

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**LUZ BRANCA E VERMELHA SOBRE A PRODUTIVIDADE E
QUALIDADE DE REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL**

Maria José Yañez Medelo
Engenheira Agrônoma

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**LUZ BRANCA E VERMELHA SOBRE A PRODUTIVIDADE E
QUALIDADE DE REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL**

Discente: Eng. Agr. Maria José Yañez Medelo

Orientador: Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho

**Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das exigências para
a obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Produção Vegetal)**

2024

Y221

Yañez Medelo, Maria José

Luz branca e vermelha sobre a produtividade e qualidade de repolho-roxo microvegetal / Maria José Yañez Medelo. -- Jaboticabal, 2024

99 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Arthur Bernardes Cecílio Filho

1. Alimento funcional. 2. Brassica oleracea L var. capitata f. rubra.
3. Cultivo indoor. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: LUZ BRANCA E VERMELHA SOBRE A PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE
REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL

AUTORA: MARIA JOSÉ YAÑEZ MEDELO

ORIENTADOR: ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente
ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO
Data: 23/10/2024 13:40:39-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Prof. Dr. ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal

Profa. Dra. SUSANA CARVALHO (Participação Virtual)
Universidade do Porto / Porto/Portugal

Susana Carvalho



Documento assinado digitalmente
TATIANA PAGAN LOEIRO DA CUNHA CHIAMOLERA
Data: 29/10/2024 19:14:23-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Profa. Dra. TATIANA PAGAN LOEIRO DA CUNHA CHIAMOLERA (Participação Virtual)
Universidad de Almeria / Almeria/Espanha



Documento assinado digitalmente
SIMONE DA COSTA MELLO
Data: 29/10/2024 11:03:36-0300
Verifique em <https://validar.j6.gov.br>

Profa. Dra. SIMONE DA COSTA MELLO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / ESALQ USP Piracicaba/SP

Prof. Dr. MIGUEL URRESTARAZU GAVILAN (Participação Virtual)
Universidad de America / Almeria/Espanha

Jaboticabal, 23 de outubro de 2024

[Handwritten signature]

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

MARIA JOSÉ YAÑEZ MEDELO - Nascida em Cúcuta, Norte de Santander, Colômbia, filha de Blanca Aliria Medelo Tarazona e Jesus Antonio Yañez Parra. Em 2015, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Francisco de Paula Santander, Colômbia. Durante a graduação participou do Programa de Pesquisa SIBAA (Semillero de Investigación Biotecnología para la Agricultura y la Alimentación). Trabalhou na Federação Nacional de Cafeteiros de Colômbia. Em agosto de 2019, ingressou no Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Câmpus Jaboticabal (Título da Dissertação:) sob a orientação do Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho e coorientação do Prof. Dr. Rogério Falleiros Carvalho, seu projeto foi financiado pela Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal Superior (CAPES) por meio da concessão de uma bolsa de estudos. Em março de 2021, ela iniciou seu doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) na mesma universidade (Título da Teses) sob a orientação do Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho.

À minha mãe, por tudo o que eu aprendi com você, por ser a minha melhor amiga, por ser o meu porto seguro e meu apoio incondicional. Eu não teria chegado até aqui sem você. Eu tenho muita sorte em tê-la como mãe

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, agradeço a tudo na vida.

A meus pais, pelo exemplo de luta, Jesus Antonio Yañez e minha mãe e melhor amiga, Blanca Aliria Medelo, pelo apoio, amor, compressão e confiança, por me ensinar o valor do esforço e trabalho.

A minha irmã, Marlody, por toda dedicação em me ajudar com o que for preciso.

A minha Avó Berta Maria Tarazona (in memoriam), por ser uma segunda mãe, pelo amor, carinho e ensinamentos.

A meu orientador Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, pela compreensão, paciência, incentivo, empenho pessoal, orientação e, sobretudo, amizade, que tanto contribuíram para a minha formação profissional.

Ao Prof. Dr. Rogério Falleiros Carvalho, pelo apoio e atenção em todas as etapas de minha pesquisa.

Aos amigos do grupo de pesquisa em hortaliças, pelas experiências compartilhadas e momentos de descontração.

A minhas amigas mais queridas, Jeiny Viviana Gonzalez Ortiz, Kelly Johana Osorio e Livia Carvalho, pela valiosa amizade ao longo da vida.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Jaboticabal, em especial ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pela oportunidade oferecida.

Aos funcionários do Departamento Produção Vegetal, em especial aos servidores Inauro Santana e Reinaldo dos Santos, do Setor de Olericultura e Plantas Aromático-medicinais, e à Rosane Innocente e Wagner Tarina, pela atenção e assistência.

À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido para realização do curso de Doutorado.

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

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	iv
Palavras-chave	iv
ABSTRACT	v
Keywords	v
 CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	 1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 REVISÃO DE LITERATURA	4
1.2.1 Repolho-roxo microvegetal	4
1.2.2 Fabrica de plantas	5
1.2.3 Efeito da luz na produtividade e qualidade do microvegetal	6
1.2.3.1 Qualidade da luz	7
1.2.3.1.1 Luz branca	7
1.2.3.1.2 Luz vermelha	8
1.2.3.2 Intensidade de luz	9
1.2.3.2 Fotoperíodo	11
1.2.4 Época de colheita.....	12
1.3 REFERÊNCIAS.....	14
 CAPÍTULO 2 – ÉPOCA DE COLHEITA, FOTOPERÍODO E IRRADIÂNCIA DE LUZ BRANCA NA PRODUTIVIDADE DE REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL	 22
RESUMO.....	22
Palavras-chave	22
ABSTRACT	23
Keywords	23
2.1 INTRODUÇÃO	24
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
2.2.1 Área experimental	27

2.2.2	Tratamentos e delineamento experimental	27
2.2.3	Condições experimentais	27
2.2.4	Características avaliadas	29
2.2.5	Análise de dados.....	29
2.3	RESULTADOS	30
2.4	DISCUSSÃO	33
2.5	CONCLUSÃO.....	37
2.6	REFERÊNCIAS.....	38

CAPÍTULO 3 – ÉPOCA DE COLHEITA, FOTOPERÍODO E IRRADIÂNCIA DE LUZ BRANCA NA QUALIDADE DE REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL

RESUMO.....	43
Palavras-chave.....	43
ABSTRACT	44
Keywords.....	44
3.1 INTRODUÇÃO	45
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	46
3.2.1 Área experimental	46
3.2.2 Tratamentos e delineamento experimental	46
3.2.3 Condições experimentais	47
3.2.4 Características avaliadas	49
3.2.5 Análise de dados.....	49
3.3 RESULTADOS	50
3.4 DISCUSSÃO	55
3.5 CONCLUSÃO.....	60
3.6 REFERÊNCIAS	60

CAPÍTULO 4 – FOTOPERÍODO E IRRADIÂNCIA DE LUZ VERMELHA ADICIONAL À LUZ BRANCA NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DO REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL	67
RESUMO.....	67

Palavras-chave.....	67
ABSTRACT	68
Keywords	68
4.1 INTRODUÇÃO	69
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	70
4.2.1 Área experimental	70
4.2.2 Tratamentos e delineamento experimental	71
4.2.3 Instalação e condução do experimento.....	71
4.2.4 Característica avaliadas	72
4.2.5 Análise de dados.....	73
4.3 RESULTADOS	73
4.4 DISCUSSÃO	78
4.5 CONCLUSÃO.....	83
4.6 REFERÊNCIAS	83

LUZ BRANCA E VERMELHA SOBRE A PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL

RESUMO - Nas últimas duas décadas, o interesse por ingestão regular de vegetais frescos, nutritivos e orgânicos aumentou. Como opção, os microvegetais têm recebido atenção pois são alimentos nutracêuticos. Recentemente, tem havido crescimento na produção destes microvegetais em *plant factories*. Nestas, um dos principais fatores para o sucesso é a luz. Este estudo objetivou avaliar o efeito da luz branca e vermelha na produção de microvegetais de repolho-roxo. Para tanto, foram realizados dois experimentos. No experimento 1, foi avaliado a densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) de LED branca (150, 250, 350 e 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e fotoperíodo (12, 16 e 20 horas por dia), em duas épocas de colheita do repolho-roxo (4 e 6 dias de irradiância). No segundo experimento, foram avaliados a DFFF (20 e 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e fotoperíodo (12, 16 e 20 horas por dia) de luz vermelha adicional a 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz branca. Em ambos experimentos foram avaliados aspectos nutricionais, bioquímicos, fisiológicos, produtivos e qualitativos do repolho-roxo microvegetal. No experimento 1, a colheita precoce, o fotoperíodo e a DFFF afetaram o comprimento do hipocótilo (CH), área cotiledonar (AC) e produtividade (PROD) isoladamente e em interação. Colheita precoce em dois dias resultou em redução de 10, 32 e 16,5% no CH, AC e PROD, respectivamente. De modo geral, maiores DFFF e fotoperíodo promoveram diminuição do CH e aumento da AC e PROD. Com a combinação desses fatores, 315 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com 20 horas de luz proporcionou a maior produtividade de repolho-roxo microvegetal. Em um ano de produção, a colheita precoce proporciona maior número de ciclos produtivos e maior produtividade de repolho-roxo microvegetal (616 kg m^{-2}), a qual foi 27% maior que quando a colheita foi realizada dois dias após, quando surgiu a primeira folha. Quanto à qualidade do repolho-roxo, constatou-se que os teores de pigmentos (clorofilas e carotenoides), compostos fenólicos e vitamina C foram modificados mediante manejo dos fatores intensidade e fotoperíodo de luz branca, com o teor de compostos fenólicos respondendo de modo oposto ao observado para os demais atributos de qualidade, que aumentaram mediante aumentos no fotoperíodo e intensidade de luz branca. O fator época de colheita também foi um fator importante sobre a qualidade do microvegetal, às vezes em interação com o fator luz. De modo geral, o atraso na colheita aumentou os teores de clorofilas, vitamina C e compostos fenólicos. No experimento 2, constataram-se efeitos significativos do fotoperíodo, intensidade luminosa de luz vermelha adicional à luz branca, observando-se incrementos na área cotiledonar, produtividade e qualidade (clorofilas *a* e *b*, carotenoides, vitamina C e compostos fenólicos) do repolho-roxo microvegetal.

Palavras-chave: Alimento funcional, *Brassica oleracea* L var. *capitata* f. *rubra*, Cultivo *indoor*, Espectro de luz, Fluxo de fótons fotossinteticamente ativos, Fábrica de plantas.

WHITE AND RED LIGHT ON YIELD AND QUALITY OF MICROGREEN RED CABBAGE

ABSTRACT – In the last two decades, interest in regular intake of fresh, nutritious and organic vegetables has increased. As an option, microgreens have received attention because they are nutraceutical foods. Recently, there has been an increase in the production of these microgreens in *plant factories*. In these, one of the main factors for success is light. This study aimed to evaluate the effect of white and red light on the production of red cabbage microgreens. For this purpose, two experiments were carried out. In experiment 1, the photosynthetic photon flux density (PPFD) of white LED (150, 250, 350 and 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and photoperiod (12, 16 and 20 hours per day) were evaluated, in two harvest seasons of red cabbage (4 and 6 days of irradiance). In the second experiment, the PPFD (20 and 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and photoperiod (12, 16 and 20 hours per day) of red light additional to 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of white light were evaluated. In both experiments, nutritional, biochemical, physiological, productive and qualitative aspects of the red cabbage microgreen were evaluated. In experiment 1, early harvest, photoperiod and DFFF affected hypocotyl length (HL), cotyledonary area (CA) and yield alone and in interaction. Early harvest in two days resulted in a reduction of 10, 32 and 16.5% in HL, CA and yield, respectively. In general, higher PPFD and photoperiod promoted a decrease in HL and an increase in CA and yield. With the combination of these factors, 315 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ with 20 hours of light provided the highest productivity of red cabbage microgreens. In one year of production, early harvest provides a greater number of production cycles and higher productivity of red cabbage microgreens (616 kg m^{-2}), which was 27% higher than when harvested two days later, when the first leaf appeared. Regarding the quality of red cabbage, it was found that the levels of pigments (chlorophylls and carotenoids), phenolic compounds and vitamin C were modified by managing the intensity and photoperiod of white light factors, with the content of phenolic compounds responding in the opposite way to that observed for the other quality attributes, which increased with increases in photoperiod and white light intensity. The harvest time factor was also an important factor on the quality of the microgreens, sometimes in interaction with the light factor. In general, the delay in harvest increased the levels of chlorophyll, vitamin C and phenolic compounds. In experiment 2, it was found that red light in addition to white light should be adopted for the cultivation of red cabbage microgreens since it promoted increases in the cotyledonary area, productivity and quality of the red cabbage microgreens.

Keywords: *Brassica oleracea* L var. *capitata* f. *rubra*, Functional food, Indoor farm, Light spectrum, Photosynthetically active photon flux, Plant factory

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO

Acredita-se que o contínuo crescimento populacional levará a cerca de 9,7 bilhões de pessoas em 2050 (Skaf et al., 2019), que somado à crescente urbanização, de até 68% para a mesma data, demandará produzir quase 70% mais alimentos para a população (ONU, 2022). Este prognóstico de crescimento populacional é preocupante, pois, em 2021, a ONU estimou haver cerca de 828 milhões de pessoas subnutridas (ONU, 2022). Este contingente pode aumentar, pois, de acordo com Saath e Fachinello (2018), somado ao crescimento populacional, a maior concentração da população nas cidades e aos aumentos de renda *per capita* e de consumo, nas próximas décadas, serão fatores determinantes para aumento da demanda de alimentos.

A fim de acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição, e promover a agricultura sustentável, os quais são objetivos da ODS 2, a ONU propõe dobrar a produtividade mediante sistemas sustentáveis de produção de alimentos. Para tanto, deve-se implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, mas com mínimo de perturbação aos ecossistemas e que, também, fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, tais como a seca, inundação e outros desastres (ONU, 2022).

Historicamente, para aumentar a produção de alimentos, recorreu-se, principalmente, à incorporação de áreas potencialmente agricultáveis e aumentos de produtividade advindos de novas cultivares e pesado investimento tecnológico. Entretanto, o desafio em atender a demanda de alimentos por vir, diferentemente de desafios anteriores é, provavelmente, maior, uma vez que: i) fronteiras agrícolas estão reduzidíssimas, sendo 90% centradas na América Latina e África Subsaariana, dos quais 50% em somente sete países (FAO, 2013); ii) a pressão por manutenção de florestas naturais pode contribuir para a menor incorporação de áreas potencialmente agricultáveis à produção de alimentos (Saath e Fachinello, 2018); iii) ganhos de produtividade não têm sido tão expressivos como em décadas anteriores (Saath e Fachinello, 2018); iv) aquecimento global, que vem prejudicando a produtividade de muitas espécies (Lima et al., 2022); v) aumento dos custos do

agronegócio gerado pelas mudanças climáticas, e limitação das terras agrícolas (Engler e Krarti 2021); e vi) aumento da pressão da sociedade por agricultura de menor impacto ambiental, tanto no uso de água e solo quanto de insumos mais eficientes e com menor geração de gases de efeito estufa (Nascimento et al., 2018; Pereira et al., 2021).

