUA (X. Liu et al. 2007a).

A análise mineral revelou que a maioria das amostras obteve melhores resultados quando o sistema de descontaminação UV-C. Quando os resultados não foram eficientes, a diferença não foi estatisticamente significativa, demonstrando que o sistema UV-C não degradou ou impediu a absorção de minerais nas plantas. No entanto, os microminerais Mn e Zn são essenciais para a nutrição de bactérias e, quando não estão disponíveis, as proteínas são usadas como alternativa (Colomer-Winter et al. 2018).

Este estudo demonstrou que a absorção de Mn e Zn pelas plantas pode ser melhorada com o uso de UV-C e ocorre devido à competição entre plantas e bactérias por nutrientes. Portanto, quanto menor o número de bactérias presentes na produção de hidroponia, maior a disponibilidade de nutrientes para as plantas. O teor de Zn na alface varia entre 30-46 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ DW}$. Os valores encontrados neste estudo estão acima daqueles encontrados na literatura, ou seja, $221 \pm 23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para o grupo de 20 h com UV-C. (Kim et al. 2016a). A literatura relata minerais de interesse em valores similares ou superiores (por exemplo, Potássio (K), com valores de 2,35 a 6,47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ obtidos de diferentes condições de cultivares de alface). Neste estudo, os valores mais altos, ou seja, $53 \pm 4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, foram obtidos no grupo de 18 h com UV-C tais valores denotam um conteúdo muito alto quando comparados aos da literatura. O Cálcio apresentou o maior conteúdo ($23 \pm 4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) em 18 horas de UV-C em comparação com alfaces *Cogollos* de Tudela, Batavia Rubia Munguía e Maravilla de Verano, cujos valores variaram entre 4,1-20,6 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ DW}$ (Baslam et al. 2013a).

Outro mineral de interesse neste estudo foi o ferro, que, de acordo com Liu, Y. et al. (Y. W. Liu and Huang 2019), é degradado pelo UV-C. Sob as condições utilizadas nas amostras de alface, os teores de ferro não apresentaram diferença significativa entre os grupos, demonstrando que o uso de UV-C não prejudica a absorção desse mineral pelas plantas. No entanto, a literatura relata valores baixos (59,9-112,4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ DW) e altos (172-248 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso seco) para vários tipos populares de alface - o teor encontrado no presente estudo está dentro dessa faixa. (Kim et al. 2016b).

2.4 Conclusão Parcial

A produção de alface em hidroponia foi otimizada pela redução do tempo de desenvolvimento com o uso de um sistema de descontaminação de água por UV-C. Uma redução na carga microbiana otimizou as condições do produto, apesar de mudanças em fatores como irradiância em diferentes fotoperíodos, manutenção da qualidade nutricional ou, em alguns casos, sua potencialização. Com base nos resultados do estudo, pode-se concluir que o uso do sistema de descontaminação por UV-C em sistemas hidropônicos tem impactos significativos no controle microbiano, melhorando o desenvolvimento dos vegetais. Através de observações experimentais de crescimento mais rápido das plantas, aumento na produção de pigmentos importantes e melhoria na resistência antioxidante, sem comprometer a absorção de nutrientes, concluímos que essa melhoria na instrumentação do sistema hidropônico implicaria um aditivo para o desenvolvimento de vegetais para produção de alimentos em ambientes controlados e para a segurança microbiológica das colheitas

3 CAPÍTULO III : Estudo Do Comportamento Da Alface Mini Lisa Variando A Intensidade Da Luz, Fotoperíodos E Concentração De Nutrientes.

3.1 Contextualização

A otimização dos parâmetros intensidade de luz, fotoperíodo e disponibilidade de nutrientes para cultivo hidropônico são fundamentais e determinantes para o desenvolvimento da planta em sistema controlado, fábricas e estufas. O capítulo III apresenta um estudo abrangente sobre a implementação de 16 regimes de tratamento distintos, conduzido para verificar seus impactos tanto no crescimento, quanto na qualidade da mini alface lisa. Os tratamentos envolveram combinações, incluindo duas intensidades de luz (138 e 168 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), três concentrações de solução nutritiva (2,0, 1,8 e 1,6 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$), e quatro fotoperíodos 24, 20, 18 e 12 h luz, respectivamente. As condutividades elétricas (CE), foram determinadas através de medições utilizando um condutivímetro portátil (Medidor de Condutividade de Bolso - AK52 New - Agro)

Este capítulo destaca o potencial de otimizar a interação entre a intensidade da luz e o fotoperíodo, particularmente em conjunto com concentrações de solução nutritiva classificadas como altas ou médias. Tal estratégia de otimização pode amplificar significativamente tanto a produção quanto a qualidade da alface. Os resultados fornecem insights valiosos para refinar as metodologias de cultivo e maximizar a produção de vegetais em ambientes controlados

Este Capítulo resultou na submissão do artigo intitulado “Impacts of Light intensity, Photoperiods, and Nutrient Concentration of Mineral Biofortification of Mini Butterhead Lettuce on a Controlled Indoor Greenhouse” na revista *Journal of plant growth regulation*

3.2 Metodologia

As análises dos parâmetros fisiológicos das plantas, apresentadas no Capítulo II, nas seções 2.2.2 a 2.2.7, incluíram a avaliação da área foliar e da massa fresca, além da quantificação de pigmentos, como clorofilas e carotenoides, compostos fenólicos e capacidade antioxidante. Também foi realizada a análise da composição mineral das plantas de alface cultivadas em sistema hidropônico, em ambiente controlado. A descrição detalhada da câmara de cultivo encontra-se na seção 2.2.8.

A principal diferença metodológica entre o capítulo anterior e o presente estudo reside no processo de obtenção das mudas e na configuração experimental, que será descrita a seguir.

3.2.1 Plantio das sementes e desenvolvimento das mudas alface

Os experimentos foram conduzidos com alface mini lisa "Sartre RZ" (*Lactuca sativa* var. *capitata*). As sementes foram adquiridas da RIJK ZWAAN (Brasil), inseridas em espuma fenólica e, posteriormente, submetidas a um período de 24 h de escuridão para germinação. Durante esta fase, foram umedecidas exclusivamente com água e, após a germinação, transferidas para uma câmara de crescimento com uma solução hidropônica. Inicialmente, a solução tinha uma concentração de $0,8 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, que foi aumentada para 1,0, 1,2 e $1,5 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ em intervalos de sete dias. A câmara de crescimento (Seção 2.2.8) foi configurada para fornecer um fotoperíodo de 18 h, composto por exposição à luz, seguido por um intervalo de 6 h de escuridão. Após 25 dias de crescimento, as plantas atingiram a fase de muda e foram transplantadas para uma solução com concentração de $2,0 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.

3.2.2 Configuração experimental

A intensidade de luz $138,33 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ foi empregado para os experimentos categorizados como "baixa intensidade" e um de $168,58 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ foi aplicado para aqueles classificados como "alta intensidade". Além disso, o estudo abrangeu quatro fotoperíodos distintos e três concentrações de nutrientes. Para uma melhor compreensão a Tabela 1, apresenta, há uma designação para cada tratamento.

Tabela 1. Configuração experimental para os horários de fotoperíodo, incluindo as respectivas concentrações e intensidades de luz. Elaborada pela autora

Designação	Intensidade	Fotoperíodo (on/off)	Concentrações mS.cm ⁻¹
H12	Alta	12/12	2.0
H18	Alta	18/06	2.0
H20	Alto	20/04	2.0
H24	Alto	24/00	2.0
L12-1	Baixa	12/12	2.0
L12-2	Baixa	12/12	1.8
L12-3	Baixa	12/12	1.6
L18-1	Baixa	18/06	2.0
L18-2	Baixa	18/06	1.8
L18-3	Baixa	18/06	1.6
L20-1	Baixa	20/04	2.0
L20-2	Baixa	20/04	1.8
L20-3	Baixa	20/04	1.6
L24-1	Baixa	24/00	2.0
L24-2	Baixa	24/00	1.8
L24-3	Baixa	24/00	1.6

3.3 Resultados e discussões

Área e massa fresca

A investigação experimental abrangeu várias condições, com H20 e L18-1 como as mais favoráveis em termos de área, apresentando valores de $1494 \pm 16 \text{ cm}^2$ e $1470 \pm 325 \text{ cm}^2$, respectivamente. Em contraste, a combinação de um fotoperíodo de 12 h com baixa concentração e intensidade (L12-3) proporcionou $904 \pm 86 \text{ cm}^2$, que é o valor mais baixo de área registrado (Figura 8).

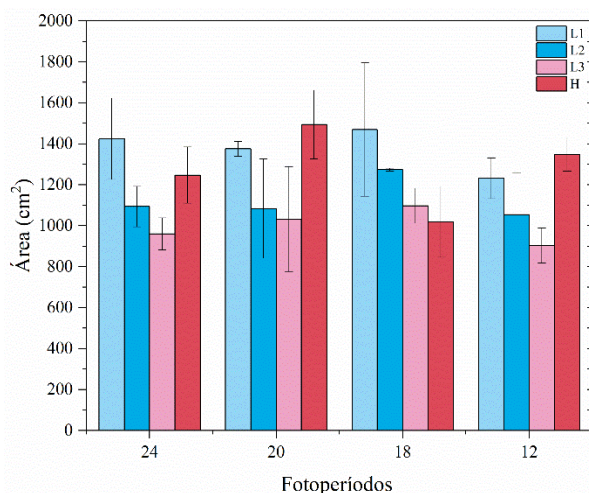


Figura 8. Área de alfaces mini lisa em função dos fotoperíodos para diferentes condições experimentais. Os resultados são mostrados pela média \pm desvio padrão. Elaborado pela autora

Tais achados sugerem que, na maioria dos casos, os grupos expostos a baixa intensidade exibem áreas maiores. Notavelmente, dentro dos fotoperíodos de 12 h, um aumento na intensidade da luz melhorou significativamente o ganho de área, em comparação com os grupos de baixa intensidade (L12-1; L12-3). Em relação à massa fresca, os resultados indicam que o incremento da biomassa para o fotoperíodo de 24 h com alta intensidade (H20) não apresentou diferença significativa em comparação com o grupo de baixa intensidade (L24-1).

No entanto, a Figura 9 apresenta que não foram observadas diferenças significativas entre H20 com H24 e os valores altos não diferiram substancialmente de L24-2, L20-1 e L18 em todas as três concentrações.

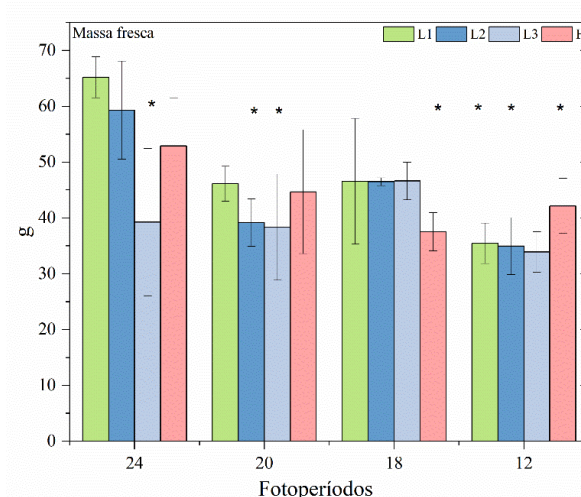


Figura 9. Massa fresca de alface mini lisa em gramas em função dos fotoperíodos para diferentes condições experimentais. Resultados apresentados pela média \pm desvio padrão. * indica diferença significativa em relação ao grupo L24-1. Elaborado pela autora

A Figura 10 mostra o resultado visual das alfaces para os fotoperíodos L20 e L18 em suas três concentrações, com a intenção de destacar que as amostras alcançaram um bom desenvolvimento morfológico.

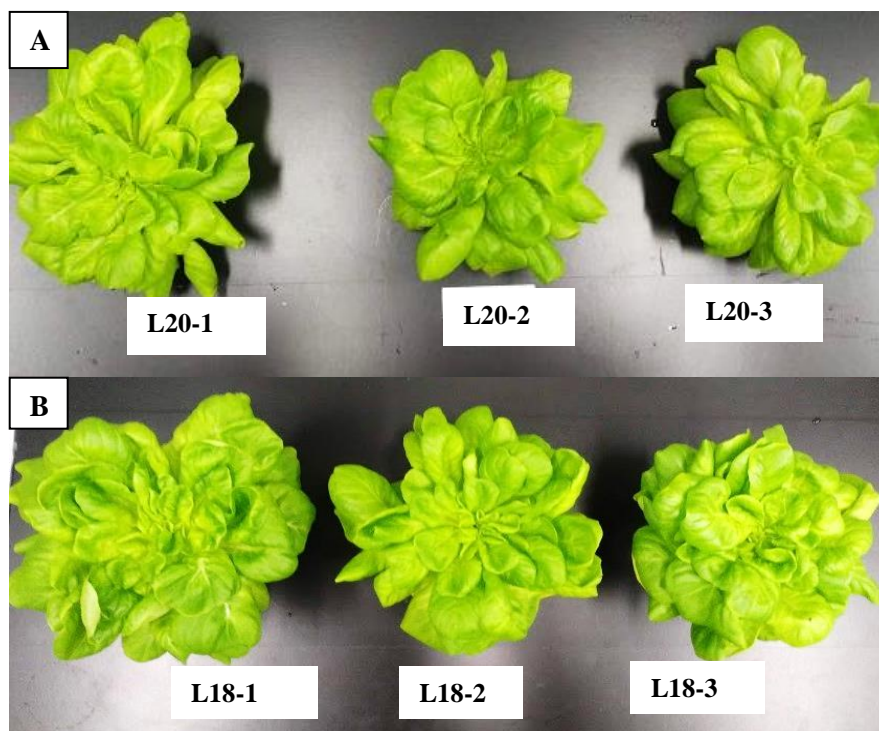


Figura 10. Imagens tiradas no dia da coleta para alface mini lisa em suas três concentrações para as condições experimentais. (A) fotoperíodo de 20 h, (B) fotoperíodo de 18 h. Elaborado pela autora.

Análise de Pigmentos

A Figura 11.A e 11.B ilustra os conteúdos de *Chl-a* e *Chl-b*, respectivamente. O maior valor de *Chl-a*, $0.7 \pm 0.2 \text{ mg.g}^{-1}$, foi observado em H18, enquanto o valor mais baixo, $0.4 \pm 0.2 \text{ mg.g}^{-1}$, foi registrado para L24-1. O valor mais alto não apresentou diferença significativa dos grupos L20-1,2,3 e a sequência de valores ascendentes continuou com L12-1 e L12-2 (0.61 ± 0.07 e $0.60 \pm 0.09 \text{ mg.g}^{-1}$), respectivamente.

Curiosamente, H18 não apresentou diferença significativa de L18, indicando que alta intensidade de luz não resulta necessariamente em aumento do conteúdo de *Chl-a* ou sua estimulação em comparação com intensidades "baixas", como ilustrado na Figura 11.A. Em relação à *Chl-b*, os valores mais altos foram L20-1 e L18-3 (0.18 ± 0.03 ; $0.18 \pm 0.03 \text{ mg.g}^{-1}$) e o conteúdo diminuiu com o aumento da intensidade de luz. Notavelmente, não foram observadas diferenças sob diferentes concentrações de solução nutritiva, como mostrado na Figura 11.B, e não foram detectadas diferenças significativas entre esses grupos de alto valor.

Composto fenólico total e Capacidade antioxidante

Observaram-se aumentos no teor fenólico total na concentração de 1,6 EC e fotoperíodo de 24 h (L24-3), com valores atingindo $4,2 \pm 0,7 \text{ mg.g}^{-1}$. Fotoperíodos de 18 h(L18-3) também proporcionaram resultados notáveis, com $5 \pm 2 \text{ mg.g}^{-1}$, seguidos por L12-2, com conteúdo de $4 \pm 1 \text{ mg.g}^{-1}$ (Figura 12C). Durante a avaliação da capacidade antioxidante, L20 e L18 mostraram os valores percentuais mais substanciais, variando de 84,02% a 88,62%. Em contraste, H12 forneceu o valor mais baixo, alcançando meramente 17,62% (Figura 11D)

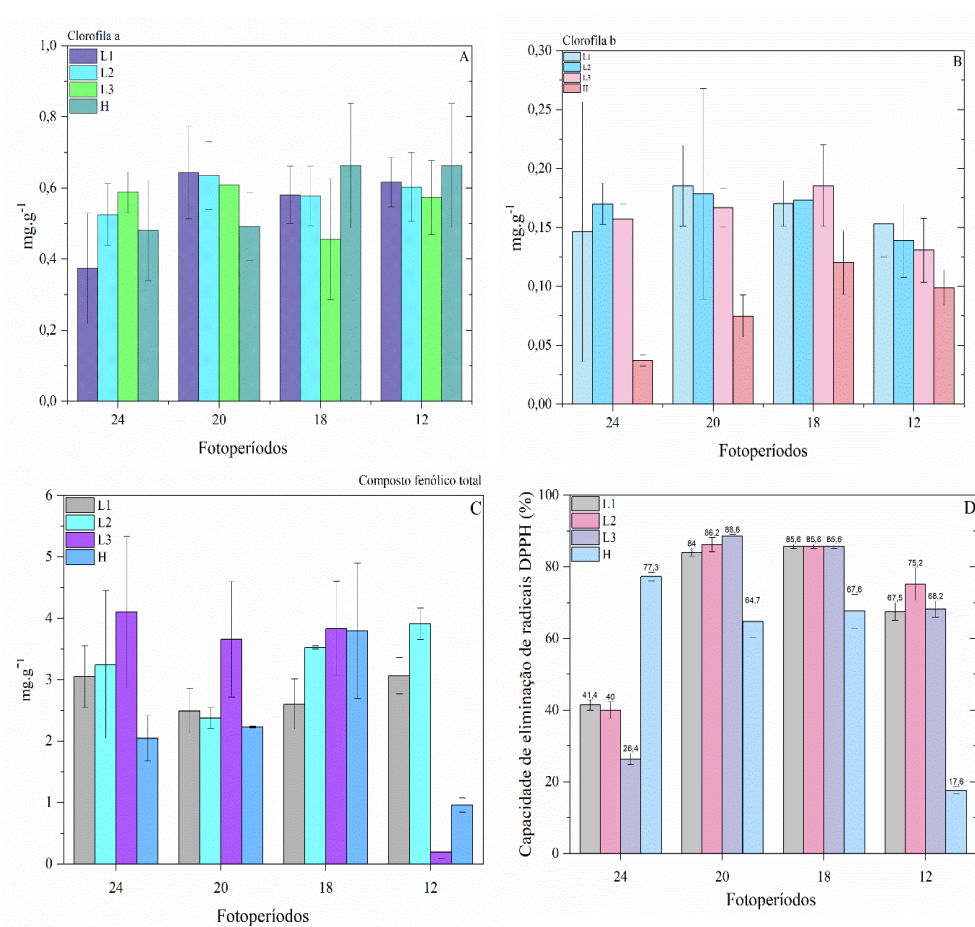


Figura 11. Avaliação do efeito de (A) Conteúdos de *Chl-a*, (B) Conteúdos de *Chl-b*. (C) Compostos fenólicos totais. (D) Capacidade antioxidante pelo DPPH da alface mini lisa em função dos fotoperíodos para diferentes condições experimentais. Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Elaborada pela autora.

