



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



**OTIMIZAÇÃO DO CRESCIMENTO E DESEMPENHO DE MUDAS DE
ALFACE (*LACTUCA SATIVA* L.) SOB ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL NO
CULTIVO HIDROPÔNICO CONVENCIONAL E *INDOOR*.**

Rafael Basilio Ferro

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM BIOTECNOLOGIA do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia da Universidade Federal de São Carlos.

Orientador:

Prof. Dr. Vanderlei Salvador Bagnato

Coorientadora:

Profa. Dra. Kate Cristina Blanco

**São Carlos - SP
2023**

RAFAEL BASILIO FERRO

**“Otimização do Crescimento e Desempenho de Mudanças de Alface
(*Lactuca sativa* L.) sob Iluminação Artificial no Cultivo Hidropônico
Convencional e *Indoor*.”**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM BIOTECNOLOGIA do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia da Universidade Federal de São Carlos.

Orientador:

Prof. Dr. Vanderlei Salvador Bagnato

Coorientadora:

Profa. Dra. Kate Cristina Blanco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vanderlei Salvador Bagnato

Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo

Profa. Dra. Henriette Monteiro Cordeiro de Azeredo

Embrapa Instrumentação

Profa. Dra. Alessandra Ramos Lima

Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo

**São Carlos - SP
2023**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Mestrado do candidato Rafael Basilio Ferro, realizada em 25/08/2023:

Prof. Dr. Vanderlei Salvador Bagnato

Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo

Profa. Dra. Henriette Monteiro Cordeiro de Azeredo

Embrapa Instrumentação

Profa. Dra. Alessandra Ramos Lima

Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo

DEDICATÓRIA

A minha mãe, Vera Lucia Basilio, por seu amor incondicional e por ser a pessoa mais batalhadora e guerreira que conheci, me inspirando a chegar até aqui e seguir em frente, sempre com humildade, lealdade, honestidade e resiliência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, saúde, família, amigos e por todas as oportunidades a mim concedidas até hoje.

Aos meus pais, Paulo Fernando Ferro e Vera Lucia Basilio pela vida, criação, ensinamentos, motivação e oportunidade de me graduar e seguir na pós-graduação. Amo vocês incondicionalmente.

Ao meu avô Amiris Marcelino Ferro (*in memoriam*) por me despertar o amor pelo agro, a minha avó Carmen Ricci Cerri Ferro, por sempre cuidar de mim, pela sua alegria e alto astral contagiantes.

A minha tia e madrinha Mara Aparecida Ferro, pelo seu zelo, amor e cuidado por mim e por toda a família e ao meu tio prof. Dr. José Roberto Ferro por me motivar e mostrar desde a infância a importância do estudo, pesquisa e inovação.

Ao meu orientador prof. Dr. Vanderlei Salvador Bagnato, pela confiança, ensinamentos e pelo seu amor pela ciência que me inspira mais a cada dia.

A minha coorientadora profa. Dra. Kate Cristina Blanco, por toda a ajuda, conversas e ensinamentos.

A minha companheira de trabalho e amiga, Mestre e doutoranda em Biotecnologia Shirly Marleny Lara Pérez, por todo auxílio nos experimentos e análises, companheirismo, ensinamentos, amizade e parceria.

Ao Engenheiro e Mestre Renê Luís Casarin, do Laboratório de Apoio Tecnológico (LAT) pela amizade, por toda ajuda na configuração experimental da estufa *indoor*, pelo convite para participar do projeto, inicialmente como consultor agrônomo, o que abriu as portas para ingresso no mestrado.

A Dra. Henriette Monteiro Cordeiro de Azeredo por aceitar participar da banca de defesa e por lecionar uma das matérias mais interessantes que cursei na pós-graduação e a Dra. Alessandra Ramos Lima por toda ajuda até aqui e pelo aceite em participar da banca.

Ao Instituto de Física de São Carlos (USP), ao Centro de Pesquisas em Óptica e Fotônica (CePOF), todos os professores e colaboradores que me receberam e acolheram da melhor forma possível e ao Laboratório de Biofotônica Ambiental.

A todos os professores e colaboradores do Programa de Pós-graduação em Biotecnologia da UFSCar que tiveram papel essencial na minha formação.

A Fundação de Apoio à Física e à Química (FAFQ) pelas bolsas de Desenvolvimento Tecnológico e Industrial - DTI e mestrado a mim concedidas.

A UFSCar campus São Carlos e campus Araras (Centro de Ciências Agrárias) e todos seus professores e colaboradores.

A minha orientadora de Iniciação Científica e do Trabalho de Conclusão de Curso profa. Dra. Marta Regina Verruma Bernardi, por me acolher desde o início da graduação, me incentivando e inspirando a seguir na área da pesquisa e desenvolvimento, além da participação na banca de qualificação. Ao prof. Dr. Fernando César Sala, por todas as conversas, ensinamentos e ajuda durante a graduação e principalmente após, quando iniciei as atividades da Vida Verde Hidroponia.

A minha amada namorada, Larissa Pereira Lopes Martinez, por sempre me incentivar e apoiar em toda minha trajetória acadêmica e profissional, me motivando e inspirando sempre a dar o meu melhor.

Aos meus amigos e irmãos Jorge Parrelli, Marcela Parrelli e Dr. Gustavo de Souza pela irmandade, apoio na trajetória acadêmica e profissional, sempre me ajudando e clareando a minha mente nos momentos mais difíceis.

A fazenda urbana Vida Verde Hidroponia, a qual tive a honra de gerenciar entre os anos de 2017-2022, me abrindo inúmeras portas e por me tornar um profissional melhor.

A empresa C4 Biotecnologia por fornecer a estufa *indoor* para pesquisa e desenvolvimento por meio de um projeto EMBRAPPII - Desenvolvimento de tecnologias ópticas para otimização da produção de vegetais.

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

Ferro, Rafael Basilio. **Otimização do crescimento e desempenho de mudas de alface (*Lactuca sativa* L.) sob iluminação artificial no cultivo hidropônico convencional e *indoor*.** 2023. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Biotecnologia) – UFSCar, São Carlos, 2023.

RESUMO

A hidroponia é um sistema de cultivo sem solo, com fornecimento de água e nutrientes controlados que, associada ao ambiente protegido e controlado, reduz significativamente as perdas em função das variações climáticas e minimiza ou elimina o uso de defensivos químicos. Por outro lado, o cultivo *indoor* é sistema de maior controle, onde além da composição da solução nutritiva, parâmetros como temperatura e umidade relativa do ar também são controlados. Esse tipo de sistema pode ser utilizado para o cultivo de brotos, mudas e plantas e a iluminação artificial pode ser utilizada como suplementação ou como fonte única de luz. Esses parâmetros possibilitam a produção verticalizada, sobrepondo as plantas até a altura desejada e aumentando a produtividade da área de cultivo. O objetivo deste estudo foi otimizar e avaliar o desenvolvimento de mudas de alface crespa (*Lactuca sativa* L. cv. Ariel) produzidas em estufa *indoor* sob iluminação artificial com diodos emissores de luz (LED) vermelho (660 nm), azul (440 nm) e branco (2700K). As mudas foram transplantadas para produção hidropônica em casa de vegetação e para hidroponia *indoor*. Além da avaliação das mudas, as plantas adultas também foram avaliadas por meio de métodos agrônômicos (massa fresca total, raiz, parte aérea; altura da parte aérea; número de folhas e índice total de clorofila SPAD) e de pós-colheita (minerais e compostos fenólicos). Os resultados mostraram que é possível otimizar a produção de mudas, reduzindo em 50% o ciclo da muda *indoor*, comparada com a muda comercial de viveiro. As plantas adultas produzidas a partir de mudas *indoor* em sistema hidropônico alcançaram produtividade superior em até 36% comparadas às mudas provenientes do viveiro no mesmo sistema de cultivo. Além disso, as plantas cultivadas o ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 24 horas nos últimos 11 dias, foram as de maior massa, portanto, maior produtividade média, o que comprovou a maior eficiência produtiva da cultivar de alface estudada no cultivo *indoor*. Esses resultados poderão auxiliar no desenvolvimento de fazendas verticais produtoras de mudas e plantas.

Palavras-chave: cultivo *indoor*, iluminação artificial, LED, hidroponia, alface.

Ferro, Rafael Basilio. **Optimization of Growth and Performance of Lettuce Seedlings (*Lactuca sativa* L.) under Artificial Lighting in Conventional Hydroponic and Indoor Cultivation.** 2023. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Biotecnologia) – UFSCar, São Carlos, 2023.

ABSTRACT

Hydroponics is a soilless cultivation system with controlled water and nutrient supply that, when coupled with a protected and controlled environment, significantly mitigates losses stemming from climatic variations and reduces or eliminates the usage of chemical pesticides. Conversely, indoor cultivation represents a highly controlled system where, in addition to the composition of the nutrient solution, parameters such as temperature and relative humidity are meticulously regulated. This system is amenable to the cultivation of seedlings, sprouts, and mature plants, with artificial lighting serving as both a supplementary and primary light source. These parameters enable vertical production by stacking plants to the desired height, thereby amplifying cultivation area productivity. The primary aim of this study was to optimize and assess the development of crisp lettuce seedlings (*Lactuca sativa* L. cv. Ariel) produced in an indoor greenhouse using light-emitting diodes (LEDs) emitting red (660 nm), blue (440 nm), and warm white (2700K) wavelengths. These seedlings were subsequently transplanted for hydroponic production in a greenhouse environment and indoor hydroponics. In addition to the evaluation of seedlings, adult plants were subjected to agronomic assessments, including total fresh mass, root mass, aboveground mass, aboveground height, leaf count, and total SPAD chlorophyll index, as well as post-harvest analyses encompassing mineral content and phenolic compounds. The results showcased the feasibility of optimizing seedling production by reducing the indoor seedling cycle by 50% in comparison to commercially nursery-grown seedlings produced. Adult plants originating from indoor seedlings in the hydroponic system exhibited up to a 36% greater productivity compared to nursery seedlings in an identical cultivation system. Furthermore, plants cultivated indoors throughout the entire cycle with a 24-hour photoperiod in the last 11 days displayed the highest mass, thereby reflecting the highest average productivity. This substantiates the enhanced productive efficiency of the lettuce cultivar under study in the context of indoor cultivation with artificial lighting. These findings have the potential to inform and advance the development of vertical farms dedicated to seedling and plant production.

Keywords: indoor cultivation, artificial lighting, LED, hydroponics, lettuce.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. DIP-LEDs (a) e LEDs de alta potência (b).	17
Figura 2. Utilização de comprimentos de onda para a fotossíntese (clorofilas) e fotomorfogênese (fitocromo, criptocromo e fototropina)	18
Figura 3. Qualidade espectral de diferentes fontes de luz.	19
Figura 4. Densidade de fluxo de fótons fotossintéticos em função da distância da placa metro (m).	26
Figura 5. Estufa de crescimento vegetativo <i>indoor</i> ; b) mudas com 7 DAG; c) mudas com 19 DAG; d) Enraizamento com 27 DAG; e) bandeja 1 com fotoperíodo de 24h; f) bandeja 2 com fotoperíodo de 18h.	27
Figura 6. Medidas físicas de altura da parte aérea, massa fresca total e massa fresca da parte aérea das mudas cultivadas <i>indoor</i> e no viveiro do bloco experimental 1. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).	34
Figura 7 Mudas produzidas em viveiro (a – superior) e <i>indoor</i> (a - inferior), (b.1) a (b.3) alface produzida a partir de mudas do viveiro e (c.1) a (c.3) alface produzida a partir de mudas <i>indoor</i> . Fonte: o autor.	35
Figura 8. Massa fresca média de plantas adultas das mudas produzidas <i>indoor</i> e no viveiro aos 35 dias após o transplante. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).	37
Figura 9. Número médio de folhas das plantas adultas das mudas produzidas <i>indoor</i> e no viveiro. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).	38
Figura 10. Desenvolvimento (17 dias) das plantas adultas no cultivo hidropônico. À esquerda viveiro e à direita, <i>indoor</i> . Fonte: o autor	39
Figura 11. Medidas físicas de altura da parte aérea, da massa fresca total e da massa fresca da parte aérea das mudas cultivadas <i>indoor</i> e no viveiro do bloco experimental 2. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).	40
Figura 12. Mudas produzidas <i>indoor</i> (superior) com 17 dias após a germinação e no viveiro (inferior) com 35 dias após germinação. Fonte: o autor.	41
Figura 13. Níveis de clorofila (SPAD) das mudas produzidas <i>indoor</i> e no viveiro. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).	42
Figura 14. Massa fresca média de plantas adultas das mudas produzidas <i>indoor</i> e no viveiro aos 35 dias após o transplante. (<i>Indoor</i> / C.H.): mudas <i>indoor</i> cultivadas em hidroponia; (Viveiro / C.H.): mudas de viveiro cultivadas em hidroponia. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).	44
Figura 15. Número médio de folhas das plantas adultas das mudas produzidas <i>indoor</i> e no viveiro. (<i>Indoor</i> / C.H.): mudas <i>indoor</i> cultivadas em hidroponia; (Viveiro / C.H.): mudas de viveiro cultivadas em hidroponia. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).	45
Figura 16. Massa fresca média de plantas adultas das mudas produzidas <i>indoor</i> com 24h e 18h de LED. B1: <i>Indoor</i> / LED 24h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25º dia de cultivo. B2: <i>Indoor</i> / LED 18h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 18 horas. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).	46
Figura 17. Número médio de folhas das plantas adultas das mudas produzidas <i>indoor</i> com 24h e 18h de LED. B1: <i>Indoor</i> / LED 24h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 24	

horas a partir do 25 ^o dia de cultivo. B2: <i>Indoor</i> / LED 18h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 18 horas. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).....	48
Figura 18. Níveis de clorofila (SPAD) das plantas adultas originárias das mudas produzidas <i>indoor</i> e no viveiro. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way). Viveiro / C.H.: mudas de viveiro cultivadas em hidroponia; <i>Indoor</i> / C.H.: mudas <i>indoor</i> cultivadas em hidroponia; B1: <i>Indoor</i> / LED 24h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25 ^o dia de cultivo; B2: <i>Indoor</i> / LED 18h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 18 horas.	49
Figura 19. Teores foliares de macronutrientes expressos em g.kg ⁻¹ . Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way). Viveiro / C.H.: mudas de viveiro cultivadas em hidroponia; <i>Indoor</i> / C.H.: mudas <i>indoor</i> cultivadas em hidroponia; B1: <i>Indoor</i> / LED 24h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25 ^o dia de cultivo; B2: <i>Indoor</i> / LED 18h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 18 horas.....	50
Figura 20. Teores foliares de micronutrientes expressos em mg.kg ⁻¹ . Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way). Viveiro / C.H.: mudas de viveiro cultivadas em hidroponia; <i>Indoor</i> / C.H.: mudas <i>indoor</i> cultivadas em hidroponia; B1: <i>Indoor</i> / LED 24h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25 ^o dia de cultivo; B2: <i>Indoor</i> / LED 18h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 18 horas.....	52
Figura 21. Conteúdo de compostos fenólicos em alface crespa cv. Ariel. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way). Viveiro / C.H.: mudas de viveiro cultivadas em hidroponia; <i>Indoor</i> / C.H.: mudas <i>indoor</i> cultivadas em hidroponia; B1: <i>Indoor</i> / LED 24h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25 ^o dia de cultivo; B2: <i>Indoor</i> / LED 18h: ciclo todo <i>indoor</i> com fotoperíodo de 18 horas.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Níveis de garantia dos fertilizantes Plenon Ferti utilizados no sistema de cultivo hidropônico <i>indoor</i>	28
Tabela 2. Composição da solução nutritiva utilizada na produção hidropônica para cultivo de alface em sistema NFT.....	29

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	12
1.1	Erro! Indicador não definido.3
1.1.1	Cultivo Protegido e Hidropônico
1.1.2	16
1.1.3	177
1.1.4	200
1.1.5	211
1.2	233
1.2.1	24
CAPÍTULO 2 – MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1	244
2.1.1	244
2.1.2	255
2.1.3	28
2.2	29
2.2.1	29
2.2.2	3030
2.2.3	30
2.2.4	30
2.3	31
2.3.1	31
2.4	31
2.5	32
2.6	32
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.1	33
3.1.1	33
3.1.2	36
3.2	39
3.2.1	40
3.2.2	43
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES	57
Referências	59

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Estima-se que a população global atingiria cerca de 9,7 a 9,9 bilhões até o ano de 2050. Segundo projeções da Organização das Nações Unidas, se o atual ritmo de consumo continuar, em 2050 o mundo precisará de 60% mais alimentos e 40% mais água (ONU, 2019).

Com o espaço para plantio limitado, uma estratégia para atender a demanda de alimentos é a verticalização da produção em fazendas tecnológicas instaladas próximas aos grandes centros urbanos. Segundo Despommier (2010) uma fazenda vertical do tamanho de um edifício de 30 andares (aproximadamente 100 metros de altura) com uma área de 2,02 hectares seria capaz de produzir uma safra equivalente a 971,2 hectares de cultivo horizontal convencional, ou seja, a produção de uma fazenda vertical seria equivalente a 480 fazendas horizontais convencionais.

Em ambientes urbanos, técnicas avançadas de agricultura, como agricultura vertical, hidroponia e aquaponia, têm se consolidado no mercado como desenvolvimentos tecnológicos promissores. Esses sistemas otimizam eficientemente o uso de recursos pelas plantas, estimulando um crescimento saudável e minimizando desperdícios, além de reduzir a distância que os alimentos percorrem do campo até o consumidor final. Esse encurtamento da cadeia alimentar também contribui para a significativa diminuição das emissões de gases do efeito estufa associadas ao transporte, resultando em uma redução notável das pegadas de carbono (ALKODMANY, 2018).

Outro ponto a ser abordado é o fato de que as tecnologias usadas na agricultura urbana podem ser adaptadas para uso em habitats espaciais ou colônias para cultivar alimentos frescos para os astronautas. Tais inovações podem apoiar ainda mais a produção sustentável de alimentos e a autossuficiência durante missões espaciais de longa duração ou futuros esforços de colonização espacial (NASA, 2021).