Diante deste contexto, o cultivo *indoor* é um sistema de produção que atende a muitas das questões tratadas anteriormente, pois, é um sistema de cultivo eficiente no uso de recursos necessários à produção; permite a verticalização da produção e, portanto, elevar a produtividade por unidade de terreno. Ademais, está alheio às questões climáticas de temperatura, pluviosidade, entre outras, e até fitossanitárias, conferindo maior segurança à produção.

O cultivo *indoor* é um sistema de produção adequada ao ambiente urbano (agricultura urbana), que além de ser uma nova opção de emprego, propicia que o alimento produzido esteja mais próximo aos consumidores. Contudo, esse sistema de produção não se aplica a todas as espécies cultivadas. Em especial, hortaliças, condimentos e pequenas frutas têm recebido maior atenção de pesquisadores e grande avanço tem sido obtido (Ampim et al., 2022). Nesse sentido, como opção para o cultivo *indoor* e também para atender à ODS 2 da ONU, os microvegetais têm se tornado ótima opção para fábricas de plantas.

Os microvegetais ou microverdes são considerados uma nova classe de alimentos e vêm ganhando popularidade, seja pela diversidade de cores, sabores intensos e textura delicada que apresentam, seja por suas propriedades nutracêuticas, funcionais, como alto conteúdo de compostos bioativos, como ácido ascórbico, filloquinona, antocianinas, carotenoides, glucosinolatos, os quais possuem ações benéficas na prevenção de doenças como diabetes, obesidade, câncer e problemas cardiovasculares (Lanoue et al., 2022; Shibaeva et al., 2023).

Os microvegetais são cultivos intensivos, colhidos quando as folhas cotiledonares estão expandidas, com o aparecimento do primeiro par de folhas definitivas, proporcionando ciclos de cultivo de 7 a 21 dias após a germinação (Hernandez-Adasme et al., 2023). Geralmente, são cultivados em ambiente *indoor*, no qual, a técnica de iluminação artificial tem sido estudada visando melhorar o crescimento e a qualidade (Kozai e Niu, 2020). As espécies mais cultivadas como

microvegetais são as da família Brassicaceae (Ying et al., 2020), as quais se destacam devido à sua relevância nutricional e funcional (Ghoora et al., 2020). O repolho (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.) é umas das hortaliças mais cultivadas no mundo, com alto valor nutricional e medicinal, e sua forma rubra é rica em antocianinas, cujas propriedades têm impacto positivo na saúde humana (Yue et al., 2021).

No cultivo *indoor*, fatores como qualidade da luz, intensidade e fotoperíodo devem compulsoriamente ser alvo de estudos para o cultivo de microvegetais. A qualidade da luz, caracterizada pelos espectros de comprimento de onda, é relevante para produtividade e qualidade do alimento a ser produzido. Os comprimentos de onda de luzes vermelha e azul, sozinhos ou combinados, têm sido amplamente utilizados na produção de hortaliças, incluindo microvegetais em ambiente *indoor* (Zhang et al., 2020). No entanto, a sustentabilidade dos sistemas de *indoor farm* é influenciada pela eficiência das lâmpadas em converter a eletricidade em luz (Pennisi, 2020). Se o efeito do espectro na fotossíntese é semelhante nas espécies, a intensidade, ou seja, a quantidade de fótons fotossintéticos não o é (Kusuma et al., 2020) e, então, há necessidade de otimizar a conversão de fótons em produção (Al Murad et al., 2021).

LED branca pode ser uma opção viável, uma vez que têm ampla saída espectral (Podsdek et al., 2023). Por conterem luz azul, verde e vermelha e, às vezes, vermelho distante, a LED branca propicia ações em múltiplos processos fisiológicos, bioquímicos e morfogenéticos, que repercutem no crescimento e desenvolvimento das plantas (Meng et al., 2019). O fotoperíodo tem papel importante na regulação do crescimento vegetal. Modificações mínimas no fotoperíodo podem desencadear modificações na floração, crescimento do hipocótilo, desenvolvimento de gemas, entre outros (Liu et al., 2022).

Não foram encontrados estudos sobre irradiância de luz branca na produção de repolho-roxo, em cultivo *indoor*. Como hipóteses deste estudo, acredita-se que: i) mesmo para o curto período de iluminação necessário para se atingir o ponto de colheita, o repolho-roxo responderá positivamente ao aumento no fluxo de fótons e ao fotoperíodo, alcançando máxima produtividade próximo à $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e fotoperíodo de 20 h; ii) maior qualidade (compostos fenólicos, antocianinas e

antioxidantes) do repolho-roxo microvegetais será obtida com mesmo fotoperíodo, mas com maior irradiância que proporcionará a máxima produtividade; iii) definida a melhor irradiância de luz branca para a produtividade, a adição de luz vermelha promoverá incremento de produtividade, sem alterar significativamente a qualidade.

Assim, o objetivo da pesquisa foi avaliar os efeitos da luz branca e vermelha sobre aspectos bioquímicos, fisiológicos, produtivos e qualitativos do repolho-roxo microvegetais.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Repolho-roxo microvegetal

Na última década, na maioria das nações, a preocupação em relação a saúde e qualidade de vida aumentou (Teng et al., 2023). Pesquisas sobre o consumo alimentar mostram que 5% da população tem alimentação saudável, enquanto 95% requerem modificações dietéticas significativas (Hernandez-Adasme, 2023). A falta de vitaminas e minerais na dieta humana pode provocar aumento de doenças, como cardiovasculares, diabetes tipo 2, alguns tipos de câncer e obesidade (Bhaswant et al., 2023), o que tem levado a um crescente interesse por alimentos que promovam o bem-estar e estilo de vida saudável (Haslund-Gourley et al., 2022).

Os microvegetais, ou microverdes, são plântulas de várias espécies vegetais, comumente colhidas após 7 a 28 dias após semeadura, quando apresentam seus cotilédones expandidos ou quando apresentam a primeira folha (Di Gioia et al., 2017; Turner et al., 2020; Cano-Lamadrid et al., 2023; Signore et al., 2024). Nessa época, as plantas apresentam sabor intenso, possuem textura agradável e são particularmente ricas em componentes nutracêuticos, que promovem a saúde ou previnem doenças (Du et al., 2022; Metelli et al., 2023). Por terem altas concentrações de fitoquímicos, 10 a 100 vezes maior que nos equivalentes produtos quando colhidos na forma convencional, são considerados alimentos funcionais (Jambor et al., 2022). Podem ser uma fonte de alimento fresco, nutritivo, que podem ser cultivados em pequenos espaços em ambiente urbano (*indoor*), inclusive, a fim de tratar localmente a desnutrição da população. Ademais, têm sido utilizados em

diferentes cozinhas, que pelo pequeno tamanho e aspecto delicado, conferem elegância e sabor às refeições (Ebert, 2022). O mercado é crescente e projeta-se expansão de 245,77 para 315,16 bilhões de dólares entre 2024 e 2029 (Mordor IntelligenceTM Industry Reports, 2023).

As espécies mais utilizadas para a produção de microvegetais são hortaliças e condimentos e pertencem às famílias Amaranthaceae, Amarillydaceae, Apiaceae, Asteraceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae, Fabaceae e Lamiaceae. Entre as espécies, as brassicáceas se destaca por apresentarem não só rápida germinação e curto período para colheita, mas, principalmente, devido aos atributos morfológicos e sensoriais altamente aceitáveis pelos consumidores (Ramirez et al., 2020) O repolho-roxo é uma das espécies mais usadas como microvegetais, devido à suas características nutracêuticas, assim como o seu sabor, textura e cor, apresentando altas fontes de vitamina C, E, carotenoides, com quantidades até 6, 40 e 260 vezes maior que os encontrados em repolho-roxo maduros, respectivamente, além de altos conteúdos de luteína/zeaxatina, que são importantes fatores antioxidantes (Yanes-Molina, 2019).

1.2.2 Fábrica de plantas

O sistema de fábrica de plantas é um componente altamente tecnológico da agricultura moderna e caracteriza-se por instalações onde os fatores de produção, tais como luz, temperatura, umidade, concentração de CO₂, água e nutrientes são controlados com precisão (Kozai e Niu, 2020). Tais condições proporcionam alta produtividade e alta qualidade do alimento, além de permitir a verticalização da produção, que otimiza a área do terreno disponível para a produção (Wong et al., 2020). É uma fábrica de plantas, como em um processo industrial, alheio às intempéries climáticas.

A produção de microvegetais tem pequeno impacto ambiental quando comparado à produção de hortaliças convencionais porque demandam muito menos tempo para produção, fertilizante, espaço e insumos (Weber, 2016). Possui maior eficiência e eficácia de insumos aplicados, o que promove a redução em mais de 96

e 80% das quantidades usadas de água e fertilizantes, respectivamente, em relação ao cultivo em campo, e até a ausência no uso de pesticidas (Sharma et al., 2022).

Geralmente, encontra-se alocado em cidades, gerando postos de serviços importantes para a crescente urbanização presenciada. Também, menor deslocamento do alimento entre a produção e o consumidor proporciona menor custo com logística e menor desperdício, o qual é importante vetor na formação do preço dos alimentos.

Assim, tais características fazem deste sistema de produção de alimentos um sistema social, econômico e ambientalmente interessante e os microvegetais são uma ótima opção para cultivo neste ambiente e podem auxiliar no combate à insegurança alimentar, à carência nutricional e combate a sobrepeso e obesidade.

1.2.3 Efeito da luz na produtividade e qualidade do microvegetal

Apesar do crescimento de pesquisas sobre fatores de produção de microvegetais em ambiente *indoor*, ainda são muitos os desafios (Lanoue et al., 2022). Variações principalmente em luz, temperatura e solução nutritiva afetam significativamente a produtividade e a qualidade dos microvegetais (Sharma et al., 2022). Sem desconsiderar a importância dos demais fatores de produção, a luz é um dos mais importantes para as plantas e o aumento da produção agrícola em áreas urbanas sob ambientes controlados, levou à procura de tecnologias eficientes de iluminação artificial (Al Murad et al., 2021).

O controle dos processos metabólicos da planta está associado aos componentes da luz, como qualidade, intensidade e fotoperíodo, sendo captada por um mecanismo complexo que inclui a percepção de sinais luminosos ao nível da folha e sua transdução para sistemas que ativam suas reações (Paik e Huq, 2019). A qualidade, a quantidade, o fotoperíodo e a distribuição uniforme são características-chave do uso da luz artificial no ambiente *indoor*. Influenciam não só a fotossíntese e, portanto, o crescimento e a produtividade dos microvegetais (Fraszczak, 2023), mas, a qualidade, pois podem afetar a absorção e o uso de nutrientes, a biossíntese e o acúmulo de pigmentos e metabólitos secundários tais como vitaminas, glucosinolatos, compostos fenólicos e outros antioxidantes

(Castillejo et al., 2021; Gao et al., 2021; Tantharapornrerk et al., 2021; Bhaswant et al., 2023).

1.2.3.1 Qualidade da luz

O diodo emissor de luz (Light Emitting Diode, LED), em comparação a outras fontes de irradiância, é uma fonte muito interessante para o cultivo *indoor* (Park et al., 2019; Castillejo et al., 2021), pois é possível estabelecer um espectro de luz otimizado, específico, o que desempenha um papel fundamental na resposta fisiológica, proporcionando alta produtividade e melhor qualidade nutricional das plantas cultivadas (Alrifai et al., 2019; Zhang et al., 2020; Yang et al., 2021; Lee et al., 2023).

1.2.3.1.1 Luz branca

Estudos consideraram principalmente as regiões azul e vermelha do espectro de luz, os comprimentos de onda mais relevantes para os processos fotossintéticos e morfogenéticos que afetam diretamente o crescimento vegetativo e acúmulo de nutrientes, vitaminas e antioxidantes em microvegetais (Alrifai et al., 2019; Castillejo et al., 2021). Brazaitytė et al. (2021) reportaram que LED azul e vermelho têm mais alta eficiência para a produção culturas hortícolas. Essa eficiência está relacionada com a energia de entrada na lâmpada e a sua conversão em energia de fótons fotossinteticamente ativos, que em LED azul, vermelho e branco atingem eficiências de 93, 81 e 76%, respectivamente.

Ainda que menos eficiente, a LED branca tem sido usada em cultivos *indoor* de hortaliças folhosas, incluído os microvegetais (Lee et al., 2023). Essa luz cria um ambiente visualmente agradável para trabalhadores ao inspecionarem as plantas, ao contrário da mistura de luzes vermelha e azul (Pattison et al., 2018). Por ser multiespectral, pode trazer benefícios aos processos fisiológicos, bioquímicos e morfogenéticos em relação à luz monocromática. Por exemplo, o LED verde monocromático não é eficiente na conversão de eletricidade em fótons, mas, traz benefícios quando aplicada via LED branca (Nguyen et al., 2021). Presente na luz

branca, a luz verde tem maior capacidade de penetrar nas camadas internas do mesofilo foliar e atingir os níveis inferiores e internos no dossel da planta, onde outros comprimentos de onda tem ação limitada, podendo aumentar a fotossíntese nos cloroplastos mais profundos e de folhas em extrato mais inferior da planta (Smith et al., 2017). Luz verde em adição ao vermelho e azul promoveu crescimento e reduziu nitrato, aumentou o ácido ascórbico, tocoferol, concentração de antocianina de várias alfaces (Kim et al., 2004; Johkan et al., 2010; Samuolienė et al., 2012).

Também, a presença de vermelho no LED branca pode aumentar produtividade e o teor de antioxidantes de microvegetais (Gerovac et al., 2016) e reduzir o teor de nitrato (Gimenez et al., 2019). Estudos realizados por Yang et al. (2018) indicaram que plantas hortícolas cultivadas sob irradiância de luz branca apresentaram maior atividade fotossintética do que aquelas cultivadas sob luz monocromática.

Somado aos efeitos no crescimento, produção e qualidade das plantas, de acordo com Kusuma et al. (2020), LED branca custa cerca de 20% do LED vermelha. Portanto, diante do exposto, LED branca podem ser uma estratégia para estabelecer protocolos de irradiância para cultivos *indoor* de microvegetais.

1.2.3.1.2 Luz vermelha

A luz vermelha (600-700nm) está entre os principais comprimentos do espectro luminoso mais frequentemente usados em cultivo *indoor* (Kozai e Niu 2020). Absorvido pelas clorofilas e ativador de fitocromo a luz vermelha está envolvida em vários processos das plantas, como germinação, floração, crescimento e biossínteses (Carvalho, 2020).