Por outro lado, a Figura 12 mostra que os menores valores de *Car* foram observados no grupo L24-1, os grupos expostos a fotoperíodos de 20 horas (L20) e 18 horas (L18), cobrindo as três concentrações, apresentaram os valores mais altos, dos quais o valor máximo foi registrado para H18 (47 ± 8 mg.g⁻¹).

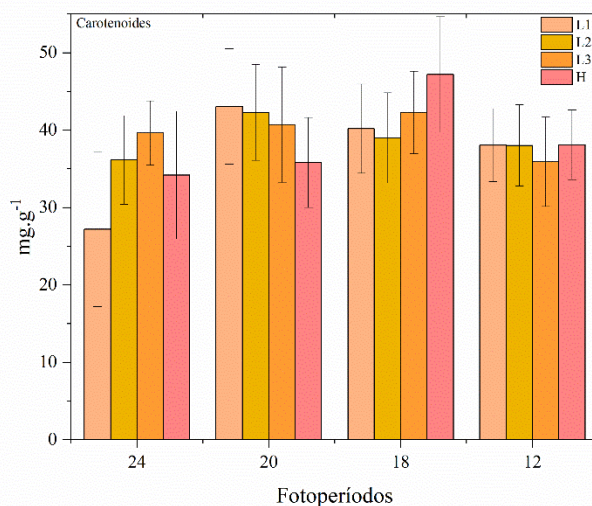


Figura 12. Grupos de *Car* em função dos fotoperíodos para diferentes condições experimentais alface mini lisa. Resultados apresentados pela média \pm desvio padrão. Elaborado pela autora

Análise de Minerais

Os resultados mostrados na Figura 13 A e B mostra os macro e micro minerais analisados. O teor de nitrogênio atingiu seu nível mais alto sob o fotoperíodo de 12 h com concentração de 1,8 mS.cm⁻¹, com valor médio de 44 ± 4 g.kg⁻¹ (L12-2). Da mesma forma, os outros grupos submetidos ao mesmo fotoperíodo, nomeadamente L12-1 e H12, mostraram teores de nitrogênio comparáveis de $43 \pm 0,8$ e 42 ± 3 g.kg⁻¹, respectivamente. Notavelmente, diferenças significativas foram observadas entre os grupos L24 em suas três concentrações (1, 2, 3) quando comparadas com L12-1 e L12-2. Essas descobertas destacam os fotoperíodos curtos em estimular a absorção de nitrogênio em comparação com os fotoperíodos longos nesse elemento específico.

Entre suas três concentrações, os grupos L12 mostraram o maior teor de cálcio (Ca). Especificamente, L12-1 forneceu $20,6 \pm 0,2$ g.kg⁻¹, seguido por L12-2 com 19 ± 1 g.kg⁻¹ e L12-3 com 21 ± 1 g.kg⁻¹, representando o maior teor entre os grupos. A sequência prossegue com L18 (que não mostrou diferenças significativas em comparação com L12), seguido por

L20 e L24. A tendência de diminuição do teor de cálcio com o aumento da intensidade é evidente tanto nos grupos H24-20-18 quanto nos grupos 12h.

Entre os grupos de fósforo (P), o maior conteúdo foi observado em L24-1, com 11 ± 2 g.kg⁻¹, seguido por L18 e L12, com valores semelhantes, como ilustrado na Figura 13A. Em relação ao potássio (K), três grupos, nomeadamente L24-1, L24-2 e H12, mostraram conteúdos semelhantes, com 62 ± 3 , 64 ± 1 e 60 ± 2 g.kg⁻¹, respectivamente. O magnésio (Mg) exibiu valores consistentes em todas as condições, exceto H18, que teve notavelmente o menor teor de $3,9 \pm 0,2$ g.kg⁻¹. Em contraste, L24-1 mostrou o valor mais alto, ou seja, $7,0 \pm 0,8$ g.kg⁻¹. O enxofre (S) apresentou um comportamento semelhante em todos os grupos, exceto H24, que forneceu o maior valor, ou seja, $3,2 \pm 0,2$ g.kg⁻¹. Os valores mais baixos foram observados em L20-1 e L12-1, com conteúdo de $2,0 \pm 0,30$ e $2,0 \pm 0,1$ g.kg⁻¹, respectivamente.

A aplicação de parâmetros não resultou em alterações observáveis nos níveis de microminerais como boro (B) e cobre (Cu). O maior valor para Cu foi obtido para alta intensidade com fotoperíodo de 12 h (H12), seguido por L18-1, com $27,2 \pm 0,9$ e 23 ± 2 mg.kg⁻¹, respectivamente, e para boro, o maior valor foi no grupo L24-1 com um conteúdo de 41 ± 6 mg.kg⁻¹.

O manganês (Mn) apresentou valores comparáveis entre os grupos, com H12 com o teor mais alto em 151 ± 8 mg.kg⁻¹. Baixas intensidades e fotoperíodo e alta concentração ajudaram a aumentar o teor de Fe e Zn, conforme mostrado na Figura 13B. O conteúdo de ferro registrou um valor alto de 458 ± 10 mg.kg⁻¹, enquanto o zinco (Zn) demonstrou um nível notável similar de 155 ± 6 mg.kg⁻¹.

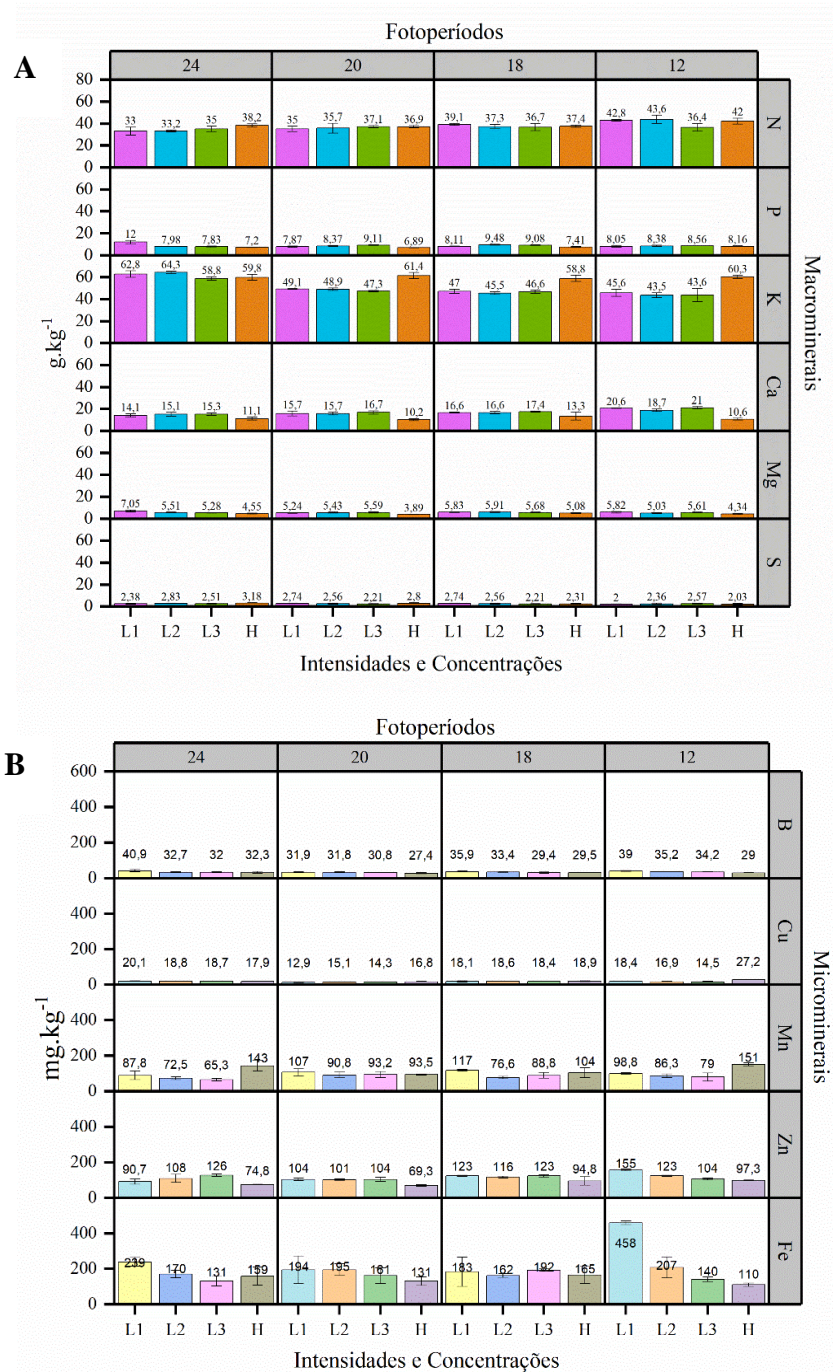


Figura 13. Macrominerais e microminerais regulado por diferentes intensidades de luz, fotoperíodos e concentração da solução nutritiva. (A) Conteúdo total de N, P, K, Ca, Mg e S (g.kg^{-1}). (B) Conteúdo total de B, Cu, Mn, Zn e Fe (mg.kg^{-1}). Resultados apresentados pela média \pm desvio padrão. Elaborado pela autora

Devido à similaridade nas respostas observadas na maioria das análises realizadas, foi necessário utilizar uma análise estatística mais robusta para identificar possíveis padrões e agrupamentos entre os diferentes grupos experimentais. Para isso, aplicamos a Análise de

Componentes Principais (PCA), uma técnica multivariada que permite reduzir a dimensionalidade dos dados, mantendo a maior parte da variabilidade original. O PCA facilitou a visualização das relações entre os grupos com base nos resultados das análises fitoquímicas, destacando variações que não seriam facilmente perceptíveis em análises univariada, na Figura 14. A exibe as concentrações de *Chl-a*, *Chl-b*, *Car*, DPPH, biomassa e compostos fenólicos totais (TPC). Essa representação visual entre vetores e tratamentos mostra correlações entre os grupos e as variáveis analisadas.

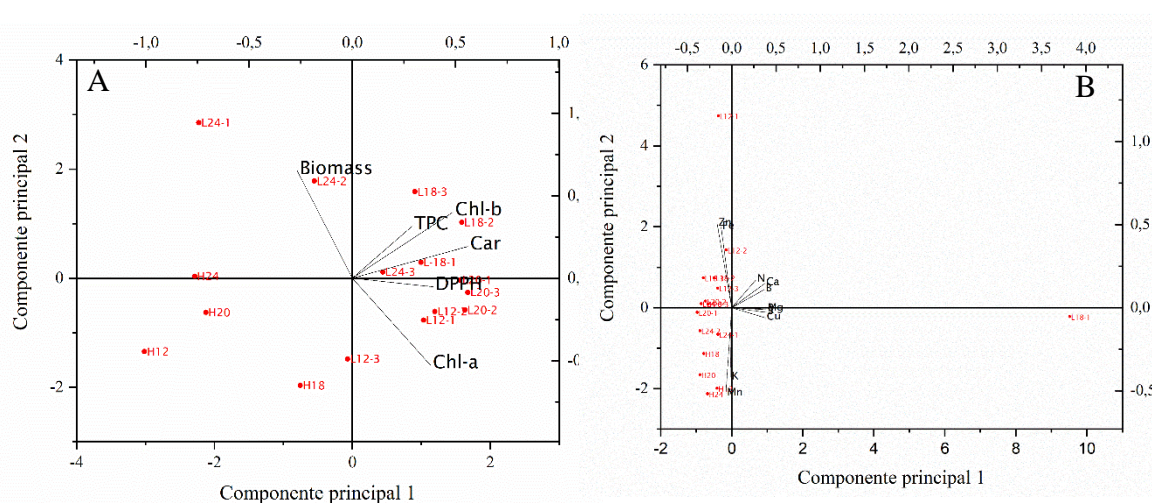


Figura 14. Análise multivariada de componentes principais com correlações entre tratamentos e análises. (A) Biplot da PCA indicando respostas distintas na alface mini lisa com diferentes tratamentos de crescimento e variáveis. Biomassa, TPC (composto fenólico total), *Chl-a*, *Chl-b*, carotenoide (*Car*) e DPPH (capacidade antioxidante). B) Biplot da PCA para tratamentos e minerais. Elaborado pela autora.

As concentrações de *Chl-a*, *Chl-b*, *Car*, Capacidade de eliminação de radicais DPPH (DPPH), biomassa (Biomass) e compostos fenólicos totais (TPC) são mostradas no biplot resultante da Figura 14.A, que exibe correlações entre os grupos e as análises realizadas. O eixo X é rotulado com TPC, *Car*, *Chl-b* e DPPH, posicionados em correlação com sua localização dentro do primeiro quadrante, ao lado dos grupos L24-2, L18-3, L18-2 e L18-1.

TPC, *Car*, *Chl-b* e DPPH estão positivamente correlacionados e localizados no primeiro quadrante no eixo X. Essas variáveis são inversamente correlacionadas com os grupos L24-3, L18-3, L18-2 e L18-1. Por outro lado, elas estabelecem correlações negativas com os grupos H20, H18 e H12 e com as massas frescas. *Chl-a*, posicionada no eixo Y,

representa o segundo componente (PC2) e mostra correlações negativas com as variáveis mencionadas no quadrante positivo.

Esse agrupamento revela similaridades nos valores de cada análise. Além disso, H24 e L24-1 mostram valores elevados de biomassa, mas baixo teor de clorofila em comparação com os outros grupos. A mesma tendência é observada nos grupos L12-1, L12-2, L12-3, L20-1, L20-2, L20-3 e L24-3, que estabelecem fortes correlações positivas com Chl-a, Chl-b, Car e TPC. Em contraste, a biomassa mostra uma correlação negativa apenas com H20, H12, H18 e H24, indicando baixa correlação e valores pequenos em todos os componentes. A análise apresentada na Figura 14.B revelou uma forte correlação entre L18-1 e os minerais B, Cu, Mg e P, mas uma fraca com os outros minerais.

Discussões

As condições ambientais que interagem efetivamente com as plantas têm um impacto positivo na obtenção de alta qualidade (Zhang et al. 2018b). Este capítulo explorou o impacto de diferentes intensidades de luz e tempo de exposição (fotoperíodos) nos parâmetros de crescimento de alface mini lisa. Os resultados mostraram efeitos significativos desses fatores tanto na expansão da área foliar quanto na acumulação de biomassa. Embora a literatura relate extensos estudos sobre intensidades de luz de 150-170 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Song et al. 2020b), (Tarr, Valle de Souza, and Lopez 2023) destacando seus resultados favoráveis para o crescimento da alface, a presente investigação ampliou tal entendimento ao enfatizar o papel vantajoso de fotoperíodos prolongados. Em comparação, fotoperíodos mais curtos resultaram em resultados sub ótimos em relação às medições de área e biomassa.

Estudos anteriores que empregaram intensidades de luz próximas a 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ e condições de temperatura similares relataram resultados semelhantes aos presentes. Song et al. (Song et al. 2020b) demonstrou uma acumulação de biomassa por planta variando entre 44,77 e 59,03 g. Outro estudo examinaram uma espécie de alface intimamente relacionada com pigmentação roxa, alcançaram um notável rendimento de biomassa de 76 g por planta (Tarr, Valle de Souza, and Lopez 2023). Esses exemplos destacam a importância da otimização dos parâmetros ambientais, com ênfase especial na intensidade de luz e fotoperíodos prolongados. Tais práticas são cruciais para aumentar a produção de alface e garantir altos rendimentos nos esforços de cultivo.

As condições experimentais utilizadas neste capítulo III alcançaram uma biomassa (60-50 g) aceitável em comparação com a hidroponia convencional. Notavelmente, a alface mini lisa apresentou pesos frescos de aproximadamente 60 g (H. Tunio et al. 2023), refletindo o sucesso das condições experimentais implementadas.

A avaliação do teor de clorofila possui uma relevância significativa como indicador tanto da produtividade fotossintética quanto das condições ambientais. O aprimoramento eficaz dessas moléculas de clorofila permanece intricadamente ligado aos processos fotossintéticos robustos, permitindo que as plantas sintetizem efetivamente carboidratos por meio da redução do CO₂. As clorofilas desempenham um papel vital no funcionamento dos fotossistemas dentro das plantas (Jama-Rodzeńska et al. 2022).

Embora não tenham sido observadas diferenças significativas no teor de clorofila entre os diferentes fotoperíodos em comparação com o teor mais elevado obtido em H18, foram detectadas variações nos níveis de clorofila entre fotoperíodos como L20 e L18. A capacidade de alcançar taxas fotossintéticas mais elevadas parece não ser afetada por fotoperíodos prolongados ou intensidades de luz variáveis. Uma tendência similar foi observada nos conteúdos de Car, uma vez que os grupos L24 apresentaram os valores mais baixos deste pigmento. Esse fenômeno está alinhado com pesquisas anteriores, indicando que um aumento na intensidade luminosa pode na verdade diminuir a taxa fotossintética, induzindo assim um estado de saturação da planta (Song et al. 2020b).