Contudo, dentro dessas fazendas verticais, a alta taxa de produtividade e precocidade das plantas são fatores cruciais para manter o negócio competitivo. Nesse contexto, a iluminação artificial como suplementação ou mesmo como substituição completa da luz solar tem trazido grandes avanços na taxa de crescimento das plantas (YAN, et al. 2019). A nova geração de lâmpadas de LEDs emite pequenos intervalos de comprimento de onda, reduz o gasto energético com atividades fotossintéticas da planta e otimiza o fluxo luminoso, atuando diretamente

na produção de clorofila nos cloroplastos e na atividade metabólica de outros nutrientes pela planta (GUPTA, 2017).

O projeto proposto surgiu após consultoria agrônômica ao projeto “Convênio C4 Biotecnologia - Desenvolvimento de tecnologias ópticas para otimização da produção de vegetais”, onde foram trabalhadas as escolhas e proporções de fertilizantes, variedades cultivadas, substratos da fase de muda, temperatura, umidade relativa, fotoperíodo e intensidade luminosa. Identificou que no sistema produtivo *Indoor*, as mudas deveriam ser formadas em espuma e não em substrato vegetal, devido ao fato do mesmo liberar partículas sólidas na solução, podendo causar o entupimento da bomba interrompendo a irrigação e comprometendo a produção.

As mudas saudáveis são a base para o cultivo de hortaliças folhosas, devem ter tamanho e enraizamento adequados e não podem estar doentes ou com pragas. Neste estudo otimizamos a produção de mudas utilizando uma câmara de cultivo hidropônico sob iluminação artificial em comparação às mudas de viveiro utilizadas pelos produtores rurais na região de São Carlos - SP, avaliando o seu desempenho no cultivo hidropônico em casa de vegetação com luz solar. Esse projeto fornece dados que pode otimizar a produção de mudas *indoor* e seu desempenho no campo.

1.1 Fundamentação teórica

1.1.1 Cultivo Protegido e Hidropônico

As mudanças imprevisíveis nas condições de iluminação natural, pode ser insuficiente durante o inverno e fenômenos de variações climáticas levam a rendimentos abaixo do ideal e quebras de safra em muitas partes do mundo. Além disso, a quebra de safra devido a mudanças climáticas imprevisíveis é uma questão de preocupação global. Ameaças como ataques de pragas e doenças agravam ainda mais a incerteza do rendimento das culturas. Para mitigar esta baixa produtividade das culturas, surgiu o conceito de cultivo protegido em estufas e instalações de

produção de culturas em ambiente controlado com iluminação artificial (MPELKAS, 1980).

Com o objetivo global, relativo à produção de alimentos, houve uma onda de desenvolvimento de novas tecnologias de produção agrícola na década de 1990, para otimização da produção em larga escala. Dentre essas melhorias, é possível citar o aprimoramento da irrigação, o desenvolvimento de alimentos transgênicos para redução de perdas de produção, aumento de produtividade, tolerância ou resistência a pragas e doenças, a mecanização da operação e distribuição, assim como tecnologias de cultivo protegido (AMARAL, 2018).

As limitações geoclimáticas da agricultura tradicional e sua dependência de fertilizantes e pesticidas danosos para o meio ambiente e para a saúde humana impulsionaram também os avanços nas técnicas agrícolas de ambiente controlado (AL-KODMANY, 2018). O conceito de agricultura de ambiente controlado em estufas e sistema fechado de produção de plantas surgiu como um meio alternativo confiável e sustentável de produção agrícola.

De acordo com Amaral (2018), o conceito de cultivo protegido ou *indoor*, onde as plantas são cultivadas em ambiente fechado, com temperatura, umidade relativa do ar, fornecimento de água e nutrientes controlados, tem se difundido nos últimos anos, tanto no agronegócio como no meio acadêmico. Com o desenvolvimento e o aprimoramento das tecnologias de produção agrícola nas últimas décadas, os custos desse meio de produção foram reduzidos, atraindo cada vez mais investidores e pesquisadores.

Atualmente a perda da produção agrícola no âmbito mundial chega a cerca de 30%, da colheita à distribuição. Já na produção agrícola *indoor* verticalizada a perda se reduz a menos de 1% (DESPOMMIER, 2010).

Os primeiros vegetais cultivados em fazenda *indoor* na década de 80 incluíam alfaces (GOTO, 2012). A alface também é comumente utilizada como planta modelo em estudos sobre os efeitos da luz em culturas hortícolas (DOUGHER; BUGBEE, 2001). Além disso, segundo Boros et al. (2023), a alface é uma das culturas mais importantes em produções com iluminação artificial devido ao seu pequeno tamanho, taxa de crescimento rápido, baixa demanda de energia e importância de mercado.

As fontes de luz artificial podem ser usadas como suplementação luminosa para aumentar a luz solar insuficiente no sistema de produção aberto ou em estufa,

principalmente no outono e inverno (KOBORI et al. 2022). Já na produção de culturas e/ou transplantes no sistema de produção fechado a iluminação artificial atua como única fonte de luz. A cultura de plantas em ambientes controlados, com fontes de luz facilmente disponíveis comercialmente os diodos emissores de luz (LEDs), as quais fornecem um nível estável de energia radiante com alto fluxo de fótons fotossintéticos e um espectro próximo ao da luz solar ou variando em funções de necessidades específicas, já é uma realidade para muito centros urbanos (AMARAL, 2018).

Segundo Fuzinato; Junior (2019), a agricultura urbana ou, em inglês, *urban farming*, é definida como toda e qualquer atividade de cultivo intensivo de alimentos realizada em ambientes urbanos, geralmente em áreas ociosas, podendo ser tanto horizontais quanto verticais, interna ou externamente. Trata-se de um tema emergente no campo do agronegócio e cada vez mais presente em discussões governamentais e acadêmicas ressaltando a busca por uma alimentação de maior qualidade. É uma atividade de fácil ingresso e altamente adaptável, não estabelecendo barreiras de entrada. Além disso, o desenvolvimento de novas formas de inserção e prática em diferentes modalidades de negócio, conferem não só a geração de emprego, renda e segurança alimentar, mas também uma nutrição de qualidade, educação alimentar, conservação ambiental, entre outros.

De acordo com Al-Kodmany, K. (2016), a fazenda vertical pode fornecer preços competitivos de alimentos, isto devido ao aumento crescente das despesas da agricultura tradicional, o que vem diminuindo rapidamente a diferença de custos. A instalação em localizações estratégicas em áreas urbanas possibilita vender produtos diretamente para o consumidor, reduzindo os custos de transporte e removendo os intermediários, o que, segundo o autor, podem constituir em redução de até 60% dos custos.

A produtividade das fazendas verticais pode aumentar exponencialmente devido às tecnologias avançadas e métodos intensivos de agricultura utilizados, como por exemplo a iluminação artificial por meio do LED. A agricultura *indoor* pode oferecer um ambiente mais saudável de cultivo, uma vez que opera o ano todo sem interferências climáticas, além de proporcionar maiores rendimentos e renda contínua. É um sistema de cultivo de baixo impacto, que reduz significativamente os custos de transporte bem como as emissões de gases do efeito estufa, reduzindo as longas distâncias entre as fazendas e o mercado local (DESPOMMIER, 2010).

Dentro da agricultura *indoor*, a hidroponia é caracterizada pelo cultivo de plantas sem solo e em solução nutritiva, gerando um produto diferenciado, com boa aceitação e qualidade superior (COSTA; JUNQUEIRA, 2000). De acordo com Commeti e Genuncio (2019) a hidroponia proporciona maior produtividade, melhor eficiência no uso de água e fertilizantes e reduz o uso de defensivos químicos quando comparada ao cultivo convencional. Além disso, pelo fato de a planta ser colhida com raiz, o consumidor leva a planta viva para casa, aumentando consideravelmente a pós-colheita e diminuindo as perdas nos pontos de venda (COMETTI; GENUNCIO, 2019).

A alface se destaca no cenário nacional de cultivos em hidroponia, sendo responsável por aproximadamente 80% da produção agrícola brasileira desse sistema (ALVES et al., 2011), em específico o sistema hidropônica NFT (*nutrient film technique*) ou fluxo laminar de nutrientes, onde tem-se um reservatório de solução nutritiva, sistema de bombeamento, canais de cultivo e retorno ao reservatório, a solução nutritiva é bombeada aos canais e escoada por gravidade formando uma fina lâmina de solução que irriga as raízes (FURLANI et al., 1999).

1.1.2 Light-Emitting Diode (LED)

A era da iluminação elétrica artificial começou com o desenvolvimento da lâmpada incandescente projetada por Thomas Edison em 1879. Contudo, os modelos propostos eram muito caros para aplicação comercial e tinham vida útil muito curta (GUPTA, 2017).

Foi apenas na primeira parte do século XX que as lâmpadas incandescentes à base de tungstênio foram desenvolvidas. As lâmpadas de descarga de gás (lâmpadas fluorescentes), foram fabricadas pela primeira vez por Heinrich Geissler em 1857 usando vários gases nobres em um tubo de arco elétrico (GUPTA, 2017). Esse tipo de lâmpada era amplamente utilizado em aplicações de crescimento de plantas devido à sua razoável eficiência energética e vida útil (MPELKAS, 1980).

De acordo com Gupta (2017), os LEDs comerciais compreendem um chip semicondutor alojado dentro de uma lente de epóxi ou plástico, com fios de conexão para direcionar a corrente elétrica. O LED *dual in-line package* (DIP) (Figura 1a) tem

tido o projeto de LED mais comumente utilizado. Os recém-desenvolvidos LEDs de alta potência (Figura 1b) produzem maior luminosidade devido ao maior fluxo de corrente do que os DIP-LEDs.

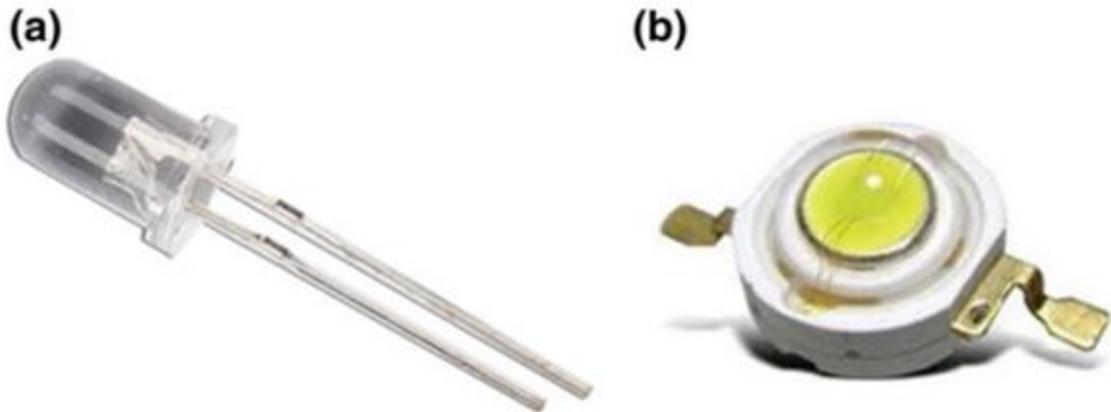


Figura 1. DIP-LEDs (a) e LEDs de alta potência (b).

Fonte: GUPTA (2017).

1.1.3 LED na agricultura

A radiação solar é a principal fonte de energia que sustenta a vida na Terra. A distribuição espectral da radiação solar tem uma ampla faixa de onda, variando de 300 a 1000 nm. No entanto, apenas 50% (de 400 a 700 nm) está disponível para as plantas como radiação fotossinteticamente ativa. Os fotorreceptores especializados presentes nas folhas das plantas capturam os fótons e convertem a energia radiante do sol em energia química após o processo de fotossíntese. O processo utiliza a luz absorvida pela clorofila *a* (662 nm) e *b* (642 nm) para síntese dos pigmentos fotossintéticos mais importantes para a planta, como pode ser observado na Figura 2 abaixo (GUPTA, 2017).

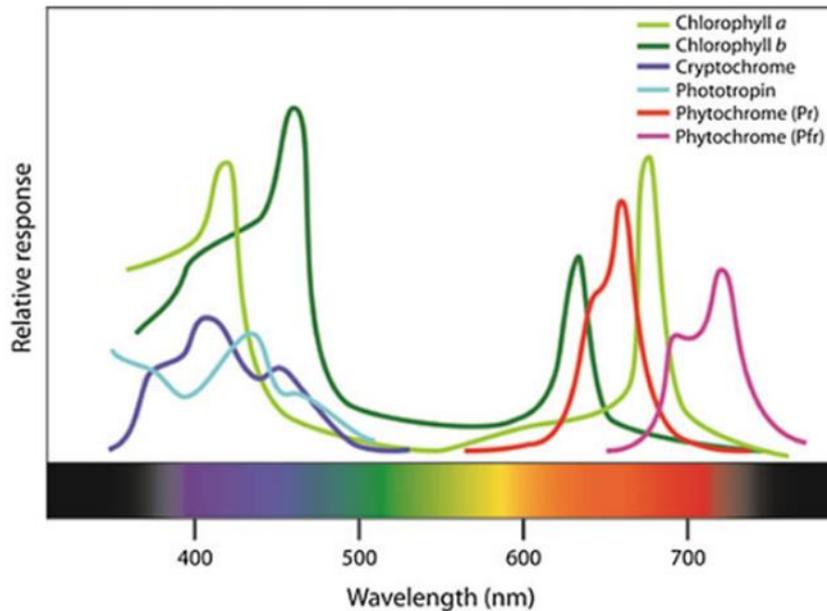


Figura 2. Utilização de comprimentos de onda para a fotossíntese (clorofilas) e fotomorfogênese (fitocromo, criptocromo e fototropina)
Fonte: GUPTA (2017).

A fotomorfogênese, fotoperiodismo e o fototropismo também são significativamente influenciados pelas condições de luz ambiente, segundo Gupta (2017). A fotomorfogênese inclui a diferenciação de células, tecidos e órgãos e depende da radiação do vermelho distante na faixa de 730 a 735 nm, enquanto o fotoperiodismo se refere à capacidade das plantas de sentir e responder às mudanças nas durações relativas do dia e da noite (na presença ou na ausência de luz, ou fotoperíodo). O movimento de crescimento das plantas em direção à sua fonte de luz é denominado fototropismo e é desencadeado pela luz nos comprimentos de onda de 400 a 500 nm (GUPTA, 2017).

As fontes de iluminação artificial e a luz solar produzem diferentes comprimentos de onda conforme demonstrado na Figura 3. As lâmpadas incandescentes produzem um espectro de emissão contínuo com altas proporções de fótons nas faixas de infravermelho e vermelho, já as lâmpadas fluorescentes produzem um espectro visível com picos próximos a 400-450 nm (azul-violeta), 540-560 nm (verde-amarelo) e 620-630 nm (vermelho-alaranjado), resultando na cor branca. Já os LEDs são fontes de luz monocromáticos, ou seja, emitem um comprimento de onda específico, o qual é determinado pelos elementos contidos no

chip, possibilitando assim a emissão de um comprimento de onda específico que se aproxima do pico de absorção dos fotorreceptores conhecidos (GUPTA, 2017).

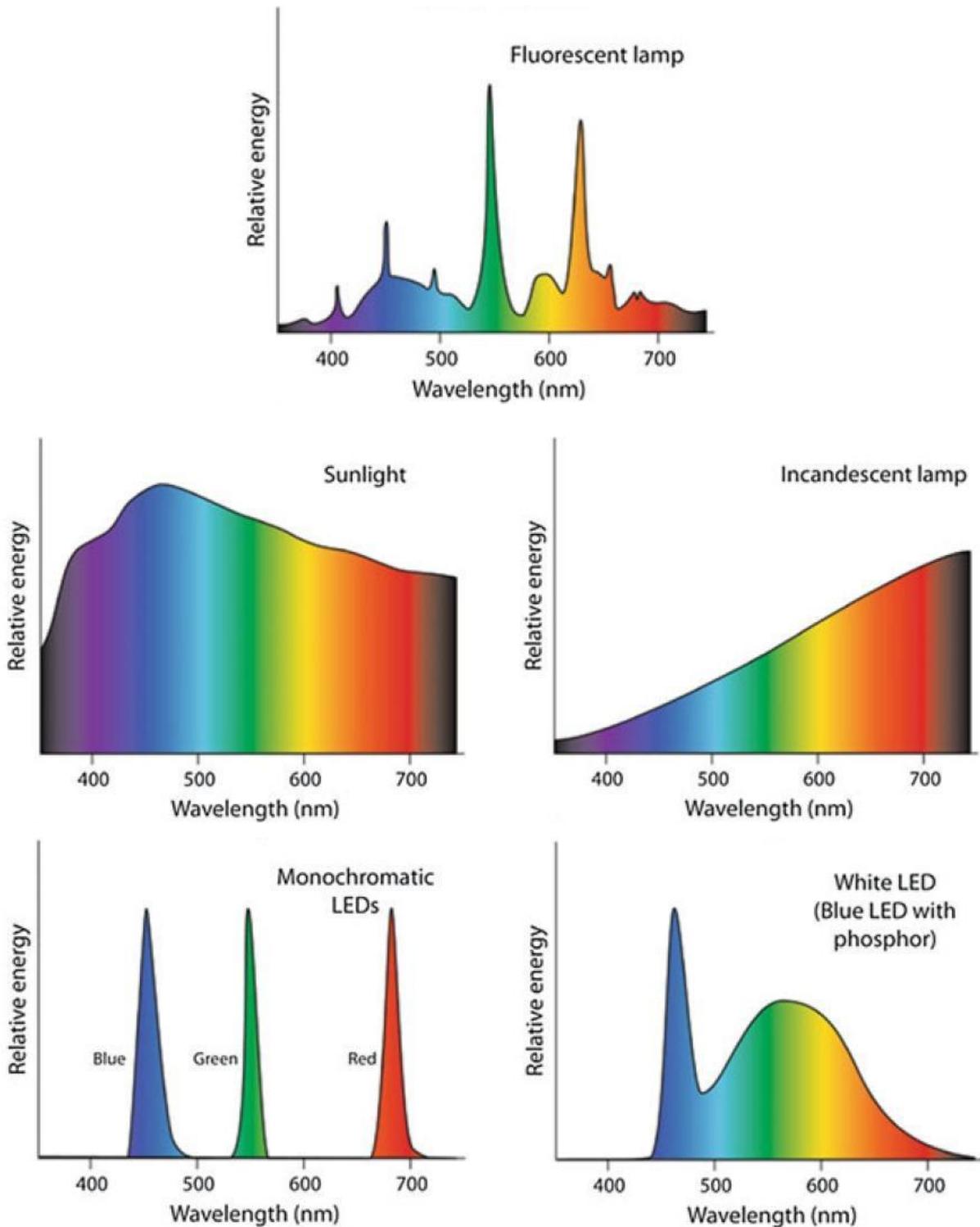


Figura 3. Qualidade espectral de diferentes fontes de luz.
Fonte: GUPTA (2017)

De acordo com Wong et al. (2020), o desenvolvimento da tecnologia de iluminação por LED permite uma flexibilidade de modificações dos espectros de luz, possibilitando a pesquisa e aplicação da luz para melhorar a qualidade das plantas em ambiente controlado em termos de crescimento, cor, sabor e nutrientes. Os efeitos dos espectros de LED no crescimento, desenvolvimento e metabolismo de vegetais folhosos têm sido intensamente estudados, especialmente em alface.