Estudos comprovaram efeitos positivos da maior proporção da luz vermelha em relação a comprimentos de onda, tanto em parâmetros biométricos quanto de qualidade de microvegetas. Foram observados aumento da área radicular de microvegetais de couve (Brazaitytė et al., 2021), aumento de área foliar, biomassa, comprimento do hipocótilo e redução de nitrato em microvegetais de couve (Fraszczak et al., 2023), aumento de biomassa e comprimento do hipocótilo de salsa

(Carillo et al., 2022), em mostarda (Gerovac et al., 2016; Geregnani et al., 2024), em mostarda, manjerição e ervilha (Bantis, 2021) e em couve-chinesa (Tantharapornrerk et al., 2021), aumento da biomassa de repolho e rabanete (Filatov et al., 2023), aumento de conteúdo fenólico total em microvegetais de tatsoi e manjerição (Brazaitytė et al., 2016). Kong et al. (2019) mostraram que microvegetais de rúcula, repolho, couve e mostarda desenvolveram maiores cotilédones quando tratados com luz vermelha monocromática em comparação à luz azul monocromática, azul-verde e azul-UV. Song et al. (2020) observaram que a luz vermelha melhorou a síntese de vitamina C em Pak choi (*Brassica rapa* ssp. *chinensis*), enquanto Lee et al. (2023) relataram que microvegetais de couve sob LED vermelha continham teores mais elevados de luteína que aquelas expostas a luz azul. Brazaitytė et al. (2021) relataram que microvegetais de mostarda e couve expostas a luz LED vermelha monocromática apresentaram maiores teores de potássio (K). Da mesma forma (Brazaitytė et al., 2017) relataram que a aplicação de luz LED vermelha aumentou os teores de macronutrientes P, K, Mg, S e Ca (1,4, 1,6, 1,8, 1,4 e 1,5 vezes, respectivamente em microvegetais de beterraba. Kamal et al. (2020) revelaram que à maior proporção de luz vermelha na composição espectral fornecida aos microvegetais, maiores foram os parâmetros de crescimento, teores de macro- e micronutrientes e vitaminas. Portanto, a luz vermelha afeta o desenvolvimento das plantas em muitos aspectos morfológicos e fisiológicos (Zhang et al., 2020; Al Murad et al., 2021).

1.2.3.2 Intensidade de luz

Para o sucesso da agricultura em ambientes controlados é preciso ajustar a densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) para a produtividade e/ou qualidade das culturas.

Urrestarazu et al. (2016) constataram que o aumento da intensidade luminosa de 50 para 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, usando lâmpadas brancas proporcionou incremento significativo em todas as espécies testadas (alface, tomate e pimenta). Avaliando intensidades de luz branca (100 a 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre o microvegetal de rúcula, Mendes (2023) verificou máximos de produtividade, de clorofila e de vitamina C com

358, 600 e 458 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. Em rúcula adulta, o aumento da intensidade de luz branca (52, 85, 95 e 117 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) proporcionou maior massa fresca (Nájera et al., 2019).

Poucos estudos foram realizados com luz branca na produção de microvegetais e a grande maioria concentrou-se com as luzes vermelha e azul, com as quais resultados similares têm sido observados. De acordo com Gerovac et al. (2016) o aumento da intensidade luminosa de 105 para 315 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ usando-se proporções de luz vermelha (R), vermelho distante (FR), verde (G) e azul (B) de R₇₄:G₁₈:B₈ e R₈₄:FR₇:B₉ aumentou em 34% e 19%, respectivamente, a massa fresca dos microvegetais de mostarda. De acordo com Jones-Baumgardt et al. (2019), a massa fresca (produtividade) é a métrica mais importante da produção de microvegetais colhido, uma vez que ele é vendido por peso. Estes autores, usando LED com 15% de azul, 85% de vermelho e fotoperíodo de 16 h, embora tenham verificado diminuição em 23% no comprimento do hipocótilo do repolho, constataram aumentos de massa fresca e seca do microvegetais em 56 e 69%, respectivamente, à medida que a DFFF aumentou de 100 para 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Liu et al. (2022), com LED azul-vermelha-verde 1:1:1, verificaram que o aumento da intensidade da luz (30 para 90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) reduziu o comprimento do hipocótilo do repolho microvegetais. Com 90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ houve melhora da qualidade nutricional com maiores teores de clorofila, carotenoides, proteínas, vitamina C e antioxidantes de couve e repolho, enquanto máximos de massa fresca e seca foram obtidos com 90 e 70 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. A aplicação de luz LED vermelha com intensidade de 375 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ foi eficaz no aumento do hipocótilo e massa fresca em microvegetail de couve-chinesa em comparação com os outros comprimentos de ondas testados (Tantharapornrerk et al., 2021), enquanto a massa fresca de brotos de canola irradiados com 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de LED vermelha foram significativamente maiores que quando expostos a luz branca, azul e mistura de azul + vermelha (Park et al., 2019). O comprimento do hipocótilo e de cotilédones de microvegetais de salsa foram 2,1 vezes menores sob luz azul em comparação àquelas cultivadas com luz vermelha (Carrillo et al., 2022).

Portanto, de acordo com resultados, a manipulação da intensidade da luz pode aumentar a atividade fotossintética, crescimento e desenvolvimento e o

conteúdo de fitoquímico nos vegetais (Kyriacou et al., 2016; Meas et al., 2020; Hernandez-Adasme et al., 2023). Também, o aumento da intensidade promove a diminuição do teor de nitrato, conforme observado por Nájera et al. (2019), em beterraba.

Lâmpadas LED têm a capacidade de fornecer altas intensidades de luz com baixo calor radiantes que podem ser ajustadas sobre as plantas, permitindo uma excitação seletiva dos fotopigmentos (Brazaitytė et al., 2015). De acordo com Appolloni et al. (2021) as intensidades mais comumente usadas em microvegetais são de 100 a 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, considerando como intensidade baixa a faixa de 100 a 140 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, médias de 150 a 190 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e alta intensidade acima de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Não foram encontrados estudos sobre intensidade de luz branca no repolho-roxo microvegetal.

1.2.3.3 Fotoperíodo

Assim como o espectro e a intensidade, o fotoperíodo é outro importante componente associado ao manejo da luz no estabelecimento de protocolos para cultivo de microvegetais em ambiente *indoor*. Trata-se de um fenômeno amplo e complexo, onde modificações em sua duração (período claro e escuro) podem desencadear alterações na morfologia e estrutura da planta (Meas et al., 2020), na floração, no crescimento e metabolismo (Meas et al., 2020; Chen et al., 2021; Liu et al., 2022).

Mantendo-se o fluxo de fótons fotossintéticos constante, maior acúmulo de biomassa é esperado conforme o fotoperíodo aumenta, uma vez que maior energia luminosa diária é fornecida às plantas (Silva et al., 2022). Entretanto, considerando que a eficiência energética é definida como a relação entre a energia fixada na biomassa das plantas e a energia elétrica consumida pelo LED (Kong et al., 2019), pode acontecer que a eficiência energética de produção de biomassa diminua devido à redução da fotossíntese mediante a manutenção do sistema de iluminação ligado.

Silva et al. (2022), avaliando fotoperíodos (12 a 24 h) para alface em cultivo *indoor*, verificaram que houve aumento de massa fresca e seca de folhas até 18 h de luz. Porém, a eficiência energética de produção de massa fresca de folhas e de massa seca total foi estável entre 12 e 18 h e reduziu em fotoperíodos maiores, atingindo eficiência menor que a obtida em 12 h a partir de 20 h de luz. Assim, a eficiência energética de produção da biomassa, e a relação produção de biomassa e a energia consumida pelo LED podem ser critérios para melhor definir o fotoperíodo a ser recomendado para o cultivo de repolho microvegetais em ambiente *indoor*.

Na literatura, não foi encontrado estudos sobre fotoperíodo para microvegetais de repolho-roxo. Para repolho-verde, Liu et al. (2022) encontraram melhor produção de biomassa com 20 h, enquanto 14 h foi o que proporcionou melhor desempenho, segundo Filatov e Olonin (2023).

1.2.4 Época de colheita

Na literatura, há relatos de colheita de microvegetais com 7 a 28 dias de crescimento (Di Gioia et al., 2017; Turner et al., 2020; Cano-Lamadrid et al., 2023; Signore et al., 2024), variação esta requerida por diferentes espécies para obter atributos desejáveis para a sua comercialização (Berba e Uchanski, 2012). Em geral, tem sido proposto que a colheita do microvegetal seja feita quando a plântula apresenta uma ou duas folhas (Tallei et al., 2024). Por outro lado, Cano-Lamadrid et al. (2023) mencionam que frequentemente os microvegetais são colhidos com a primeira folha. Estes autores consideraram como brotos e microvegetais quando as plântulas foram colhidas entre 3 a 7 dias de crescimento sob luz e de 12 a 17 dias, respectivamente. Além da espécie e cultivar, a amplitude do período de crescimento dos microvegetais até sua colheita é devida a fatores de produção como qualidade, intensidade e período de luz, densidade de semeadura, temperatura do ambiente, entre outros fatores de produção, inclusive atributos sensoriais para os quais não existem padrões e variam com o interesse pessoal, local ou regional.

Cano-Lamadrid et al. (2023) avaliaram compostos bioativos e compostos fenólicos de plântulas de brássicas colhidas aos 3 até 17 dias de crescimento sob luz. Observaram que a concentração de glucosinolatos de couve, brócoli e mostarda

não foi influenciada entre as colheitas realizadas aos 3 e 7 dias, mas diminuiu em 27% para rabanete e rúcula com o atraso na colheita. Aos 17 dias de crescimento, as concentrações de glucosinolatos em plântulas de brócolis, mostarda, rúcula e rabanete diminuíram em cerca de 39, 50, 62 e 68% em relação às concentrações observadas na colheita realizada com o menor período de crescimento (aos 3 dias), respectivamente. Por outro lado, a concentração de compostos fenólicos não apresentou um padrão entre as espécies avaliadas.

Segundo Signore et al. (2024), a colheita realizada tardiamente (14 dias) em relação à precoce (11 dias) resultou em aumento médio de 30% no estágio de desenvolvimento do brócolis microvegetal, que era compreendido por três fases, a plântula com cotilédones expandidos, primeira folha com menos de 5 mm de comprimento e primeira folha apresentando mais de 5 mm de comprimento. Esse atraso da época de colheita proporcionou o aumento em mais de o dobro no comprimento da primeira folha verdadeira do microvegetal de brócolis, além de apresentar maior altura da planta (10 cm - 7,5 cm) e maior produtividade de 55%. Portanto, a diferença de comprimento do período luminoso para colheita do microvegetal, ainda que em poucos dias, permite colher microvegetais com diferentes desenvolvimentos, podendo apresentar ou não o comprimento da primeira folha verdadeira.

São escassos os estudos na literatura sobre os efeitos da época de colheita sobre a qualidade e produção dos microvegetais (Turner et al., 2020). Entender a fase do crescimento e o momento da colheita para microvegetais é crucial para maximizar flavour e valor nutricional (Tallei et al., 2024). Somado ao efeito na qualidade, a colheita precoce de microvegetais, sem a presença da primeira folha, ainda que pese obter menor produtividade na presente colheita, em razão de menor ciclo de produção, pode ser uma estratégia para aumento de produtividade ao longo do ano.

1.3 REFERÊNCIAS

- Al Murad M, Razi, K, Jeong BR, Samy PMA, Muneer S (2021) Light Emitting Diodes (LEDs) as Agricultural Lighting: Impact and Its Potential on Improving Physiology, Flowering, and Secondary Metabolites of Crops. **Sustainability** 13:1985. <https://doi.org/10.3390/su13041985>
- Alrifai O, Hao X, Marcone MF, Tsao R (2019) Current review of the modulatory effects of LED lights on photosynthesis of secondary metabolites and future perspectives of microgreen vegetables. **Journal of agricultural and food chemistry** 67:6075-6090. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00819>
- Ampim PA, Obeng E, Olvera-Gonzalez E (2022) *Indoor Vegetable Production: An Alternative Approach to Increasing Cultivation*. **Plants** 11:2843. <https://doi.org/10.3390/plants11212843>
- Appolloni E, Pennisi G, Zauli I, Carotti L, Paucek I, Quaini S, Gianquinto G (2021) Beyond vegetables: effects of indoor LED light on specialized metabolite biosynthesis in medicinal and aromatic plants, edible flowers, and microgreens. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 102:472-487. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11513>
- Bantis, F. (2021) Light spectrum differentially affects the yield and phytochemical content of microgreen vegetables in a plant factory. **Plants** 10:2182. <https://doi.org/10.3390/plants10102182>
- Berba KJ, Uchanski M (2012) Post-harvest Physiology of Microgreens. **Journal of Young Investigators** 24:1-5.
- Bhaswant M, Shanmugam DK, Miyazawa T, Abe C, Miyazawa T (2023) Microgreens—A Comprehensive Review of Bioactive Molecules and Health Benefits. **Molecules** 281:867. <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/2/867>
- Brazaitytė A, Miliauskienė J, Vaštakaitė-Kairienė V, Sutulienė R, Laužikė K, Duchovskis P, Małek S (2021) Effect of different ratios of blue and red led light on brassicaceae microgreens under a controlled environment. **Plants** 10:801. <https://doi.org/10.3390/plants10040801>
- Brazaitytė A, Sakalauskienė S, Samuolienė G, Jankauskienė J, Viršilė A, Novičkovas A, Duchovskis P (2015) The effects of LED illumination spectra and intensity on carotenoid content in Brassicaceae microgreens. **Food chemistry** 173:600-606. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.077>

Brazaitytė A, Vaštakaitė V, Viršilė A, Jankauskienė J, Samuolienė G, Sakalauskienė S, Novičkovas A, Miliauskienė J, Duchovskis, P (2017) Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW TECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENT CONTROL, ENERGY-SAVING AND CROP PRODUCTION IN GREENHOUSE AND PLANT, **Anais...** 12271:507-516.

Brazaitytė A, Vaštakaitė V, Viršilė A, Jankauskienė J, Samuolienė G, Sakalauskienė S, Novičkovas A, Miliauskienė J, Duchovskis, P (2016) Light quality: growth and nutritional value of microgreens under indoor and greenhouse conditions. In: VIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHT IN HORTICULTURE. **Anais...** Michigan: East Lansing, 277-284 p.

Cano-Lamadrid M, Martínez-Zamora L, Castillejo N, Cattaneo C, Pagliarini E, Artés-Hernández F (2023) How does the phytochemical composition of sprouts and microgreens from Brassica vegetables affect the sensory profile and consumer acceptability?. **Postharvest Biology and Technology** 203:112411. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112411>

Carillo P, El-Nakhel C, De Micco V, Giordano M, Pannico A, De Pascale S, Graziani G, Ritieni A, Soteriou GA, Kyriacou MC, Rouphael Y (2022) Morpho-metric and specialized metabolites modulation of parsley microgreens through selective LED wavebands. **Agronomy** 12:1502. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071502>

Carvalho RF (Ed.) (2020) Fitocromos. Moléculas espectaculares na vida das plantas. Jaboticabal: Funep, 164p.