Os compostos fenólicos são metabólitos secundários bioativos comumente encontrados em plantas e reconhecidos por suas propriedades antioxidantes. Eles atuam como defensores robustos contra estressores ambientais e patógenos, destacando assim seu papel crítico na proteção das plantas (Kumar et al. 2020). O teor de compostos fenólicos variou entre 2-3 mg.g⁻¹ no presente estudo, alinhando-se bem com investigações anteriores sobre a produção de alface no Brasil. Isso é notável, uma vez que estudos anteriores geralmente relataram faixas de 0,9 a 1,08 mg.g⁻¹ (Arbos et al. 2010). A alface é reconhecida por seu elevado teor de compostos fenólicos, cujos valores reais podem variar em função das condições de cultivo e da variedade de alface. Nesta investigação, foram encontrados níveis semelhantes de compostos fenólicos quando comparados a estudos envolvendo maior intensidade de luz (250 μmol·m⁻²·s⁻¹). No que diz respeito ao cultivo indoor de alface mini lisa, pesquisas anteriores apresentaram resultados congruentes em termos de teor de compostos fenólicos e capacidade antioxidante (Perez et al. 2024). No entanto, o presente estudo demonstrou condições favoráveis que produziram altos níveis de teor de compostos

fenólicos. Um estudo independente utilizando hidroponia convencional para o cultivo de alface mini lisa alcançou um valor notável de 63,4% em um ensaio de DPPH, indicando uma atividade antioxidante significativa (Li et al. 2020). Outro estudo que utilizou hidroponia convencional na alface mini lisa alcançou 63,4% no ensaio de DPPH (H. Tunio et al. 2023).

No que diz respeito à análise do conteúdo mineral, abrangendo elementos como Nitrogênio, Cálcio, Boro e Manganês, os resultados obtidos neste estudo estão amplamente em conformidade com as faixas projetadas estabelecidas pelas recomendações do Instituto Agrônomo Brasileiro (Trani et al. 2014). Quanto aos minerais como Fósforo, Magnésio, Cobre, Ferro e Zinco, foram observadas melhorias significativas nos tratamentos implementados, com Ferro e Zinco apresentando teores significativos. O teor de Ferro do grupo L12-1 foi três vezes maior do que os níveis convencionais de campo, enquanto outros grupos mostraram um aumento de duas vezes. O comportamento mineral variou entre diferentes intensidades e fotoperíodos. Os fotoperíodos longos pareceram estimular minerais como Fósforo, Potássio, Magnésio, Enxofre e Boro. Por outro lado, Nitrogênio, Cálcio, Cobre, Manganês, Ferro e Zinco exibiram teores mais altos com fotoperíodos curtos e intensidades mais baixas. Esses achados estão alinhados com estudos anteriores realizados em condições de baixa intensidade (Perez et al. 2024).

Em conclusão, o conteúdo mineral na alface é influenciado pelo fotoperíodo específico e pela intensidade da luz aplicada. Uma compreensão abrangente das ramificações desses fatores na absorção e no conteúdo mineral pode contribuir significativamente para o aprimoramento dos protocolos de cultivo de alface, garantindo uma nutrição mineral ideal para um crescimento e desenvolvimento robustos das plantas

3.4 Conclusão parcial

Esta pesquisa demonstrou que ajustes estratégicos na intensidade da luz, no fotoperíodo e nas soluções de nutrientes hidropônicos podem melhorar os perfis fitoquímicos da alface mini lisa, incluindo conteúdo mineral, composição fenólica e capacidade antioxidante. O uso de fotoperíodos estendidos, em conjunto com concentrações precisas de nutrientes e intensidades moderadas de luz, resultou em melhorias significativas no crescimento e na qualidade da alface. Esses resultados fornecem orientações valiosas para otimizar a produção

de vegetais em ambientes controlados, reduzindo a dependência de pesticidas ou inseticidas e promovendo práticas agrícolas sustentáveis.

4 CAPÍTULO IV: Bioestimulação e Perfis Fitoquímicos de Quatro Variedades de Alface em Luz Controlada de Baixa Intensidade: Otimizando Protocolos de Crescimento

4.1 Contextualização

Na produção hidropônica e em estufas convencionais de alface, é comum utilizar mudas que atingiram o estágio de crescimento de 4-5 folhas (3-4 semanas) antes do transplante e cultivo subsequente (5-6 semanas), resultando em um período de crescimento cumulativo entre 8 a 10 semanas. O objetivo do Capítulo IV foi investigar o desenvolvimento de quatro variedades de alface (Mini Lisa, Crespa, Roxa e Romana) em um sistema hidropônico sob diferentes fotoperíodos (24, 18 e 12 horas de luz) com intensidades de luz reduzidas (100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), a bioestimulação da planta podendo favorecer o ciclo de crescimento convencional de 8-10 semanas para um ciclo acelerado de 4 semanas.

4.2 Metodologia

Desenvolveu-se o cultivo de quatro variedades de alface (Mini Lisa, Crespa, Roxa e Romana) em um sistema hidropônico, submetido a diferentes fotoperíodos: 24, 18 e 12 horas de luz. As análises realizadas para avaliar as amostras foram detalhadas no Capítulo II, Seções 2.2.4 a 2.2.7. As configurações específicas dos experimentos, incluindo os parâmetros técnicos e metodológicos, estão descritas a seguir.

4.2.1 Seleção e obtenção das Mudanças

As sementes de alface paletizadas foram adquiridas da Rijk Zwaan, quatro variedades de alface foram avaliadas: "Veneranda" (Crespa) (*Lactuca sativa var. crispata*): Salanova® verde e alface vermelha (*Lactuca sativa L. var. capitata*), e Tudela RZ "Mini alface romana" (*Lactuca sativa L. var. longifolia*). No processo obtenção das mudas, transferiu-se as sementes para serem germinadas para durante 24h em placas de espuma fenólica (2x2x2cm célula) umedecida com água filtrada na temperatura de 23°C. Após a germinação, transferiu-se a espuma fenólica para cestos individualizados em diferentes cubas hidropônicas de uma câmara de cultivo indoor (LED Keisue Hydroponic Plants Growing Vertical Farm KES 2.0). O sistema contou com fertirrigação contínua no modo flutuante de solução nutritiva de

hidroponia (PM3 e PM4), suplementada com ferro. O controle de umidade e temperatura foram ajustados em 75% e 18 °C, respectivamente. A configuração experimental desse capítulo é apresentada nas próximas seções.

4.2.2 Configuração experimental.

Os experimentos foram conduzidos dentro de uma câmara de crescimento com ambiente controlado descrito na seção 2.2.8. A intensidade luminosa específica foi mantida em $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. A temperatura foi controlada entre 22-24°C, e a umidade relativa foi mantida constante em 60%.

4.2.3 Ciclos de Fotoperíodo crescimento das plantas

Os ciclos de fotoperíodo foram investigados, incluindo i) exposição contínua, sendo 24 h luz/0 h de escuro, ii) ciclo 18 h luz / 6 h escuro, e iii) ciclo balanceado de 12 h luz/ 12 h escuro. Os regimes foram selecionados com base em Weaver and van Iersel 2020, como modificações. Esses autores observaram que diferentes tempos de iluminação poderiam influenciar o metabolismo e o crescimento das plantas (Weaver and van Iersel 2020)

4.2.4 Suplementação do cultivo hidropônico

Além das condições de luz, a solução nutritiva hidropônica foi ajustada semanalmente durante o período de cultivo. A condutividade elétrica foi aumentada gradualmente uma vez na semana em 0,8, 1,2, 1,5 e 2,0 mS.cm^{-1} , respectivamente, com o fluido hidropônico (MP3 e MP4). O pH da solução nutritiva foi mantido na faixa entre pH 5,5-6,3, respectivamente. Essas variações no fluido hidropônico foram estabelecidas para simular mudanças nas condições ambientais que as plantas podem encontrar em um ambiente natural.

4.3 Resultados e discussões

O capítulo IV teve como objetivo melhorar a eficiência do desenvolvimento da alface, ao comparar com o ciclo de crescimento tradicionalmente que dura em torno de 37 a 40 dias. Além disso, o processo de mudas requer um tempo mínimo de 30 dias. Em contraste, nosso

estudo buscou acelerar esse período para apenas 30 dias, cobrindo todo o ciclo de crescimento desde a germinação da semente até a observação final da fase de maturação. Para alcançar esse objetivo, o estudo empregou três fotoperíodos distintos que variavam em duração, sendo um representando a duração máxima relatada na literatura existente de 24 h, outro o mínimo de 12 h, e um terceiro fotoperíodo intermediário de 18 h. A implementação desses regimes variados de exposição à luz visava determinar o impacto da manipulação do fotoperíodo nas taxas de crescimento e desenvolvimento da alfaca.

A Figura 15 apresenta o desenvolvimento visual das plantas ao longo do ciclo de 30 dias. Observa-se que, nos fotoperíodos de 24 horas e 18 horas de luz, as plantas exibiram um maior desenvolvimento da área foliar em comparação ao fotoperíodo de 12 horas. No entanto, isso não indica um resultado negativo para o fotoperíodo de 12 horas, mas sugere que, sob essas condições, as plantas requerem um período de cultivo mais prolongado para alcançar um desenvolvimento comparável.

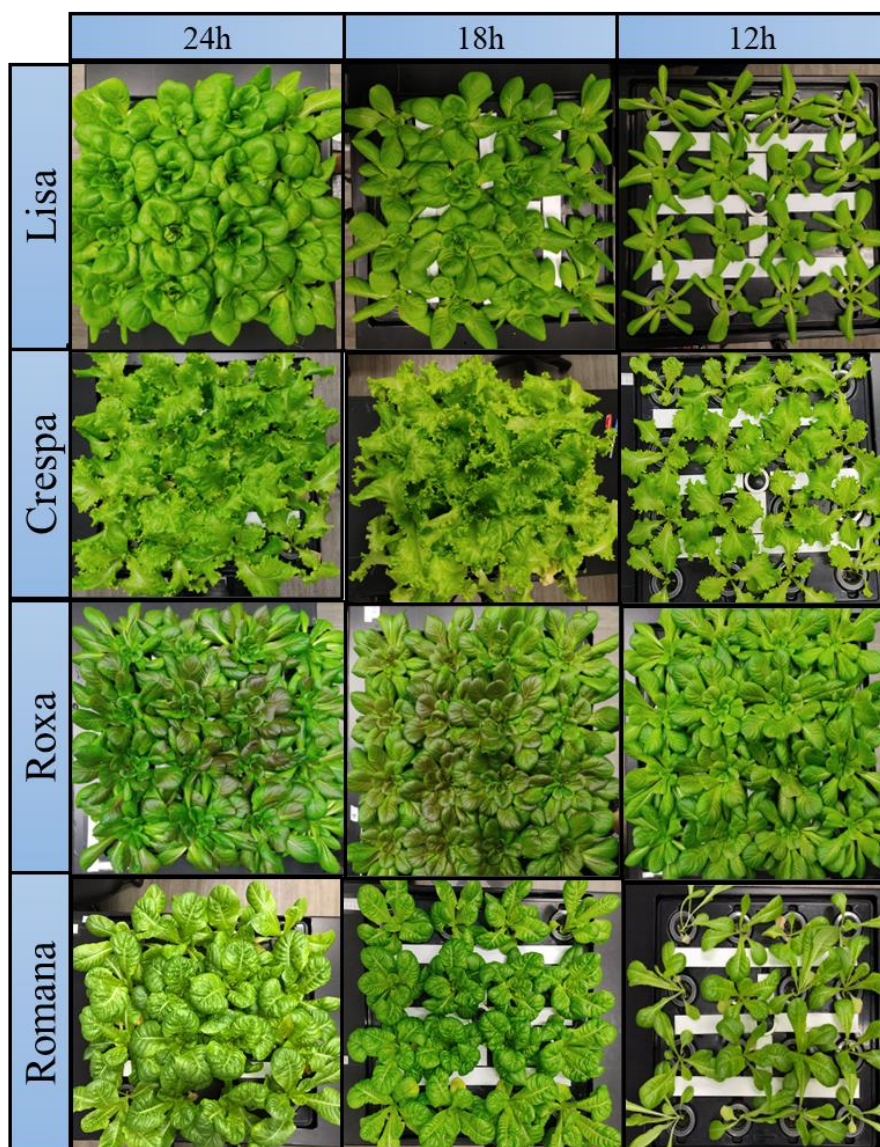


Figura 15. Aspecto visual das quatro variedades de alface (Lisa, Crispa, Roxa, Romana) sob três diferentes fotoperíodos (24, 18 e 12 horas). Elaborado pela autora

Imediatamente após a colheita, a alface foi avaliada quanto a parâmetros morfológicos da planta e conteúdo de macro e microelementos e metabólitos com propriedades promotoras de saúde. A análise dos dados revelou que a massa e a área (Figuras 16A e 16.B) tendem a diminuir à medida que o fotoperíodo diminui, conforme mostrado nas fotos na Figura 16. Uma diferença significativa foi observada entre os grupos submetidos a fotoperíodos de 24 h (19 ± 5) e 12 h (13 ± 5), com o primeiro mostrando um ganho de massa mais significativo.

A Figura 16 mostra a comparação massa fresca, raízes e área foliar das quatro variedades de alface (Lisa, Crispa, Roxa, Romana) sob três diferentes fotoperíodos (24, 18 e 12 h). As

alfaces vermelhas apresentaram resultados semelhantes em todas as amostras. Nos casos das variedades Crespa, Romana e Lisa, todos os grupos mostraram diferenças significativas, com o grupo de 24 h registrando o maior ganho de massa, seguido pelo grupo de 18 h e, finalmente, pelo grupo de 12 h. Em relação ao desenvolvimento das raízes, foi observada uma diferença significativa no crescimento das raízes entre os períodos de iluminação de 24 e 12 h para a variedade vermelha. Por outro lado, tanto para as variedades Crespa Romana quanto para a Lisa, todas as condições de iluminação resultaram em diferenças significativas no crescimento das raízes.

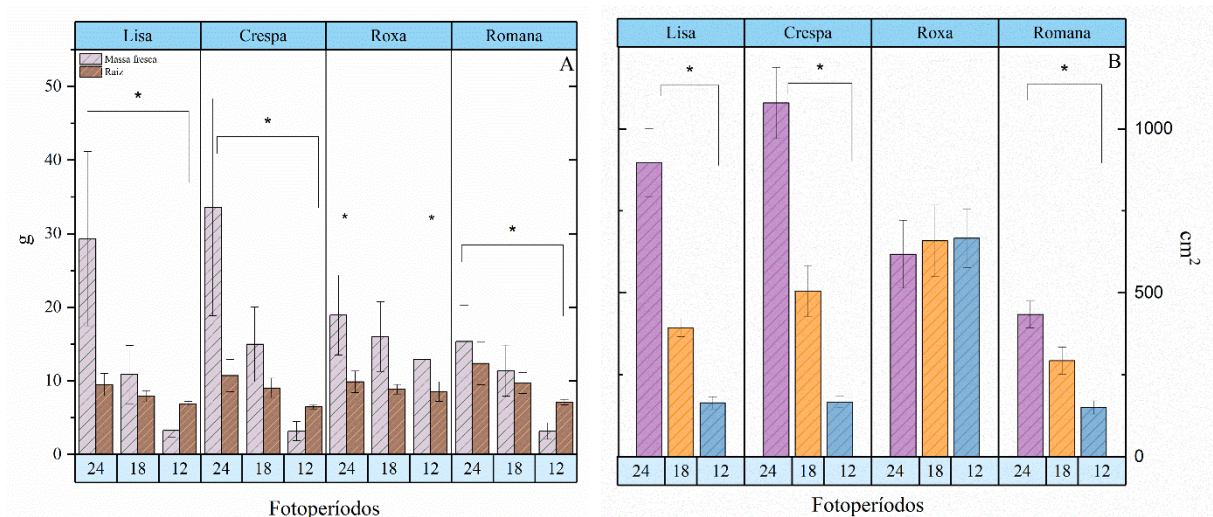


Figura 16. (A) Massa Fresca e Raízes em gramas para 30 dias. (B) Área alcançada em 30 dias para 4 espécies de alface com três fotoperíodos. Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. * Denota uma diferença significativa com todos os dados ($P \leq 0,05$, teste de Tukey). Elaborado pela autora

Os resultados das medidas de pigmentos de alface, influenciados pelos tratamentos de fotoperíodo, estão mostrados na Tabela 2, e as plantas apresentaram respostas de crescimento distintas aos diferentes tratamentos de fotoperíodo.

Tabela 2. Conteúdo dos pigmentos clorofila-A (*Chl-a*), clorofila-B (*Chl-b*) e Carotenoides (*Car*) em três fotoperíodos para quatro variedades de alface. Os dados são apresentados como média desvio padrão. ** significa diferença com os demais grupos. Elaborado pela autora

<i>Variedade</i>	<i>Fotoperíodo (h)</i>	<i>Chl-a mg.g⁻¹</i>	<i>Chl-b mg.g⁻¹</i>	<i>Car mg. g⁻¹</i>
<i>Lisa</i>	24	0.56 ± 0.08	0.320± 0.003	20 ± 1
	18	0.6 ± 0.1	0.3100± 0.5e ⁻⁴	19.2 ± 0.9
	12	0.61 ± 0.05	0.300 ± 0.003	19.8 ± 0.9
<i>Romana</i>	24	0.85 ± 0.09	0.33 ± 0.05	51 ± 8*
	18	0.61 ± 0.02**	0.23 ± 0.02	39 ± 10*
	12	0.9 ± 0.2	0.33 ± 0.04	45 ± 10
<i>Crespa</i>	24	0.40 ± 0,06**	0.12 ± 0.02	30 ± 4*
	18	0.49 ± 0,06	0.15 ± 0.01	35 ± 4
	12	0.54 ± 0,09	0.15 ± 0.02	39 ± 8*
<i>Roxa</i>	24	1.0 ± 0.3	0.33 ± 0.05	87 ± 9*
	18	0.90 ± 0.01	0.27 ± 0.02	76 ± 8*
	12	1.0 ± 0.1	0.33 ± 0.05	80 ± 9

A alface Romana apresentou uma diferença entre o grupo de 18 h e os outros grupos, sendo este o valor mais baixo, enquanto o conteúdo com o valor mais alto foi observado para os fotoperíodos de 12 e 24 h sucessivamente ($0,9 \pm 0,2$, $0,85 \pm 0,09$ mg. g⁻¹). Por outro lado, a alface Roxa, embora não mostre diferenças significativas entre os grupos, teve o conteúdo de pigmento mais alto em comparação com as variedades examinadas.