Segundo Kozai (2018), o consumo de eletricidade e, portanto, seu custo relacionado à produção *indoor*, tem diminuído entre 30 a 40% com o uso de LED (diodo emissor de luz) em comparação com o uso de lâmpadas fluorescentes. Além disso, o custo da geração de energia elétrica a partir de fontes naturais, como solar, eólica e biomassa, vem diminuindo ano a ano. Nesse contexto, a agricultura *indoor* com aplicação de LED, surge como um sistema de produção de plantas de alto rendimento que economiza recursos, além de ser sustentável e viável para áreas urbanas.

1.1.4 Cultura da alface

A alface (*Lactuca sativa* L.) da família Asteraceae, é uma hortaliça folhosa consumida principalmente na forma *in natura*. Além disso, contém boas quantidades de fibras, vitaminas A, B1, B2, B6 e C e possui baixo valor calórico. A cultura é largamente difundida no Brasil, sendo considerada a hortaliça folhosa mais consumida no país, destacando-se como cultura de grande importância econômica e alimentar (RESENDE et al., 2003). Seu cultivo é intensivo e o tipo predominante no Brasil é do grupo *crespa*, liderando 70% do mercado. As do grupo *americana* e *lisa* detêm 15 e 10%, respectivamente, enquanto outras (*vermelha*, *mimosa*, *romana*) correspondem a 5% do mercado (COSTA; SALA, 2012).

O clima é uma condição fundamental para a produção da alface. Espécie de clima temperado, a alface possui folhas e cabeça de qualidade quando as temperaturas de cultivo se situam entre 12 e 22°C. Temperaturas superiores levam ao pendoamento precoce, além disso, a alta pluviosidade favorece o ataque por fungos e bactérias devido à maior umidade relativa (SALA, 2011).

1.1.5 Estado da arte

A agricultura urbana, caracterizada pelo cultivo de culturas em áreas densamente povoadas, está ganhando força como uma solução sustentável para enfrentar os desafios da produção de alimentos em ambientes urbanos. Um aspecto fundamental da agricultura urbana é a implementação de sistemas de iluminação eficientes para apoiar o crescimento das plantas e otimizar a produção agrícola. Nos últimos anos, a tecnologia LED surgiu como uma solução de iluminação promissora para fazendas urbanas, oferecendo inúmeros benefícios em relação aos sistemas de iluminação tradicionais (ZHANG et al., 2021).

Diversas contribuições científicas evidenciam o benefício da iluminação artificial no cultivo hidropônico. De acordo com o estudo de Li e Kubota (2009), os resultados demonstraram que a luz suplementar de comprimentos de onda específicos pode ser estrategicamente usada para aumentar o valor nutricional e o crescimento da alface baby leaf cultivada sob luz branca, a suplementação de azul ou UV-A. Os resultados demonstram que a suplementação fotônica pode aumentar o acúmulo de antocianinas. Além disso, a suplementação de azul também aumentou a concentração de carotenoides, suplementação de vermelho aumentou a concentração de fenólicos. Por outro lado, a suplementação de luz vermelha distante pode aumentar a biomassa, mas resultar em concentrações fitoquímicas mais baixas.

Takasu et al. (2019) estudaram como a irradiação alternada acelera o crescimento da alface, o melhor tratamento foi com 21 horas com LED vermelho e 3 horas com LED azul, ambos com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de $100 \mu\text{mol m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, um tempo mais longo de irradiação de luz vermelha foi eficaz, mas uma pequena quantidade de irradiação de luz azul foi absolutamente necessária.

Kim et al. (2004) explorou a influência da suplementação de luz verde para aumento do crescimento de alface cultivada sob LEDs vermelhos e azuis, demonstrando que a adição de 24% de luz verde aos LEDs vermelho e azul melhorou o crescimento da alface em comparação com as plantas cultivadas sob lâmpadas fluorescentes brancas frias.

Grzegorzewska et al. (2023), cultivaram diversas variedades de alface romana em sistema hidropônico com iluminação artificial, utilizando LEDs vermelho (660 nm), verde (560 nm) e azul (440 nm) na proporção 70:18:12. Nesse trabalho, foi feita a

variação da densidade de fluxo fotossintético entre 160 e 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, não havendo diferenças significativas no crescimento das plantas cultivadas nas diferentes condições.

Liu, J., & Liu, W. (2022) variaram a razão de LEDs vermelho e azul e mediram os teores de amido e sacarose em duas cores de alface. Os resultados mostram que um espectro com baixos teores de luz azul favorece o crescimento da planta, o acúmulo de amido, sucrose e aumenta a atividade metabólica enzimática.

Chen et al. (2014) estudaram o efeito combinado de LEDs vermelho (R) e azul(B) com lâmpadas fluorescentes (FL) no cultivo de alface da variedade green oak leaf. As principais conclusões, dos autores foram que a combinação FLR tem efeito principal no desenvolvimento das mudas com aumento da taxa de crescimento e diminuição do ciclo de cultivo. Já a combinação FLB tem influência principalmente no estágio de maturação da planta. Além disso, a combinação FLR e FLB, resultou em maiores conversões de biomassa do que as lâmpadas monocromáticas aplicadas sozinhas.

Chen et al. (2017) estudaram o efeito do intervalo de exposição à iluminação artificial a LEDs vermelho e azul no crescimento e propriedades nutricionais de alfaces durante cultivo hidropônico. Os autores observaram que a variação no fotoperíodo 8 horas de vermelho e 8 horas de azul totalizando no fotoperíodo de 16h, resultou em maior crescimento geral da planta (número de folhas, tamanho de folhas e massa fresca).

Pennisi et al, (2020) avaliaram uma combinação de LEDs vermelhos e azuis na proporção 3:1 para o crescimento de alface focando eficiência energética e redução do consumo de água no sistema hidropônico e observaram que um fluxo de fótons fotossintéticos de 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ parece adequado para otimizar o rendimento e a eficiência no uso de recursos na iluminação com LEDs vermelhos e azuis para o cultivo *indoor* de alface.

Yan et al, (2019) variaram a intensidade de fluxo fotossintético, o fotoperíodo e uma vasta combinação de comprimentos de onda no cultivo hidropônico de mudas de alface. Os autores demonstraram que a intensidade de luz, o fotoperíodo e a qualidade da luz na fase de plântula afetaram não apenas o crescimento e a morfologia das plântulas, mas também afetaram o rendimento e a qualidade da alface. Com base na qualidade das mudas e seu posterior crescimento e valores nutricionais,

o PPFD (densidade de fluxos fotossintéticos) a $200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ com fotoperíodo de 16 h fornecido por LEDs com relação vermelho e azul de 2:2 foi recomendado para produção de mudas de alface hidropônica em ambiente controlado.

A pesquisa conduzida por Zhang et al. (2021) focou nos efeitos de diferentes espectros de iluminação fornecidos por LEDs no crescimento e acúmulo de nitrato em alface cultivada em sistema hidropônico, abordando o potencial da iluminação LED para mitigar as preocupações relacionadas ao nitrato.

Devido à complexidade das células vegetais e a sua interação com a luz, ainda não há um consenso sobre os melhores parâmetros de qualidade da luz, intensidade fotossintética e fotoperíodo para cultivo hidropônico de alfaces sob iluminação artificial. Embora grandes avanços surgiram nos últimos anos sobre os efeitos da iluminação artificial na horticultura e no benefício da combinação de LEDs vermelho, azul, verde e branco para a bioestimulação, produção mais eficiente e de maior valor nutricional sob diferentes espectros luminosos, a literatura ainda carece de trabalhos avaliando o desempenho a campo (cultivo convencional, hidropônico, orgânico e aquaponia) e viabilidade econômica da produção de mudas de alface em ambiente controlado sob iluminação artificial.

1.2 Objetivo geral

O presente trabalho avaliou o efeito da utilização de iluminação artificial com leds vermelhos, azuis e brancos no tempo de cultivo e características nutricionais de mudas e plantas adultas de alface (*Lactuca sativa* L.). Para isso foram utilizados dois sistemas de cultivo: o cultivo *indoor* (com iluminação artificial) e o cultivo hidropônico em casa de vegetação. Mudas comerciais foram comparadas com mudas cultivadas *indoor* sob iluminação artificial em função do tempo para atingir a altura mínima para transplante. Na hidroponia as mudas de origem *indoor* e comercial foram acompanhadas até atingirem a fase adulta, sendo avaliadas ao final do período produtivo.

1.2.1 Objetivos específicos

- Analisar comparativamente o crescimento das mudas de alface crespa de viveiro e cultivadas *indoor*;
- Avaliar o crescimento de ambas as categorias de mudas (viveiro e *indoor*) no sistema de cultivo hidropônico em casa de vegetação;
- Avaliar o crescimento das mudas cultivadas *indoor* até a fase adulta;
- Caracterizar a fase de muda e fase adulta por meio de análises agronômicas;
- Avaliar o teor de compostos fenólicos e minerais.

CAPÍTULO 2 – MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Bloco experimental 1: Produção de mudas de alface crespa *indoor*, avaliando o comportamento em sistema hidropônico convencional

2.1.1 Germinação e Produção de Mudas de Alface Crespa em Viveiro

A produção de mudas de alface crespa foi realizada entre os meses de maio e julho de 2021 nas instalações da empresa produtora de mudas (viveiro) IBS Mudanças, localizada em Piracicaba - SP, registrada no Registro Nacional de Sementes e Mudanças (Renase SP-15775/2016).

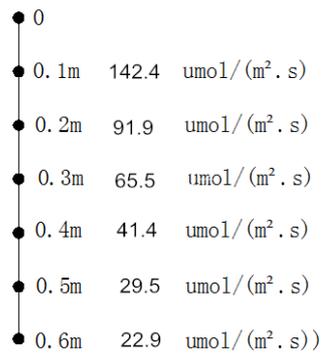
Para o início do cultivo foram utilizadas bandejas de polietileno de 200 células e a semeadura foi realizada com sementes peletizadas de alface (*Lactuca sativa* L.) cv. Ariel (Horticeres®), onde cada célula recebeu uma semente. Na formação das mudas, foi utilizado substrato à base de turfa, fibra de coco e vermiculita e a bandeja foi umedecida e mantida protegida da luz, com umidade relativa de 80% e temperatura de 25°C por 24 horas. Após a germinação, a bandeja foi transferida para casa de vegetação (estufa agrícola) com estrutura metálica galvanizada, 100m de comprimento, 10 de largura e pé direito de 4m, coberta com filme plástico difusor de 150µm e as laterais protegidas com tela antiafídeo.

A irrigação foi feita quatro vezes ao dia e fertirrigação três vezes por semana, utilizando formulado NPK 6-12-36 e nitrato de cálcio, iniciando com condutividade elétrica de 0,8 mS/cm, elevando 0,2 mS/cm por semana até 1,5 mS/cm. Esses parâmetros foram construídos de forma experimental, visando a maior produtividade do sistema. Tanto a irrigação como a fertirrigação foram feitas por aspersão em sistema de barras móveis. As mudas foram mantidas em ambiente protegido por 43 dias após a germinação (DAG), tempo até as mudas atingirem padrão comercial aceitável. Houve aplicação de 4 defensivos químicos (fungicidas e inseticidas), sendo uma aplicação por semana.

2.1.2 Germinação e Produção de Mudanças *Indoor*

A germinação e produção de mudas *indoor* foram feitas utilizando bandejas de cultivo hidropônico de mudas, na estufa *Keisue Hydroponic Plants Growing Vertical Farm KES 2.0*, fabricado pela empresa Shenzhen Keisue Technology Co. Ltd, Longgang Shenzhen China. A produção de mudas foi realizada no laboratório de Biofotônica Ambiental do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo em São Carlos - SP, entre os meses de maio e junho de 2021, simultaneamente à produção de mudas no viveiro.

A semeadura foi realizada com sementes peletizadas de alface (*Lactuca sativa* L.) cv. Ariel (Horticeres®) em placa de espuma fenólica úmida com dimensões de 2x2x2cm por célula, onde cada célula recebeu uma semente. Inicialmente a placa de espuma fenólica com 200 sementes foi mantida no escuro por 24 horas na estufa *indoor* com temperatura de 25°C e umidade relativa do ar em 80% e após esse período a iluminação artificial e fertirrigação foram ligadas. Utilizou-se uma placa de LED *Keisue Full Spectrum LED Grow Light KES-GL-001* na proporção vermelho 660nm/azul 440nm/branco quente de 4:1:1 com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de 142,4 $\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, à 10 cm de distância da espuma, segundo especificações do fabricante (Figura 4).



● 0			
● 0.1m	142.4	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	
● 0.2m	91.9	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	
● 0.3m	65.5	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	
● 0.4m	41.4	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	
● 0.5m	29.5	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	
● 0.6m	22.9	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	

Figura 4. Densidade de fluxo de fótons fotossintéticos em função da distância da placa metro (m).
Fonte: KEISUE: <https://www.keisue.com/product/1.html>.

A Figura 5 mostra o *setup* experimental utilizado para produção de mudas *indoor*. Na figura 5.a é observado a estufa utilizada. A seta indica o painel de ajustes do equipamento, que é responsável pelo controle de umidade, temperatura, fotoperíodo e tempo de irrigação. A porta da estufa é de material transparente e possui borracha para fechamento hermético, proporcionando as condições ideais para a observação das plantas sem necessidade de abertura e mantendo os parâmetros controlados e estáveis durante todo o período de produção de mudas até o momento do transplante das mudas para a hidroponia em casa de vegetação.



Figura 5. Estufa de crescimento vegetativo *indoor*; b) mudas com 7 DAG; c) mudas com 19 DAG; d) Enraizamento com 27 DAG; e) bandeja 1 com fotoperíodo de 24h; f) bandeja 2 com fotoperíodo de 18h.

A fertirrigação foi utilizada, com solução nutritiva comercial para cultivo de alface Ferti PM3 e Ferti PM4 da empresa Plenar® com adição de 0,25 g de ferro quelatado Keliron 6 da marca Biolchim® por 12,5L de solução nutritiva. A condutividade elétrica começou em 0,8mS/cm na primeira semana, aumentando 0,2mS/cm por semana até 1,5mS/cm na quarta semana, sugerida pelo produtor de mudas comerciais. O volume de água e os fertilizantes foram ajustados 3 vezes por semana. Detalhes da composição da solução nutritiva estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Níveis de garantia dos fertilizantes Plenar Ferti utilizados no sistema de cultivo hidropônico *indoor*.

Níveis de Garantia	PM3 (g/L)	PM4 (g/L)
Nitrogênio (N)	25,20	66,94
Fósforo (P20)	36,65	-
Potássio (K20)	89,20	6,90
Enxofre (S)	29,26	0,038
Magnésio (Mg)	22,32	-
Cálcio (Ca)	-	50,43
Molibdênio (Mo)	-	0,038
Boro (B)	-	0,1905
Cobre (Cu)	-	0,1778
Ferro (Fe)	-	0,74
Manganês (Mn)	-	0,1778
Zinco (Zn)	-	0,076
Níquel (Ni)	-	0,0635

O fotoperíodo foi de 18 horas e a fertirrigação foi realizada por 1 minuto a cada 6 horas. As mudas permaneceram na estufa *indoor* por 27 dias, tempo para atingir o máximo crescimento em função do espaço vertical. Não houve aplicação de defensivos agrícolas nesta etapa.

2.1.3 Produção Hidropônica em Casa de Vegetação

As mudas (*indoor* com 27 DAG e viveiro com 43 DAG) foram transplantadas ao mesmo tempo para o sistema de produção hidropônica NFT (*Nutrient Film Technique*), em casa de vegetação, coberta com filme plástico difusor de 150 µm e tela termo refletora com bloqueio de 35% de luz na Vida Verde Hidroponia, empresa de produção e comércio de hortaliças localizada na cidade de São Carlos - SP. O cultivo foi realizado entre os meses de julho e agosto de 2021.

Ao total foram transplantadas 100 mudas de cada categoria (viveiro e *indoor*), com espaçamento de 12,5cm entre plantas e 20cm entre linhas. As plantas foram irrigadas com solução nutritiva de alface, com adição de 20 g de ferro quelatado e 20g de micronutrientes por 1000L de solução, irrigando a cada 15 minutos e permanecendo por 15 minutos sem irrigação durante o dia e a cada 15 minutos,

permanecendo três horas desligada à noite. Detalhes da composição da solução hidropônica estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Composição adaptada da solução nutritiva utilizada na produção hidropônica para cultivo de alface em sistema NFT.

Fertilizante	g/1000L
Nitrato de cálcio	750
Nitrato de potássio	500
Fosfato monoamônico	150
Sulfato de magnésio	400
Micronutrientes Dripsol micro	20
Ferro Keliron 6	20

Fonte: Furnali et al. (1999).

A condutividade elétrica da solução nutritiva foi mantida em 1,5 mS/cm. O volume de água e nutrientes foram ajustados diariamente. No 15º dia de cultivo, a solução foi descartada e refeita, um procedimento padrão para evitar a contaminação. A colheita foi realizada no 35º dia de plantio.