Castillejo N, Martínez-Zamora L, Gómez PA, Pennisi G, Crepaldi A, Fernández JA, Orsini F, Artés-Hernández F (2021) Postharvest yellow LED lighting affects phenolics and glucosinolates biosynthesis in broccoli sprouts. **Journal of Food Composition and Analysis** 103:104101. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104101>

Chen J, Chen Z, Li Z, Zhao Y, Chen X, Wang-Pruski G, Guo R (2021) Effect of photoperiod on Chinese kale (*Brassica alboglabra*) sprouts under white or combined red and blue light. **Frontiers in Plant Science** 11:589746. <https://doi.org/10.3339/fpls.2020.589746>

Di Gioia F, Renna M, Santamaria P (2017) Sprouts, microgreens and “baby leaf” vegetables. In.: Yildiz F, Wiley R (Eds.) **Minimally Processed Refrigerated Fruits and Vegetables**. Boston: Springer, p. 403–432

Du M, Xiao Z, Luo Y (2022) Advances and emerging trends in cultivation substrates for growing sprouts and microgreens toward safe and sustainable agriculture. **Current Opinion in Food Science** 46:100863. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100863>

Ebert AW (2022) Sprouts and microgreens—Novel food sources for healthy diets. **Plants** 11:571. <https://doi.org/10.3390/plants11040571>

Engler N, Krarti M (2021) Review of energy efficiency in controlled environment agriculture. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 141:110786. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110786>

Filatov D, Olonin I (2023) Optimal ratio of spectrum, light intensity and photoperiod to minimize costs when growing microgreens. **E3S Web of Conferences** 383:04074 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304074>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Crops and Livestock Products. Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on 20 June 2023).

Frąszczak B, Kula-Maximenko M, Podsędek A, Sosnowska D, Unegbu KC, Spizewski T (2023) Morphological and Photosynthetic Parameters of Green and Red Kale Microgreens Cultivated under Different Light Spectra. **Plants** 12:3800. <https://doi.org/10.3390/plants12223800>

Gao M, He R, Shi R, Zhang Y, Song S, Su W, Liu H (2021) Differential effects of low light intensity on broccoli microgreens growth and phytochemicals. **Agronomy** 11:537. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/3/537>

Garegnani M, Sandri C, Pacelli C, Ferranti F, Bennici E, Desiderio A, Villani ME (2024) Non-destructive real-time analysis of plant metabolite accumulation in radish microgreens under different LED light recipes. **Frontiers in Plant Science** 14:1289208. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1289208>

Gerovac JR, Craver JK, Boldt JK, Lopez RG (2016) Light intensity and quality from sole-source light-emitting diodes impact growth, morphology, and nutrient content of Brassica microgreens. **HortScience** 51:497-503. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.5.497>

Ghoora MD, Babu DR, Srividya N (2020) Nutrient composition, oxalate content and nutritional ranking of ten culinary microgreens. **Journal of Food Composition and Analysis** 91:103495. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103495>

Giménez A, Fernández JA, Pascual A, Ros M, López-Serrano M, Egea-Gilabert C (2019) An agroindustrial compost as alternative to peat for production of baby leaf red lettuce in a floating system. **Scientia Horticulturae** 246:907-915. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.080>

Haslund-Gourley B, Para C, Rachuri S, Enders S, Marshall R, Mishra V, Udeh S, Nwabeke J, Gadegbeku A (2022) Microgreens Grow Kit: A Novel Pilot Study to Improve Nutrition Awareness. **Transformative Medicine** 1:2-11. <https://doi.org/10.54299/tmed/ngfk2366>

Hernández-Adasme C, Palma-Dias R, Escalona VH (2023) The Effect of Light Intensity and Photoperiod on the Yield and Antioxidant Activity of Beet Microgreens Produced in an *Indoor* System. **Horticulturae** 9:493. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040493>

Jambor T, Knizatova N, Valkova V, Tirpak F, Greifova H, Kovacik A, Lukac N (2022) Microgreens as a functional component of the human diet: a review. **Journal of microbiology, biotechnology and food sciences** 12: e5870-e5870. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.5870>

Johkan M, Shoji K, Goto F, Hashida SN, Yoshihara T (2010) Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. **HortScience** 45:1809-1814. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.12.1809>

Jones-Baumgardt C, Llewellyn D, Ying Q, Zheng Y (2019) Intensity of sole-source light-emitting diodes affects growth, yield, and quality of Brassicaceae microgreens. **HortScience** 54:1168-1174. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13788-18>

Kamal KY, Khodaeiaminjan M, El-Tantawy AA, Moneim DA, Salam AA, Ash-shormillesy SM, Ramadan MF (2020) Evaluation of growth and nutritional value of Brassica microgreens grown under red, blue and green LEDs combinations. **Physiologia plantarum** 169:625-638. <https://doi.org/10.1111/ppl.13083>

Kim HH, Goins GD, Wheeler RM, Sager JC (2004). Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. **Annals of botany** 94: 691-697. <https://doi.org/10.1093/aob/mch192>

Kong Y, Kamath D, Zheng Y (2019) Blue versus red light can promote elongation growth independent of photoperiod: A study in four Brassica microgreens species. **HortScience** 54:1955-1961. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14286-19>

Kozai T, Niu G (2020) Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In.: Kozai T, Niu G, Takagaki M (Eds.) **Plant Factory An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production** Academic Press, p. 477-487

Kusuma P, Pattison PM, Bugbee B (2020) From physics to fixtures to food: Current and potential LED efficacy. **Horticulture research** 7:56. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0283-7>

Kyriacou MC, Rouphael Y, Di Gioia F, Kyrtzis A, Serio F, Renna M, Santamaria P (2016) Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. **Trends in Food Science & Technology** 57:103-115. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.005>

Lanoue J, St Louis S, Little C, Hao X (2022) Continuous lighting can improve yield and reduce energy costs while increasing or maintaining nutritional contents of microgreens. **Frontiers in Plant Science** 13:983222. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.983222>

Lee H, Park SW, Cui M, Lee B, Minh Pham D, Hwang H, Chun C (2023) Improvement of strawberry transplant production efficiency by supplementary blue light in a plant factory using white LEDs. **Horticulture, Environment, and Biotechnology** 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13580-022-00493-9>

Lee S, Park CH, Kim JK, Ahn K, Kwon H, Kim JK, Yeo HJ (2023) LED lights influenced phytochemical contents and biological activities in kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) microgreens. **Antioxidants** 12:1686. <https://doi.org/10.3390/antiox12091686>

Lima RF, de Oliveira Aparecido LE, Torsoni GB, Chiquitto AG, Moraes JR, de Souza Rolim G (2022) Agroclimatic zoning for the incidence of brown eye spot on coffee under climate change scenarios. **Theoretical and Applied Climatology** 149:1471-1496. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04123-3>

Liu K, Gao M, Jiang H, Ou S, Li X, He R, Liu H (2022) Light intensity and photoperiod affect growth and nutritional quality of brassica microgreens. **Molecules** 27:883. <https://doi.org/10.3390/molecules27030883>

Meas S, Luengwilai K, Thongket T (2020) Enhancing growth and phytochemicals of two amaranth microgreens by LEDs light irradiation. **Scientia Horticulturae** 265:109204. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109204>

Mendes FQ (2023) **Características da luz sobre a produtividade e valor nutricional de rúcula-microvegetal em cultivo indoor**. 60 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Unesp, Jaboticabal.

Meng Q, Kelly N, Runkle ES (2019) Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. **Environmental and experimental botany** 162:383-391. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.016>

Metelli G, Lampazzi E, Pagliarello R, Garegnani M, Nardi L, Calvitti M, Desiderio A (2023) Design of a modular controlled unit for the study of bioprocesses: Towards solutions for Bioregenerative Life Support Systems in space. **Life Sciences in Space Research** 36:8-17. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2022.10.006>

Mordor Intelligence™ Industry Reports (2023) Microgreens market size & share analysis – growth trends & forecasts (2023–2028)

Nájera C, Urrestarazu M (2019) Effect of the intensity and spectral quality of LED light on yield and nitrate accumulation in vegetables. **HortScience** 54:1745-1750. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14263-19>

Nascimento CS, Cecilio Filho AB, Mendoza-Cortez JW, Nascimento CS, Bezerra NF, Grangeiro LC (2018) Effect of population density of lettuce intercropped with rocket on productivity and land-use efficiency. **PloS one** 13:0194756. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194756>

Nguyen TKL, Cho KM, Lee HY, Cho DY, Lee GO, Jang SN, Lee Y, Kim D, Son KH (2021) Effects of white LED lighting with specific shorter blue and/or green wavelength on the growth and quality of two lettuce cultivars in a vertical farming system. **Agronomy** 11:2111. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112111>

Paik I, Huq E (2019) Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks. **Seminars in Cell & Developmental Biology** 92:114-121. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2019.03.007>

Park CH, Kim NS, Park JS, Lee SY, Lee JW, Park SU (2019). Effects of light-emitting diodes on the accumulation of glucosinolates and phenolic compounds in sprouting canola (*Brassica napus* L.). **Foods** 8:76. <https://doi.org/10.3390/foods8020076>

Pattison PM, Tsao JY, Brainard GC, Bugbee B (2018) LEDs for photons, physiology and food. **Nature** 563:493-500 <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0706-x>

Pennisi G, Pistillo A, Orsini F, Cellini A, Spinelli F, Nicola S, Marcelis LF (2020) Optimal light intensity for sustainable water and energy use in *indoor* cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. **Scientia Horticulturae** 272:109508. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109508>

Pereira BJ, Cecílio Filho AB, La Scala JN (2021) Greenhouse gas emissions and carbon footprint of cucumber, tomato and lettuce production using two cropping systems. **Journal of cleaner production** 282:124517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124517>

Ramirez D, Abellán-Victorio A, Beretta V, Camargo A, Moreno DA (2020) Functional ingredients from Brassicaceae species: Overview and perspectives. **International journal of molecular sciences** 21:1998. <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/6/1998>

Saath KCDO, Fachinello AL (2018) Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural** 56:195-212. <http://dx.doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>

Samuolienė G, Sirtautas R, Brazaitytė A, Viršilė A, Duchovskis P (2012) Supplementary red-LED lighting and the changes in phytochemical content of two baby leaf lettuce varieties during three seasons. **Journal of Food Agriculture & Environment** 10:701-706.

Shibaeva TG, Rubaeva A A, Sherudilo EG, Titov AF (2023) Continuous lighting increases yield and nutritional value and decreases nitrate content in Brassicaceae microgreens. **Russian Journal of Plant Physiology** 70:118. <https://doi.org/10.1134/S1021443723601337>

Silva LM, Cruz LP, Pacheco VS, Machado EC, Purquerio LFV, Ribeiro RV (2022) Energetic efficiency of biomass production is affected by photoperiod in *indoor* lettuce cultivation. **Theoretical and Experimental Plant Physiology** 34:265-276. <https://doi.org/10.1007/s40626-022-00246-0>

Smith HL, McAusland L, Murchie EH (2017) Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. **Journal of experimental botany** 68: 2099-2110.

Song Y, Qiu K, Gao J, Kuai B (2020) Molecular and physiological analyses of the effects of red and blue LED light irradiation on postharvest senescence of pak choi. **Postharvest Biology and Technology** 164:111155. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111155>

Sharma S, Shree B, Sharma D, Kumar S, Kumar V, Sharma R, Saini R (2022) Vegetable microgreens: The gleam of next generation super foods, their genetic enhancement, health benefits and processing approaches. **Food Research International** 111038. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111038>

Signore A, Somma A, Leoni B, Santamaria P (2024) Optimising Sowing Density for Microgreens Production in Rapini, Kale and Cress. **Horticulturae** 10:274. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030274>

Skaf L, Buonocore E, Dumontet S, Capone R, Franzese PP (2019) Food security and sustainable agriculture in Lebanon: An environmental accounting framework. **Journal of cleaner production** 209:1025-1032. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.301>

Tallei TE, Kepel BJ, Wungouw HIS, Nurkolis F, Adam AA, Fatimawali (2024). A comprehensive review on the antioxidant activities and health benefits of microgreens: Current insights and future perspectives. **International Journal of Food Science & Technology**, 59:58-71. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16805>

Tantharapornrerk N, Vichitsoonthonkul T, Techavuthiporn C, Photchanachai S (2021) Growth and antioxidant system of Chinese kale microgreens in response to different illumination of light sources. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science** 1-15. <https://doi.org/10.1080/01140671.2021.1958876>

Teng Z, Luo Y, Pearlstein DJ, Wheeler RM, Johnson CM, Wang Q, Fonseca JM (2023) Microgreens for home, commercial, and space farming: A comprehensive update of the most recent developments. **Annual Review of Food Science and Technology** 14:539-562. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721-024636>

Turner ER, Luo Y, Buchanan RL (2020) Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: a review. **Journal of Food Science** 85:870-882. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15049>

United Nations (2022) Sustainable development goals knowledge platform. Progress of goal 2 in 2022. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg2>

Urrestarazu M, Nájera C, del Mar Gea M (2016) Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops. **HortScience** 51:268-271. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.3.268>

Weber CF, 2016 Nutrient content of cabbage and lettuce microgreens grown on vermicompost and hydroponic growing pads. **Journal of Horticulture** 3:1-5. <https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000190>

Wong CE, Te ZWN, Shen L, Yu H (2020) Seeing the lights for leafy greens in *indoor* vertical farming. **Trends in Food Science & Technology** 106:48-63. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.031>

Yanes-Molina AP, Jaime-Meuly R, Andrade-Bustamante G, Lucero-Flores TI, Martínez-Ruíz FE (2019) Microgreens-an alternative of horticultural production and market. **Expert journal of marketing** 7:120-136.

Yang L, Fanourakis D, Tsaniklidis G, Li K, Yan Q, Li T (2021) Contrary to red, blue monochromatic light improves the bioactive compound content in broccoli sprouts. **Agronomy** 11:2139. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/11/2139>

Yang X, Xu H, Shao L, Li T, Wang Y, Wang R (2018) Response of photosynthetic capacity of tomato leaves to different LED light wavelength. **Environmental and Experimental Botany** 150:161-171. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.013>

Ying Q, Kong Y, Jones-Baumgardt C, Zheng Y (2020) Responses of yield and appearance quality of four Brassicaceae microgreens to varied blue light proportion in red and blue light-emitting diodes lighting. **Scientia Horticulturae** 259:108857. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108857>

Yue T, Xing Y, Xu Q, Yang S, Xu L, Wang X, Yang P (2021) Physical and chemical properties of purple cabbage as affected by drying conditions. **International Journal of Food Properties** 24:997-1010. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1953070>

Zhang X, Bian Z, Yuan X, Chen X, Lu C (2020) A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. **Trends in food science & technology** 99:203-216. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.031>

CAPÍTULO 2 - ÉPOCA DE COLHEITA, FOTOPERÍODO E IRRADIÂNCIA DE LUZ BRANCA NA PRODUTIVIDADE DE REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL

RESUMO - O cultivo em fábricas de plantas é um sistema de produção que se caracteriza por alto controle e eficiência dos fatores de produção, no qual tem crescido o cultivo de microvegetais. O fotoperíodo e a densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) são dois dos principais fatores a serem estudados a fim de obter máximos de produtividade, não tendo sido encontrados estudos para estes fatores com o uso de LED branca associados à colheita precoce. Assim, em ambiente *indoor*, foi conduzido um experimento para avaliar a influência do fotoperíodo (12, 16 e 20 horas por dia) e DFFF (150, 250, 350 e 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em duas épocas de colheita (4 e 6 dias de luz) no crescimento e produtividade do repolho-roxo microvegetal. A colheita precoce, o fotoperíodo e a DFFF afetaram o comprimento do hipocótilo (CH), área cotiledonar (AC) e produtividade (PROD) isoladamente e em interação. Colheita precoce em dois dias resultou em redução de 10, 32 e 16,5% no CH, AC e PROD, respectivamente. De modo geral, maiores DFFF e fotoperíodo promoveram diminuição do CH e aumento da AC e PROD. Com a combinação desses fatores, 315 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com 20 horas de luz proporcionou a maior produtividade de repolho-roxo microvegetal. Em um ano de produção, a colheita precoce proporciona maior número de ciclos produtivos e maior produtividade de repolho-roxo microvegetal (616 kg m^{-2}), a qual foi 27% maior que quando a colheita foi realizada dois dias após, quando surgiu a primeira folha.