A variedade de alface Crespa, o grupo submetido ao fotoperíodo de 24 h, mostrou um valor reduzido ($0,40 \pm 0,06$), divergindo significativamente dos outros grupos. Em relação à análise da *Chl-b*, a alface Romana demonstrou uma diferença entre os grupos de 18 h, que indica o valor mais baixo. Um padrão semelhante com o grupo de alface Crespa de 24 h, enquanto a variedade Lisa mostrou resultados comparáveis nos grupos de 12 e 24 h. Em

particular, o grupo de alface Romana sob o fotoperíodo de 18 h mostrou diferenças de todos os outros grupos. No caso da variedade de alface Crespa, o grupo submetido ao fotoperíodo de 24 h manifestou um valor conspicuamente diminuído, divergindo significativamente dos outros grupos. Os conteúdos de Car foram semelhantes para os fotoperíodos de cada variedade. Portanto, a variedade Roxa apresentou altos teores de clorofilas *a* e *b*, para os Car para os três tratamentos, portanto, para 12 h (80 ± 9) e 24 h (87 ± 9), respectivamente.

A Figura 17 A e B, mostram os efeitos dos fotoperíodos (24, 18 e 12 h) para as variedades de alface (Lisa, Crespa, Roxa e Romana) em relação ao conteúdo de compostos fenólicos totais e à atividade de captura de radical DPPH, respectivamente. Os dados indicam que fotoperíodos mais curtos podem favorecer o acúmulo de compostos antioxidantes nas alfaces, embora varie entre as variedades. Os resultados sugerem que ajustar o fotoperíodo pode ser uma estratégia para manipular o perfil fitoquímico da alface no cultivo hidropônico, possivelmente aproveitando as diferenças na resposta das variedades para otimizar o conteúdo nutricional e as propriedades antioxidantes. Os resultados Figura A, mostraram que os valores mais baixos foram observados sob o fotoperíodo de 12 h, enquanto as variedades com o maior teor de compostos fenólicos foram identificadas como a variedade "Roxa" no fotoperíodo de 24 h ($7 \pm 3 \text{ mg.g}^{-1}$) e a variedade "Lisa" no fotoperíodo de 18 h ($7 \pm 2 \text{ mg.g}^{-1}$).

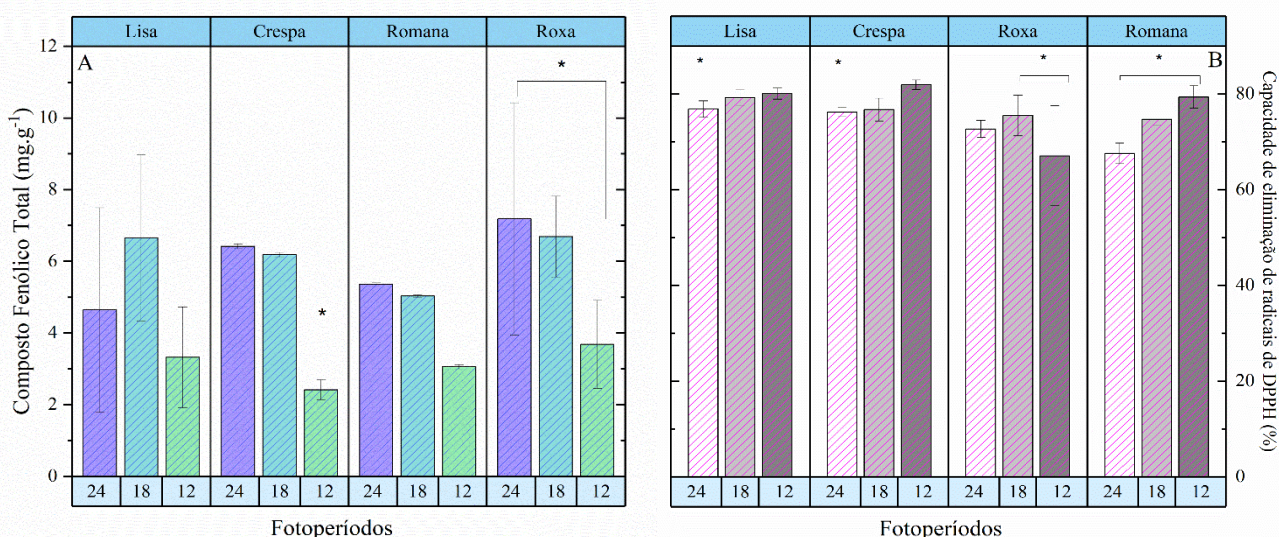


Figura 17. Efeito dos três tratamentos de fotoperíodo para quatro variedades de alface no (A) Conteúdo de compostos fenólicos totais (mg.g^{-1}). (B) Capacidade antioxidante em porcentagem (%). Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Elaborado pela autora

Os resultados da Figura 17 B, relacionados à capacidade antioxidante foram notavelmente superiores em todas as variedades de alface e configurações de fotoperíodo, conforme evidenciado nesta análise, ao contrário dos resultados obtidos nos testes de TPC (conteúdo fenólico total). Observou-se que, para a maioria das variedades, o fotoperíodo de 12 h (82 ± 1 para a variedade Crespa) demonstrou uma capacidade antioxidante significativamente maior. No entanto, vale ressaltar que, no caso da alface Romana, foi observada uma diferença estatisticamente significativa em relação a todos os outros grupos de fotoperíodo. Em resumo, os resultados sugerem uma tendência consistente de desempenho antioxidante semelhante entre diferentes fotoperíodos, exceto para a alface Romana.

A composição de macro e micro minerais foram determinadas para as diferentes espécies de alface, cultivadas sob condições de baixa intensidade de luz e fotoperíodos variados. Os resultados obtidos foram consistentes entre os três fotoperíodos testados, no entanto, para cada variedade de alface e fotoperíodo, foi identificada uma variação em termos de teor mineral ótimo. A Figura 18 ilustra o conteúdo de diferentes minerais para as quatro variedades de alface (Lisa, Crespa, Roxa e Romana) cultivadas sob três fotoperíodos diferentes: 12, 18 e 24 h. Os minerais determinados são Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn). Observou-se que minerais como Fe e Mn mostraram melhorias significativas quando submetidos a um fotoperíodo de 18 h (Figura 18A). Este achado sugere uma influência positiva do prolongamento do fotoperíodo na acumulação desses elementos minerais nas folhas de alface Lisa

Para o mineral N, observa-se que a variedade "Crespa" Figura 18B, apresenta o maior valor em um fotoperíodo (PP) de 12 h, alcançando um valor de $55,12 \pm 0,02 \text{ g.kg}^{-1}$, enquanto essa mesma variedade tem um PP de 24 h, exibindo um valor registrado mais baixo, de $37 \pm 4 \text{ g.kg}^{-1}$. Em contraste, a variedade de "Roxa" Figura 18C, submetida a um PP de 12 h apresenta um valor intermediário de $38 \pm 8 \text{ g.kg}^{-1}$. As outras cultivares de alface demonstram níveis de nitrogênio semelhantes, em torno de $\sim 40 \text{ g.kg}^{-1}$. Na análise dos níveis de P, um padrão consistente foi observado nos dados. As concentrações de P observadas variaram de um valor mínimo de $6,04 \pm 0,07 \text{ g.kg}^{-1}$ (registrado para ambas as variedades de alface Lisa e Roxa, cada uma submetida a um fotoperíodo de 12 h) a valores máximos de $9,0 \pm 0,6 \text{ g.kg}^{-1}$, observados no grupo de alface Crespa exposto a um fotoperíodo de 18 h.

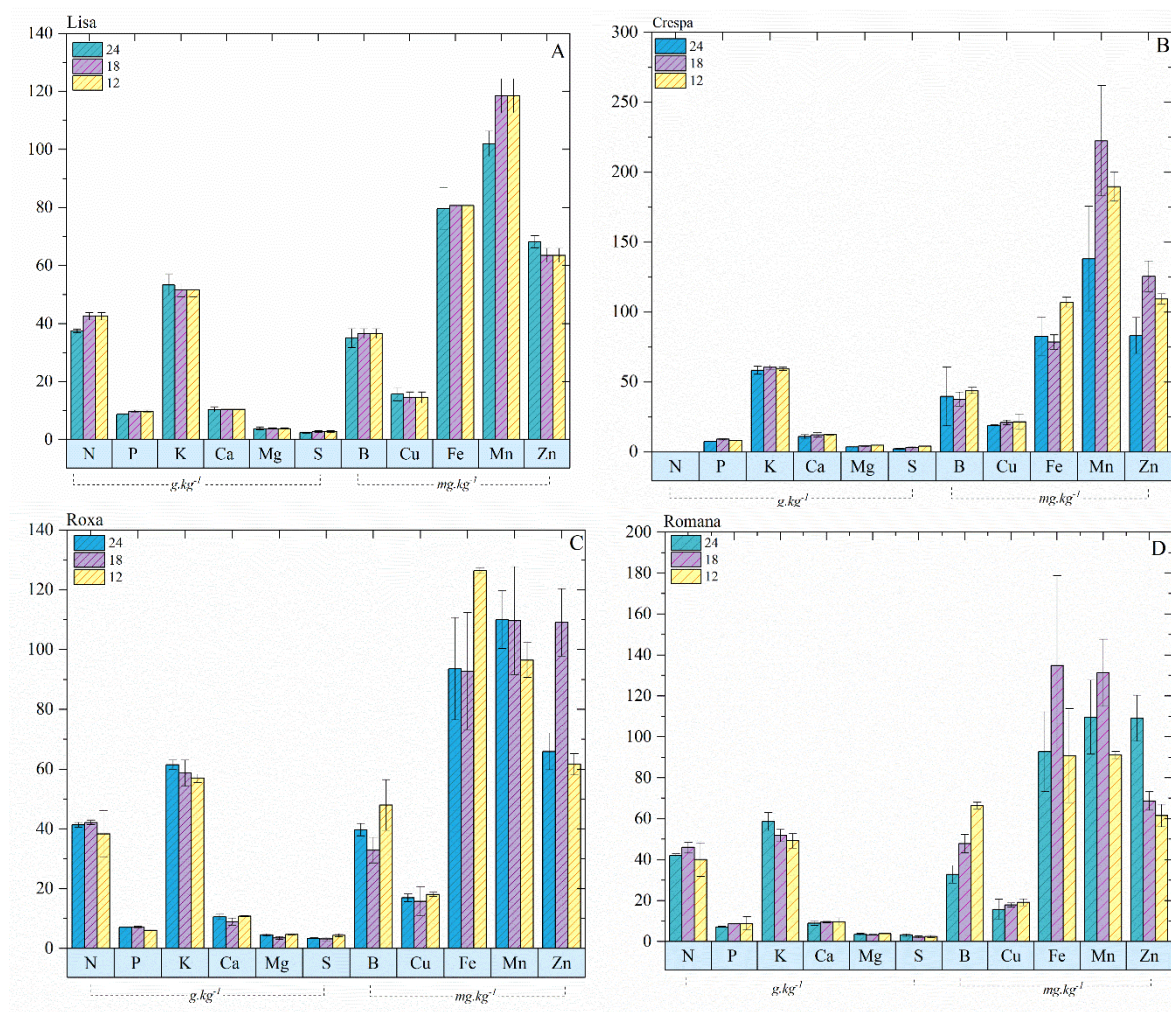


Figura 18. Macrominerais: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S) e microminerais: Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn) de quatro variedades de alfaca sob três fotoperíodos. A) Alfaca Lisa, B) Alfaca Crespa, C) Alfaca Roxa e D) Alfaca Romana. Elaborado pela autora.

Para o elemento K, foram identificados níveis ótimos na variedade Roxa (Figura 18B) sob um PP de 24 h, alcançando um conteúdo de $62 \pm 2 \text{ g.kg}^{-1}$, enquanto a mesma variedade sob um fotoperíodo de 18 h manteve um nível considerável de $59 \pm 4 \text{ g.kg}^{-1}$. Em contraste, os outros grupos apresentaram valores entre 49 e 53, com os registros mais baixos observados no grupo de variedades Romana (Figura 18D), sob um fotoperíodo de 12 h ($49 \pm 4 \text{ g.kg}^{-1}$) e Lisa (Figura 18A), no fotoperíodo de 18 h ($52 \pm 2 \text{ g.kg}^{-1}$).

Para o elemento Mg, foi identificado que o grupo com melhor desempenho foi aquele submetido a um fotoperíodo de 12 h, resultando em $4,7 \pm 0,1 \text{ g.kg}^{-1}$ para a variedade Roxa 12 h (Figura 18B) e para crespa (Figura 18C) 24h de $4,35 \pm 0,09 \text{ g.kg}^{-1}$, respectivamente.

Por outro lado, os diferentes grupos mantêm valores relativamente estáveis, variando entre 3,5 e 3,9 g.kg⁻¹.

Para o grupo de Ca, observou-se que a variedade Lisa (Figura 18A), sob um fotoperíodo de 12 horas apresentou o maior conteúdo, atingindo $14,5 \pm 5,5$ g.kg⁻¹, seguida pela variedade Crespa (Figura 18B) com um fotoperíodo de 18 h, registrando 12 ± 2 g.kg⁻¹. Por outro lado, os outros grupos demonstraram valores semelhantes, variando entre ~ 9,6 e 10,4 g.kg⁻¹. Para o mineral S, observou-se que a variedade de alface Roxa (Figura 18B), quando submetida a um fotoperíodo de 12 h, apresentou o maior valor, alcançando $4,4 \pm 0,5$ mg.kg⁻¹. Em seguida, o grupo Crespa (Figura 18C), também sob um fotoperíodo de 12 h, registrou um valor ligeiramente menor, atingindo $3,95 \pm 0,009$ mg.kg⁻¹. Para o mineral B, a alface Romana (Figura 18D) submetida a um fotoperíodo de 12 h apresentou o valor mais alto, registrando 66 ± 2 mg.kg⁻¹, enquanto sob um fotoperíodo de 24 h, permaneceu próximo, com 53 ± 2 mg.kg⁻¹, respectivamente. Em seguida, com um fotoperíodo de 12 h, a variedade Roxa (Figura 18B) apresentou um valor de 48 ± 8 mg.kg⁻¹. No entanto, o valor mais baixo foi observado na variedade Roxa, com um fotoperíodo de 18 h, alcançando 33 ± 4 mg.kg⁻¹.

O mineral Cu, o valor mais baixo foi encontrado na alface Romana (Figura 18D), submetida a um fotoperíodo de 18 h ($9,5 \pm 0,3$ mg.kg⁻¹), enquanto o valor mais alto foi identificado nas variedades crespa sob fotoperíodo de 12 e 18 h (21 ± 5 ; 21 ± 2 mg.kg⁻¹), respectivamente. As outras variedades demonstraram valores muito semelhantes. Quanto ao Mn, uma diferença significativa foi observada em variedades submetidas a um fotoperíodo de 18 h. Por outro lado, os valores mais baixos foram encontrados nas variedades de fotoperíodo de 24 h para Lisa (Figura 18A) e Romana (Figura 18D) (88 ± 2 ; 88 ± 2 mg.kg⁻¹), respectivamente. A variedade Crespa

(Figura 18 B) submetida a um fotoperíodo de 18 h registrou o valor mais alto (222 ± 39 mg.kg⁻¹), enquanto as outras variedades demonstraram valores bastante semelhantes quando comparados. Finalmente, o mineral Zn apresentou o maior teor para a variedade Crespa (Figura 18B) no fotoperíodo de 18h (125 ± 11 mg.kg⁻¹) e o valor mais baixo para Roxa (Figura 18C) e Romana (Figura 18D) 12h (61 ± 5 mg.kg⁻¹), respectivamente.

Os resultados obtidos indicam que ajustes no fotoperíodo podem ser uma estratégia valiosa para manipular o perfil mineral e estimular a produção nas culturas de alface hidropônica, o que poderia ter implicações significativas para a nutrição humana e o manejo de cultivos comerciais.

Discussões

A maturação vegetativa da alface, desde a germinação das plântulas até a fase adulta para a colheita em ambientes internos controlados, está sujeita a variabilidade dependente de uma série de fatores e parâmetros ambientais de cultivo como temperatura, umidade, luz e disponibilidade de nutrientes. Além disso depende da metodologia agrícola escolhida sendo hidropônica, ou em solo, entre outras. Predominantemente, todo o ciclo de crescimento da alface em condições ótimas oscila entre quatro e seis semanas, especialmente ao considerar sistemas hidropônicos em câmaras internas (Alrajhi et al. 2023; Nguyen et al. 2021). Por outro lado, em ambientes exógenos, a germinação e o desenvolvimento vegetativo incipiente até a emergência das folhas primárias são esperados ocorrer em aproximadamente cinco a seis semanas. (Andriolo, Espindola, and Stefanello 2003).

Os ensaios realizados para o perfil fitoquímico das variantes de alface testadas, como Lisa, Crespa, Roxa e Romana, tinham como objetivo discernir seu desempenho máximo em relação à técnica de cultivo sob as condições experimentais avaliadas. Os pigmentos estão intrinsecamente ligados à eficiência fotossintética das plantas, influenciando seu crescimento e capacidade de se adaptar a uma infinidade de condições ambientais. Isso se deve em parte às concentrações de clorofilas e os Car.