2.2 Bloco experimental 2: Comparação do desenvolvimento das mudas de alface produzidas *indoor* e no campo; e das plantas adultas em sistema hidropônico convencional e *indoor* com iluminação artificial

2.2.1 Germinação e Produção de Mudas em Viveiro

A produção de mudas em viveiro para a comparação do desenvolvimento das mudas de alface produzidas *indoor* e no campo do bloco experimental 2 foi realizada seguindo o procedimento citado no item 2.1.1, entre os meses de novembro e dezembro de 2021. As mudas permaneceram em ambiente protegido por 35 dias, tempo para atingirem o padrão comercial.

2.2.2 Germinação e Produção de Mudanças *Indoor*

A produção de mudas *indoor* para a comparação do desenvolvimento das mudas de alface produzidas *indoor* e no campo bloco experimental 2 seguiu o mesmo procedimento citado no item 2.1.2, entre os meses de novembro e dezembro de 2021. As mudas permaneceram em estufa *indoor* por 17 dias, tempo para atingirem padrão comercial semelhante às mudas de viveiro. Não houve aplicação de defensivos agrícolas.

2.2.3 Produção Hidropônica em Cultivo em casa de vegetação

A produção hidropônica em cultivo protegido para o bloco experimental 2 seguiu conforme citado no item 2.1.3. O cultivo foi realizado entre os meses de novembro e dezembro de 2021. A colheita foi realizada no 18º dia de plantio, ao final do dia.

2.2.4 Produção Hidropônica *Indoor*

O transplante das mudas comerciais e cultivadas *indoor* foi realizado simultaneamente, onde houve o transplante para os andares superiores da estufa *indoor*, onde na bandeja 2 (B2) (Figura 2. f) o fotoperíodo de 18h foi mantido até o final do ciclo e na bandeja 1 (B1) (Figura 2. e) o fotoperíodo foi de 18 horas até a penúltima semana e na última semana o fotoperíodo foi alterado para 24 horas, ou seja, a placa ficou ligada do 8º dia até o final do experimento.

As placas de iluminação utilizadas foram iguais à placa utilizada na fase 1 (produção de mudas), a umidade relativa do ar foi mantida em 80% e temperatura 22°C. A condutividade elétrica da solução nutritiva foi mantida em 1,5 mS/cm, o nível de água e condutividade foram ajustadas três vezes por semana. A colheita foi realizada no 18º dia de cultivo, quando as plantas atingiram o tamanho máximo em função do espaço disponível.

2.3 Avaliação Agronômica

Os parâmetros avaliados para a formação de mudas (*indoor* e viveiro) foram altura da parte aérea (cm), massa fresca total (g) e massa fresca da parte aérea, utilizando 10 mudas de cada tipo. Para a produção hidropônica, foram avaliados massa fresca da planta inteira, da parte aérea, comercial (eliminando folhas inaptas para consumo), raiz e do caule, de 4 plantas originadas de mudas *indoor* e 4 plantas originadas de mudas do viveiro. Todas as medidas de massa foram realizadas utilizando balança analítica (marca BEL modelo HPBG2285Di). As amostras foram escolhidas aleatoriamente e sempre desprezando as bordaduras.

2.3.1 Índice de Clorofila Total

O conteúdo do índice de clorofila total das mudas foi avaliado de forma indireta, através do valor SPAD, utilizando o clorofilômetro SPAD-502 (Minolta Corp, Ramsey, NJ, EUA). Foram avaliadas 10 mudas de cada tipo de cultivo (*indoor* e viveiro) e 4 plantas adultas de cada tratamento (led/hidroponia, campo/hidroponia, B1 24h e B2 18h) medindo o teor em 4 folhas por planta, no terço mais externo da folha.

2.4 Análises de compostos fenólicos

A quantificação de compostos fenólicos foi realizada de forma destrutiva, a partir do extrato das mudas. O extrato foi preparado com 250 mg de amostra liofilizada diluída em 10 mL de metanol e água (MeOH/água (70:30 v/v) centrifugada a 4400 rpm por 20 minutos e filtrada à vácuo (NICOLLE et al. 2004).

Para a extração (1 mL) foi colocada em um tubo de ensaio e diluída com 10 mL de água destilada. O reagente Folin Ciocalteu (Sigma) (1,5 mL) foi então adicionado e incubado à temperatura ambiente por 5 min. 4 mL de Bicarbonato de sódio (Na₂CO₃) 20% (p/p) foram adicionados, ajustados com água destilada até 35 mL, agitados e deixados por 30 min em temperatura ambiente. A absorbância da

amostra foi medida a 765 nm, contra um branco, ou seja, água destilada (MADAAN et al. 2011) em espectrofotômetro Varian Cary 50 Bio UV-Vis.

2.5 Análise de Minerais

A análise de tecido vegetal completa (N - P - K - Ca - Mg - S - B - Cu - Fe - Mn - Zn) foi realizada no laboratório de tecidos vegetais da Athenas Agrícola (Jaboticabal - SP). As amostras foram liofilizadas, homogeneizadas e encaminhadas para análise.

A análise foi realizada seguindo a metodologia proposta por Malavolta et al. (1997):

- Nitrogênio (N): Semi-micro-Kjeldahl;
- Fósforo (P): Colorimetria do metavanadato (fósforo total);
- Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn): Espectrofotometria de absorção atômica;
- Enxofre (S): Turbidimetria do sulfato de bário;
- Boro (B): Colorimetria da azometina H.

2.6 Análises Estatística

Os resultados apresentados referem-se a média e desvio padrão dos dados obtidos. Na estatística inferencial, foi aplicado o teste ANOVA one-way para dados normalmente distribuídos. O teste de normalidade aplicado foi Tukey com nível de significância de 5%. O programa estatístico utilizado foi Minitab 17 Statistical Software. Para as análises na fase de mudas das plantas, foram utilizadas 10 plantas e para análises na fase de produção hidropônica foram utilizadas 4 plantas.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produção de mudas de alface crespa *indoor*, avaliando o comportamento em sistema hidropônico convencional

3.1.1 Avaliação das Mudas

A Figura 6 mostra os valores médios das medidas físicas de altura da parte aérea (cm), massa fresca total (g) e massa fresca da parte aérea (g) para as mudas cultivadas *indoor* e no viveiro. É observado uma grande disparidade nas alturas da parte aérea entre as plantas cultivadas nas diferentes condições. As mudas de viveiro, embora tenham tido um tempo significativamente maior de desenvolvimento (43 dias), alcançaram uma altura máxima média de 4,2 cm, enquanto as mudas *indoor* alcançaram uma altura média de 14 cm em 27 dias. Ou seja, as mudas de cultivo *indoor* alcançaram uma altura média 3 vezes maior do que as mudas de cultivo em viveiro, mesmo tendo um ciclo produtivo menor (16 dias de diferença). Isso resultou em uma massa fresca média superior para as mudas dessa categoria em relação às mudas de viveiro (9 g contra 6,1 g). Mesmo contabilizando somente a parte superior da muda (massa fresca da parte aérea), as mudas formadas *indoor* ainda apresentaram uma massa significativamente maior.

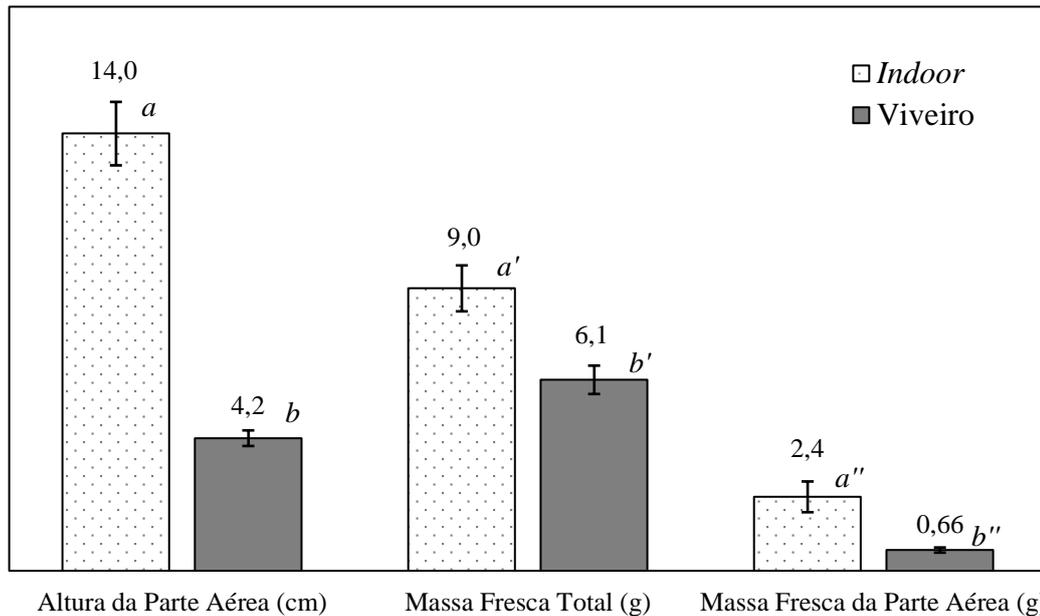


Figura 6. Medidas físicas de altura da parte aérea, massa fresca total e massa fresca da parte aérea das mudas cultivadas *indoor* e no viveiro do bloco experimental 1. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).

O sucesso de uma produção agrícola tem dependência forte na qualidade das mudas, pois mudas malformadas produzirão plantas inferiores ao seu potencial genético (Trani et al., 2004). Segundo Nascimento e Pereira (2016), o momento ideal para transplante de mudas de alface é de 21 a 28 dias após o semeio, com altura de 4 a 5 cm, porém em condições de baixa temperatura e quando se utilizam bandejas com menor volume de substrato por célula, pode ocorrer atraso no momento ideal de transplante, conforme foi observado para mudas produzidas no viveiro.

A sequência da Figura 7 (a) ilustra o aspecto físico das mudas produzidas no viveiro e *indoor*. Na parte superior são observadas as 10 mudas produzidas em viveiro e na parte inferior da Figura 7 (a) as mudas produzidas *indoor*. Na análise comparativa visual dos resultados, é observado a confirmação, com maior desenvolvimento das mudas cultivadas *indoor*.

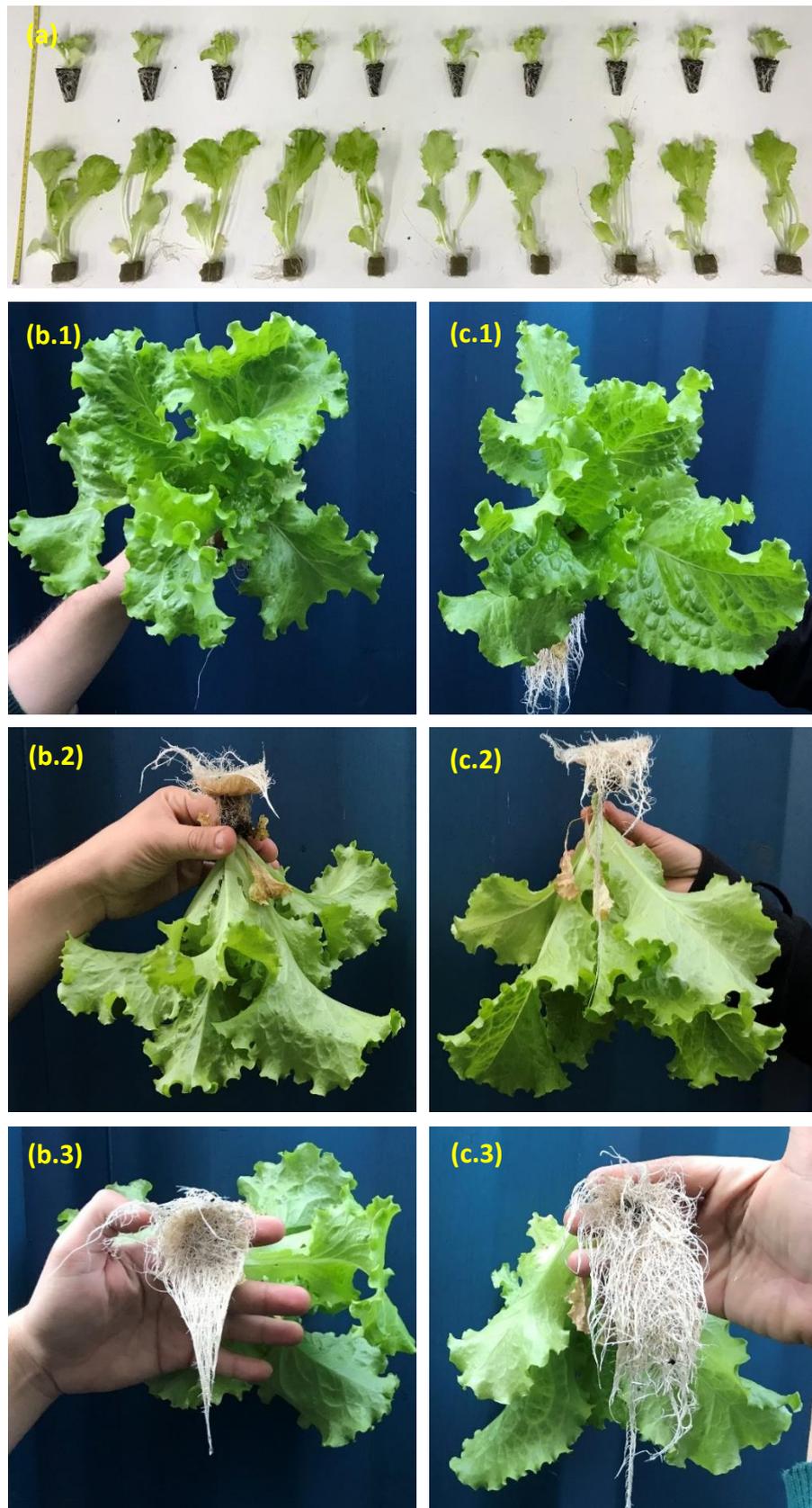


Figura 7 Mudanças produzidas em viveiro (a – superior) e *indoor* (a - inferior), (b.1) a (b.3) alface produzida a partir de mudas do viveiro e (c.1) a (c.3) alface produzida a partir de mudas *indoor*. Fonte: o autor.

3.1.2 Avaliação das Plantas Adultas

A sequência das Figuras 7 (b.1), (b.2) e (b.3) mostra as plantas desenvolvidas a partir das mudas de viveiro, cultivada na hidroponia. As Figuras 7 (c.1), (c.2) e (c.3) mostram o mesmo cenário para plantas desenvolvidas a partir de mudas *indoor* também transplantadas para cultivo hidropônico. Aparentemente não há diferenças no aspecto visual entre as duas amostragens, entretanto as plantas provenientes do cultivo *indoor* apresentam maior enraizamento quando comparamos as Figuras (b.3) e (c.3). Vale ressaltar que quando não há um bom enraizamento, o estresse climático e o número de falhas na produção será muito maior (Nascimento e Pereira, 2016)

A Figura 8 demonstra a massa fresca média das plantas adultas, produzidas a partir das mudas *indoor* e viveiro. Em ambos os casos as mudas foram transplantadas e o desenvolvimento se deu em cultivo hidropônico (C.H), durante o período de 35 dias. A massa fresca média foi segmentada em cinco categorias, sendo elas planta inteira, sem raiz, comercial, raiz e caule. Em todas as categorias, a massa média apresentada pelas plantas provenientes das mudas produzidas *indoor* é maior, havendo diferença significativa, com exceção da massa da raiz. Para massa fresca da parte aérea (sem raiz), as alfaces cultivadas com mudas *indoor* alcançaram média de 104 g por planta (31% maior) e as do viveiro, 79,3 g por planta.

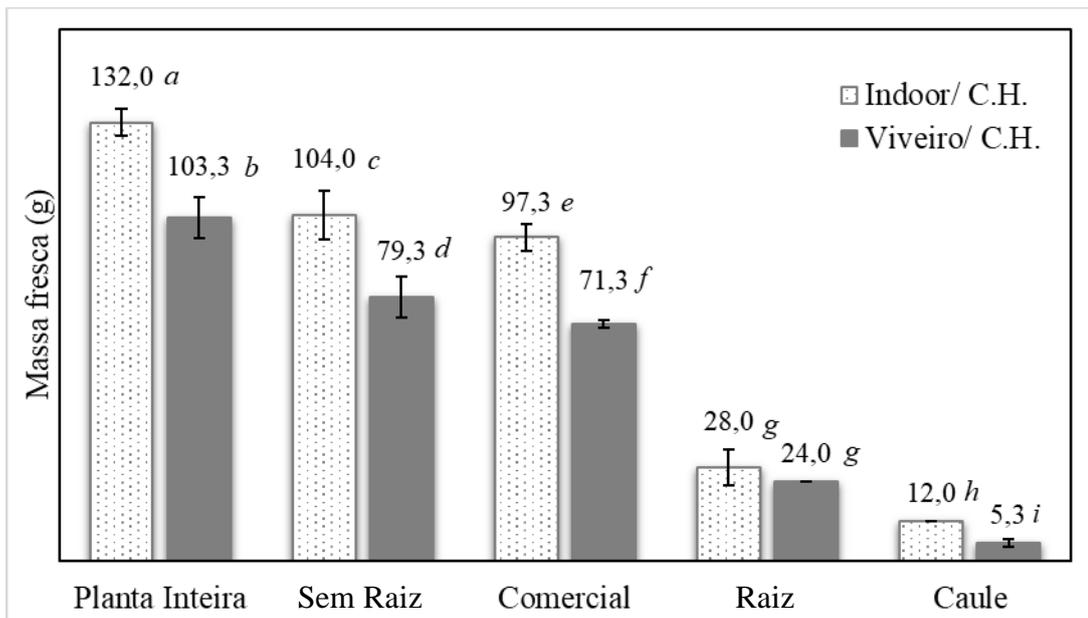


Figura 8. Massa fresca média de plantas adultas das mudas produzidas *indoor* e no viveiro aos 35 dias após o transplante. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).