Palavras-chave: Alimento funcional, *Brassica oleracea* L var. *capitata* f. *rubra*, Fábrica de plantas, LED branca

CHAPTER 2 - HARVESTING TIME, PHOTOPERIOD AND WHITE LIGHT IRRADIANCE ON MICROVEGETABLE RED CABBAGE PRODUCTIVITY

ABSTRACT - Plant factory cultivation is a production system characterized by high control and efficiency of production factors, in which microvegetable cultivation has grown. Photoperiod and photosynthetic photon flux density (PPFD) are two of the main factors to be studied in order to obtain maximum productivity, and no studies have been found for these factors with the use of white LED associated with early harvest. Thus, in an indoor environment, an experiment was conducted to evaluate the influence of photoperiod (12, 16 and 20 hours per day) and PPFD (150, 250, 350 and 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in two harvest periods (4 and 6 days of light) on the growth and productivity of the red cabbage microgreen. Early harvest, photoperiod and PPFD affected hypocotyl length (HL), cotyledonary area (CA) and yield alone and in interaction. Early harvest in two days resulted in a reduction of 10, 32 and 16.5% in HL, CA and yield, respectively. In general, higher PPFD and photoperiod promoted a decrease in HL and an increase in CA and yield. With the combination of these factors, 315 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ with 20 hours of light provided the highest productivity of red cabbage microgreens. In a year of production, early harvesting provides a greater number of production cycles and higher productivity of red cabbage microgreens (616 kg m^{-2}), which was 27% higher than when harvesting was carried out two days later, when the first leaf appeared.

Keywords: Functional food, *Brassica oleracea* L var. *capitata* f. *rubra*, Plant factory, White LED

2.1 INTRODUÇÃO

O desafio de acabar com a fome é permanente. Para tanto, a ONU propõe dobrar a produtividade dos cultivos, utilizando-se de práticas agrícolas resilientes com mínima perturbação aos ecossistemas e que, também, sejam fortes frente às mudanças climáticas, tais como a seca, inundação e outros desastres (ONU 2022). Historicamente, para aumentar a produção de alimentos, recorreu-se, principalmente, à incorporação de áreas potencialmente agricultáveis e aumentos de produtividade advindos de novas cultivares e pesado investimento tecnológico. Entretanto, diferentemente de desafios anteriores, o desafio em atender ao aumento de 70% na demanda de alimentos até 2050 (FAO 2023) é maior, uma vez que: i) fronteiras agrícolas estão reduzidíssimas, sendo 90% centradas na América Latina e África Subsaariana, dos quais 50% em somente sete países (FAO 2023); ii) a pressão por manutenção de florestas naturais pode contribuir para a menor incorporação de áreas potencialmente agricultáveis à produção de alimentos (Saath e Fachinello 2018); iii) ganhos de produtividade não têm sido tão expressivos como em décadas anteriores (Saath e Fachinello 2018); iv) aquecimento global vem prejudicando a produtividade de muitas espécies (Lima et al 2022); v) aumento da pressão da sociedade por agricultura de menor impacto ambiental, tanto no uso de água e solo quanto de insumos mais eficientes e com menor geração de gases de efeito estufa (Nascimento et al., 2018; Pereira et al., 2021).

O cultivo *indoor* é um sistema de produção que responde positivamente às questões mencionadas. Caracteriza-se por ser altamente tecnológico, onde os fatores de produção são controlados com precisão (Kozai e Niu 2020), proporcionando alta produtividade e qualidade do alimento. Também, permite a verticalização da produção, que otimiza a área do terreno disponível para a produção (Wong et al., 2020). Neste sistema de produção, considerados como uma nova classe de alimentos, os microvegetais têm sido vistos como grande opção para cultivo e produção de alimento em quantidade e qualidade à população, especialmente pelo alto valor nutracêutico e concentrações de compostos bioativos com ações benéficas na prevenção de doenças como diabetes, obesidade, câncer e problemas cardiovasculares (Lanoue et al., 2022; Shibaeva et al., 2022). Entre as

espécies mais cultivadas, as brassicáceas se destacam por apresentarem não só rápida germinação e curto período para colheita, mas, principalmente, devido aos atributos morfológicos e sensoriais altamente aceitáveis pelos consumidores (Ramirez et al., 2020). O repolho-roxo é uma interessante opção devido ao seu sabor, textura, cor, altas concentrações de vitaminas C e E, carotenoides, luteína/zeaxatina, que são importantes fatores antioxidantes (Yanes-Molina, 2019).

Não obstante, neste ambiente, dada a ausência de radiação solar, é compulsório estabelecer protocolos de irradiância para obter produção com qualidade comercial. Devido serem mais eficientes e eficazes na conversão da eletricidade em fótons, as primeiras luminárias de LED para horticultura eram combinações de azul e vermelho (Kusuma et al., 2020) e hoje correspondem à grande maioria dos relatos de estudos para microvegetal em ambiente *indoor* (Zhang et al., 2020). No entanto, ainda que menos eficiente, devido ao uso generalizado em aplicações de iluminação para conforto da visão humana, LED branca custa cerca de 20% do custo da LED vermelha, o que contribuiu para o aumento da participação de luz branca para mais de 60% em alguns acessórios hortícolas (Kusuma et al., 2020). Ademais, pelo amplo espectro de radiação, a luz branca pode ter ações potencializadoras de processos fisiológicos, que repercutem no crescimento e desenvolvimento das plantas (Meng et al., 2019). A luz verde monocromática não é eficiente na conversão de eletricidade em fótons, mas, traz benefícios quando é componente da LED branca, pois tem maior capacidade de penetrar no perfil foliar que as luzes azul e vermelha, incrementando a fotossíntese por atuar em cloroplastos inferiores (Nguyen et al., 2021). Segundo Yang et al. (2018), plantas hortícolas cultivadas sob luz branca apresentaram maior atividade fotossintética que aquelas sob luz monocromática. Portanto, LED branca pode ser uma estratégia para estabelecer protocolos de irradiância para alta produtividade e qualidade de alimentos, com menor custo.

Quanto ao fotoperíodo, este tem papel importante na regulação do crescimento, desenvolvimento e valor nutricional das plantas (Meas et al., 2020; Liu et al., 2022). Mantendo o fluxo de fótons fotossintéticos constante, maior acúmulo de biomassa é esperado com o aumento do fotoperíodo, uma vez que maior energia luminosa diária é fornecida às plantas (Silva et al., 2022). Avaliando fotoperíodos (12

a 24 h) para alface em cultivo *indoor*, Silva et al. (2022) verificaram aumentos de massas fresca e seca de folhas até 18 h de luz. Para repolho verde, Liu et al. (2022) encontraram maior produção de biomassa com 20 h enquanto 14 h proporcionou melhor desempenho segundo Filatov e Olonin (2023). Não foi encontrado estudo sobre fotoperíodo para repolho-roxo microvegetal.

Para o sucesso da agricultura em ambientes controlados é preciso, também, ajustar a densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) para a cultura. De acordo com Jones-Baumgardt et al. (2019), provavelmente, a massa fresca (produtividade) é a métrica mais importante da produção de microvegetal colhido, uma vez que ele é vendido por peso. Estes autores, usando LED com 15% de azul e 85% de vermelho e fotoperíodo de 16 h, embora tenham verificado diminuição em 23% no comprimento do hipocótilo do repolho, constataram aumentos de massa fresca e seca do microvegetal em 56 e 69%, respectivamente, à medida que a PPPD aumentou de 100 para 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Liu et al. (2022), com LED azul-vermelha-verde 1:1:1, verificaram que o aumento da irradiância de 30 para 90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ reduziu o comprimento do hipocótilo do repolho microvegetal, enquanto máximos de massa fresca e seca foram obtidos com 90 e 70 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. Não foram encontrados resultados para irradiância em repolho-roxo microvegetal usando-se de LED branca.

Estudos sobre a época de colheita não foram encontrados para repolho-roxo microvegetal. Como padrão para a colheita de microvegetais, recomenda-se que seja feita quando se inicia o aparecimento da primeira folha (Shibaeva et al., 2023). Entretanto, este estudo tem como hipótese que apesar da colheita precoce reduzir o tamanho de hipocótilo, da área foliar e massa fresca e seca do microgreen, ela não comprometerá aspectos sensoriais de comercialização (apresentação visual, principalmente) e permitirá à fábrica de microvegetal obter maior produção de alimento no decorrer de um ano em razão de permitir a realização de mais ciclos produtivos. Soma-se a esta hipótese a de que mesmo para o curto período de iluminação necessário para se atingir o ponto de colheita, o repolho-roxo responderá positivamente ao aumento no fluxo de fótons e ao fotoperíodo. Assim, objetivou-se avaliar os efeitos da irradiância de luz branca e do fotoperíodo sobre o crescimento e produtividade do repolho-roxo microvegetal.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área experimental

O experimento foi conduzido de 10 a 19 de março de 2023, no Laboratório Cultivo *Indoor*, com controle de temperatura para 20 ± 1 °C e umidade relativa do ar de 50 a 70%. O laboratório está localizado no Departamento Produção Vegetal, na UNESP, câmpus de Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

2.2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Foram avaliados 24 tratamentos em parcelas sub-sub-divididas, sendo o fotoperíodo (12, 16 e 20 horas por dia) na parcela, densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) (150, 250, 350 e 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) na sub-parcela e a época de colheita (4 e 6 dias de luz) na sub-sub-parcela, com quatro repetições dos tratamentos. Cada unidade experimental correspondeu a uma prateleira da estante contendo duas bandejas de microvegetais.

Foram utilizadas lâmpadas LED branca, 7W, 48VDC, modelo GLFS-v.11.7.4.22 (LEDs-up Soluções para cultivo®), composta por azul (25,4%), verde (23,8%), amarelo/laranja (21,3%), vermelho (27,1%) e vermelho distante (2,3%). Utilizando-se de um espectro-radiômetro SpectraPen SN-SP-144 (Photon System Instruments®), realizou-se a distribuição das lâmpadas de modo a obter uniformidade das irradiâncias estabelecidas nos tratamentos sobre as bandejas de microvegetais.

2.2.3 Condições experimentais

As bandejas de polipropileno retangulares (14 x 11,5 x 4,5 cm) foram preenchidas com 1,5 cm de substrato organomineral para hortaliças (Bioplant®), o qual apresenta pH $6 \pm 0,3$ e condutividade elétrica de $0,8 \text{ dS m}^{-1} \pm 0,06$. Na base das bandejas, foram realizados furos de 2 mm de diâmetro, equidistantes em 3 cm, para umedecimento do substrato com solução nutritiva por capilaridade.

Realizou-se a semeadura manual, distribuindo 300 g m^{-2} de sementes de repolho-roxo (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* f. *rubra*) 'Mamouth Red Rock' (Feltrim Seeds®) sobre o substrato úmido, de maneira uniforme, sem incorporação das sementes. Após a semeadura, as bandejas foram pulverizadas com água para umedecimento da semente, empilhadas em lotes de quatro bandejas e colocadas em ambiente escuro para germinação, enraizamento das plântulas no substrato e crescimento do hipocótilo. Três dias após a semeadura (DAS), duas bandejas contendo as plântulas foram colocadas no centro de bandejas maiores, e transferidas para o Laboratório Plant Factory para aplicação dos tratamentos (Figura 1). A distância entre as lâmpadas e os cotilédones dos microvegetais foi de 27 cm.

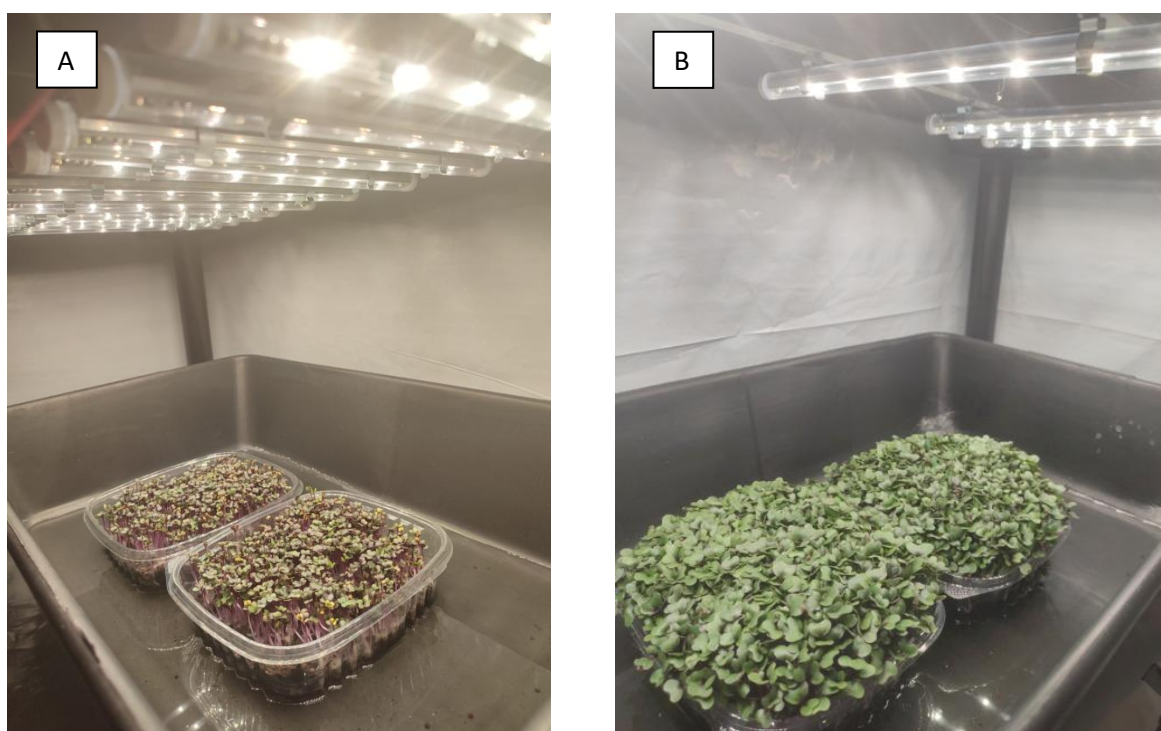


Figura 1. Bandejas com repolho-roxo microvegetal recém retiradas da fase escura e colocadas em bandeja contentora de solução nutritiva (A) e bandejas com microvegetal prontos para a colheita (B).