As concentrações de pigmentos, e as razões entre esses pigmentos e especificamente entre *Chl-a* e *Chl-b*, flutuam de acordo com a intensidade da luz. A quantificação da clorofila nas folhas é da habilidade fotossintética de uma planta, devido ao seu papel direto na absorção e translocação de energia luminosa (Croce and Van Amerongen 2014). Os níveis elevados de clorofila geralmente podem se correlacionam com taxas aumentadas de fotossíntese, atribuídas à capacidade ampliada de captura de quantidade de fótons ao longo de uma determinada duração. No entanto, é crucial reconhecer que essa relação não é universalmente constante, uma vez que a fase bioquímica da fotossíntese, comumente referida como a "fase escura", poderia impor fatores limitantes sobre o processo como um todo (Porra, Thompson, and Kriedemann 1989).

Apesar da falta de disparidade significativa de maneira geral, uma concentração pronunciada de clorofila foi observada sob regimes de fotoperíodo reduzido. É provável as concentrações de pigmento podem ser amplificadas quando a folhagem está em uma fase de crescimento rápido. Portanto, alfaces expostas a fotoperíodos de 12 h demonstraram níveis de pigmento elevados. Esse fenômeno poderia potencialmente ser atribuído às

peculiaridades metabólicas e ao estágio de desenvolvimento inicial da alface, que estava passando por crescimento no momento da coleta (Simkin et al. 2022; Bielczynski et al. 2017).

O teor de clorofila na alface Crespa, sob fotoperíodos de 18 h, está em conformidade com os níveis relatados em condições controladas. Outro estudo, utilizando técnicas de hidroponia em várias variedades de alface, incluindo as variantes Lisa e Roxa, determinou concentrações de clorofila que variavam de 0,1 a 0,3 mg.g⁻¹, respectivamente. Isso foi observado dentro de um cronograma de cultivo que iniciava com uma fase de crescimento de mudas de 28 dias, seguida pela transplantação e culminava no crescimento até a maturidade ao longo de um período de 30 dias, tudo dentro de sistemas de hidroponia (Mampholo et al. 2016).

Estudos que utilizaram luz de alta intensidade e fotoperíodos de 16 h e avaliar os teores de *Chl-a*, *Chl-b* e pigmentos totais para cultivares de alface Romana. Os resultados demonstram níveis mais baixos do que os apresentados nessa presente pesquisa, com valores para *Chl-a* (0,2-0,3 mg.g⁻¹) e *Car* (51 ± 8 mg.g⁻¹), respectivamente (Grzegorzewska et al. 2023).

O teor de pigmento detectado na alface Lisa nesta pesquisa apresentou uma concentração significativamente elevada (20 mg.g⁻¹) em contraste com os resultados de condições experimentais paralelas, onde os níveis de *Car* foram aproximadamente de 1,8 mg.g⁻¹. Além disso, os valores obtidos nesta investigação superaram aqueles documentados em estudos anteriores (Lin et al. 2013).

Os *Car* são imprescindíveis para proteger as plantas do estresse oxidativo, atuando como antioxidantes e neutralizando os radicais livres gerados durante a fotossíntese ou em resposta a estímulos ambientais desfavoráveis. Esses compostos são indispensáveis para o desenvolvimento adequado de estruturas fotossintéticas, como os cloroplastos, e desempenham um papel fundamental na absorção de luz durante a fotossíntese, que é vital para a produção de energia nas plantas (Bonet et al. 2016; Swapnil et al. 2021). Os resultados encontrados para este pigmento são similares ao relatados na literatura (Givens et al. 2023; Lin et al. 2013; Baslam et al. 2013b). Isso demonstra que em apenas 30 dias de crescimento, é possível alcançar os níveis esperados de *Car* (Teng et al. 2019).

A avaliação de DPPH demonstra a capacidade antioxidante da alface de neutralizar radicais livres. Isso é significativo porque os antioxidantes presentes na alface podem desempenhar um papel crucial na proteção das células contra o estresse oxidativo e na

prevenção de danos às células e tecidos. Um estudo realizou várias caracterizações da alface, analisando sua capacidade antioxidante usando DPPH, que mostrou valores de 80%, corroborando com os resultados obtidos. (X. Liu et al. 2007b). Os autores relataram que utilizaram alfaces Lisa e Roxa, e seus resultados apresentaram semelhantes em relação aos compostos fenólicos, e valores mais baixos de DPPH foram encontrados em comparação com esta pesquisa. (Mampholo et al. 2016).

Quanto aos minerais, as diferentes e específicas formas de absorção, transporte e acumulação de micronutrientes são essenciais para garantir a saúde e produtividade ótimas das culturas hortícolas. Uma das análises importantes conduzidas neste estudo é o teor mineral, pois eles revelam os caminhos das atividades bioquímicas da planta refletidas em suas funções fisiológicas. Certos minerais, como N, Zn e Fe, desempenham um papel crucial nos processos fotossintéticos, pois estão envolvidos na síntese de clorofila, e a menor absorção desses elementos pode causar danos às plantas (N. Ahmed et al. 2024; Gupta, Srivastava, and Singh 2024).

Neste contexto, os valores de N registrados no presente estudo variaram aproximadamente entre 40-50 mg.kg⁻¹. Outros autores examinaram o teor de N obtiveram concentrações comparáveis ou inferiores (Pennisi et al. 2019). Já o K desempenha papéis vitais na fisiologia das plantas, incluindo processos como fotossíntese e respiração, síntese de proteínas, transporte de nutrientes e, por fim, serve como um elemento indispensável para o crescimento ótimo das plantas (Johnson et al. 2022; Inthichack, Nishimura, and Fukumoto 2012). É de interesse alcançar uma boa absorção deste macro mineral dentro das condições de planta dadas, especialmente quando se considera um período de apenas 30 dias desde a semente até a colheita, e avaliar se os conteúdos obtidos se alinham com os valores da literatura. Barickman 2016 e colaboradores realizaram a avaliação da alface Romana em um ambiente de estufa, com um período de crescimento de 83 dias, relataram valores de K variando de 30 a 55,68 mg.g⁻¹, suportando nossos resultados (Barickman et al. 2016).

O mineral Mg é um componente central da molécula de clorofila, o pigmento verde responsável pela fotossíntese nas plantas. Sem a quantidade de Mg adequada, a síntese de clorofila é prejudicada, afetando a capacidade da planta de realizar a fotossíntese de forma eficiente. Além de seu papel na clorofila, o Mg está envolvido em muitos processos metabólicos dentro da planta, incluindo a ativação de enzimas e a produção de ATP (adenosina trifosfato), a principal molécula de energia celular (M. Ishfaq et al. 2022). Song e colaboradores utilizaram condições experimentais semelhantes por Song e as investigações

realizadas. Os autores encontram teores de Mg 4-6 g.kg⁻¹ em alfaces crespas, que corrobora com este trabalho. (Song et al. 2020b).

O elemento Ca desempenha um papel crucial tanto no processo de divisão celular quanto na formação das paredes celulares, contribuindo significativamente para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Roosta, Samadi, and Bikdeloo 2023). O cultivo de alface crespa em condições orgânicas apresentou um teor de cálcio (Ca) compatível com o observado nas alfaces analisadas neste estudo, com uma concentração superior a 3 g, conforme registrado em nossas amostras. Além disso, o teor de DPPH conforme relatado no mesmo estudo, se aproxima de 65%, enquanto nossos resultados indicam uma faixa entre 70% e 80%, validando assim a eficácia de nosso protocolo experimental em alcançar níveis congruentes com a literatura existente em um prazo condensado (Roosta, Samadi, and Bikdeloo 2023). Essa congruência se estende ao conteúdo fenólico total (TPC), pois os resultados refletiram os observados em empreendimentos de pesquisa anteriores, significando uma quantificação consistente e confiável de compostos fenólicos. (de Lima et al. 2024).

Além disso, a interação entre Fe e Zn vai além da absorção nas plantas, estendendo-se aos processos fisiológicos e metabólicos. Ambos os elementos desempenham papéis cruciais na síntese de clorofila, respiração e metabolismo energético.

Normalmente, a concentração de Zn na alface varia de 30 a 46 mg.g⁻¹ de peso seco. No entanto, neste estudo, foram obtidos valores variando de 60 a 125 mg.g⁻¹. Moraes e colaboradores, relataram de valores de 40-200 mg.g⁻¹ para Zn, o que corrobora válida com os nossos resultados. (de Moraes et al. 2022)

4.4 Conclusão parcial

O estudo explorou o crescimento de quatro variedades de alface (Crespa, Lisa, Roxa e Romana) em ambientes internos sob três fotoperíodos diferentes (12, 18 e 24, h). no crescimento dessas variedades. Além disso, um protocolo de fertilização cuidadosamente projetado foi implementado para aumentar as concentrações de nutrientes semanalmente, começando desde a germinação até a quarta semana de crescimento. Os resultados indicam que sob fotoperíodos de 18 e 24 h, todas as variedades alcançaram a fase adulta dentro do período especificado. No entanto, sob o fotoperíodo de 12 h, as plantas de alface não

atingiram tamanhos comparáveis, sugerindo que podem necessitar de períodos de crescimento prolongados dentro da câmara. Notavelmente, os resultados demonstram que em apenas quatro semanas, é possível cultivar alface mantendo níveis nutricionais e fisiológicos comparáveis aos observados no cultivo indoor tradicional ao longo de um período de 50 dias.

5 CAPÍTULO V: O impacto da diversidade de luz nas respostas adaptativas das plantas

5.1 Contextualização

No contexto do cultivo hidropônico e em estufas, o manejo adequado da luz emerge como um fator essencial para maximizar o crescimento e a qualidade das plantas, especialmente em culturas sensíveis como a alface. Este estudo tem como objetivo explorar o impacto de diferentes regimes de luz fracionada sobre o desenvolvimento de alfaces, analisando como variações na duração e espectro luminoso influenciam as respostas adaptativas dessas plantas. A compreensão detalhada desses efeitos pode proporcionar insights valiosos para aprimorar práticas agrícolas, levando a uma produção mais eficiente e de maior qualidade.

Neste capítulo, é descrita a construção de uma nova câmara de cultivo indoor. Nos capítulos anteriores, a câmara utilizada para o crescimento das alfaces operava com três comprimentos de onda e a iluminação era fornecida por meio de fitas de LEDs, o que limitava a investigação dos efeitos espectrais de outras regiões do espectro luminoso. Para viabilizar a investigação proposta, que busca explorar diferentes comprimentos de onda e suas respectivas durações nas respostas fisiológicas das plantas (alface), foi necessária a construção de uma nova câmara de cultivo. Esta nova estrutura incorpora comprimentos de onda adicionais (Violeta, Verde e Branco quentes) e um sistema eletrônico avançado, permitindo o controle individual ou combinado dos comprimentos de onda, assim como a programação da duração dos ciclos de luz. Além disso, o arranjo dos LEDs foi otimizado para garantir uma distribuição homogênea da luz dentro da câmara de cultivo.

5.2 Metodologia

As análises para a avaliação dos parâmetros fisiológicos das plantas neste capítulo foram detalhadas no Capítulo II, nas seções 2.2.2 a 2.2.7. Essas análises incluíram a medição da área foliar, massa fresca, quantificação de pigmentos como clorofilas e carotenoides, compostos fenólicos e capacidade antioxidante.

5.2.1 Configuração experimental

As condições experimentais foram planejadas, com base nos resultados das otimizações realizadas nos capítulos II, III e IV. Em nossos resultados concluiu-se que o fotoperíodo mais eficaz, de forma geral, envolvia uma duração prolongada. Assim, estabeleceu-se 18 h como o fotoperíodo a estudar essas novas distribuições e espectros de luz. Além disso, uma revisão da literatura revelou a proporção ótima entre luz vermelha e azul em termos percentuais (80% para luz vermelha e 20% para luz azul) (Chen et al. 2021). O sistema de descontaminação UV-C foi adaptado nessa câmara de cultivo na solução hidropônica. As sementes utilizadas foram alface lisa (Natalia) e as configurações experimentais da solução nutritiva foi descrita Capítulo IV. Onde a solução foi aumentada gradualmente uma vez na semana até atingir $2,0 \text{ mS.cm}^{-1}$ (seção 4.2.4). A etapa de colheita foi realizada em 30 dias incluído a fase de germinação.

Para realizar essas configurações, foi necessário desenvolver um novo equipamento capaz de manipular cada comprimento de onda individualmente como se mostra na Figura 19 A, conforme ilustrado na Figura 19.B. As placas de LEDs que foram construídas e padronizadas para uma distribuição espacial da luz fosse mais uniforme, com uma intensidade de aproximadamente de $600 \text{ umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

Na Figura 19.C apresenta os espectros de luz emitidos pelos LEDs. Os espectros são representados por diferentes picos de comprimento de onda, 400, 470, 530 e 660 nm, respectivamente. Esses representam uma faixa específica de comprimentos de onda que a planta absorve e são utilizados para estimular o crescimento das plantas dentro da câmara controlada.

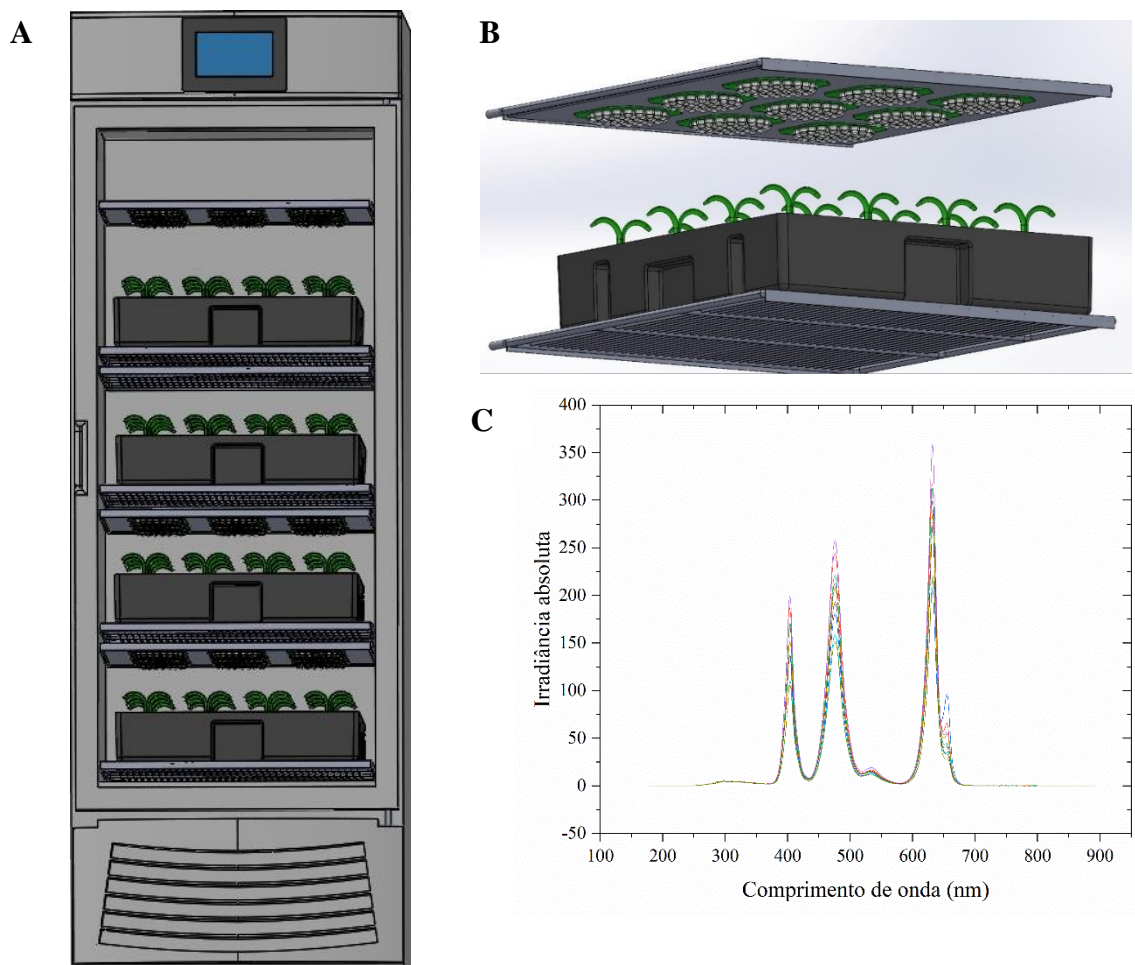


Figura 19. A) Estrutura general da câmara B) Estruturadas placas de LEDs para crescimento de plantas. B) espectros de luz de irradiância absoluta dos LED. Elaborada pela autora.

Os espectros de emissão dos diferentes comprimentos de onda dos LEDs foram combinados em fotoperíodos para realizar a bioestimulação da germinação, crescimento e desenvolvimento das plantas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Condições experimentais de iluminação para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Elaborada pela autora.

Condição	Luz Vermelha (h)	Luz Azul (h)	Luz Verde (h)	Luz Violeta (h)	Luz Brancas (h)	Escuro (h)	Ciclos Repetidos Continuamente	Combinação (λ nm)
1A	15	3	3	3	3	6	Não	
1B	5	1	1	1	1	2	Sim	
2A	15	3	15	15	15	6	Não	Luz verde, violeta, branco combinado
2B	5	1	5	5	5	2	Sim	Luz verde, violeta, branco combinado
3A	15	3	6	6	6	0	Não	Luz verde, violeta, branco combinado
3B	5	1	2	2	2	0	Sim	Luz verde, violeta, branco combinado

5.3 Resultados e discussões

Este capítulo explora o impacto de diferentes regimes de luz fracionada no crescimento da alface. Na agricultura de precisão, a horticultura é uma área fundamental que requer pesquisas inovadoras e significativas para seu desenvolvimento. A suplementação de luz em hortaliças e leguminosas pode não apenas acelerar a produção, mas também ajudar a atender à crescente demanda por alimentos de maneira mais eficiente. Por tanto estudos têm demonstrado que a luz, é o principal motor da fotossíntese, desempenha um papel crucial no desenvolvimento vegetativo das plantas. A manipulação do espectro de luz pode alterar taxas de fotossíntese, crescimento, e desenvolvimento morfológico, oferecendo caminhos para otimizar a produção agrícola em ambientes controlados.