Lima (2017) ao comparar volumes de substratos na produção de alface, reportou uma massa fresca média da parte aérea de 246 g 29 dias após o transplante, porém com espaçamento maior de 25 cm entre plantas e 30 cm entre linhas, atingindo uma produtividade de 3,28kg/m². Fazendo o mesmo cálculo de produtividade pela área, as plantas originadas de mudas *indoor*, atingiram uma produtividade de 4,16kg/m² e do viveiro, 3,17kg/m². Portanto, nas condições de produção de mudas de alface crespa *indoor* e hidropônico convencional, as plantas *indoor* foram 31,2% mais produtivas quando comparado às mudas provenientes do viveiro e 26,8% maior quando comparada à referência citada.

Ainda com relação da Figura 8, a massa fresca comercial está diretamente relacionada com a decisão de compra final. Uma planta de massa comercial maior (nesse caso em média 36% maior), tende a ser mais vistosa, de aspecto visual mais atraente e com maior valor agregado para o produtor. Com relação as massas das raízes e dos caules, observa-se que a massa das raízes permaneceu semelhante para plantas adultas de mudas produzidas *indoor* e no viveiro, observada pela sobreposição de desvios - padrão. Entretanto, a massa fresca média do caule da planta *indoor* foi de 2,26 vezes maior em relação a planta de viveiro.

Na Figura 9 é apresentado o número médio de folhas (total, maior que 15 cm e menor que 15 cm) das duas categorias analisadas. A planta adulta proveniente da muda *indoor* apresenta um número de folhas e é estatisticamente maior no número

total de folhas e nas maiores que 15cm, corroborando o que foi afirmado acima sobre o maior desenvolvimento dessa amostra.

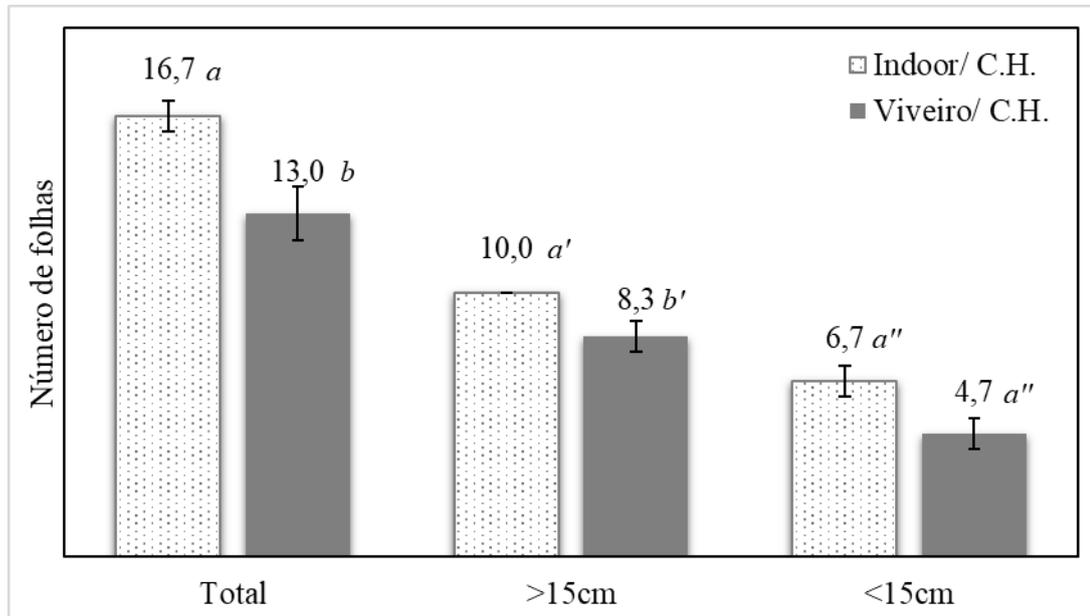


Figura 9. Número médio de folhas das plantas adultas das mudas produzidas *indoor* e no viveiro. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).

Tal dado ainda na Figura 10, pode ser observar visualmente, à esquerda são apresentadas as plantas adultas produzidas a partir de mudas de viveiro e à direita as plantas adultas produzidas a partir de mudas *indoor*. Nesse caso, o maior desenvolvimento da planta *indoor* pode ser observado pela ausência de espaços entre as linhas de cultivo, corroborando os resultados da média das massas frescas avalias.



Figura 10. Desenvolvimento (17 dias) das plantas adultas no cultivo hidropônico. À esquerda viveiro e à direita, *indoor*. Fonte: o autor

3.2 Bloco experimental 2: Comparação do desenvolvimento das mudas de alface produzidas *indoor* e no campo; e das plantas adultas em sistema hidropônico convencional e *indoor* com iluminação artificial

A comparação do desenvolvimento das mudas de alface produzidas *indoor* e no campo, e as plantas adultas em sistema hidropônico convencional e *indoor* com iluminação artificial foi realizado na primavera/verão, com a finalidade de diminuir a disparidade entre o desenvolvimento das mudas cultivadas no viveiro e *indoor*, visando uma maior uniformidade das amostras para o cultivo hidropônico. A muda *indoor* permaneceu na estufa por 17 dias e a muda de viveiro permaneceu por 35 dias na casa de vegetação. Em paralelo foi avaliado o comportamento de alfaces produzidas totalmente no cultivo *indoor*, ou seja, amostras produzidas sob iluminação artificial em ambiente controlado.

3.2.1 Avaliação das Mudanças

A Figura 11 mostra os dados de altura de parte aérea, massa fresca total e massa fresca da parte aérea das mudas cultivadas *indoor* e no viveiro para o segundo experimento. Ao contrário do experimento 1, as mudas *indoor* do experimento 2 foram colhidas com 17 dias, ou seja, 10 dias a menos do que no primeiro cenário estudado. Em termos de altura a muda *indoor* ainda se destaca, com um comprimento médio de 9,6 cm contra 5,2 cm apresentado pelas mudas de viveiro.

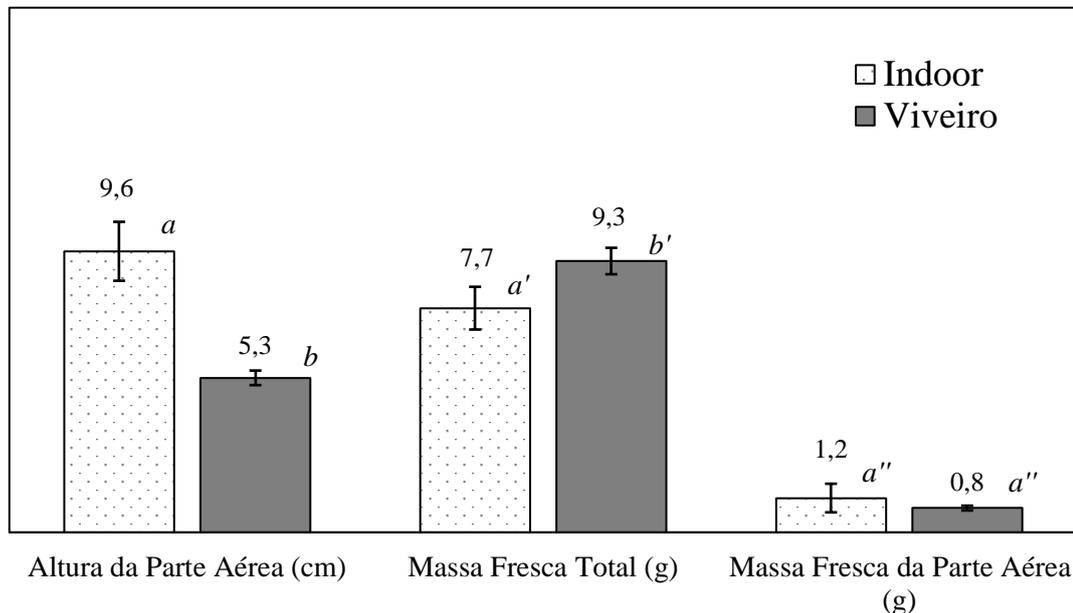


Figura 11. Medidas físicas de altura da parte aérea, da massa fresca total e da massa fresca da parte aérea das mudas cultivadas *indoor* e no viveiro do bloco experimental 2. Letras minúsculas referem-se aos agrupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).

Yan et al. (2019), produziram mudas de alface do tipo friseé com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com fotoperíodo de 16 horas e relação LED vermelho/azul de 2:2, e o resultado atingido foi de 7,7 cm de altura da muda, 20 dias após a germinação. Outros autores Frąszczak e Kula-Maximenko (2021), ao produzirem mudas de alface crespa (*cv. Aleppo*) obtiveram a melhor média de altura da parte aérea, 10 cm, utilizando apenas LED branco, com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de $170 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e fotoperíodo de 16 horas. Porém, ao aumentarem a densidade de fluxo de fótons fotossintéticos para $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

após a inclusão do LED azul, a altura média da parte aérea foi menor, atingindo 9,5 cm e ainda menor com a inclusão do LED vermelho junto ao branco, atingindo média de 6,9 cm.

A muda de viveiro apresentou uma massa fresca total significativamente maior, 9,3 g contra 7,7 g apresentado pela muda *indoor*. Ambas as categorias apresentam massa fresca da parte aérea bem próximas, sem variação significativa, sendo 0,8 g para muda de viveiro e 1,2 g para muda *indoor*, com volume de célula de 8 cm³. Lima (2017) ao estudar produção de mudas de alface crespa cultivadas em viveiro, utilizando bandeja com 10 cm³ por célula, atingiu mudas com massa fresca da parte aérea de 0,95 g, 40 dias após a germinação.

A Figura 12 mostra o conjunto de mudas *indoor*, na parte superior e as mudas de viveiro na parte inferior.



Figura 12. Mudanças produzidas *indoor* (superior) com 17 dias após a germinação e no viveiro (inferior) com 35 dias após germinação. Fonte: o autor.

A Figura 13 apresenta os níveis de clorofila na escala SPAD, para as mudas cultivadas em viveiro e *indoor*. É observado que o índice SPAD da muda *indoor* é significativamente maior do que o mensurado para a muda de viveiro (15,4 contra 11, um valor 28,5% maior). A clorofila é o pigmento responsável pela fotossíntese e está diretamente relacionada a captação de luz para o desenvolvimento da planta. As mudas *indoor* foram foto estimuladas com uma combinação de leds vermelho, azul e branco quente, sendo que os led azul e vermelho emitem na faixa de comprimento de onda e 440 nm e 660 nm, respectivamente. Tais comprimentos de onda são os picos máximos de absorção para a clorofila *a* e *b*, como pode ser observado na Figura 2.

Uma hipótese que pode explicar essa disparidade nos índices de clorofila é o maior desenvolvido inicial da muda *indoor*, em função dos comprimentos de onda e do fotoperíodo de 18h, fatores que levaram a uma maior robustez (maior massa da parte aérea e maior altura) e que pode ter influenciado os índices de clorofila medidos.

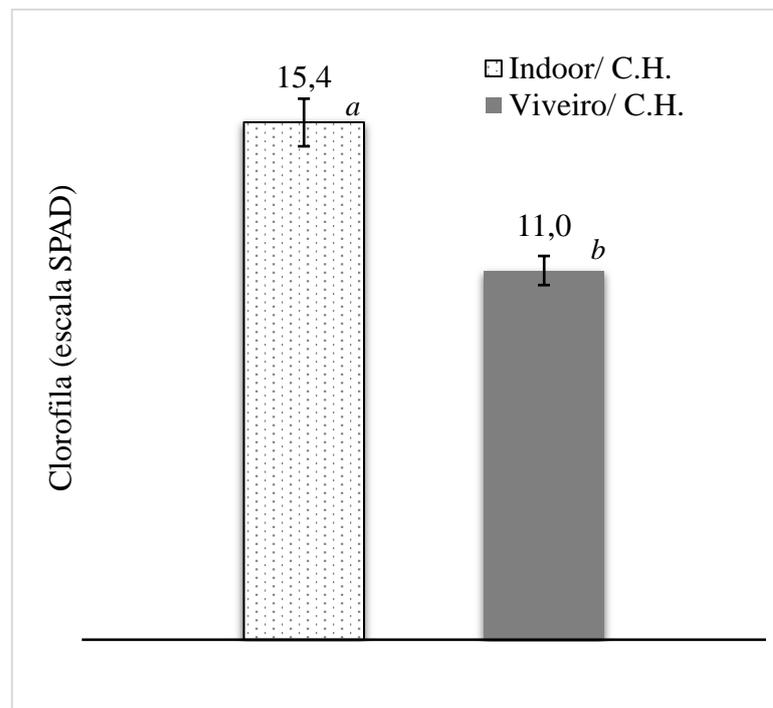


Figura 13. Níveis de clorofila (SPAD) das mudas produzidas *indoor* e no viveiro. Letras minúsculas referem-se aos agrupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).

Frańczczak e Kula-Maximenko (2021) ao estudarem as preferências de diferentes cultivares de mudas de alface aos 30 dias após a germinação em função da composição espectral da luz, com fotoperíodo de 16 horas e densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de $170 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para LEDs brancos e $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ quando acrescido os LEDs vermelhos ou azuis, alcançaram conteúdo relativo de clorofila (SPAD) de 5,6 (LED branco), 5,0 (LED branco + vermelho) e 3,5 (LED branco + azul) na alface crespa (cv. Aleppo). Tais valores foram inferiores aos encontrados nesse trabalho, pois apesar da menor intensidade luminosa, o fotoperíodo de 18 horas foi o suficiente para trazer altos valores do conteúdo relativo de clorofila (SPAD) à cultivar de alface crespa estudada nesse trabalho.

Por outro lado, as mesmas autoras citadas (Frańczczak e Kula-Maximenko, 2021) avaliaram alface romana (cv. *Quintus*) e alcançaram valores maiores de

conteúdo relativo de clorofila (SPAD) ao combinarem LED branco + vermelho (12,0) e branco + azul (11,5), evidenciando que cada cultivar de alface, seja do mesmo tipo ou não, responde de maneira diferente aos estímulos fotônicos.

3.2.2 Avaliação das Plantas Adultas

A Figura 14 apresenta a massa fresca das plantas adultas cultivadas em hidroponia (C.H.) a partir das mudas *indoor* (*Indoor/* C.H.) e das mudas de viveiro (Viveiro/ C.H.). É observado que no conjunto de dados de massa fresca da planta inteira e da planta sem raiz não há variação significativa entre as amostras, fato importante pois validou a eficiência das mudas *indoor* transplantadas para hidroponia em casa de vegetação, eliminando o uso de defensivos químicos na fase de muda. Houve diferença significativa apenas na massa fresca da raiz, que pode ser explicado pelo estresse climático que as mudas *indoor* sofreram após o transplântio para o cultivo hidropônico, além do menor enraizamento inicial devido ao pouco tempo de crescimento (17 dias) e do fato das raízes se entrelaçarem (Figura 5.d) e romperem quando realizada a separação das mudas. Esse problema pode ser solucionado facilmente individualizando as mudas e realizando aclimação prévia ao transplântio.

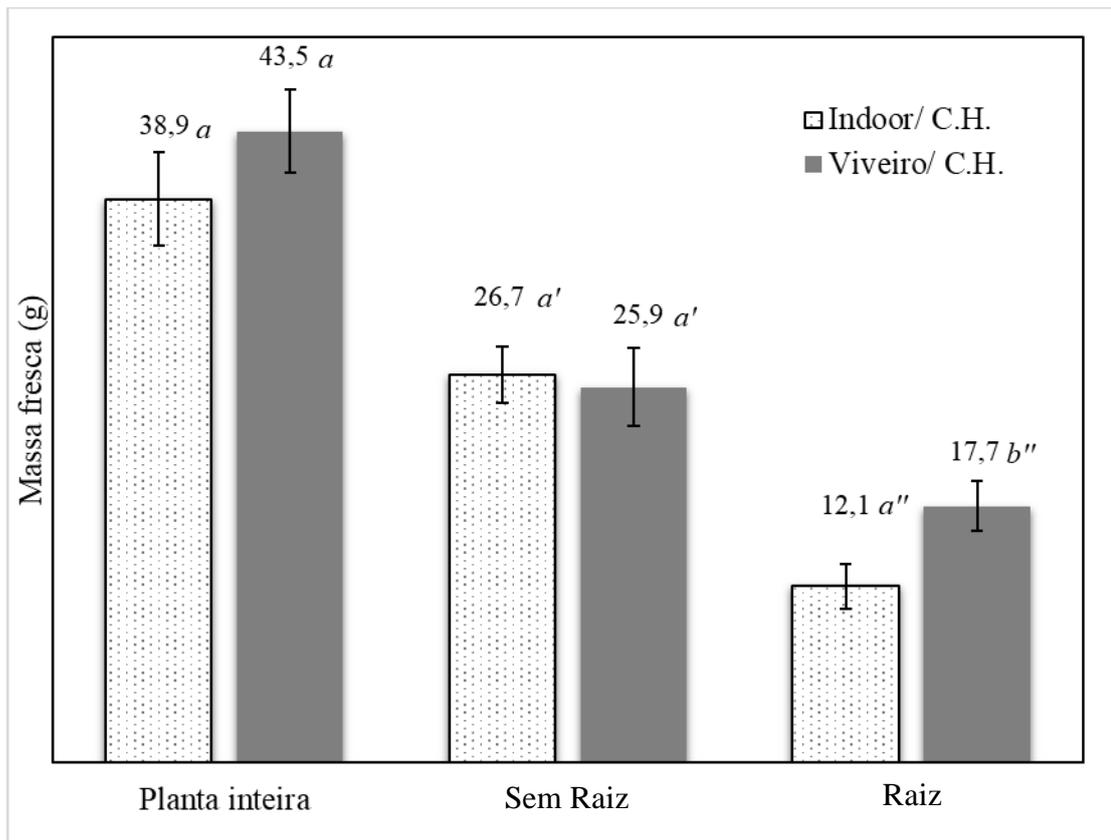


Figura 14. Massa fresca média de plantas adultas das mudas produzidas *indoor* e no viveiro aos 35 dias após o transplante. (*Indoor/ C.H.*): mudas *indoor* cultivadas em hidroponia; (*Viveiro/ C.H.*): mudas de viveiro cultivadas em hidroponia. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).