Previamente ao início da irradiância dos tratamentos, foram disponibilizados 500 mL de solução nutritiva na bandeja maior para atender às duas bandejas de microvegetal (unidade experimental). Utilizou-se a solução nutritiva proposta por Furlani et al. (1999) para hortaliças folhosas em hidroponia *nutrient film technique*,

que tem a seguinte concentração de nutrientes: 174,0; 24,0; 39,0; 183,0; 142,0; 38,0; 52,0; 0,3; 0,02; 2,0; 0,4; 0,06 e 0,06 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻, N-NH₄⁺, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn, respectivamente. O critério para reposição de solução nutritiva às bandejas foi a completa absorção de solução nutritiva disponibilizada.

Realizaram-se duas colheitas. A primeira, aos 4 dias de irradiância, quando as plântulas só apresentavam os cotilédones completamente expandidos, sem a visualização da primeira folha. A segunda colheita ocorreu aos 6 dias de iluminação e os microvegetais apresentavam início do crescimento da primeira folha.

2.2.4 Características avaliadas

- a) Fluorescência da clorofila: no dia da colheita, com o auxílio de um fluorômetro portátil, modelo OS30p (Opti-Science, USA), foi avaliada a eficiência quântica do fotossistema II. Para tanto, após 30 minutos da colocação de pinças, foram obtidos os dados de F₀ (fluorescência inicial), F_m (fluorescência máxima), F_v (variação na fluorescência calculada a partir de F₀ e F_m), e obtida a eficiência quântica (F_v/F_m)
- b) Produtividade: os microvegetais de uma bandeja foram colhidos cortando-se o hipocótilo rente ao substrato e imediatamente pesados em balança com 0,01 g de precisão. A produtividade foi estimada e expressa em g m⁻².
- c) Comprimento do hipocótilo (cm): hipocótilos de 50 plântulas foram medidos com auxílio de uma régua graduada.
- d) Área cotiledonar (cm² por planta): cotilédones de 50 plântulas por unidade experimental tiveram as suas áreas quantificadas por meio do medidor eletrônico de área, modelo LI 3100 (LI-COR®).

2.2.5 Análise de dados

Os dados de cada característica foram submetidos a análise de variância (Teste F). O teste Tukey foi aplicado para comparar as médias dos fatores época de colheita e fotoperíodo e estudo de regressão polinomial foi realizado para o fator DFFF, escolhendo a equação significativa ($p < 0,05$) e com maior coeficiente de

determinação para melhor representar a distribuição das médias. Foi utilizado o programa AgroEstat (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015).

2.3 RESULTADOS

O comprimento do hipocótilo (CH) foi influenciado pelos fatores isoladamente e pelas interações de época de colheita e DFFF e de fotoperíodo e DFFF. A colheita com 6 dias de luz possibilitou CH maior em 11,6% que com 4 dias e maior fotoperíodo (20 h) proporcionou CH semelhante ao fotoperíodo de 16 h e cerca de 3,5% menor que quando as plântulas foram cultivadas com 12 h (Tabela 1).

Tabela 1 Comprimento do hipocótilo (CH), área cotiledonar (AC), produtividade (PROD), Fo, Fn e Fv/m de repolho-roxo microvegetal em função da época de colheita e de fotoperíodo.

	CH cm	AC cm ² /planta	PROD kg m ⁻²	Fo -	Fn -	Fv/m -
Colheita						
4 dias	5,83b	0,98b	6,77b	77,0a	330,8a	0,76a
6 dias	6,51a	1,44a	8,11a	91,9a	380,9a	0,76a
Fotoperíodo						
12 h	6,27a	1,12b	6,91c	85,65a	353,63a	0,76a
16 h	6,19ab	1,21ab	7,42b	86,40a	361,60a	0,76a
20 h	6,06b	1,30a	7,99a	81,19a	349,28a	0,76a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey ($p > 0,05$).

De acordo com a interação época de colheita e irradiância, o atraso na colheita em dois dias proporcionou maiores CH independentemente da DFFF (Tabela 2).

Em ambas épocas, maiores e menores CH foram obtidos com 150 e 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mas houve maior redução no CH com aumento na irradiância com a colheita mais tardia (10%) que precoce (5%) (Figura 2). Com relação à interação fotoperíodo e irradiância, o CH respondeu diferentemente ao fotoperíodo em cada DFFF (Tabela 2). Exceto com o fotoperíodo de 16 h que, segundo ajuste quadrático, o CH aumentou de 150 até 255 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e diminuiu com maiores DFFF até 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, o CH de plântulas sob fotoperíodos de 12 e 20 h diminuiu linearmente no intervalo de irradiância estudado. A semelhança entre os três fotoperíodos foi que menor CH foi obtido com a maior irradiância (Figura 3).

Tabela 2 Comprimento do hipocótilo de repolho-roxo microvegetal em função das interações entre irradiância e época de colheita e entre irradiância e fotoperíodo.

Comprimento do hipocótilo (cm)				
Irradiância ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				
Colheita (dias)	150	250	350	450
4	6,00b	5,87b	5,75b	5,71b
6	6,74a	6,73a	6,53a	6,04a
Irradiância ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				
Fotoperíodo (h)	150	250	350	450
12	6,55a	6,29a	6,17a	6,04a
16	6,23b	6,42a	6,18a	5,95a
20	6,34b	6,18a	6,07a	5,65b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste Tukey ($p > 0,05$).

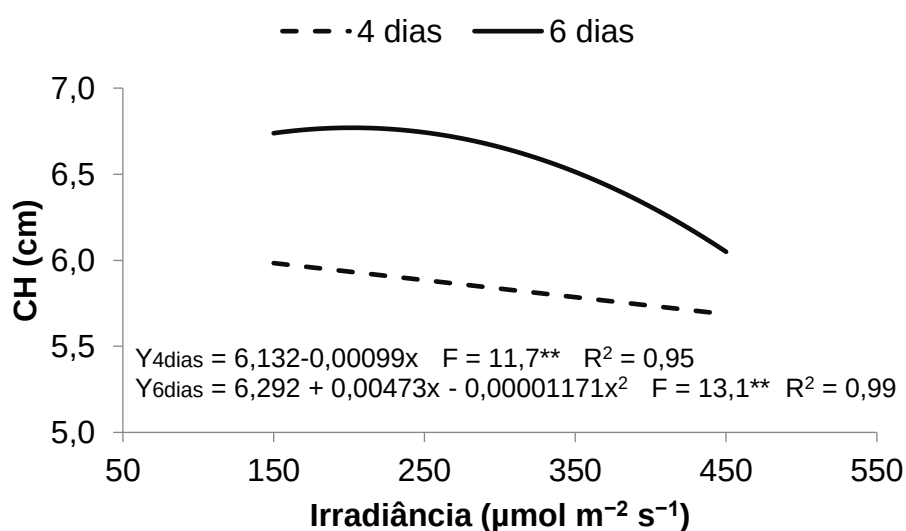


Figura 2. Comprimento do hipocótilo (CH) de repolho-roxo microvegetal em função da época de colheita e irradiância.

A área cotiledonar foi afetada pelos fatores isoladamente. A colheita aos 6 dias de luz proporcionou 47% de incremento na área dos cotilédones em relação à colheita precoce e plântulas sob 20 horas de luz apresentaram área cotiledonar 16% maior que as cultivadas com 12 horas (Tabela 1). Em função da irradiância, máxima área cotiledonar foi obtida com $390 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 4).

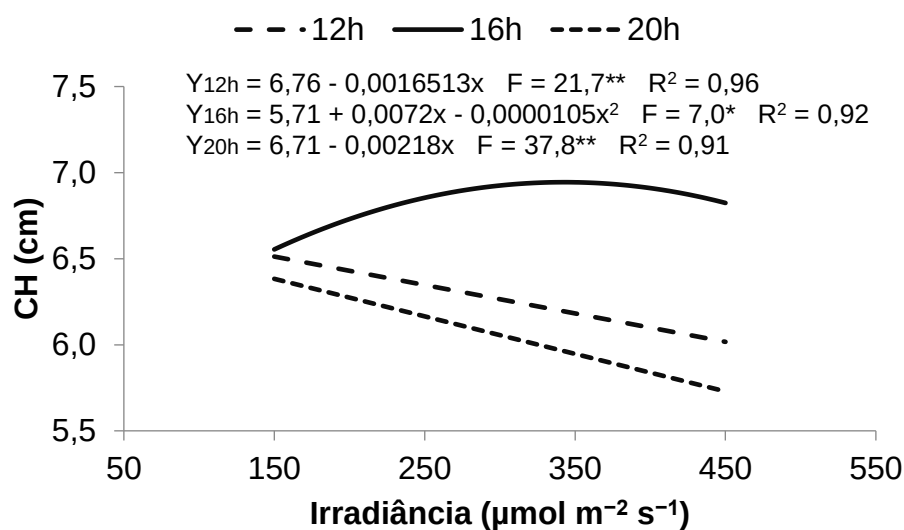


Figura 3. Comprimento do hipocótilo (CH) de repolho-roxo microvegetal em função do fotoperíodo e irradiância.

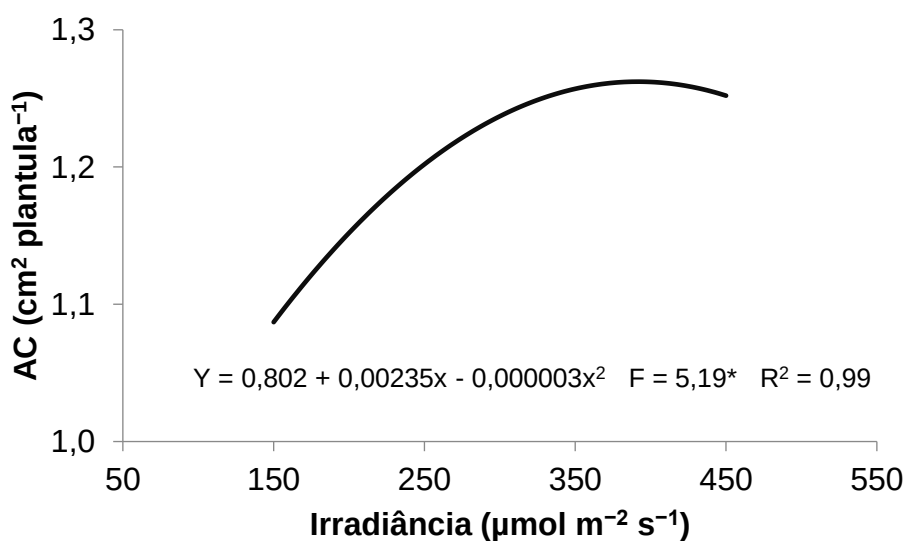


Figura 4. Área cotiledonar da plântula de repolho-roxo microvegetal em função da irradiância.

A produtividade de repolho-roxo foi influenciada pelos fatores isoladamente (Tabela 1) e pela interação fotoperíodo e irradiância (Tabela 3, Figura 5). Com as irradiâncias de 150, 250 e 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, o maior fotoperíodo proporcionou maiores produtividades, com incrementos de 18, 18 e 19% em relação às produtividades obtidas com os mesmos DFFF sob 12 h. Com 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a

produtividade obtida com 16 h não diferiu da obtida com 20 h e a média obtida com estes fotoperíodos foi 9,8% maior que com 12 h (Tabela 3). A maior produtividade ($8,2 \text{ kg m}^{-2}$) foi obtida com 20 h e $315 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e superou em 25% a menor produtividade, que foi obtida com 12 h e $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 5).

Tabela 3 Produtividade de repolho-roxo microvegetal em função do fotoperíodo e irradiância.

Fotoperíodo (h)	Produtividade (kg m^{-2}) Irradiância ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
	150	250	350	450
12	6,58B	6,84B	6,94B	7,28B
16	6,76B	7,34B	7,49B	8,09AB
20	7,74A	8,05A	8,26A	7,89A

Para cada característica, médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem pelo teste Tukey ($p > 0,05$).

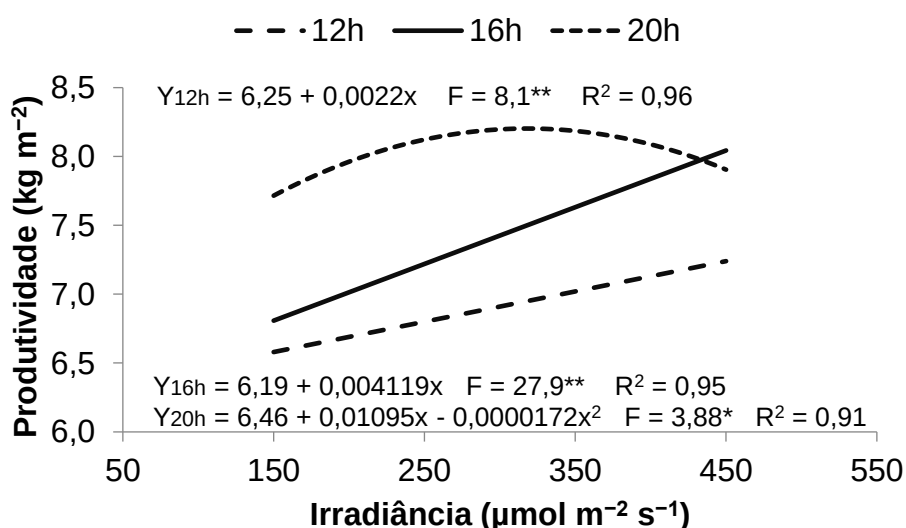


Figura 5. Produtividade de repolho-roxo microvegetal em função do fotoperíodo e irradiância. (para cada irradiância, médias de fotoperíodos seguidos por mesma letra não diferem pelo teste Tukey, $p > 0,05$)

2.4 DISCUSSÃO

Ainda que a literatura recomenda a colheita do microvegetal com o aparecimento da primeira folha, realizou-se a colheita precoce a fim de avaliar se as características biométricas e aparência seriam comercialmente prejudicadas. A

aparência é um dos atributos mais importantes dos microvegetais para sua comercialização. No presente estudo, não foram observados defeitos decorrentes da iluminação artificial (fotoperíodo e DFFF) e época de colheita, como oxidação por fotoinibição com os maiores DFFF.

Há muitos estudos sobre luz em microvegetais, especialmente de brassicáceas. As características deste fator de produção modificam a morfologia, processos fisiológicos e bioquímicos, que repercutem no crescimento, produtividade e qualidade do microvegetal. No entanto, não há padrões estabelecidos pelo consumidor quanto ao tamanho do hypocótilo e área cotiledonar, o que é bom sob o ponto de vista comercial, uma vez que o consumidor não rejeitará microvegetais mais compridos ou curtos e cotilédones maiores ou menores. No entanto, uma das características morfológicas principais nos microvegetais é o comprimento do hypocótilo, sendo que maior hypocótilo confere melhor aparência e facilita a colheita (Jones-Baumgardt et al., 2019). No presente estudo, as plântulas com a colheita precoce apresentaram média de 5,83 cm e foram 10% menores que plântulas colhidas dois dias após (6,51 cm) (Tabela 1), sendo menores com a maior irradiância e fotoperíodo (Figuras 2 e 3).