Nesta etapa retomamos o estudo das condições descritas na Tabela 3. A maior área foi identificada na condição 3B mostrada na Figura 20.A, alcançando valores de $1103 \pm 1 \text{ cm}^2$. Em seguida, o grupo 2B apresentou uma área de $854 \pm 74 \text{ cm}^2$. Observou-se diferenças

significativas entre os grupos 1A e 1B, onde o grupo 1A exibiu uma área maior ($705 \pm 44 \text{ cm}^2$) em comparação com o grupo 1B, que manteve a mesma proporção, porém fracionada ($499 \pm 98 \text{ cm}^2$)

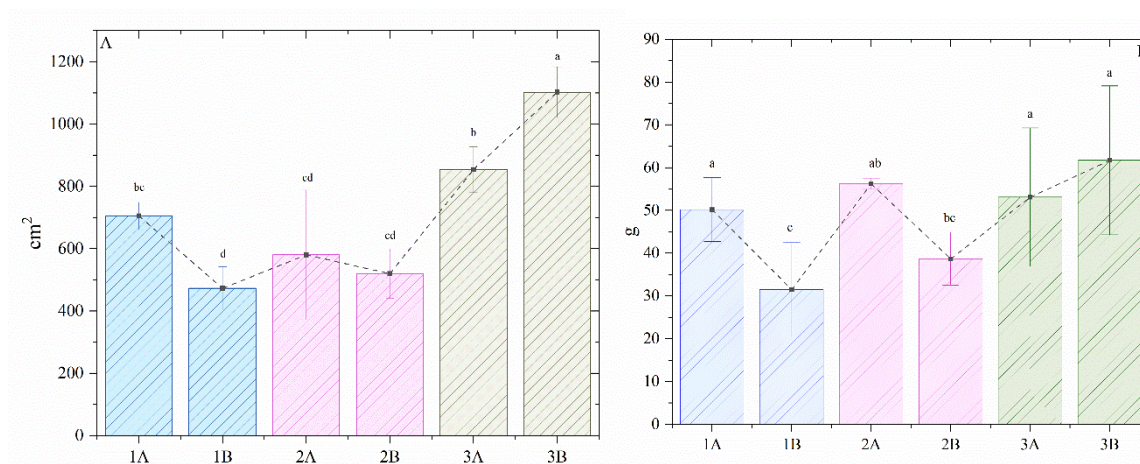


Figura 20. (A) Área em cm^2 para diferentes intervalos de luz (1A-3B) em alface lisa. (B) Massa fresca em gramas para alface lisa para diferentes intervalos de luz (1A-3B). Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Letras não compartilhadas são estatisticamente diferentes. Elaborado pela autora.

A massa também seguiu a mesma tendência da área, conforme ilustrado pelas linhas conectoras na Figura 20.B, sendo o melhor grupo 3B com ganho de massa de $62 \pm 17 \text{ g}$, porém não teve diferença significativa com os grupos 1A, 2A e 3A (50 ± 7 ; 52 ± 5 ; $53 \pm 16 \text{ g}$), respectivamente. A partir dos resultados apresentados, destaca-se que a condição 3B, que envolveu uma exposição maior, e mas mais diversificada de luz (5 h de luz vermelha, 1 h de luz azul, e 2h de verde, roxa e branca, respectivamente), resultou na maior área foliar e massa fresca planta. Isto sugere que regimes de luz mais diversificados, mesmo que mais curtos, podem ser mais eficazes na promoção do crescimento foliar em alfaces, em comparação com ciclos mais longos ou com predominância de um único tipo de luz.

Na Figura 21 A, presente a relação das *Chl-a* houve um maior conteúdo para o grupo 1B $0,9 \pm 0,1 \text{ mg.g}^{-1}$ e 2A de $0,67 \pm 0,09 \text{ mg.g}^{-1}$, respectivamente. O grupo 2A, mostrou que obteve maior conteúdo de *Chl-b* ($0,4 \pm 0,1 \text{ mg.g}^{-1}$).

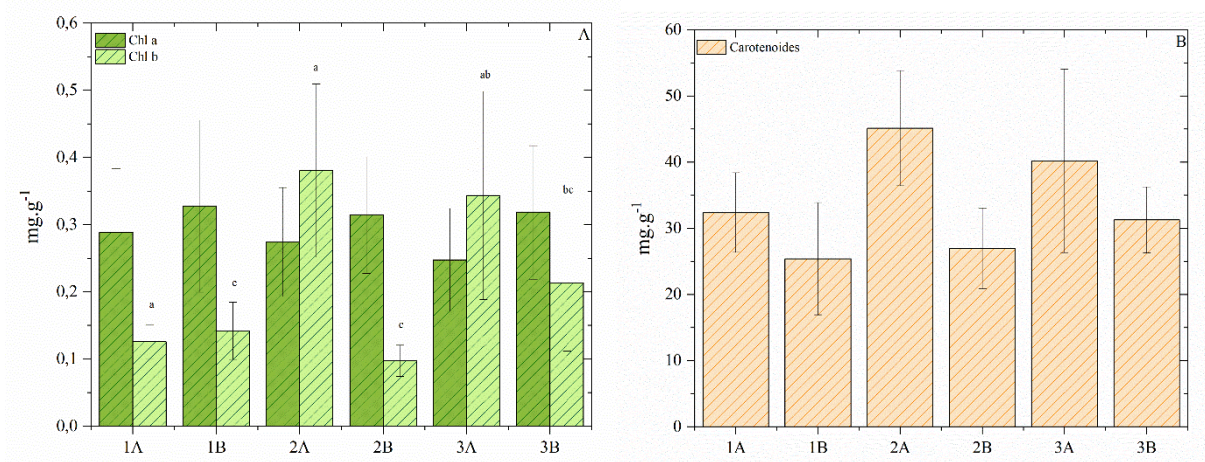


Figura 21. (A) Conteúdo de clorofila-A (Chl-a) e clorofila-B (Chl-b) para alface Lisa. (B) Conteúdo de carotenoides para alface Lisa. Os resultados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Letras não compartilhadas são estatisticamente diferentes. Elaborado pela autora

Os teores de pigmentos em relação aos *Car*, são apresentados na Figura 21B, o grupo 2A apresentou o maior valor, mostrando diferenças significativas $45 \pm 9 \text{ mg.g}^{-1}$ com todos os grupos. As comparações com cada grupo A e B com o grupo contínuo (A) teve maior conteúdo de *Car* que o grupo B fracionado, sendo assim o menor valor para 1B e 2B, respectivamente.

A capacidade antioxidante foi avaliada, revelando diferenças significativas entre os grupos estudados. O grupo 1B apresentou o menor valor, com uma média de $56 \pm 3\%$. Por outro lado, os grupos 2B e 3C demonstraram os maiores valores de capacidade antioxidante, com médias de $90,2 \pm 0,9\%$ e $89,1 \pm 0,7\%$, respectivamente. Foi observado que a estimulação do conteúdo de compostos fenólicos foi mais proeminente nos grupos 1A, 1B e 2A, enquanto uma diferença significativa foi notada no grupo 2B, que apresentou o menor conteúdo com uma média de $1,13 \pm 0,04 \text{ mg.g}^{-1}$ (Figura 22.A). Por outro lado, o grupo 2A demonstrou o conteúdo mais elevado de compostos fenólicos (Figura 22.B), atingindo valores médios de $10 \pm 2 \text{ mg.g}^{-1}$. O grupo 2A embora não teve a maior área como se mostra na Figura 22.A, é o grupo que teve o maior conteúdo de compostos fenólicos, *Chl-b* e *Car*, isto se deve pela maior exposição de luz tanto vermelho como as demais cores, não obstante a condição 3B teve o maior acúmulo e área e biomassa, e os conteúdos de pigmentos e DPPH foram estatisticamente diferentes, porém não muito diferentes. Uma hipótese de que isto seja é a maior estimulação do ciclo. (Fraszczak and Kula-Maximenko 2021).

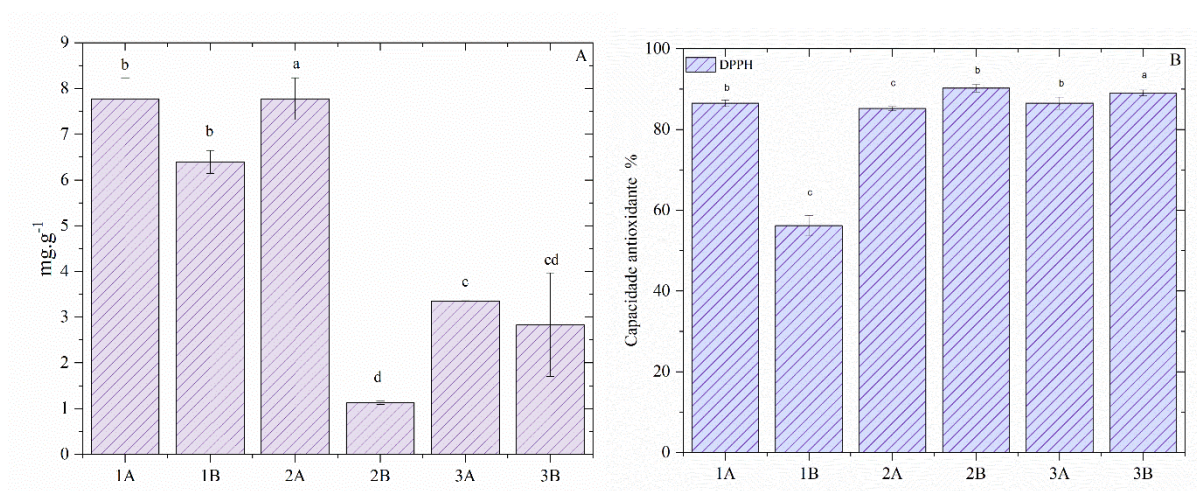


Figura 22. A) Conteúdo de compostos fenólicos totais em mg.g^{-1} B) Capacidade antioxidante pela eliminação de radicais de DPPH em (%) para diferentes parâmetros de luz (1A-3B). Os dados são apresentados pela média \pm desvio padrão. Letras não compartilhadas são estatisticamente diferentes. Elaborado pela autora.

Discussões

Ao longo dos anos, houve uma extensa pesquisa sobre o uso de luz vermelha e azul e suas proporções (Lin et al. 2013), mas os efeitos específicos do uso dessas cores durante o mesmo ciclo de luz, porém de forma individualizada com todos os comprimentos de onda requeridos, não foram completamente explorados. Este capítulo teve como objetivo analisar os efeitos de diferentes comprimentos de onda (400, 450, 500-550, 660 nm) na entrega contínuo e fracionada. O crescimento das plantas foi influenciado pelo espectro e distribuição dos comprimentos de onda na entrega de luz.

Os resultados indicam que a influência do tempo de exposição a diferentes comprimentos de onda de luz, como vermelha, verde, roxa e branca, resultou em uma maior estimulação da *Chl-a* em determinados grupos. Por exemplo, o grupo 1B, exposto a 5 horas de luz vermelha, 1 h de luz azul, verde, roxa e branca, e 2 h de escuridão, apresentou um conteúdo de *Chl-a* de $0,9 \pm 0,1 \text{ mg.g}^{-1}$. Embora não tenha apresentado diferença significativa em relação aos grupos 1A e 2A, que tiveram um conteúdo de *Chl-a* de $0,67 \pm 0,09 \text{ mg.g}^{-1}$, esse maior estímulo no grupo 1B sugere uma influência positiva da luz vermelha na ativação das clorofilas, conforme descrito na literatura (Chang and Chang 2014).

A análise dos resultados revelou que a condição de luz 3B, que combinou múltiplos espectros, promoveu o maior crescimento foliar e ganho de massa. Este achado está alinhado com estudos recentes que sugerem que espectros de luz diversificados podem ativar mais

eficientemente os fotorreceptores das plantas, resultando em um aumento da taxa de fotossíntese e crescimento vegetativo. A literatura indica que a luz vermelha é essencial para a ativação da fotossíntese, enquanto a luz azul é fundamental para regular o fototropismo (Lazzarini; et al. 2017).

A inclusão de luz verde e violeta pode ter contribuído para uma resposta mais equilibrada de fotomorfogênese, como observado nos conteúdos aumentados de clorofila e Car. Estes resultados destacam a importância de um espectro de luz equilibrado para maximizar a eficiência fotossintética e o crescimento das plantas. Comparando com estudos anteriores, nossos resultados corroboram as descobertas de (Chang and Chang 2014) e (Toscano et al. 2021) que demonstraram que regimes de luz que mimetizam o espectro completo, são mais eficazes na promoção do crescimento vegetal do que aqueles que usam apenas um ou dois comprimentos de onda.

Simkin e colaboradores reforçam a ideia de que a exposição a múltiplos comprimentos de onda durante o ciclo de crescimento pode estimular uma gama mais ampla de respostas adaptativas nas plantas (Simkin, López-Calcano, and Raines 2019). Os achados desse trabalho sugere que a modulação do espectro de luz pode ser uma ferramenta valiosa na agricultura de precisão, permitindo o ajuste fino das condições de cultivo para maximizar a produção vegetal e a qualidade nutricional dos alimentos.

As implicações para a prática agrícola são significativas, indicando que os agricultores podem otimizar as condições de luz para melhorar não apenas a produtividade, mas também as características nutricionais das culturas. Por outro lado, é importante ressaltar que as plantas não podem se desenvolver de forma ideal apenas com luz vermelha monocromática. Elas necessitam também de luz azul e vermelha distante para regular outros tipos de respostas além da fotossíntese e produção de biomassa. Isso se deve ao papel crucial de moléculas fotossintéticas acessórias, que são responsáveis pela morfologia saudável das plantas e pela capacidade de estimular proteções na planta (Han et al. 2017). Portanto, é essencial considerar a influência de uma variedade de comprimentos de onda na fisiologia das plantas.

A conexão entre os resultados obtidos e as respostas fisiológicas das plantas pode estar relacionada à absorção de luz azul pelos criptocromos e fototropinas, que também absorvem luz vermelha. Os criptocromos estão envolvidos na inibição do alongamento do caule e no desenvolvimento das folhas, enquanto as fototropinas regulam o fototropismo, ou seja, o crescimento direcional em resposta à luz. Assim, a ativação desses fotorreceptores por meio

da exposição à luz azul pode induzir respostas relacionadas à orientação e eficiência da captação de luz (Simkin et al. 2022). A exposição a 1 h de luz azul mostra-se suficiente para ativar esses fotorreceptores e induzir respostas relacionadas à orientação e eficiência da captação de luz.

Embora a luz verde seja menos estudada em comparação com a luz vermelha e azul, ela também afeta a fotomorfogênese. Alguns estudos sugerem que a luz verde pode modular os efeitos da luz vermelha e azul, potencialmente desencadeando reações adaptativas em ambientes com muita luz. A luz roxa (violeta) geralmente contém componentes da luz ultravioleta, que podem influenciar a morfologia e a defesa química das plantas. A luz branca, sendo uma mistura de todas as cores visíveis, proporciona um espectro completo que pode simular a luz natural do dia e é eficaz para a maioria dos processos fotomorfogenéticos (Son and Oh 2015).

Por fim, o período de escuro no regime de luz é crucial para processos dependentes do ciclo claro/escuro, como respiração e síntese de metabólitos, permitindo que as plantas sincronizem seus ritmos biológicos internos para o próximo ciclo de luz. (Son and Oh 2015). Este período permite que as plantas voltem seus relógios internos e preparem-se para o próximo ciclo de luz (Ouzounis, Rosenqvist, and Ottosen 2015). Além disso, é importante considerar o impacto da luz verde na fotomorfogênese, mesmo que seja menos estudada em comparação com a luz vermelha e azul.

Estudos mais recentes têm evidenciado os efeitos benéficos da luz verde sobre as respostas fisiológicas e morfológicas das plantas, incluindo a fotossíntese e a fotomorfogênese. A luz verde, com sua menor taxa de absorção na parte superior das folhas, pode estimular a fotossíntese na parte inferior da planta devido à alta transmitância de energia luminosa (Son and Oh 2015). A complementação de LEDs verdes com vermelhos e azuis demonstrou promover o crescimento da alface, enquanto a manipulação das características da luz verde teve efeitos positivos adicionais no crescimento e na pigmentação da planta. Esses achados ressaltam a importância da consideração da luz verde como um componente significativo na otimização das condições de cultivo de plantas, visando a maximização do seu desempenho fisiológico e produtivo. (Razzak et al. 2022).

A relação entre os diversos regimes de luz e a produção de antioxidantes endógenos, tais como enzimas antioxidantes e compostos não enzimáticos, desempenha um papel significativo na resposta antioxidante das plantas diante do estresse oxidativo. Esses

antioxidantes desempenham um papel crucial na neutralização dos radicais livres gerados durante o estresse oxidativo, conferindo às células vegetais uma maior resistência aos danos oxidativos (Xie et al. 2019). Em geral, os grupos que receberam 18 h de luz demonstraram uma capacidade antioxidante considerável, corroborando os capítulos anteriores que destacaram a relevância da exposição prolongada à luz na promoção da atividade antioxidante nas plantas.

No entanto, a capacidade antioxidante entre os grupos designados como 2B e 3C apresentaram os melhores resultados. Esses grupos se distinguiram por receber uma iluminação mais intensa, especialmente em relação aos comprimentos de onda auxiliares, como verde, roxo e branco. Esses achados sugerem que a intensidade e a composição espectral da luz podem influenciar significativamente a capacidade antioxidante das plantas, destacando a importância de considerar não apenas a duração, mas também a qualidade da exposição à luz ao investigar os efeitos sobre as respostas antioxidantes vegetais (Sawatdee et al. 2023).