Soares et al. (2020) avaliaram alface hidropônica em duas épocas de semeio, no período chuvoso (mesmo período avaliado neste experimento) cultivaram alface crespa *cv. Vera* e o resultado de massa fresca da parte aérea atingiu o valor de 74,4 g no período de 49 dias após germinação com espaçamento de 25 x 30 cm, e, portanto, ocupando uma área de 0,075 m² por planta. Ao comparar com os resultados obtidos neste experimento, em que o espaçamento utilizado foi de 12,5 x 20 cm, isto é, 0,025 m² por planta, pode-se observar que é possível produzir 3 plantas numa mesma área. Sendo assim, os valores de massa fresca da parte aérea seriam similares (*indoor/C.H.*: 80,1 g e *viveiro/C.H.*: 77,7 g).

Na Figura 15 é apresentado o número médio de folhas por planta para ambas as amostras estudadas. A planta adulta proveniente das mudas *indoor* apresentou uma média total de folhas superior quando comparado com as plantas originárias de

mudas de viveiro, havendo diferença estatística. Para as folhas maiores e menores que 15 cm, não houve diferença significativa.

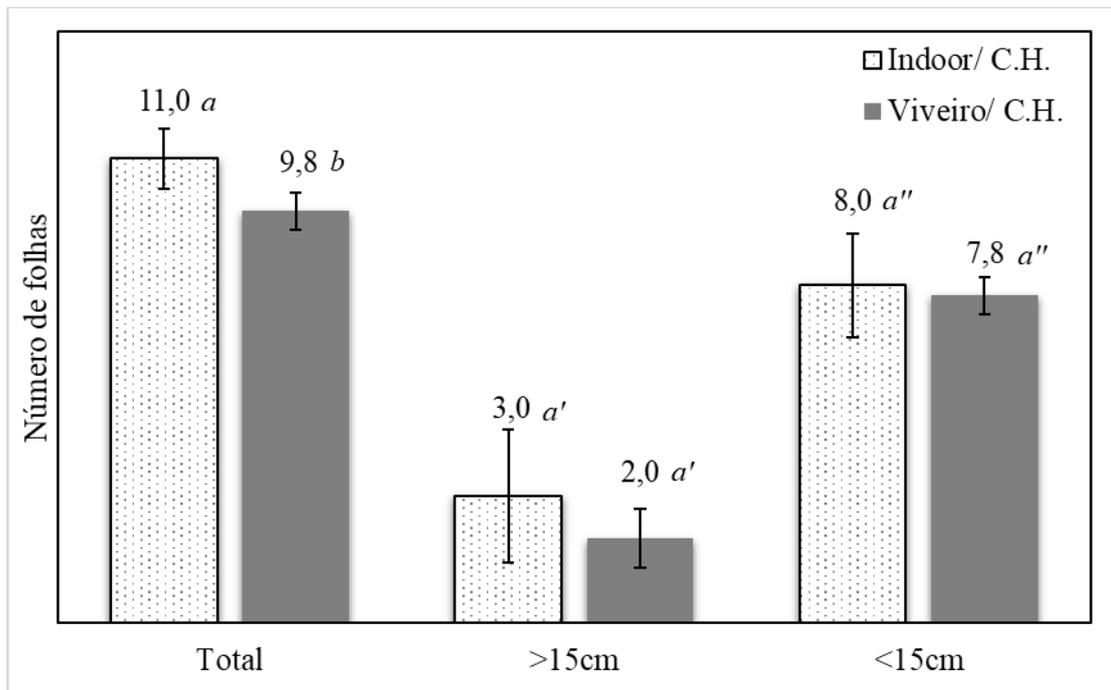


Figura 15. Número médio de folhas das plantas adultas das mudas produzidas *indoor* e no viveiro. (*Indoor* / C.H.): mudas *indoor* cultivadas em hidroponia; (*Viveiro* / C.H.): mudas de viveiro cultivadas em hidroponia. Letras minúsculas referem-se aos agrupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).

Vale ressaltar que no bloco experimental 2 as plantas adultas foram colhidas com 18 dias, enquanto no bloco experimental 1 foram colhidas com 35 dias, portanto um tempo menor para o desenvolvimento, o que justifica os menores valores globais de massa fresca em relação ao primeiro experimento.

Nas avaliações de Soares et al. (2020), a alface crespa *cv. Vera* atingiu um número médio de folhas de 16,3 por planta em um período de 49 dias. Pode-se concluir que o valor superior encontrado neste estudo diz respeito ao maior espaçamento utilizado e tempo de cultivo.

A Figura 16 apresenta os valores médios de massa fresca da planta inteira, da planta sem raiz e só da raiz para plantas provenientes de mudas *indoor* que foram mantidas no cultivo com LED durante os 35 dias do experimento (17 dias de muda e 18 dias de planta adulta).

É observado que, embora as amostras da bandeja 1 (B1) submetidas ao fotoperíodo de 24 horas na última semana apresentaram valores de massa fresca

média de planta inteira (54,7 g), da planta sem raiz (41,1 g) e da raiz (13,6 g) superiores às amostras da bandeja 2 (B2) de 18 horas de fotoperíodo durante todo o ciclo, apenas a massa média das raízes apresentou diferença significativa. As plantas desenvolvidas na condição (*indoor/led 24h*) apresentaram uma massa fresca média próxima a 55 g por planta quando levando em consideração a massa total, e próximo a 42 g por planta, levando em conta somente a massa da planta sem raiz. Essas foram as maiores médias registrada para o segundo experimento, ou seja, os valores foram superiores tanto aos valores das mudas *indoor* desenvolvidas no cultivo hidropônico quanto das mudas de viveiro cultivadas também em hidropônica. Isso valida a hipótese de que houve estresse climático afetando o desenvolvimento das mudas *indoor* transplantadas uma vez que as mudas que permaneceram no cultivo *indoor* tiveram desenvolvimento superior às que foram transplantadas para a casa de vegetação.

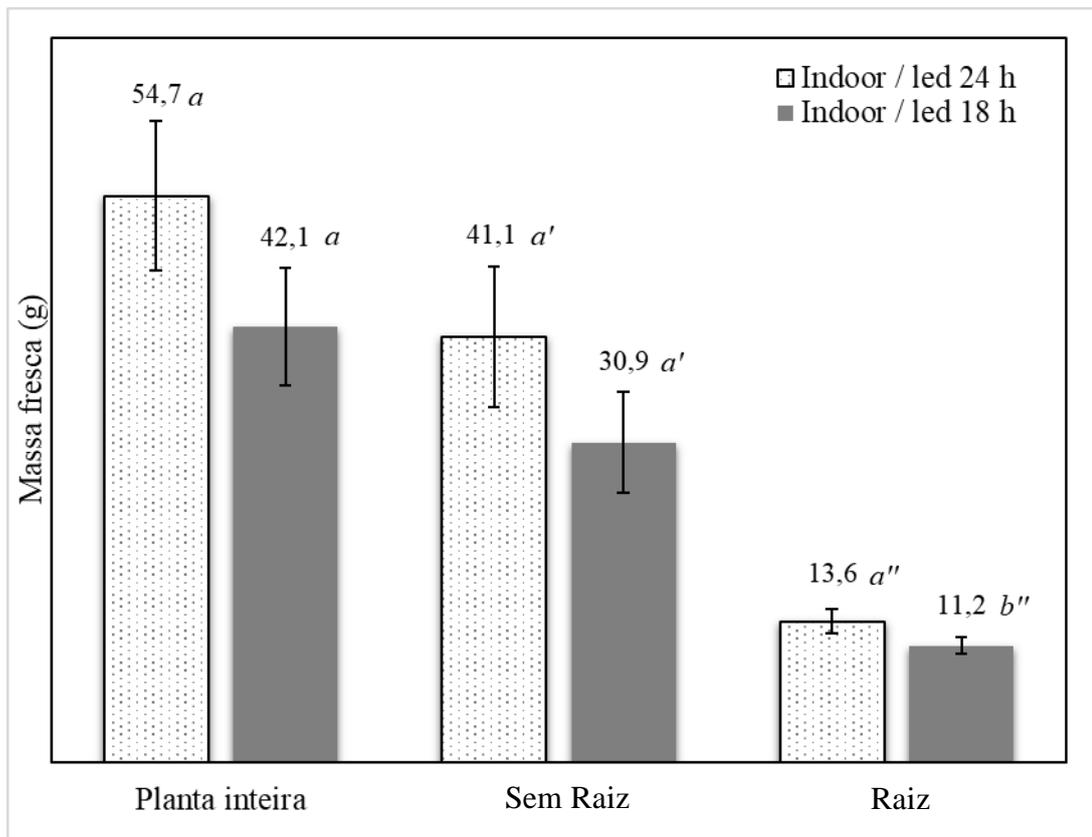


Figura 16. Massa fresca média de plantas adultas das mudas produzidas *indoor* com 24h e 18h de LED. B1: *Indoor* / LED 24h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25º dia de cultivo. B2: *Indoor* / LED 18h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 18 horas. Letras minúsculas referem-se aos agrupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).

Segundo Shein et al. (2014), a alface pode crescer e se desenvolver normalmente sem um período de escuro, sugerindo que um tempo de iluminação de 24 horas é viável para alface, aumentando o rendimento com melhor qualidade nutricional. Por outro lado, Silva et al. (2022) a maior eficiência energética para produção de biomassa de alface foi observada entre 12 e 18 horas de fotoperíodo e menor entre 22 e 24h de fotoperíodo, evidenciando que não há um consenso quanto ao melhor fotoperíodo para alface.

Lu et al. (2019) ao estudarem como os espectros dos LEDs brancos afetam o peso fresco de alface cultivada sob iluminação artificial, com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, condutividade elétrica de 1,8 mS/cm e fotoperíodo de 16 horas por 12 dias na fase de muda, elevando para $200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ após o transplante com condutividade elétrica de 2,4 mS/cm e fotoperíodo de 14 horas por 23 dias, atingiram média de massa fresca da parte aérea de 57,7 g por planta utilizando LEDs vermelhos (75%) e azuis (25%). Porém, ao produzirem utilizando apenas LEDs brancos atingiram média de 97,9 g por planta com a justificativa de que a presença de certa quantidade de luz verde e vermelho distante ajuda no crescimento das plantas, espectros contidos nos LEDs brancos utilizados. O maior valor de massa fresca obtida se justifica pela maior intensidade luminosa e maior condutividade elétrica utilizadas pelos autores.

Park et al. (2012) produziram alface crespa roxa utilizando LEDs vermelhos, azuis e brancos na proporção 8:1:1, com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de $140 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, condutividade elétrica de 1,5 mS/cm e fotoperíodo de 12 horas por 46 dias, atingiram valores médios de massa fresca da parte aérea de apenas 26,4 g por planta e 5,65 g por planta de massa fresca da raiz.

Com relação ao número total de folhas, não houve diferença significativa entre as amostras, conforme é observado na Figura 17. Ambas as amostras submetidas a diferentes condições de iluminação apresentaram uma média de 12 folhas por planta, sendo metade dessas folhas menores do que 15 cm e metade maior.

Embora as plantas apresentem números totais de folhas similares nota-se uma diferença considerável com relação as folhas maiores do que 15 cm. Viršilė et al. (2019) ao variarem a densidade de fluxo de fótons fotossintéticos, fixando o fotoperíodo em 18 horas por 27 dias com $300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, atingiram o valor médio de número de folhas de 6. Esse resultado foi inferior ao encontrado no presente trabalho.

Ou seja, sob as condições de suplementação fotônica realizadas no presente trabalho, o desenvolvimento das plantas foi melhor.

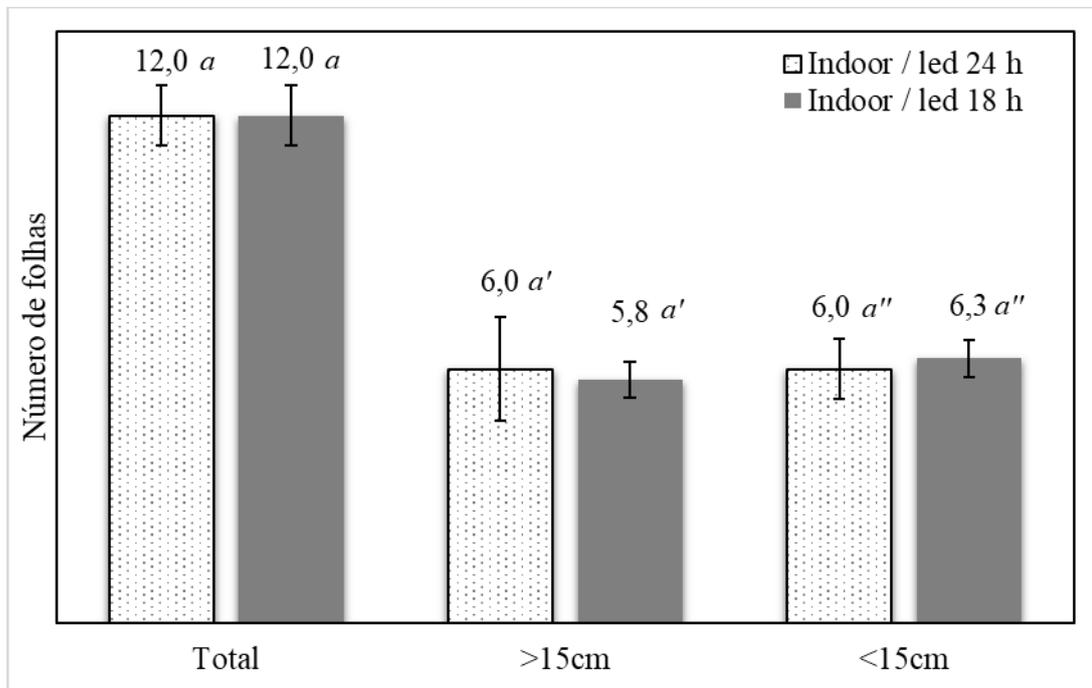


Figura 17. Número médio de folhas das plantas adultas das mudas produzidas *indoor* com 24h e 18h de LED. B1: *Indoor* / LED 24h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25º dia de cultivo. B2: *Indoor* / LED 18h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 18 horas. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way).

A Figura 18 apresenta os valores médios de clorofila (escala SPAD) para todo o conjunto de amostras estudado no bloco experimental 2. Os valores encontram-se entre 20 e 23, com destaque para a amostra (*indoor*/C.H) que apresentou um índice de clorofila maior que as demais amostras. Vale ressaltar que as plantas mantidas no cultivo em led (*indoor*/ led 18 h) e (*indoor*/ led 24 h) apresentaram valores similares de clorofila aos obtidos para as plantas que foram transplantadas para o cultivo hidropônico, um indicativo de que a fotoestimulação nos comprimentos de onda azul (440 nm) e vermelho (660 nm) foram efetivas não só para o desenvolvimento físico, mas também para o desenvolvimento bioquímico das plantas.

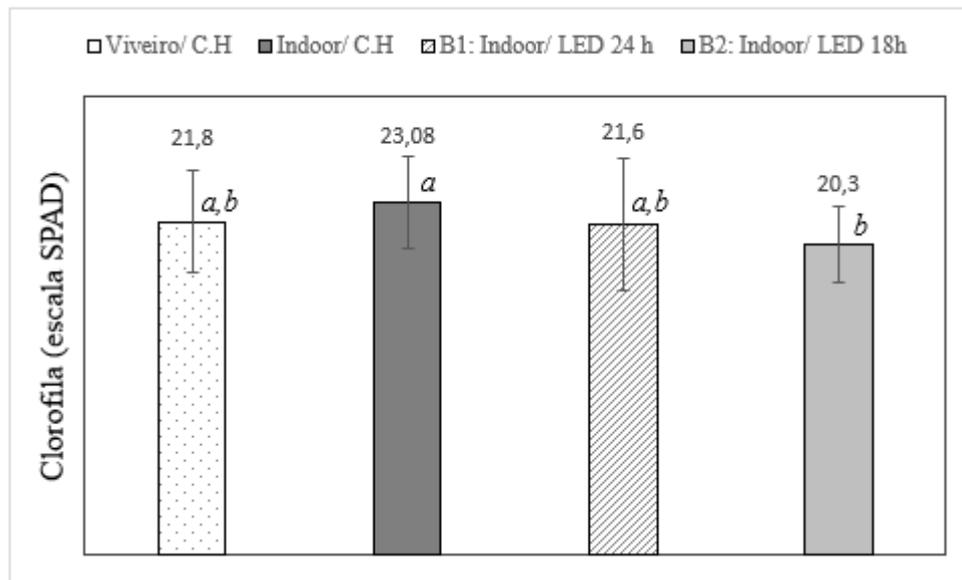


Figura 18. Níveis de clorofila (SPAD) das plantas adultas originárias das mudas produzidas *indoor* e no viveiro. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way). Viveiro / C.H.: mudas de viveiro cultivadas em hidroponia; *Indoor* / C.H.: mudas *indoor* cultivadas em hidroponia; B1: *Indoor* / LED 24h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25º dia de cultivo; B2: *Indoor* / LED 18h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 18 horas.

Além da função físico-química na planta, a clorofila quando ingerida, pode oferecer propriedades antioxidantes, já que a maior parte das doenças neurodegenerativas e inflamatórias, câncer, diabetes melitus, além do processo de envelhecimento, podem estar associadas à formação em excesso de radicais livres, resultando em estresse oxidativo e/ou comprometimento do sistema de defesa antioxidante do organismo, assim, as doenças podem ser prevenidas ou seus sintomas e efeitos podem ser aliviados pelo uso terapêutico de diferentes antioxidantes (Solymose; Mysliwa-Kurdziel, 2014). De acordo com os autores, vários precursores, derivados e metabólitos da clorofila podem ser usados como fotossensibilizadores em medicamentos para terapia fotodinâmica de câncer.

Os resultados para os teores foliares de macronutrientes estão demonstrados através da Figura 19 expressos em g.kg^{-1} . Como valores de referência adotou-se o Boletim Técnico 251 (Hortaliças: recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo) emitido pela Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI), Trani et al. (2018), o qual cita as faixas de teores adequados de macro e micronutrientes em folhas de alface com base na matéria seca.