Com relação ao fotoperíodo, analisando o efeito da interação fotoperíodo e irradiância, observou-se a tendência de haver efeito depressivo sobre o tamanho do hypocótilo quando o fotoperíodo foi de 20 h (Tabelas 1 e 2), concordando com Chen et al. (2021) que avaliaram fotoperíodos (0 a 16 h) e proporções de luz vermelha-azul para couve-chinesa e parcialmente com o observado por Liu et al. (2022) para repolho, que observaram incremento no CH até 14 h de luz por dia, quando avaliaram fotoperíodos de 12 a 20 h sob luz vermelha-azul-verde na proporção 1:1:1. Atribui-se à divergência nos resultados às menores irradiâncias (30 a 90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) que os autores trabalharam, pois sabidamente elevados DFFF determinam menor crescimento do hypocótilo. Não obstante, CH do repolho-roxo maiores 4,7 a 6,0 cm, que os observados por Liu et al. (2022), 3,26 a 4,01 cm, pode ser devido à maior composição espectral da luz branca. Avaliando LED brancas, Toscano et al. (2021) conseguiram aumentar significativamente o comprimento do caule em microvegetal de *Amaranthus tricolor* L. and *Brassica rapa* L. subsp. *oleifera*, uma vez

que a presença de luz verde pode neutralizar o efeito depressivo da luz azul no crescimento do hipocótilo (Folta, 2004; Bouly et al., 2007; Park et al., 2010).

O efeito do aumento de DFFF reduzindo o CH de repolho-roxo está em acordo com resultados descritos na literatura, como os observados para tatsoi, couve-rábano e mostarda (Samuoliené et al., 2013), brócoli, couve-rábano, rabanete (Kwack et al., 2015), couve-rábano, couve-mizuna e mostarda (Gerovac et al., 2016), repolho, rúcula, couve e mostarda (Jones-Baumgardt et al., 2019), soja (Feng et al., 2019), brócoli (Gao et al., 2021) e repolho e couve-chinesa microvegetais (Liu et al., 2022). Baixos DFFF favorecem o estiolamento do hipocótilo (Niroula et al., 2021), o que pode estar relacionado com redução da concentração de giberelinas com maiores DFFF (Potter et al. 1999), as quais são hormônios responsáveis pela alongação do hipocótilo (Binenbaum et al., 2018).

Independente da época de colheita, irradiância e fotoperíodo, os CH apresentaram-se adequados à comercialização e colheita mecânica, para a qual, segundo Toscano et al. (2021) são preferidos hipocótilos com mínimo de 5 cm.

Houve aumento na área cotiledonar do repolho-roxo à medida que maior foi o tempo de luz, seja por atraso na colheita (4 e 6 dias de luz), seja por maior fotoperíodo (12, 16 e 20 h) (Tabela 1), concordando com Hwang et al. (2022). Similar efeito foi observado com a irradiância, sendo que a área cotiledonar aumentou 16% de 150 ($1,087 \text{ cm}^2 \text{ plantula}^{-1}$) até $390 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($1,262 \text{ cm}^2 \text{ plântula}^{-1}$), permanecendo estável (variação menor que 1%) até a irradiância de $450 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Jones-Baumgardt et al. (2020) verificaram maior área cotiledonar de repolho com $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. O aumento da área cotiledonar observado para repolho-roxo concordou com resultados observados por Samuoliené et al. (2013), Gommers et al. (2013), Hwang et al. (2022), Chen et al. (2021) e Orlando et al. (2022).

A massa fresca é considerada por Jones-Baumgardt et al. (2019) como a métrica de colheita mais importante para a comercialização de microvegetais porque estes são normalmente vendidos “por peso fresco”. A produtividade observada no estudo foi influenciada pela interação fotoperíodo e irradiância. Sob as irradiâncias de 150 a $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, quanto maior o fotoperíodo, maior a produtividade. A produtividade de repolho-roxo com 20 h não diferiu da obtida com 16h, mas foi maior

que com 12 h (Tabela 3). Meas et al. (2020) e Liu et al. (2022) também obtiveram maior produtividade de amaranto e repolho com 20 h de luz por dia, quando avaliaram intervalos de 8 a 20 h e de 12 a 20 h, respectivamente. Em couve cultivada por três semanas, em hidroponia, Lefsrud et al. (2006) observaram incremento para massa fresca (produtividade) com o aumento do fotoperíodo de 6 para 24 h e inúmeros estudos citados por Lefsrud et al. (2006) correlacionam o aumento de produtividade em resposta a crescente fotoperíodo ao aumento da concentração foliar de clorofilas.

O aumento da DFFF foi determinante para aumento da produtividade, independentemente do fotoperíodo adotado. Maior produtividade de repolho-roxo ($8,2 \text{ kg m}^{-2}$) foi obtida com 20 h e $315 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, superando em 9,5% a produtividade obtida com 16 h e $315 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e em 25% a menor produtividade, que foi obtida com 12 h e $150 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 5). Economia significativa de energia elétrica pode ser conseguida se considerada a perda de 5% da máxima produtividade, para a qual, mantendo-se o fotoperíodo de 20 h, demandaria $165 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, quase 50% menos que a requerida para obter a máxima produtividade. Entretanto, considerando-se a máxima produtividade, o resultado obtido é inferior à faixa de 330 a $440 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ observado por Samuolienė et al. (2013) como adequada para maximizar produtividades de couve-rábano, mostarda, pakchoi vermelho e tatsoi. Também, a DFFF que proporcionou máxima produtividade do repolho-roxo foi inferior à faixa de 400 a $500 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ observada para repolho por Jones-Baugardt et al. (2019). Outra diferença é que a redução de produtividade observada em repolho-roxo a partir de $315 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ só foi verificada por Jones-Baugardt et al. (2019) a partir de $500 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. No entanto, estes autores trabalharam com luz azul-vermelha e menor fotoperíodo (16 horas). Ainda que maiores DFFF e fotoperíodo contribuam para menores CH, é também sabido que contribuem positivamente para a taxa fotossintética, transpiração, condutância estomática (Yang et al., 2014, 2017) e robustez geral do microvegetal (Jones-Baugardt et al., 2019; Chen et al., 2021). Por outro lado, menores irradiâncias afetam negativamente o balanço de carbono, diminuindo a fotossíntese líquida (Feng et al., 2019), além de acumular nitrato e diminuir açúcares (Samuolienė et al.,

2013), características que denotam menor atividade fotossintética e metabólica e que levam a menor crescimento de microvegetais.

Quanto à questão da época de colheita, a produtividade foi 16,5% menor quando foi realizada precocemente. Por outro lado, a colheita precoce permite a realização de maior número de ciclos de produção por ano, 91 com 4 dias de luz contra 60 ciclos com 6 dias de luz. Em razão disso e de acordo com as produtividades obtidas (Tabela 1), as produtividades de repolho-roxo microvegetal com as colheitas realizadas com 4 e 6 dias de luz, e semelhante gasto de energia para um ano de produção (7280 e 7200 h para ciclos de 4 e 6 dias, respectivamente), alcançam 616 e 486 kg m⁻² ano⁻¹, respectivamente; portanto, 26,7% maior.

Os resultados não significativos do F0 e Fm e Fv/Fm indicam que a época de cultivo, o fotoperíodo e a irradiância não foram capazes de prejudicar a transferência de energia da antena para os centros de reação do PSII. As relações de Fv/Fm praticamente não variaram com a média de 0,76 para as duas épocas de colheita, para os fotoperíodos e DFFF avaliados. Segundo Ahammed et al. (2018), a relação Fv/Fm pode ser indicador indireto de estresse que mostram as mudanças induzidas pelo estresse na fotossíntese. No entanto, não foi observado estresse sobre o fotossistema, uma vez que os valores encontram-se na faixa de 0,75 a 0,80 são considerados adequados (Bolhár-Nordenkamp e Öquist, 1993; Krause 2001). Assim, pode-se entender que a energia de excitação da clorofila foi utilizada para fixação de carbono, acúmulo de massa e aumento da produtividade.

2.5 CONCLUSÃO

O estudo realizado mostrou que a luz branca e a relação irradiância/fotoperíodo influencia as características biométricas dos microvegetais. Maiores irradiâncias e fotoperíodo com luz branca promovem diminuição no comprimento do hipocótilo, mas tem efeito oposto sobre a área cotiledonar e produtividade de repolho-roxo microvegetal, sendo esta maximizada com 315 µmol m⁻² s⁻¹ e 20 horas de luz. Com a colheita precoce foram observados menores comprimento de hipocótilo, área cotiledonar e produtividade. Entretanto, o ciclo de

produção menor em dois dias proporciona maior número de ciclos produtivos e, no período de um ano, obtém-se 616 kg m⁻² de repolho-roxo microvegetal, cuja produtividade é 27% maior que quando a colheita é realizada dois dias após, quando surgiu a primeira folha.

2.6 REFERÊNCIAS

Ahammed GJ, Xu W, Liu A, Chen S (2018) COMT1 silencing aggravates heat stress-induced reduction in photosynthesis by decreasing chlorophyll content, photosystem II activity, and electron transport efficiency in tomato. **Frontiers in Plant Science** 9:998. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00998>

Barbosa JC e Maldonado JW (2015) Experimentação agrônômica & AgroEstat: Sistemas para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda., 396 p.

Binenbaum J, Weinstain R, Shani E (2018) Gibberellin Localization and Transport in Plants. **Trends in Plant Science** 23:410-421. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.02.005>

Bouly JP, Schleicher E, Dionisio-Sese M, Vandenbussche F, Van Der Straeten D, Bakrim N, Meier S, Batschauer A, Galland P, Bittl R, Ahmad M (2007) Cryptochrome blue light photoreceptors are activated through interconversion of flavin redox states. **Journal of Biological Chemistry** 282: 9383-9391. <https://doi.org/10.1074/jbc.M609842200>

Bolhár-Nordenkamp, HR, Öquist G (1993) Chlorophyll Fluorescence as a tool in photosynthesis research. In.: Hall DO, Scurlock JMO, Bolhár-Nordenkamp HR, Leegood LRC (Eds.) **Photosynthesis and Production in Changing Environment: A Field and Laboratory Manual**. London:1^a ed. Chapman e Hall, p, 193-206. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1566-7>

Chen J, Chen Z, Li Z, Zhao Y, Chen X, Wang-Pruski G, Guo R (2021) Effect of photoperiod on Chinese kale (*Brassica alboglabra*) sprouts under white or combined red and blue light. **Frontiers in Plant Science** 11:589746. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.589746>

Feng LY, Raza MA, Li Z, Chen Y, Khalid MHB, Du J, Liu W, Wu X, Song C, Yu L, Zhang Z, Yuan S, Yang W, Yang F (2019) The influence of light intensity and leaf movement on photosynthesis characteristics and carbon balance of soybean. **Frontiers in plant science** 9:1952. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01952>

Filatov D, Olonin I (2023) Optimal ratio of spectrum, light intensity and photoperiod to minimize costs when growing microgreens. **E3S Web of Conferences** 383:04074. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304074>

Folta KM (2004) Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition. **Plant Physiology** 135:1407-1416. <https://doi.org/10.1104/pp.104.038893>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Crops and Livestock Products. Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on 20 June 2023).

Furlani PR, Silveira LCP, Bolonhesi D, Faquin V (1999) **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: IAC, 52 p. (Boletim Técnico, 180)

Gao M, He R, Shi R, Zhang Y, Song S, Su W, Liu H (2021) Differential effects of low light intensity on broccoli microgreens growth and phytochemicals. **Agronomy** 11: 537. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030537>

Gerovac JR, Craver JK, Boldt JK, Lopez RG (2016) Light intensity and quality from sole-source Light-emitting Diodes impact Growth, Morphology, and Nutrient Content of Brassica Microgreens. **HortScience** 51:497-503. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.5.497>

Gommers CMM, Visser EJW, St Onge KR, Voesenek LACJ, Pierik R (2013) Shade tolerance: when growing tall is not an option. **Trends in plant science** 18:65-71. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.09.008>

Hwang HS, Jeong HW, Jeong JH, Jo DH, Hwang SJ (2022) Changes in Growth and Anthocyanin Content of *Brassica juncea* L. affected by Light Intensity and Photoperiod in Plant Factory with Artificial Lighting. **Korean Journal of Horticultural Science and Techonology** 40:586-594. <https://doi.org/10.7235/HORT.20220053>

Jones-Baumgardt C, Llewellyn D, Ying Q, Zheng Y (2019) Intensity of sole-source light-emitting diodes affects growth, yield, and quality of Brassicaceae microgreens. **HortScience** 54:1168-1174. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI113788-18>

Jones-Baumgardt C, Ying Q, Zheng Y, Bozzo GG (2020) The growth and morphology of microgreens is associated with modified ascorbate and anthocyanin profiles in response to the intensity of sole-source light-emitting diodes. **Canadian Journal of Plant Science** 101:212-228. <https://doi.org/10.1139/cjps-2020-0060>

Kozai T, Niu G (2020) Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In.: Kozai T, Niu G, Takagaki M (Eds.) **Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production**. Japão: Academic Press, p. 7-34.

Krause GH, Koroleva OY, Dalling JW, Winter K (2001) Acclimation of tropical tree seedlings to excessive light in simulated tree-fall gaps. **Plant cell environ** 24:1345-1352 <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00786.x>

Kusuma P, Pattison PM, Bugbee B (2020) From physics to fixtures to food: Current and potential LED efficacy. **Horticulture research** 7:56. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0283-7>

Kwack Y, Kim KK, Hwang H, Chun C (2015) Growth and quality of sprouts of six vegetables cultivated under different light intensity and quality. **Horticulture, Environment, and Biotechnology** 56:437-443. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-1044-7>

Lanoue J, St Louis S, Little C, Hao X (2022) Continuous lighting can improve yield and reduce energy costs while increasing or maintaining nutritional contents of microgreens. **Frontiers in Plant Science** 13:983222. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.983222>

Lefsrud MG, Kopsell DA, Augé RM, Both AJ (2006) Biomass production and pigment accumulation in kale grown under increasing photoperiods. **HortScience** 41:603-606. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.3.603>

Lima RF, de Oliveira ALE, Torsoni GB, Chiquitto AG, Moraes JR, Rolim SG (2022) Agroclimatic zoning for the incidence of brown eye spot on coffee under climate change scenarios. **Theoretical and Applied Climatology** 149:1471-1496. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04123-3>

Liu K, Gao M, Jiang H, Ou S, Li X, He R, Liu H (2022) Light intensity and photoperiod affect growth and nutritional quality of brassica microgreens. **Molecules** 27:883. <https://doi.org/10.3390/molecules27030883>

Meas S, Luengwilai K, Thammasak T (2020) Enhancing growth and phytochemicals of two amaranth microgreens by LEDs light irradiation. **Scientia Horticulturae** 265:109204. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109204>

Meng Q, Kelly N, Runkle ES (2019) Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. **Environmental and experimental botany** 162:383-391. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.016>

Nascimento CS, Cecilio Filho AB, Mendoza-Cortez JW, Nascimento CS, Bezerra NF, Grangeiro LC (2018) Effect of population density of lettuce intercropped with rocket on productivity and land-use efficiency. **PloS one** 13:0194756. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194756>

Nguyen TKL, Cho KM, Lee HY, Cho DY, Lee GO, Jang SN, Lee Y, Kim D, Son KH (2021) Effects of white LED lighting with specific shorter blue and/or green wavelength on the growth and quality of two lettuce cultivars in a vertical farming system. **Agronomy** 11:2111. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112111>