Os resultados deste estudo destacam a complexidade e a importância da luz no crescimento, desenvolvimento e resposta antioxidante das plantas. A investigação cuidadosa dos efeitos dos diferentes regimes de luz, incluindo a distribuição e intensidade dos diferentes comprimentos de onda, revelou insights valiosos sobre como otimizar o cultivo de plantas, promovendo seu crescimento saudável e aumentando sua capacidade de defesa antioxidante.

Essas descobertas têm implicações significativas na agricultura de precisão e na produção de alimentos sustentáveis, destacando a importância de considerar não apenas a quantidade, mas também a qualidade da luz ao projetar ambientes de cultivo para maximizar o desempenho das plantas. Ao levar em conta esses aspectos, os agricultores podem potencializar o crescimento vegetal, melhorar a qualidade dos produtos agrícolas e fortalecer a resistência das plantas aos estresses ambientais, contribuindo assim para a segurança alimentar e o desenvolvimento sustentável

5.4 Conclusão parcial

A exposição à luz fracionada teve um impacto significativo no crescimento e desenvolvimento das alfaces. Regimes de luz mais diversificados, mesmo com períodos mais

curtos de exposição, mostraram-se mais eficazes na promoção do crescimento foliar em comparação com ciclos mais longos ou com predominância de um único tipo de luz. Esses achados destaca a importância de considerar não apenas a quantidade total de luz, mas também a diversidade espectral e a distribuição ao longo do ciclo de crescimento das plantas.

Quanto aos pigmentos, foi observado que o grupo 2A (15 h de luz vermelha, verde, violeta e branco e 3 h de azul) apresentou o maior conteúdo de carotenoides, enquanto o grupo 1B (5 h de luz vermelha seguido de 1h de azul, verde, violeta e branco e 2 h de escuro) demonstrou o maior conteúdo de clorofila (*Chl-a*). Esses resultados indicam que diferentes regimes de luz podem influenciar de forma distinta a síntese de pigmentos nas plantas, o que pode ter implicações na qualidade nutricional e na saúde das culturas.

Portanto, com base nos achados deste estudo, sugere-se que a utilização de regimes de luz fracionada, com uma distribuição equilibrada de diferentes comprimentos de onda, pode ser uma estratégia promissora para otimizar o crescimento e a qualidade das alfaces cultivadas em ambientes controlados. Esta abordagem pode contribuir para aumentar a eficiência dos sistemas de cultivo e para a produção de alimentos mais saudáveis e nutritivos.

6 CAPÍTULO VI: Conclusões

A produção de alface em hidroponia foi otimizada pela redução do tempo de desenvolvimento com o uso de descontaminação da água no sistema por UV-C. Uma redução na carga microbiana otimizou as condições do produto final, apesar das mudanças em fatores como irradiância em diferentes fotoperíodos, manutenção da qualidade nutricional ou, em alguns casos, sua potencialização. E este estudo também indicou que os fotoperíodos podem afetar o crescimento e a produtividade das culturas ou positiva ou negativamente o conteúdo de nutrientes, dependendo do objetivo ou necessidades da amostra, seja biomassa ou qualidade nutricional. No entanto, conclui-se que para o crescimento da alface tipo mini crespa o melhor tratamento foi para fotoperíodos longos (18 h) com uma concentração de nutrientes e baixas intensidades.

A exploração do crescimento de quatro variedades de alface - Crespa, Lisa, Roxa e Romana - cultivadas em ambientes internos dentro de uma câmara de crescimento controlada. Sob três fotoperíodos diferentes (24, 18 e 12 horas de exposição à luz) Além disso, um protocolo de fertilização foi implementado para aumentar as concentrações de nutrientes semanalmente, a partir da germinação até a quarta semana de crescimento. Os resultados indicam que sob fotoperíodos de 24 e 18 horas, todas as variedades atingiram o estágio adulto dentro do prazo especificado. No entanto, sob o fotoperíodo de 12 horas, as plantas de alface não alcançaram tamanhos comparáveis, sugerindo que podem requerer períodos de crescimento prolongados dentro da câmara. Notavelmente, os resultados demonstram que em apenas quatro semanas, é possível cultivar alface mantendo níveis nutricionais e fisiológicos comparáveis aos observados no cultivo indoor tradicional ao longo de um período de 50 dias.

Com base no contexto nos resultados obtidos, é possível concluir que a exposição à luz fracionada teve um impacto significativo no crescimento e desenvolvimento das alfaces avaliadas. Esses resultados sugerem que regimes de luz mais diversificados, mesmo que com períodos mais curtos de exposição, podem ser mais eficazes na promoção do crescimento foliar em alfaces, em comparação com ciclos mais longos ou com predominância de um único tipo de luz.

Além disso, observou-se que a distribuição fracionada da luz contribuiu para um aumento significativo na área foliar e na massa das plantas, em comparação com os grupos que receberam uma exposição contínua de luz. Esse achado destaca a importância de

considerar não apenas a quantidade total de luz, mas também a diversidade espectral e a distribuição ao longo do ciclo de crescimento das plantas. Portanto, com base nos resultados deste estudo, sugere-se que a utilização de regimes de luz fracionada, com uma distribuição equilibrada de diferentes comprimentos de onda, longos fotoperíodos (18h), e aumentos graduais de nutrientes alinhados com o crescimento da planta pode ser uma estratégia promissora para otimizar o crescimento e a qualidade das alfaces cultivadas em ambientes controlados. Esta abordagem pode contribuir para aumentar a eficiência dos sistemas de cultivo e para a produção de alimentos mais saudáveis e nutritivos.

7 Referencias

- Ahmed, Hesham A., Tong Yu-Xin, and Yang Qi-Chang. 2020a. "Optimal Control of Environmental Conditions Affecting Lettuce Plant Growth in a Controlled Environment with Artificial Lighting: A Review." *South African Journal of Botany* 130:75–89. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018>.
- . 2020b. "Optimal Control of Environmental Conditions Affecting Lettuce Plant Growth in a Controlled Environment with Artificial Lighting: A Review." *South African Journal of Botany* 130:75–89. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018>.
- Ahmed, Nazir, Baige Zhang, Zaid Chachar, Juan Li, Gengsheng Xiao, Qin Wang, Faisal Hayat, et al. 2024. "Micronutrients and Their Effects on Horticultural Crop Quality, Productivity and Sustainability." *Scientia Horticulturae* 323 (July 2023). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>.
- Alrajhi, Abdullah A., Abdulaziz S. Alsahli, Ibrahim M. Alhelal, Hail Z. Rihan, Michael P. Fuller, Abdullah A. Alsadon, and Abdullah A. Ibrahim. 2023. "The Effect of LED Light Spectra on the Growth, Yield and Nutritional Value of Red and Green Lettuce (*Lactuca Sativa*)." *Plants* 12 (3): 1–14. <https://doi.org/10.3390/plants12030463>.
- Andriolo, Jerônimo Luiz, Maria Carolina Grigoletto Espindola, and Moisés Osmari Stefanello. 2003. "Crescimento e Desenvolvimento de Plantas de Alface Provenientes de Mudanças Com Diferentes Idades Fisiológicas Growth and Development of Lettuce Plants from Transplants with Different Physiological Ages." *Ciencia Rural* 33 (1): 35–40.
- Arbos, Kettelin Aparecida, Renato João Sossela de Freitas, Sônia Cachoeira Stertz, and Marlos Ferreira Dornas. 2010. "Atividade Antioxidante e Teor de Fenólicos Totais Em Hortaliças Orgânicas e Convencionais." *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 30 (2): 501–6. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612010000200031>.
- Badi, Souhir. 2023. "Behavior of Some Escherichia Coli Isolated from Water after Exposure to UV-C 254-Study of Their Main Biological and Kinetic Inactivation Characteristics," 1–11.
- Barickman, T. Casey, Thomas E. Horgan, Jennifer R. Wheeler, and Carl E. Sams. 2016. "Elevated Levels of Potassium in Greenhouse-Grown Red Romaine Lettuce Impacts Mineral Nutrient and Soluble Sugar Concentrations." *HortScience* 51 (5): 504–9. <https://doi.org/10.21273/hortsci.51.5.504>.
- Baslam, Marouane, Fermín Morales, Idoia Garmendia, and Nieves Goicoechea. 2013a. "Nutritional Quality of Outer and Inner Leaves of Green and Red Pigmented Lettuces (*Lactuca Sativa* L.) Consumed as Salads." *Scientia Horticulturae* 151:103–11. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.12.023>.
- . 2013b. "Nutritional Quality of Outer and Inner Leaves of Green and Red Pigmented Lettuces (*Lactuca Sativa* L.) Consumed as Salads." *Scientia Horticulturae* 151:103–11. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.12.023>.

- Bazyar Lakeh, Amir Abbas, Werner Kloas, Rainer Jung, Ra'Anan Ariav, and Klaus Knopf. 2013. "Low Frequency Ultrasound and UV-C for Elimination of Pathogens in Recirculating Aquaculture Systems." *Ultrasonics Sonochemistry* 20 (5): 1211–16. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.01.008>.
- Bielczynski, Ludwik W., Mateusz K. Łański, Iris Hoefnagels, Anna Gambin, and Roberta Croce. 2017. "Leaf and Plant Age Affects Photosynthetic Performance and Photoprotective Capacity." *Plant Physiology* 175 (4): 1634–48. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00904>.
- Bonet, M Luisa, Jose A Canas, Joan Ribot, and A Palou. 2016. "Carotenoids in Nature." *Carotenoids in Nature: Biosynthesis, Regulation, and Function* 79:377–414. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39126-7>.
- Chang, Chung Liang, and Kuang Pi Chang. 2014. "The Growth Response of Leaf Lettuce at Different Stages to Multiple Wavelength-Band Light-Emitting Diode Lighting." *Scientia Horticulturae* 179 (November):78–84. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.013>.
- Chen, Xiao li, You li Li, Li chun Wang, and Wen zhong Guo. 2021. "Red and Blue Wavelengths Affect the Morphology, Energy Use Efficiency and Nutritional Content of Lettuce (*Lactuca Sativa L.*)." *Scientific Reports* 11 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87911-7>.
- Choi, In Lee, Tae Jong Yoo, and Ho Min Kang. 2015. "UV-C Treatments Enhance Antioxidant Activity, Retain Quality and Microbial Safety of Fresh-Cut Paprika in MA Storage." *Horticulture Environment and Biotechnology* 56 (3): 324–29. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-0141-y>.
- Colomer-Winter, Cristina, Ana L Flores-Mireles, Shannon P Baker, Kristi L Frank, Aaron J L Lynch, Scott J Hultgren, Todd Kitten, and José A Lemos. 2018. "Manganese Acquisition Is Essential for Virulence of *Enterococcus Faecalis*." <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1007102>.
- Croce, Roberta, and Herbert Van Amerongen. 2014. "Natural Strategies for Photosynthetic Light Harvesting." *Nature Chemical Biology* 10 (7): 492–501. <https://doi.org/10.1038/nchembio.1555>.
- Czarnek, Katarzyna, Małgorzata Tatarczak-Michalewska, Piotr Dreher, Vishnu D. Rajput, Grzegorz Wójcik, Anna Gierut-Kot, Agnieszka Szopa, and Eliza Blicharska. 2023. "UV-C Seed Surface Sterilization and Fe, Zn, Mg, Cr Biofortification of Wheat Sprouts as an Effective Strategy of Bioelement Supplementation." *International Journal of Molecular Sciences* 24 (12). <https://doi.org/10.3390/ijms241210367>.
- Dankwa, A S, R M Machado, and J J Perry. 2020. "Sources of Food Contamination in a Closed Hydroponic System." *Letters in Applied Microbiology* 70 (1): 55–62.
- Delgado-Vargas, F., A. R. Jimenez, and O. Paredes-Lopez. 2010. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition. Natural Pigments: Carotenoids, Anthocyanins, and Betalains*

— *Characteristics, Biosynthesis, Processing, and Stability. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Vol. 40.

- Easlon, Hsien Ming, and Arnold J. Bloom. 2014. “Easy Leaf Area: Automated Digital Image Analysis for Rapid and Accurate Measurement of Leaf Area.” *Applications in Plant Sciences* 2 (7): 1400033. <https://doi.org/10.3732/apps.1400033>.
- Frank, Harry A. 2010. “Molecular Factors Controlling Photosynthetic Light Harvesting by Carotenoids TOM’AŠTOM’ TOM’ATOM’A`TOM’AŠ POL’IVKAPOL’POL’IVKA” 43 (8): 55. <https://doi.org/10.1021/ar100030m>.
- Frąszczak, Barbara, and Monika Kula-Maximenko. 2021. “The Preferences of Different Cultivars of Lettuce Seedlings (*Lactuca Sativa* L.) for the Spectral Composition of Light.” *Agronomy* 11 (6). <https://doi.org/10.3390/agronomy11061211>.
- Givens, Spencer R., Dustin S. Del Moro, Sarah E. Parker, Alexander G. Renny, Carl E. Sams, and Kellie J. Walters. 2023. “Light Intensity during Green-Leaf Butterhead Lettuce Propagation Influences Yield and Carotenoids at Harvest.” *Horticulturae* 9 (2). <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020223>.
- Goel, Reeta. 2022. *Survival Strategies in Cold-Adapted Microorganisms. Survival Strategies in Cold-Adapted Microorganisms*. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-2625-8>.
- González, Yenifer, Gloria Gómez, Gabriela E. Moeller-Chávez, and Gladys Vidal. 2023. “UV Disinfection Systems for Wastewater Treatment: Emphasis on Reactivation of Microorganisms.” *Sustainability (Switzerland)* 15 (14). <https://doi.org/10.3390/su151411262>.
- Grzegorzewska, Maria, Ewa Badełek, Bożena Matysiak, Stanisław Kaniszewski, Jacek Dyśko, Waldemar Kowalczyk, Anna Wrzodak, and Justyna Szwejda-Grzybowska. 2023. “Assessment of Romaine Lettuce Cultivars Grown in a Vertical Hydroponic System at Two Levels of LED Light Intensity.” *Scientia Horticulturae* 313 (February). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111913>.
- Gupta, Sonam, Pankaj Kumar Srivastava, and Rana Pratap Singh. 2024. “Growth Promotion and Zinc Biofortification in Lettuce (*Lactuca Sativa* L.) by the Application of *Talaromyces* Strain as a Biostimulant.” *Scientia Horticulturae* 323 (May 2023). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112534>.
- H. Tunio, Mazhar, Jianmin Gao, Tarek M. K. Mohamed, Fiaz Ahmad, Irfan Abbas, and Sher Ali Shaikh. 2023. “Comparison of Nutrient Use Efficiency, Antioxidant Assay, and Nutritional Quality of Butter-Head Lettuce (*Lactuca Sativa* L.) in Five Cultivation Systems.” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 16 (1): 95–103. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231601.6794>.
- Han, Tao, Vitaliy A. Vaganov, Shixiu Cao, Qiang Li, Lili Ling, Xiaoyao Cheng, Lingling Peng, et al. 2017. “Improving ‘Color Rendering’ of LED Lighting for the Growth of Lettuce.” *Scientific Reports* 7 (April). <https://doi.org/10.1038/srep45944>.

- Ibaraki, Yasuomi. 2017. *LED Supplementary Lighting BT - Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting*.
- Ieperen, W. Van. 2016. "Plant Growth Control by Light Spectrum: Fact or Fiction?" *Acta Horticulturae* 1134:19–24. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.3>.
- Ikeda, Hideo, Prommart Koohakan, and Tanimnun Jaenaksorn. 2002. "Problems and Countermeasures in the Re-Use of the Nutrient Solution in Soilless Production." *Acta Horticulturae* 578 (1999): 213–19. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.578.26>.
- Inthichack, Phommy, Yasuyo Nishimura, and Yasufumi Fukumoto. 2012. "Effect of Potassium Sources and Rates on Plant Growth, Mineral Absorption, and the Incidence of Tip Burn in Cabbage, Celery, and Lettuce." *Horticulture Environment and Biotechnology* 53 (2): 135–42. <https://doi.org/10.1007/s13580-012-0126-z>.
- Ishfaq, Muhammad, Yongqi Wang, Minwen Yan, Zheng Wang, Liangquan Wu, Chunjian Li, and Xuexian Li. 2022. "Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China." *Frontiers in Plant Science* 13 (April): 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.802274>.
- Ishfaq, Pir Mohammad, Archana Shukla, Satyaprakash Beraiya, Swati Tripathi, and Siddhartha K. Mishra. 2018. "Biochemical and Pharmacological Applications of Essential Oils in Human Health Especially in Cancer Prevention." *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry* 18 (13): 1815–27. <https://doi.org/10.2174/1871520618666181002130240>.
- J. Vallance, F. Déniel, G. LeFloch, L. Guérin-Dubrana, D. Blancard, and P. Rey. 2019. *Pathogenic and Beneficial Microorganisms in Soilless Cultures*.
- Jama-Rodzeńska, Anna, Piotr Chohura, Bernard Gałka, Anna Szuba-Trznadel, Agnieszka Falkiewicz, and Monika Białkowska. 2022. "Effect of Different Doses of Phosgreen Fertilization on Chlorophyll, K, and Ca Content in Butterhead Lettuce (*Lactuca Sativa* L.) Grown in Peat Substrate." *Agriculture (Switzerland)* 12 (6). <https://doi.org/10.3390/agriculture12060788>.
- Johnson, Riya, Kanchan Vishwakarma, Md Shahadat Hossen, Vinod Kumar, A. M. Shackira, Jos T. Puthur, Gholamreza Abdi, Mohammad Sarraf, and Mirza Hasanuzzaman. 2022. "Potassium in Plants: Growth Regulation, Signaling, and Environmental Stress Tolerance." *Plant Physiology and Biochemistry* 172 (September 2021): 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001>.
- Khan, Saad, Ankit Purohit, and Nikita Vadsaria. 2020. "Hydroponics: Current and Future State of the Art in Farming." *Journal of Plant Nutrition* 44 (10): 1515–38. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1860217>.
- Khawas, P., A. J. Das, N. Sit, L. S. Badwaik, and S. C. Dekka. 2014. "Nutritional Composition of Culinary Musa ABB at Different Stages of Development." *American Journal of Food Science and Technology* 2 (3): 80–87. <https://doi.org/10.12691/ajfst-2-3-1>.