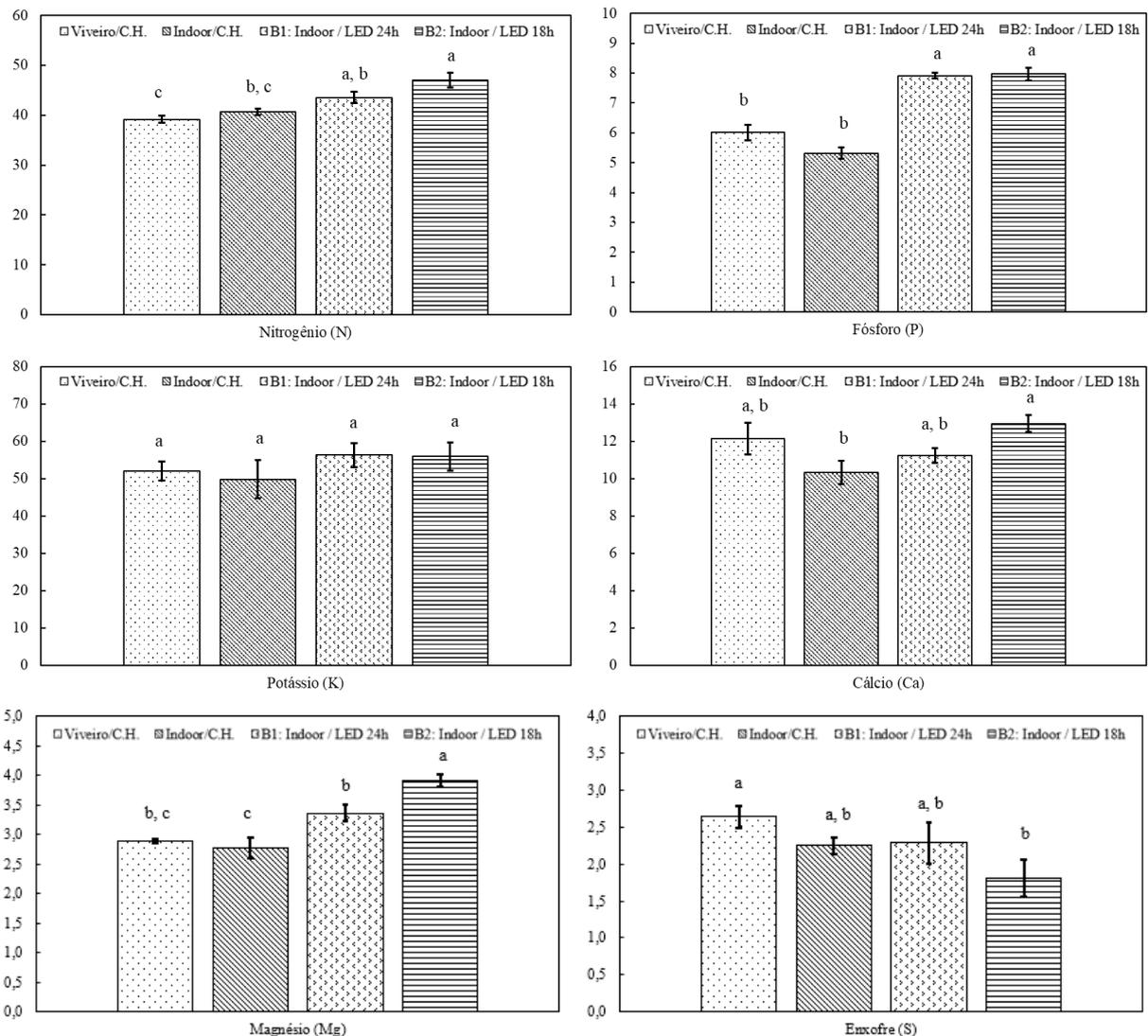


Figura 19. Teores foliares de macronutrientes expressos em g.kg^{-1} . Letras minúsculas referem-se aos agrupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way). Viveiro / C.H.: mudas de viveiro cultivadas em hidroponia; Indoor / C.H.: mudas *indoor* cultivadas em hidroponia; B1: Indoor / LED 24h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25º dia de cultivo; B2: Indoor / LED 18h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 18 horas

Para os teores de nitrogênio (N), as plantas Viveiro/C.H. apresentaram a menor média ($39,2 \text{ g.kg}^{-1}$), sendo está uma diferença significativa quando comparado com o ciclo todo em LED (B1: $43,5 \text{ g.kg}^{-1}$ e B2: $47,1 \text{ g.kg}^{-1}$). Já as plantas Indoor/C.H. resultaram uma média de $40,7 \text{ g.kg}^{-1}$, apresentando diferença significativa apenas quando comparado à B2. Todos os valores obtidos estão dentro da faixa de referência (30 a 50 g.kg^{-1}) de acordo com Trani et al. (2018).

Com relação aos teores de fósforo (P), as alfaces produzidas na hidroponia em casa de vegetação apresentaram diferença significativa (Viveiro/C.H.: $6,0 \text{ g.kg}^{-1}$ e Indoor/C.H.: $5,3 \text{ g.kg}^{-1}$) quando comparadas às produzidas Indoor (B1: $7,9 \text{ g.kg}^{-1}$ e B2:

8,0 g.kg⁻¹), porém não houve diferença significativa considerando cada grupo isoladamente. As plantas na hidroponia em casa de vegetação atingiram valores de P dentro da referência (3 a 7 g.kg⁻¹) segundo Trani et al. (2018). Entretanto, as plantas produzidas com ciclo todo *indoor* resultaram em valores acima da referência para o mesmo elemento.

O elemento potássio (K) não apresentou diferença estatística entre os grupos, variando entre 50 e 56,3 g.kg⁻¹, valores dentro da faixa de referência indicada de 50 a 80 g.kg⁻¹. Todos os valores obtidos para os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) ficaram muito próximos, porém abaixo dos valores de referência, de 15 a 25 g.kg⁻¹ e de 4 a 6 g.kg⁻¹ respectivamente, segundo o Boletim Técnico 251, porém nenhuma das amostras apresentou deficiência foliar de Ca (*tip burn*) e de Mg. Os valores de enxofre (S) encontrados apresentaram diferença significativa apenas entre Viveiro/C.H. e B2, sendo que B2 foi o único tratamento que resultou em um valor de 1,8 g.kg⁻¹, sendo este abaixo da referência, 2 a 4 g.kg⁻¹.

Na Figura 20 estão apresentados os resultados para os teores foliares de micronutrientes. Como valores de referência adotou-se o Boletim Técnico 251 (Hortaliças: recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo) emitido pela Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI), Trani et al. (2018), assim como no anterior.

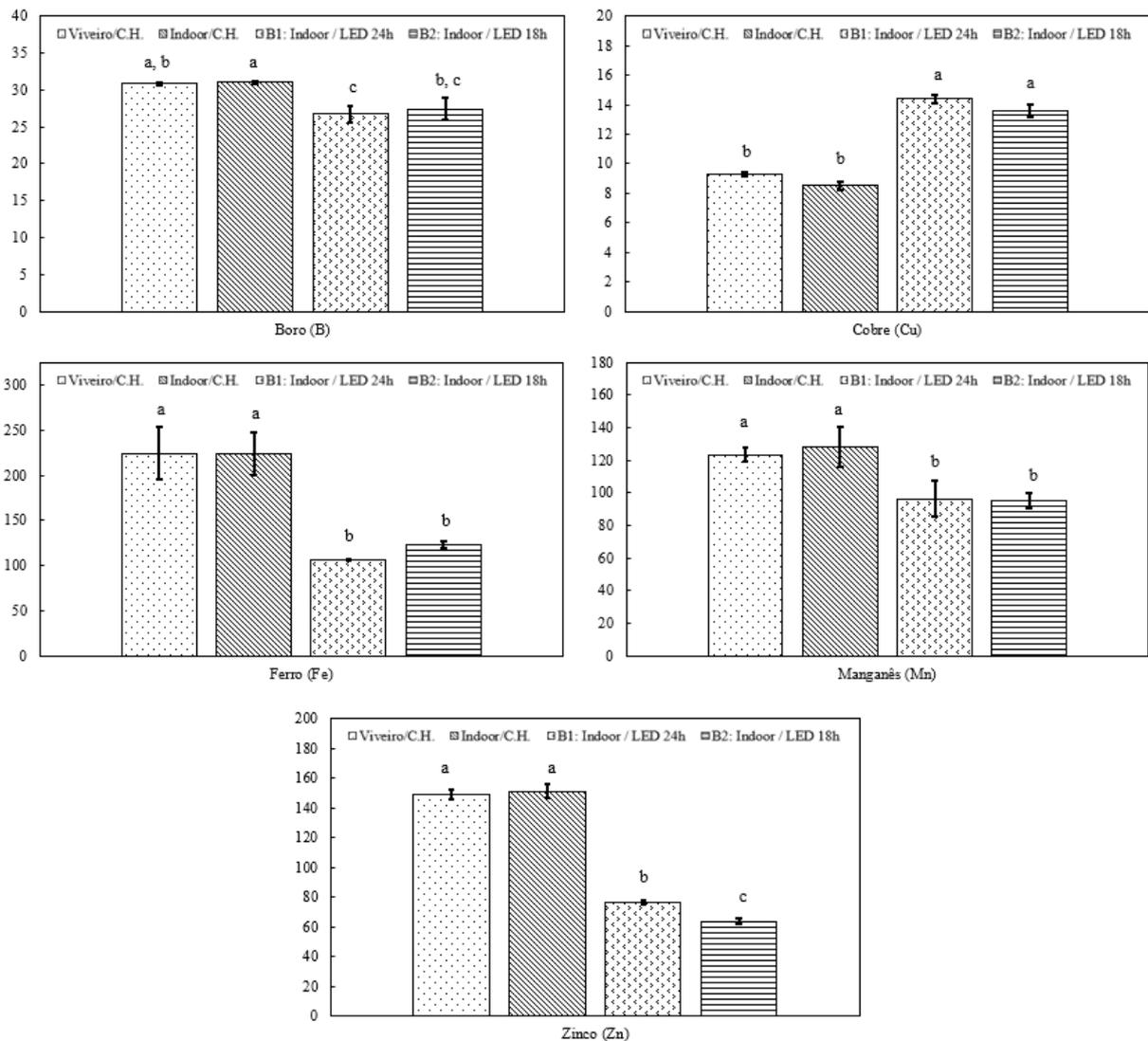


Figura 20. Teores foliares de micronutrientes expressos em mg.kg^{-1} . Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way). Viveiro / C.H.: mudas de viveiro cultivadas em hidroponia; Indoor / C.H.: mudas *indoor* cultivadas em hidroponia; B1: Indoor / LED 24h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25º dia de cultivo; B2: Indoor / LED 18h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 18 horas

Ao analisar os teores de micronutrientes expressos em mg.kg^{-1} , pode-se observar que para o boro (B), as plantas cultivadas na hidroponia em casa de vegetação (*Indoor/C.H.* e *Viveiro/C.H.*) apresentaram teores maiores, 30,8 e 31,0 mg.kg^{-1} , respectivamente, valores dentro da faixa de referência segundo Trani et al. (2018) que é entre 30 e 70 mg.kg^{-1} . As plantas produzidas totalmente sob iluminação artificial (B1 e B2) apresentaram valores muito próximos ao estabelecido pela referência, porém abaixo, 26,7 e 27,4 mg.kg^{-1} respectivamente.

O cobre (Cu) foi o único micronutriente que apresentou maiores teores nas alfaces cultivadas o ciclo todo *indoor*, onde B1 atingiu 14,4 mg.kg^{-1} e B2 13,6 mg.kg^{-1} ,

não havendo diferença estatística entre si, mas diferindo significativamente das plantas produzidas na hidroponia em casa de vegetação (*Indoor*/ C.H. 8,5 mg.kg⁻¹ e Viveiro/ C.H. 9,3 mg.kg⁻¹), também não havendo diferença significativa entre si. Essa diferença pode ser justificada pelo fato de os fertilizantes utilizados na produção *indoor* conterem o dobro de cobre em comparação à solução utilizada na hidroponia em casa de vegetação. Todas as amostras apresentaram teores dentro do citado por Trani et al. (2018) que é entre 7 e 20 mg.kg⁻¹.

Para os teores dos micronutrientes de ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) observa-se uma tendência similar, uma vez que houve diferença significativa entre as plantas do cultivo hidropônico em casa de vegetação, que atingiram teores superiores, próximos a 223 mg.kg⁻¹ de Fe, 125 mg.kg⁻¹ de Mn e 150 mg.kg⁻¹ de Zn e as plantas cultivadas o ciclo todo *indoor*, atingindo teores próximos a 115 mg.kg⁻¹ de Fe, 96 mg.kg⁻¹ de Mn e 70 mg.kg⁻¹ de Zn. Os teores de Fe e Zn das plantas cultivadas na hidroponia em casa de vegetação ficaram acima dos teores sugeridos por Trani et al (2018), onde é estabelecido uma faixa de 50 a 150 mg.kg⁻¹ para o Fe e de 30 a 100 mg.kg⁻¹ para o Zn. Os teores de Mn para as plantas cultivadas na hidroponia em casa de vegetação ficaram dentro da faixa de referência, que é de 40 a 150 mg.kg⁻¹. As plantas cultivadas o ciclo todo *indoor*, apresentaram teores dentro das faixas estabelecidas para Fe, Mn e Zn.

O conteúdo de compostos fenólicos totais nas diferentes categorias está demonstrado na Figura 21. Os compostos fenólicos são substâncias amplamente distribuídas em toda a natureza, mais de 8000 já foram encontrados em plantas. Esse grande e complexo grupo faz parte da composição de muitos vegetais, frutas e produtos industrializados. Podem ser pigmentos, que são responsáveis pela cor aos alimentos, ou produtos do metabolismo secundário, que geralmente derivam de reações de defesa das plantas contra agressões do ambiente (BRAND-WILLIAMS et al., 1995). Vários fatores relacionados ao cultivo do vegetal, a exemplo das condições climáticas e edáficas, além das características genéticas da planta, influenciam o perfil de compostos fenólicos das hortaliças (MELO et al., 2006).

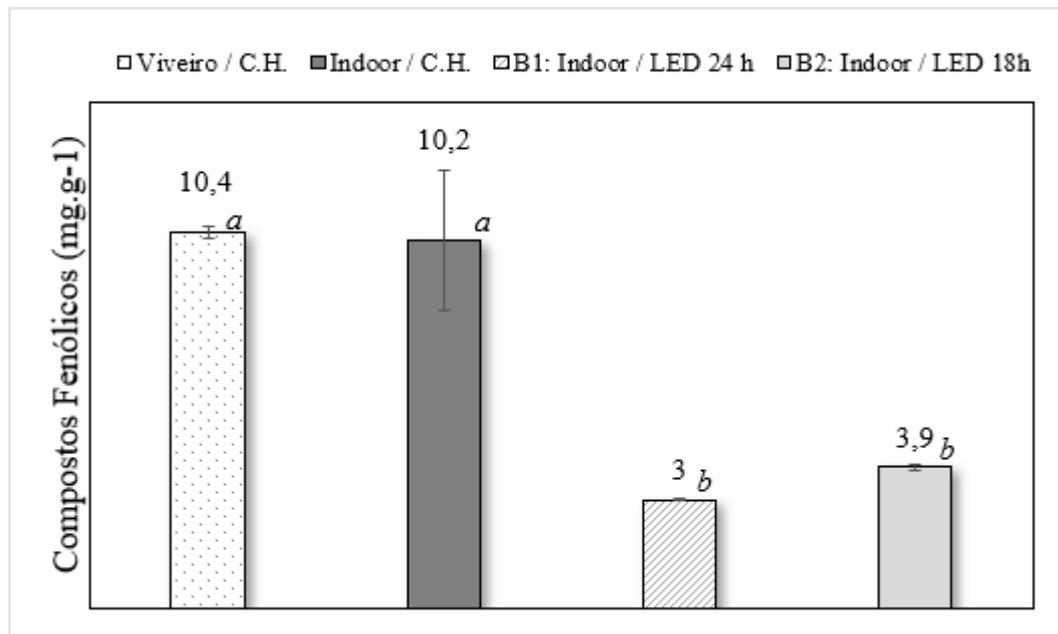


Figura 21. Conteúdo de compostos fenólicos em alface crespa cv. Ariel. Letras minúsculas referem-se aos grupamentos estatísticos ($\alpha = 0.05$, ANOVA one-way). Viveiro / C.H.: mudas de viveiro cultivadas em hidroponia; *Indoor* / C.H.: mudas *indoor* cultivadas em hidroponia; B1: *Indoor* / LED 24h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 24 horas a partir do 25º dia de cultivo; B2: *Indoor* / LED 18h: ciclo todo *indoor* com fotoperíodo de 18 horas.

Através da análise dos dados obtidos, notou-se variação significativa entre as plantas produzidas na hidroponia em casa de vegetação (*Viveiro/C.H* e *Indoor/C.H*) e as plantas de ciclo todo *indoor*, variando de 10,4 a 10,2 mg g⁻¹ nos primeiros casos, contra 3 a 3,9 mg g⁻¹ em B1 e B2, respectivamente.

Souza et al. (2022) estudaram a influência da cultivar e da estação nos carotenoides e compostos fenólicos de alface roxa produzida em casa de vegetação por 63 dias no inverno e 26 dias no verão. Os teores totais de compostos fenólicos encontrados pelos autores variaram de 3,59 a 10,43 mg g⁻¹ dependendo da cultivar e estação, valores semelhantes aos encontrados no presente trabalho.

Samuolienė et al. (2013) ao estudar os efeitos da iluminação LED nos compostos bioativos em alface romana identificaram que durante o tratamento com luz laranja ou amarela, houve um aumento significativo nos teores de compostos fenólicos. Como a placa de LED utilizada no presente trabalho contém apenas LEDs vermelhos, azuis e brancos, a ausência de LEDs laranja e amarelo podem justificar os menores teores de compostos fenólicos encontrados no cultivo *indoor*.

Comparando os resultados obtidos para os dois blocos experimentais realizados, é possível observar que a disparidade entre mudas de cultivo *indoor* e de viveiro foi reduzida, ou seja, no bloco experimental 2 foi possível fazer o transplântio das duas categorias de mudas para cultivo hidropônico em casa de vegetação com estádios similares de desenvolvimento, o que comprovou a eficiência da muda *indoor* no cultivo hidropônico sob luz solar.