- Kim, Moo Jung, Youyoun Moon, Janet C. Tou, Beiquan Mou, and Nicole L. Waterland. 2016a. "Nutritional Value, Bioactive Compounds and Health Benefits of Lettuce (*Lactuca Sativa* L.)." *Journal of Food Composition and Analysis* 49:19–34. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.004>.
- . 2016b. "Nutritional Value, Bioactive Compounds and Health Benefits of Lettuce (*Lactuca Sativa* L.)." *Journal of Food Composition and Analysis* 49:19–34. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.004>.
- Kobayashi, Kent, Teresita Amore, and Michelle Lazaro. 2013. "Light-Emitting Diodes (LEDs) for Miniature Hydroponic Lettuce." *Optics and Photonics Journal* 03 (01): 74–77. <https://doi.org/10.4236/opj.2013.31012>.
- Kumar, Santosh, Md Minhajul Abedin, Ashish Kumar Singh, and Saurav Das. 2020. "Role of Phenolic Compounds in Plant-Defensive Mechanisms." *Plant Phenolics in Sustainable Agriculture: Volume 1* 1 (January):517–32. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4890-1_22/COVER.
- Li, Yamin, Rui Shi, Haozhao Jiang, Linyuan Wu, Yiting Zhang, Shiwei Song, Wei Su, and Houcheng Liu. 2020. "End-of-Day Led Lightings Influence the Leaf Color, Growth and Phytochemicals in Two Cultivars of Lettuce." *Agronomy* 10 (10). <https://doi.org/10.3390/agronomy10101475>.
- Lima, Daniele Pinto de, Ezio dos Santos Pinto Júnior, Anely Vieira de Menezes, Daniel Alves de Souza, Vinícius Parzanini Brilhante de São José, Bárbara Pereira da Silva, André Quintão de Almeida, and Izabela Maria Montezano de Carvalho. 2024. "Chemical Composition, Minerals Concentration, Total Phenolic Compounds, Flavonoids Content and Antioxidant Capacity in Organic and Conventional Vegetables." *Food Research International* 175 (November 2023). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113684>.
- Lin, Kuan Hung, Meng Yuan Huang, Wen Dar Huang, Ming Huang Hsu, Zhi Wei Yang, and Chi Ming Yang. 2013. "The Effects of Red, Blue, and White Light-Emitting Diodes on the Growth, Development, and Edible Quality of Hydroponically Grown Lettuce (*Lactuca Sativa* L. Var. *Capitata*)." *Scientia Horticulturae* 150 (February):86–91. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2012.10.002>.
- Liu, Xiangfei, Shane Ardo, Marisa Bunning, John Parry, Kequan Zhou, Cecil Stushnoff, Frank Stoniker, Liangli Yu, and Patricia Kendall. 2007a. "Total Phenolic Content and DPPH{radical Dot} Radical Scavenging Activity of Lettuce (*Lactuca Sativa* L.) Grown in Colorado." *LWT - Food Science and Technology* 40 (3): 552–57. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.09.007>.
- . 2007b. "Total Phenolic Content and DPPH{radical Dot} Radical Scavenging Activity of Lettuce (*Lactuca Sativa* L.) Grown in Colorado." *LWT* 40 (3): 552–57. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2005.09.007>.
- Liu, Yu Wei, and Chen Kang Huang. 2019. "Effects of the Circulation Pump Type and Ultraviolet Sterilization on Nutrient Solutions and Plant Growth in Plant Factories." *HortTechnology* 29 (2): 189–98. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04244-18>.

- Lynn Garcia, Aubrey, Mya Alexandria Catherine Griffith, George Paul Buss, Xiusheng Yang, John L Griffis, Sarah Bauer, and Ankit Kumar Singh. 2023. "Controlled Environment Agriculture and Its Ability to Mitigate Food Insecurity." *Agricultural Sciences* 14:298–315. <https://doi.org/10.4236/as.2023.142019>.
- Madaan, R., G. Bansal, S. Kumar, and A. Sharma. 2011. "Estimation of Total Phenols and Flavonoids in Extracts of *Actaea Spicata* Roots and Antioxidant Activity Studies." *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences* 73 (6): 666–69. <https://doi.org/10.4103/0250-474X.100242>.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; DE OLIVEIRA, S. 1989. "Assessment of the Nutritional Status of Plants: Principles and Applications." *POTAPHOS*, 201.
- Mampholo, Bevly M., Martin M. Maboko, Puffy Soundy, and Dharini Sivakumar. 2016. "Phytochemicals and Overall Quality of Leafy Lettuce (*Lactuca Sativa* L.) Varieties Grown in Closed Hydroponic System." *Journal of Food Quality* 39 (6): 805–15. <https://doi.org/10.1111/jfq.12234>.
- Moraes, Carolina Cinto de, Neidiquele Maria Silveira, Gabriel Stefanini Mattar, Fernando César Sala, Estêvão Vicari Mellis, and Luis Felipe Villani Purquerio. 2022. "Agronomic Biofortification of Lettuce with Zinc under Tropical Conditions: Zinc Content, Biomass Production and Oxidative Stress." *Scientia Horticulturae* 303 (April). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111218>.
- Mou, Beiquan. 2009. "Nutrient Content of Lettuce and Its Improvement." *Current Nutrition & Food Science* 5 (4): 242–48. <https://doi.org/10.2174/157340109790218030>.
- Muhie, Seid Hussen. 2022. "Novel Approaches and Practices to Sustainable Agriculture." *Journal of Agriculture and Food Research*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100446>.
- Naznin, Most Tahera, Mark Lefsrud, Valerie Gravel, and Md Obyedul Kalam Azad. 2019a. "Blue Light Added with Red LEDs Enhance Growth Characteristics, Pigments Content, and Antioxidant Capacity in Lettuce, Spinach, Kale, Basil, and Sweet Pepper in a Controlled Environment." *Plants* 8 (4). <https://doi.org/10.3390/plants8040093>.
- . 2019b. "Blue Light Added with Red LEDs Enhance Growth Characteristics, Pigments Content, and Antioxidant Capacity in Lettuce, Spinach, Kale, Basil, and Sweet Pepper in a Controlled Environment." *Plants* 8 (4). <https://doi.org/10.3390/plants8040093>.
- Nguyen, Thi Kim Loan, Kye Man Cho, Hee Yul Lee, Du Yong Cho, Ga Oun Lee, Seong Nam Jang, Yongki Lee, Daesup Kim, and Ki Ho Son. 2021. "Effects of White Led Lighting with Specific Shorter Blue and/or Green Wavelength on the Growth and Quality of Two Lettuce Cultivars in a Vertical Farming System." *Agronomy* 11 (11). <https://doi.org/10.3390/agronomy11112111>.
- Nicolle, Catherine, Andrée Carnat, Didier Fraisse, Jean Louis Lamaison, Edmond Rock, Hervé Michel, Pierre Amoureux, and Christian Remesy. 2004. "Characterisation and

- Variation of Antioxidant Micronutrients in Lettuce (*Lactuca Sativa Folium*).” *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84 (15): 2061–69.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.1916>.
- Oliveira, Bruno Pereira de, Shirlei Lara, Daniel Chianfrone, Kate Cristina Blanco, and Vanderlei Salvador Bagnato. 2019. “Perimetric Distributed UV Reactor and Its Validation and the Decontamination of Fresh Broccolis.” *American Journal of Applied Chemistry* 7 (6): 161–67.
- Ouzounis, Theoharis, Eva Rosenqvist, and Carl-Otto Ottosen. 2015. “Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review.” *HORTSCIENCE*. Vol. 50. <http://www.photobiology.info/>.
- Pennisi, Giuseppina, Francesco Orsini, Sonia Blasioli, Antonio Cellini, Andrea Crepaldi, Iaria Braschi, Francesco Spinelli, et al. 2019. “Resource Use Efficiency of Indoor Lettuce (*Lactuca Sativa L.*) Cultivation as Affected by Red:Blue Ratio Provided by LED Lighting.” *Scientific Reports* 9 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z>.
- Perez, Shirly Lara, Daniel Jose Chianfrone, Vanderlei Salvador Bagnato, and Kate Cristina Blanco. 2022. “Optical Technologies for Antibacterial Control of Fresh Meat on Display.” *Lwt* 160 (July 2021): 113213. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113213>.
- Pomoni, Dimitra I., Maria K. Koukou, Michail Gr Vrachopoulos, and Labros Vasiliadis. 2023. “A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use.” *Energies*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16041690>.
- Porra, R. J., W. A. Thompson, and P. E. Kriedemann. 1989. “Determination of Accurate Extinction Coefficients and Simultaneous Equations for Assaying Chlorophylls a and b Extracted with Four Different Solvents: Verification of the Concentration of Chlorophyll Standards by Atomic Absorption Spectroscopy.” *BBA - Bioenergetics* 975 (3): 384–94. [https://doi.org/10.1016/S0005-2728\(89\)80347-0](https://doi.org/10.1016/S0005-2728(89)80347-0).
- Quatrini, Thaila, Kate Cristina, Érica Boer, Shirly Marleny, Lara Perez, Daniel José, Vinicius Sigari, and Vanderlei Salvador. 2020. “Photodiagnosis and Photodynamic Therapy Effects of Ultraviolet Light and Curcumin-Mediated Photodynamic Inactivation on Microbiological Food Safety : A Study in Meat and Fruit.” *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy* 30 (January): 101678. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.101678>.
- RABINOWITCH, E. I., and GOVINDJEE. 1965. “The Role of Chlorophyll in Photosynthesis.” *Scientific American* 213 (August 1965): 74–83. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0765-74>.
- Razzak, Md Abdur, Md Asaduzzaman, Hideyuki Tanaka, and Toshiki Asao. 2022. “Effects of Supplementing Green Light to Red and Blue Light on the Growth and Yield of Lettuce in Plant Factories.” *Scientia Horticulturae* 305 (November). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111429>.

- Resh, Howard M. 2013. *HYDROPONIC Food Production. A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener*. CRC Press.
- Roosta, Hamid Reza, Arman Samadi, and Mahdi Bikdeloo. 2023. "Different Cultivation Systems and Foliar Application of Calcium Nanoparticles Affect the Growth and Physiological Characteristics of Pennyroyal (*Mentha Pulegium L.*)." *Scientific Reports* 13 (1): 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47855-6>.
- Runia, W.Th. 1994a. "Elimination of Root-Infecting Pathogens in Recirculation Water From Closed Cultivation Systems By Ultra-Violet Radiation." *Acta Horticulturae*. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1994.361.36>.
- . 1994b. "Elimination of Root-Infecting Pathogens in Recirculation Water From Closed Cultivation Systems By Ultra-Violet Radiation." *Acta Horticulturae*. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1994.361.36>.
- Sapkota, Sundar, Sanjib Sapkota, and Zhiming Liu. 2019. "Effects of Nutrient Composition and Lettuce Cultivar on Crop Production in Hydroponic Culture." *Horticulturae* 5 (4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>.
- Saran, Ishaan, and Kevin DAMico. 2023. "Effect of UV-C Light on the Growth of Begonia Dregei and Begonia Arching Plants." *Journal of Student Research* 12 (1): 1–10. <https://doi.org/10.47611/jsrhs.v12i1.3992>.
- Sawatdee, Sapanat, Teeraya Jarunglumlert, Prasert Pavasant, Yasuko Sakihama, Adrian E. Flood, and Chattip Prommuak. 2023. "Effect of Mixed Light Emitting Diode Spectrum on Antioxidants Content and Antioxidant Activity of Red Lettuce Grown in a Closed Soilless System." *BMC Plant Biology* 23 (1). <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04364-y>.
- Scheer, H. 2013. "Chlorophylls and Carotenoids." *Encyclopedia of Biological Chemistry: Second Edition* 1:498–505. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378630-2.00134-1>.
- Shamshiri, Redmond Ramin, Fatemeh Kalantari, K. C. Ting, Kelly R. Thorp, Ibrahim A. Hameed, Cornelia Weltzien, Desa Ahmad, and Zahra Shad. 2018. "Advances in Greenhouse Automation and Controlled Environment Agriculture: A Transition to Plant Factories and Urban Agriculture." *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 11 (1): 1–22. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210>.
- Sharma, Nisha, Somen Acharya, Kaushal Kumar, Narendra Singh, and O.P. Chaurasia. 2018. "Hydroponics as an Advanced Technique for Vegetable Production: An Overview." *Journal of Soil and Water Conservation* 17 (4): 364. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>.
- Simkin, Andrew J., Leepica Kapoor, C. George Priya Doss, Tanja A. Hofmann, Tracy Lawson, and Siva Ramamoorthy. 2022. "The Role of Photosynthesis Related Pigments in Light Harvesting, Photoprotection and Enhancement of Photosynthetic Yield in Planta." *Photosynthesis Research* 152 (1): 23–42. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00892-6>.

- Simkin, Andrew J., Patricia E. López-Calcano, and Christine A. Raines. 2019. "Feeding the World: Improving Photosynthetic Efficiency for Sustainable Crop Production." *Journal of Experimental Botany*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery445>.
- Son, Ki Ho, and Myung Min Oh. 2015. "Growth, Photosynthetic and Antioxidant Parameters of Two Lettuce Cultivars as Affected by Red, Green, and Blue Light-Emitting Diodes." *Horticulture Environment and Biotechnology* 56 (5): 639–53. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-1064-3>.
- Song, Jiali, Hui Huang, Yanwei Hao, Shiwei Song, Yiting Zhang, Wei Su, and Houcheng Liu. 2020a. "Nutritional Quality, Mineral and Antioxidant Content in Lettuce Affected by Interaction of Light Intensity and Nutrient Solution Concentration." *Scientific Reports* 10 (1): 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59574-3>.
- . 2020b. "Nutritional Quality, Mineral and Antioxidant Content in Lettuce Affected by Interaction of Light Intensity and Nutrient Solution Concentration." *Scientific Reports* 10 (1): 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59574-3>.
- Sperber, William H. 1983. "Influence of Water Activity on Foodborne Bacteria-A Review 1 '-'." *Copyrighto. International Association of Milk. Food*. Vol. 46.
- Sutton, John Clifford, Coralie Rachelle Sopher, Tony Nathaniel Owen-going, Weizhong Liu, Bernard Grodzinski, John Christopher Hall, and Ruth Linda Benchimol. 2006. "Etiology and Epidemiology of Pythium Root Rot in Hydroponic Crops: Current Knowledge and Perspectives." *Summa Phytopathol* 32 (4): 307–21.
- Swapnil, Prashant, Mukesh Meena, Sandeep Kumar Singh, Umesh Praveen Dhuldhaj, Harish, and Avinash Marwal. 2021. "Vital Roles of Carotenoids in Plants and Humans to Deteriorate Stress with Its Structure, Biosynthesis, Metabolic Engineering and Functional Aspects." *Current Plant Biology* 26 (July 2020): 100203. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100203>.
- Teng, Zi, Yaguang Luo, Ellen R. Bornhorst, Bin Zhou, Ivan Simko, and Frances Truth. 2019. "Identification of Romaine Lettuce (*Lactuca Sativa* Var. *Longifolia*) Cultivars with Reduced Browning Discoloration for Fresh-Cut Processing." *Postharvest Biology and Technology* 156 (June): 110931. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110931>.
- Toscano, Stefania, Valeria Cavallaro, Antonio Ferrante, Daniela Romano, and Cristina Patané. 2021. "Effects of Different Light Spectra on Final Biomass Production and Nutritional Quality of Two Microgreens." *Plants* 10 (8). <https://doi.org/10.3390/plants10081584>.
- Trani, Paulo Espíndola, Luís Felipe Villani Purquério, Gilberto Job Borges Figueiredo, Sebastião Wilson Tivelli, and Sally Ferreira. 2014. "Calagem e Adubação Da Alface, Almeirão, Agrião d'água, Chicória, Coentro, Espinafre e Rúcula*." *Instituto Agrônômico de Campinas - IAC*, 1–16.

- Weaver, Geoffrey, and Marc W. van Iersel. 2020. "Longer Photoperiods with Adaptive Lighting Control Can Improve Growth of Greenhouse-Grown 'Little Gem' Lettuce (*Lactuca Sativa*)."
HortScience 55 (4): 573–80.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI14721-19>.
- Wellburn, Alan R. 1994. "The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as Well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution."
Journal of Plant Physiology 144 (3): 307–13.
[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2).
- Xie, Xiulan, Zhouqing He, Nifan Chen, Zizhong Tang, Qiang Wang, and Yi Cai. 2019. "The Roles of Environmental Factors in Regulation of Oxidative Stress in Plant."
BioMed Research International. Hindawi Limited.
<https://doi.org/10.1155/2019/9732325>.
- Xu, Yong. 2018. *Nature and Source of Light for Plant Factory. Plant Factory Using Artificial Light: Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00002-6>.
- Zhang, Xin, Dongxian He, Genhua Niu, Zhengnan Yan, and Jinxiu Song. 2018a. "Effects of Environment Lighting on the Growth, Photosynthesis, and Quality of Hydroponic Lettuce in a Plant Factory."
International Journal of Agricultural and Biological Engineering 11 (2): 33–40. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.3420>.
- . 2018b. "Effects of Environment Lighting on the Growth, Photosynthesis, and Quality of Hydroponic Lettuce in a Plant Factory."
International Journal of Agricultural and Biological Engineering 11 (2): 33–40.
<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.3420>.
- Zwicker, Paula, Johannes Schleusener, Silke B Lohan, Loris Busch, Claudia Sicher, Sven Einfeldt, Michael Kneissl, et al. 2023AD. "Application of 233 Nm Far-UVC LEDs for Eradication of MRSA and MSSA and Risk Assessment on Skin Models."
Scientific Reports / 12:2587. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06397-z>.