Com relação as plantas adultas, foi observado que a massa média das amostras do bloco experimental 1 é praticamente o dobro da massa média obtida para o bloco experimental 2. Isso porque as amostras do bloco experimental 1 foram colhidas com 35 dias, enquanto as amostras do bloco experimental 2 foram colhidas com 18 dias.

Embora em estádios diferentes, foi possível observar que no bloco experimental 2 as amostras provenientes de mudas em viveiro se desenvolveram um pouco mais do que as mudas provenientes do cultivo *indoor*, situação inversa ao que foi observado no bloco experimental 1. Como no bloco experimental 2 as mudas se mostraram mais parelhas é possível afirmar que no cultivo *indoor* das mudas, apesar da redução no ciclo produtivo, há uma possibilidade de a planta sofrer estresse climático e retardar seu desenvolvimento em função da variação de temperatura do ambiente após o transplântio.

Um resultado significativo foi a maior massa média obtida para amostras provenientes de mudas *indoor* cultivadas sob iluminação LED sem transplântio para o cultivo hidropônico, demonstrando o potencial para o cultivo 100% *indoor* no qual é possível ter um cultivo controlado, sem a necessidade de uso de defensivos químicos.

Com relação ao índice de clorofila, observou-se que para as mudas do bloco experimental 2 foi atingido um máximo de 15 na escala SPAD para as mudas provenientes de cultivo *indoor*. Já para as plantas adultas do bloco experimental 2 o valor médio foi em torno de 20 SPAD na mesma escala, sem variação significativa entre as amostras, ou seja, mesmo com iluminação artificial, as plantas de cultivo *indoor* não sofreram déficit de clorofila no seu desenvolvimento.

Na análise de minerais houve diferença significativa em quase todos os tratamentos quando comparamos o cultivo hidropônico em casa de vegetação com o cultivo *indoor*, isso pode ser justificado pelas diferentes soluções nutritivas utilizadas, já que a produção hidropônica em casa de vegetação foi realizada em uma empresa

produtora de hortaliças da cidade de São Carlos - SP que utilizou adubos sólidos, pois tem custo inferior aos líquidos utilizados no cultivo *indoor* no laboratório de Biofotônica Ambiental. Entretanto, nenhuma planta apresentou sintoma de deficiência nutritiva foliar durante todo o cultivo.

No conteúdo total de compostos fenólicos, houve grande discrepância entre os resultados obtidos no cultivo hidropônico em casa de vegetação e no LED, esse fato pode ser justificado pela limitação de comprimentos de onda contidos na placa LED utilizada (vermelho, azul e branco). Apesar do branco conter mais comprimentos de onda quando comparados aos LEDs monocromáticos, sua baixa proporção pode não ter sido suficiente para acúmulo de maiores teores de compostos fenólicos.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos no bloco experimental 1 realizado no inverno, concluiu-se que o cultivo de mudas de alface (cv. Ariel) *indoor* com iluminação artificial LED oferece vantagens, antecipando o ciclo de produção em 16 dias (63% do tempo de cultivo de viveiro) e possibilitando o desenvolvimento de mudas e massa maiores. No cultivo hidropônico em casa de vegetação, as mudas provenientes do cultivo *indoor* se destacaram, produzindo plantas de massa fresca comercial 36% maiores que as obtidas pelas mudas de viveiro no mesmo sistema. Sendo assim, o cultivo de mudas de alface *indoor* se mostrou eficiente para produção hidropônica em casa de vegetação no inverno, produzindo mudas mais precoces e plantas adultas mais produtivas.

Já no bloco experimental 2 realizado entre a primavera e o verão, ao buscar uma maior proximidade de tamanho entre as mudas de alface (cv. Ariel) *indoor* e do viveiro, o ciclo de produção foi ainda mais precoce, antecipando em 18 dias (49% do tempo de cultivo de viveiro), um resultado ainda mais vantajoso que o obtido no primeiro bloco experimental. Uma produção de mudas *indoor* verticalizada com apenas 5 andares (aprox. 2 metros de altura) pode levar a uma produtividade 10 vezes superior à de viveiro. No cultivo hidropônico em casa de vegetação, as duas categorias de mudas obtiveram produtividade, teores de macronutrientes, micronutrientes, clorofila e compostos fenólicos semelhantes, sem diferença significativa. Esses

resultados comprovaram que, no cultivo hidropônico em casa de vegetação, as mudas de alface *indoor* se mostraram como um modelo promissor perante o cultivo de mudas tradicional, além de eliminar o uso de defensivos nesta fase.

O desempenho das plantas cultivadas o ciclo todo *indoor* se mostrou com baixa diferença estatística, porém significativa em praticamente todos os parâmetros avaliados, porém houve uma superioridade no tratamento que recebeu 24h de luz durante os 11 dias finais de ciclo quando comparado ao cultivo com 18h de fotoperíodo em todo o ciclo, podendo ser uma estratégia fotônica viável.

Como sugestões para trabalhos futuros, deve-se individualizar as mudas produzidas em ambiente controlado sob iluminação artificial, realizar a aclimação das mudas antes do transplante e testá-las no verão, em sistema hidropônico, convencional e orgânico, dentro de casa de vegetação, cobertas com tela de sombreamento e a campo aberto.

REFERÊNCIAS

AL-KODMANY, K. **The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City**. Revista mdpi, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 24, 2018. DOI: 10.3390/buildings8020024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/8/2/24>. Acesso em: 24/06/2023.

ALVES, M. S., SOARES, T. M., SILVA, L. T., FERNANDES, J. P., OLIVEIRA, M. L., & PAZ, V. P. **Estratégias de uso de água salobra na produção de alface em hidroponia NFT**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 15, 491-498. 2011.

AMARAL, C. D. A. **Vertical farm (fazenda vertical): análise da qualidade do investimento usando protótipo de empreendimento imobiliário**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. 2018.

BOROS, I. F.; SZÉKELY, G.; BALÁZS, L.; CSAMBALIK, L.; SIPOS, L. **Effects of LED lighting environments on lettuce (*Lactuca sativa* L.) in PFAL systems – A review**. Scientia Horticulturae, v. 321, p. 112351, 2023. ISSN 0304-4238. DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112351. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423823005204>. Acesso em: 31/07/2023.

CHEN, X.L.; GUO, W.Z.; XUE, X.Z.; WANG, L.C.; QIAO, X.J. **Growth and quality responses of ‘Green Oak Leaf’ lettuce as affected by monochromic or mixed radiation provided by fluorescent lamp (FL) and light-emitting diode (LED)**. Scientia Horticulturae, v. 172, p. 168-175, 2014. ISSN 0304-4238. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.04.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.009>. Acesso em: 25/07/2023.

CHEN, X.L.; YANG, Q.C.; SONG, W.P.; WANG, L.C.; GUO, W.Z.; XUE, X.Z. **Growth and nutritional properties of lettuce affected by different alternating intervals of red and blue LED irradiation**. Scientia Horticulturae, v. 223, p. 44-52, 2017. ISSN 0304-4238. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.04.037. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.037>. Acesso em: 04/04/2023.

COMETTI, N.N.; GENUCIO, G.C.; ZONTA, E. **Hidroponia para Técnicos**. 1. ed. Brasília: Editora IFB, 2019. Disponível em: <https://pergamum.ufsc.br/pergamumweb/vinculos/000001/000001f6.pdf>. Acesso em: 20/07/2023.

COSTA, J. S.; JUNQUEIRA, A. M. R. **Diagnóstico do cultivo hidropônico de hortaliças na região do Distrito Federal**. Horticultura Brasileira, v. 18, n. 1, p. 49-52, 2000.

DESPOMMIER, D. **The vertical farm: feeding the world in the 21st century**. New York: St. Martin's Press. 2010.

DOUGHER, T. A.; BUGBEE, B. **Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation.** Photochemistry and Photobiology, v. 73, n. 2, p. 199-207, 2001. DOI: 10.1562/0031-8655(2001)073.

FRAŚCZAK, B.; KULA-MAXIMENKO, M. **The Preferences of Different Cultivars of Lettuce Seedlings (*Lactuca sativa* L.) for the Spectral Composition of Light.** Agronomy, v. 11, p. 1211, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11061211>.

FURLANI, P. R., SILVEIRA, L. C. P., BOLONHEZI, D., & FAQUIN, V. (1999). **Cultivo hidropônico de plantas.** Boletim técnico do Instituto Agrônômico, (180), p. 50.

FUZINATTO, N. M.; JUNIOR, S. S. **Agricultura urbana como recurso competitivo em serviços alimentares: uma avaliação por meio da teoria da visão baseada em recursos.** Universidade do Oeste de Santa Catarina, Chapecó, Santa Catarina, Brasil, 2019.

GOTO, E. **Plant production in a closed plant factory with artificial lighting.** ISHS Acta Horticulturae 956: VII International Symposium on Light in Horticultural Systems, 2012.

GRZEGORZEWSKA, M.; BADEŁEK, E.; MATYSIAK, B.; KANISZEWSKI, S.; DYŚKO, J.; KOWALCZYK, W.; WRZODAK, A.; SZWEJDA-GRZYBOWSKA, J. **Assessment of romaine lettuce cultivars grown in a vertical hydroponic system at two levels of LED light intensity.** Scientia Horticulturae, v. 313, 2023.

GUPA, S. D. **Light Emitting Diodes for Agriculture.** Departamento de Engenharia Agrícola e Alimentar, Indian Institute of Technology Kharagpur, Kharagpur, Índia, 2017.

Kim, H. H., Goins, G. D., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. **Green-light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth under Red- and Blue-light-emitting Diodes.** HortScience, 39(7), 1617–1622. 2004. DOI:10.21273/hortsci.39.7.1617.

KOBORI, M. M. R. G.; MELLO, S. da C.; FREITAS, I. S. de; SILVEIRA, F. F.; ALVES, M. C.; AZEVEDO, R. A. **Supplemental light with different blue and red ratios in the physiology, yield and quality of Impatiens.** Scientia Horticulturae, v. 306, p. 111424, 2022. DOI: 10.1016/j.scienta.2022.111424. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423822005441?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7ef61491094b1a8b. Acesso em: 15/07/2023.

KOZAI, T. **Current Status of Plant Factories with Artificial Lighting (PFALs) and Smart PFALs.** In: KOZAI, T. (ed.). Smart Plant Factory. Japan Plant Factory Association (NPO), Kashiwa, Chiba, Japan. 2018. Capítulo 1. DOI: 10.1007/978-981-13-1065-2_1.

LI, Q.; KUBOTA, C. **Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce.** Environmental and Experimental Botany, v. 67, n. 1, p. 59-64, 2009. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2009.06.011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847209001348>. Acesso em: 28/01/2023.

LIMA, T. J. L. de. **Desempenho de mudas de alface produzidas nos diferentes volumes de células em bandejas e cultivadas em sistema hidropônico**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal e Bioprocessos Associados) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9175>.

LIU, J.; LIU, W. **Regulation of accumulation and metabolism circadian rhythms of starch and sucrose in two leaf-color lettuces by red:blue ratios of LED continuous light**. *Environmental and Experimental Botany*, v. 196, p. 104811, 2022. ISSN 0098-8472. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2022.104811. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104811>. Acesso em: 30/03/2023.

LU, N.; SAENGTHARATIP, S.; TAKAGAKI, M.; MARUYAMA, A.; KIKUCHI, M. **How Do White LEDs' Spectra Affect the Fresh Weight of Lettuce Grown under Artificial Lighting in a Plant Factory? A Statistical Approach**. *Agricultural Sciences*, v. 10, p. 957-974, 2019. DOI: 10.4236/as.2019.107073.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MADAAN, R.; BANSAL, G.; KUMAR, S.; SHARMA, A. **Estimation of Total Phenols and Flavonoids in Extracts of *Actaea spicata* Roots and Antioxidant Activity Studies**. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 73, n. 6, p. 666-669, 2011.

MPELKAS, Christos C. **Light Sources for Horticultural Lighting**. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-16, no. 4, p. 557-567, jul./ago. 1980.

NASA. **Growing Plants in Space**. 2021. Disponível em: <https://www.nasa.gov/content/growing-plants-in-space>. Acesso em: 20/05/2023.

NASCIMENTO, W. M.; PEREIRA, R. B. **Produção de mudas de hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2016.

NICOLLE, C.; CARNAT, A.; FRAISSE, D.; LAMAISON, J.-L.; ROCK, E.; MICHEL, H.; AMOUROUX, P.; REMESY, C. **Characterisation and variation of antioxidant micronutrients in lettuce (*Lactuca sativa* folium)**. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 84, p. 2061-2069, 2004. DOI: 10.1002/jsfa.1916.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais. Divisão de População. **World Population Prospects 2019: Highlights**. Nova York, 2019.

PARK, Y. G.; PARK, J. E.; HWANG, S. J.; JEONG, B. R. **Light source and CO₂ concentration affect growth and anthocyanin content of lettuce under controlled environment**. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, v. 53, n. 6, p. 460-466, 2012. DOI: 10.1007/s13580-012-0821-9.

PENNISI, G.; PISTILLO, A.; ORSINI, F.; CELLINI, A.; SPINELLI, F.; NICOLA, S.; FERNANDEZ, J. A.; CREPALDI, A.; GIANQUINTO, G.; MARCELIS, L. F. M. **Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs.** Scientia Horticulturae, v. 272, p. 109508, 2020. ISSN 0304-4238. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109508.

RESENDE, G. M.; YURI, J. E.; MOTA, J. H.; SOUZA, R. J.; FREITAS, S. A. C.; RODRIGUES JUNIOR, J. C. **Efeitos de tipos de bandejas e idade de transplântio de mudas sobre o desenvolvimento e produtividade de alface americana.** Horticultura Brasileira, Brasília, v. 21, n. 3, p. 558-563, 2003.

SALA, F.C. **Melhoramento genético de alface.** CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 51., 2011. Viçosa: Horticultura Brasileira, v. 29, p. 5813-5827, 2011.

SALA, F. C.; COSTA, C.P. **Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira.** Horticultura Brasileira, v.30, n.2, p.187-194, 2012.

SAMUOLIENĖ, G.; BRAZAITYTĖ, A.; SIRTAUTAS, R.; VIRŠILĖ, A.; SAKALAUŠKAITĖ, J.; SAKALAUŠKIENĖ, S.; DUCHOVSKIS, P. **LED illumination affects bioactive compounds in romaine baby leaf lettuce.** Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 93, n. 13, p. 3286–3291, 2013. DOI: 10.1002/jsfa.6173.

SILVA, L. M.; CRUZ, L. P.; PACHECO, V. S. et al. **Energetic efficiency of biomass production is affected by photoperiod in indoor lettuce cultivation.** Theoretical and Experimental Plant Physiology, v. 34, p. 265–276, 2022. DOI: 10.1007/s40626-022-00246-0.

SHEN, Y. Z.; GUO, S. S.; AI, W. D.; TANG, Y. K. **Effects of illuminants and illumination time on lettuce growth, yield and nutritional quality in a controlled environment.** Life Sciences in Space Research, v. 2, p. 38–42, 2014. DOI: 10.1016/j.lssr.2014.06.001.

SOARES, C. S.; SILVA, J. A.; SILVA, G. N.; BRITO NETO, J. F. **Avaliação da alface em duas épocas de semeio em sistema hidropônico.** BIOFARM - Journal of Biology & Pharmacy and Agricultural Management, v. 16, n. 1, p. 1-16, 2020. Disponível em: <https://revista.uepb.edu.br/BIOFARM/article/view/2189>.

SOUZA, A. S. N. de; SCHMIDT, H. de O.; PAGNO, C.; RODRIGUES, E.; SILVA, M. A. S. da; FLÔRES, S. H.; RIOS, A. de O. **Influence of cultivar and season on carotenoids and phenolic compounds from red lettuce influence of cultivar and season on lettuce.** Food Research International, v. 155, p. 111110, 2022. ISSN 0963-9969. DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111110. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111110>. Acesso em: 28/03/2023.

SOLYMOŠI, Katalin; MYSLIWA-KURDZIEL, Beata. **Chlorophylls and their Derivatives Used in Food Industry and Medicine.** Mini Reviews in Medicinal Chemistry, v. 17, n. 13, p. 1194-1222, 2017. DOI: 10.2174/1389557516666161004161411.

TAKASU, S.; SHIMIZU, H.; NAKASHIMA, H.; MIYASAKA, J.; OHDOI, K. **Photosynthesis and Morphology of Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Greenwave) Grown under Alternating Irradiation of Red and Blue Light.** *Environ. Control Biol.*, v. 57, n. 4, p. 93-98, 2019. DOI: 10.2525/ecb.57.93.

TRANI, P.E.; NOVO, M.C.S.S.; CAVALLARO JUNIOR, M.L.; TELLES, L.M.G. **Produção de mudas de alface em bandejas e substratos comerciais.** *Horticultura Brasileira*, Brasília, v.22, n.2, p.290-294, 2004.

TRANI, P. E.; VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; FIGUEIREDO, G. J. B. **Hortaliças: recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo (Boletim técnico).** *Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI)*, v. 251, n. 1, p. 12-13, 2018.

VIRŠILĖ, A.; BRAZAITYTĖ, A.; VAŠTAKAITĖ-KAIRIENĖ, V.; MILIAUSKIENĖ, J.; JANKAUSKIENĖ, J.; NOVIČKOVAS, A.; SAMUOLIENĖ, G. **Lighting intensity and photoperiod serves tailoring nitrate assimilation indices in red and green baby leaf lettuce.** *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019. DOI: 10.1002/jsfa.9948.

WONG, C. E.; TEO, Z. W. N.; SHEN, L.; YU, H. **Seeing the lights for leafy greens in indoor vertical farming.** *Trends in Food Science & Technology*, v. 106, p. 48-63, 2020. ISSN 0924-2244. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.09.031.

YAN, Z.; HE, D.; NIU, G.; ZHAI, H. **Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage.** *Scientia Horticulturae*, v. 248, n. 1, p. 138-144, 2019.

ZHANG, Y.; ZHA, L.; LIU, W.; ZHOU, C.; SHAO, M.; YANG, Q. **LED Light Quality of Continuous Light before Harvest Affects Growth and As A Metabolism of Hydroponic Lettuce Grown under Increasing Doses of Nitrogen.** *Plants*, v. 10, p. 176, 2021. DOI: 10.3390/plants10010176.