Niroula A, Amgain N, Rashmi KC, Adhikari S, Acharya J (2021) Pigments, ascorbic acid, total polyphenols and antioxidant capacities in deetiolated barley (*Hordeum vulgare*) and wheat (*Triticum aestivum*) microgreens. **Food Chemistry** 354:129491. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129491>

Orlando M, Trivellini A, Incrocci L, Ferrante A, Mensuali A (2022) The inclusion of green light in a red and blue light background impact the growth and functional quality of vegetable and flower microgreen species. **Horticulturae** 8:217. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030217>

Park JW, Kang P, Park H, Oh HY, Yang JH, Kim YH, Kwon SK (2010) Synthesis and properties of blue-light-emitting anthracene derivative with diphenylamino-fluorene. **Dyes and Pigment** 85:93-98. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2009.10.009>

Pereira BJ, Cecílio Filho AB, La Scala JN (2021) Greenhouse gas emissions and carbon footprint of cucumber, tomato and lettuce production using two cropping systems. **Journal of cleaner production** 282:124517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124517>

Potter TI, Rood SB, Zanewich KP (1999) Light intensity, gibberellin content and the resolution of shoot growth in Brassica. **Planta** 207:505-511. <https://doi.org/10.1007/s004250050510>

Ramirez D, Victorio-Abellán A, Beretta V, Camargo A, Moreno DA (2020) Functional ingredients from Brassicaceae species: Overview and perspectives. **International journal of molecular sciences** 21:1998. <https://doi.org/10.3390/ijms21061998>

Saath KCO, Fachinello AL (2018) Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural** 56:195-212 <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>

Samuolienė G, Brazaitytė A, Jankauskienė J, Viršilė A, Sirtautas R, Novičkovas A, Sakalauskienė S, Sakalauskaitė J, Duchovskis P (2013) LED irradiance level affects growth and nutritional quality of Brassica microgreens. **Central European Journal of Biology** 8:1241-1249. <https://doi.org/10.2478/s11535-013-0246-1>

Shibaeva TG, Rubaeva AA, Sherudilo EG, Titov AF (2023) Continuous lighting increases yield and nutritional value and decreases nitrate content in Brassicaceae microgreens. **Russian Journal of Plant Physiology** 70:118. <https://doi.org/10.1134/S1021443723601337>

Shibaeva TG, Sherudilo EG, Rubaeva AA, Titov AF (2022) Continuous LED lighting enhances yield and nutritional value of four genotypes of brassicaceae microgreens. **Plants** 11:176. <https://doi.org/10.3390/plants11020176>

Silva LM, Cruz LP, Pacheco VS, Machado EC, Purquerio LFV, Ribeiro RV (2022) Energetic efficiency of biomass production is affected by photoperiod in *indoor* lettuce cultivation. **Theoretical and Experimental Plant Physiology** 34:265-276. <https://doi.org/10.1007/s40626-022-00246-0>

Toscano S, Cavallaro V, Ferrante A, Romano D, Patané C (2021) Effects of different light spectra on final biomass production and nutritional quality of two microgreens. **Plants** 10:1584. <https://doi.org/10.3390/plants10081584>

United Nations Sustainable Development Goals Knowledge Platform, 2022. Progress of Goal 2 in 2022. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg2>

Wong CE, Teo ZWN, Shen L, Yu H (2020) Seeing the lights for leafy greens in *indoor* vertical farming. **Trends in Food Science & Technology** 106:48-63. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.031>

Yanes-Molina AP, Jaime-Meuly R, Andrade-Bustamante G, Lucero-Flores TI, Martinez-Ruiz FE (2019) Microgreens-an alternative of horticultural production and market. In Microgreens-an alternative of horticultural production and market. **Expert Journal of Marketing** 7:120-136. <http://hdl.handle.net/11159/4595>

Yang F, Huang S, Gao R, Liu W, Yong T, Wang X, Yang W (2014) Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red:far-red ratio. **Field Crop Research** 155:245-253. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.011>

Yang F, Liao D, Wu X, Gao R, Fan Y, Ali Raza M, Wang X, Yong T, Liu W, Liu J, Du Janbo, Shu K, Yang W (2017) Effect of aboveground and belowground interactions on the intercrop yields in maize-soybean relay intercropping systems. **Field Crop Research** 203:16-23. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.007>

Yang X, Xu H, Shao L, Li T, Wang Y, Wang R (2018) Response of photosynthetic capacity of tomato leaves to different LED light wavelength. **Environmental and Experimental Botany** 150:161-171. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.013>

Zhang X, Bian Z, Yuan X, Chen X, Lu C (2020) A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. **Trends in Food Science & Technology** 99:203-216. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.031>

CAPÍTULO 3 - ÉPOCA DE COLHEITA, FOTOPERÍODO E IRRADIÂNCIA DE LUZ BRANCA NA QUALIDADE DO REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL

RESUMO - Os microvegetais são vegetais comestíveis imaturos que se tornaram relevantes no mercado devido à sua contribuição para a saúde humana como “alimento funcional”. Os efeitos da época de colheita (4 e 6 dias de luz), do fotoperíodo (12, 16 e 20 horas) e intensidade da luz branca (150, 250, 350 e 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram avaliados nos teores de clorofilas, carotenoides, vitamina C e compostos fenólicos do repolho-roxo microvegetal. A qualidade do repolho-roxo microvegetal foi modificada mediante manejo dos fatores intensidade e fotoperíodo de luz branca, com o teor de compostos fenólicos respondendo de modo oposto ao observado para os demais atributos de qualidade, que aumentaram mediante aumentos no fotoperíodo e intensidade de luz branca. O fator época de colheita também foi um fator importante sobre a qualidade do microvegetal, às vezes em interação com o fator luz. De modo geral, o atraso na colheita aumentou teores de clorofilas, vitamina C e compostos fenólicos.

Palavras-chave: Alimento funcional, *Brassica oleracea* L var. *capitata* f. *rubra*, Fábrica de plantas, Intensidade luminosa, LED branca

CHAPTER 3 - HARVESTING TIME, PHOTOPERIOD AND WHITE LIGHT IRRADIANCE ON THE QUALITY OF THE MICROVEGETABLE RED CABBAGE

ABSTRACT - Microvegetables are immature edible vegetables that have become relevant in the market due to their contribution to human health as a “functional food”. The effects of harvesting time (4 and 6 days of light), photoperiod (12, 16 and 20 hours) and white light intensity (150, 250, 350 and 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) were evaluated on the levels of chlorophylls, carotenoids, vitamin C and phenolic compounds of red cabbage microvegetable. The quality of the red cabbage microgreen was modified by managing the factors of white light intensity and photoperiod, with the content of phenolic compounds responding in the opposite way to that observed for the other quality attributes, which increased with increases in photoperiod and white light intensity. The harvest time factor was also an important factor on the quality of the microgreen, sometimes in interaction with the light factor. In general, the delay in harvest increased the contents of chlorophyll, vitamin C and phenolic compounds.

Keywords: Functional food, *Brassica oleracea* L var. *capitata* f. *rubra*, Plant factory, Light intensity, White LED

3.1 INTRODUÇÃO

Os microvegetais de repolho-roxo estão ganhando popularidade e chamando atenção da população como uma opção de alimento saudável, principalmente por seus atributos sensoriais e nutricionais, pois são ricos em vitaminas, minerais e fitoquímicos (Wu et al., 2023) sendo consumidos frescos (Hernandez-Adasme, 2023).

O repolho é uma das principais brássicas com adaptação a diferentes sistemas de cultivos (Podsędek et al., 2023). Microvegetais de repolho-roxo têm quantidades mais altas de fitoquímicos, como ácido ascórbico, carotenoides, proteína, compostos fenólicos, assim como maior atividade antioxidante, que o repolho em estágio maduro (Xiao et al., 2012; Drozdowska et al., 2020). No entanto, a manipulação adequada dos fatores de produção é importante para potencializar a sua qualidade e produtividade e a luz é um dos fatores mais importantes no cultivo *indoor*. Os diodos emissores de luz (LED) se tornaram a fonte de iluminação mais adequada para a produção em agricultura interna, devido a suas características na alta eficiência energética, pequena geração de calor e longevidade (Brazaitytė et al., 2015; Zhang et al., 2020; Narouei et al., 2024).

Além da qualidade da luz, a intensidade da luz e o fotoperíodo desempenham papel essencial nas reações morfogênicas e fotossintéticas das plantas (Bantis et al., 2018; Negri et al., 2019; Vrkić et al., 2024) afetando o crescimento e desenvolvimento, além da qualidade do alimento por promover a síntese de compostos fitoquímicos (Alrifai et al., 2019; Turner et al., 2020). Sabe-se que a luz azul e vermelha combinadas são comumente usadas na produção agrícola, no entanto, essa mistura gera uma coloração cinza-púrpura, que dificulta o diagnóstico de doenças e distúrbios nas plantas (Massa et al., 2008).

As lâmpadas de LED branca têm se tornado uma opção por seu amplo espectro que pode beneficiar o desenvolvimento e a qualidade das plantas além de economizar energia (Nozue e Gomi 2018). Segundo Lee et al. (2023), a luz branca misturada ou sozinha pode estimular a produção de compostos nas plantas. De acordo com Park et al. (2019), os maiores conteúdos fenólicos totais foram registrados após uma semana de tratamento com luz LED branca e azul em canola (*Brassica napus*), enquanto a luz branca monocromática promoveu maiores

concentrações de carotenoides em microvegetais de perilla (*Perilla frutescens* L Britt), seguido pela mistura de vermelho e azul (70R:30B), os menores valores de carotenoides totais foram apresentados nos tratamentos azul e vermelho monocromaticos (Patsadu et al., 2023). O conteúdo de vitamina C da couve chinesa aumentou significativamente quando tratadas sob luz branca em comparação com luz vermelha, azul monocromaticas e luz solar (Tantharapornrerka et al., 2023).

A grande variedade de tipo de luz, intensidade e tempo de exposição, bem como o tipo de plantas cultivadas, torna desafiador formular conclusões claras (Podsędek et al., 2023). Existem poucos estudos sobre a influência da qualidade da luz branca, sua intensidade e fotoperíodo nas características fitoquímica do repolho-roxo microvegetal. Portanto, objetivou-se avaliar os efeitos da irradiância de luz branca e do fotoperíodo sobre a qualidade do repolho-roxo microvegetal.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área experimental

O experimento foi conduzido de 10 a 19 de março de 2023, no Laboratório Cultivo *Indoor*, com controle de temperatura para 20 ± 1 °C e umidade relativa do ar de 50 a 70%. O laboratório está localizado no Departamento Produção Vegetal, na UNESP, câmpus de Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

3.2.2 Tratamentos e delineamento experimental

Foram avaliados 24 tratamentos em parcelas sub-sub-divididas, sendo o fotoperíodo (12, 16 e 20 horas por dia) na parcela, densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) (150, 250, 350 e 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) na sub-parcela e a época de colheita (4 e 6 dias de luz) na sub-sub-parcela, com quatro repetições dos tratamentos. Cada unidade experimental correspondeu a uma prateleira da estante contendo duas bandejas de microvegetais.

Foram utilizadas lâmpadas LED branca, 7W, 48VDC, modelo GLFS-v.11.7.4.22 (LEDs-up Soluções para cultivo®), composta por azul (25,4%), verde

(23,8%), amarelo/laranja (21,3%), vermelho (27,1%) e vermelho distante (2,3%). Utilizando-se de um espectro-radiômetro SpectraPen SN-SP-144 (Photon System Instruments®), realizou-se a distribuição das lâmpadas de modo a obter uniformidade das irradiâncias estabelecidas nos tratamentos sobre as bandejas de microvegetais.

3.2.3 Condições experimentais

As bandejas de polipropileno retangulares (14 x 11,5 x 4,5 cm) foram preenchidas com 1,5 cm de substrato organomineral para hortaliças (Bioplant®), o qual apresenta pH $6 \pm 0,3$ e condutividade elétrica de $0,8 \text{ dS m}^{-1} \pm 0,06$. Na base das bandejas, foram realizados furos de 2 mm de diâmetro, equidistantes em 3 cm, para umedecimento do substrato com solução nutritiva por capilaridade.

Realizou-se a semeadura manual, distribuindo 300 g m^{-2} de sementes de repolho-roxo (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* f. *rubra*) 'Mamouth Red Rock' (Feltrim Seeds®) sobre o substrato úmido, de maneira uniforme, sem incorporação das sementes. Após a semeadura, as bandejas foram pulverizadas com água para umedecimento da semente, empilhadas em lotes de quatro bandejas e colocadas em ambiente escuro para germinação, enraizamento das plântulas no substrato e crescimento do hipocótilo. Três dias após a semeadura (DAS), duas bandejas contendo as plântulas foram colocadas no centro de bandejas maiores, e transferidas para o Laboratório Cultivo *Indoor* para aplicação dos tratamentos (Figura 1). A distância entre as lâmpadas e os cotilédones dos microvegetais foi de 27 cm.



Figura 1. Bandejas com repolho-roxo microvegetal recém retiradas da fase escura e colocadas em bandeja contidora de solução nutritiva (A) e bandejas com microvegetal prontos para a colheita (B).

Previamente ao início da irradiância dos tratamentos, foram disponibilizados 500 mL de solução nutritiva na bandeja maior para atender às duas bandejas de microvegetal (unidade experimental. Utilizou-se a solução nutritiva proposta por Furlani et al. (1999) para hortaliças folhosas em hidroponia *nutrient film technique*, que tem a seguinte concentração de nutrientes: 174,0; 24,0; 39,0; 183,0; 142,0; 38,0; 52,0; 0,3; 0,02; 2,0; 0,4; 0,06 e 0,06 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻, N-NH₄⁺, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn, respectivamente. O critério para reposição de solução nutritiva às bandejas foi a completa absorção de solução nutritiva disponibilizada.

Realizaram-se duas colheitas. A primeira, aos 4 dias de irradiância, quando as plântulas só apresentavam os cotilédones completamente expandidos, sem a visualização da primeira folha. A segunda colheita ocorreu aos 6 dias de iluminação e os microvegetais apresentavam início do crescimento da primeira folha.

3.2.4 Características avaliadas

a) Teor de vitamina C: titulação com DCPIP: Em ambiente escuro 1g de folhas foi moída em 5 ml, de ácido oxálico 56 mM, utilizando pilão e almofariz (Ponting, 1943). Posteriormente esta foi filtrada a vácuo em papel de filtro Whatman No. 1 e o filtrado foi coletado. Alíquotas duplicadas de 1 ml do filtrado foram tituladas com DCPIP 3,73 mM (2,6-diclorofenolindofenol), até que o filtrado ficasse com uma cor rosa persistente. Por último o volume de DCPIP adicionado foi comparado com uma curva padrão de concentrações de ácido ascórbico.

b) Teor de compostos fenólicos (mg EAG 100g⁻¹ massa fresca): realizado por espectrofotometria de um extrato obtido segundo Larrauri et al. (1997) com a utilização de soluções de acetona 70% e metanol 50% e posterior adição do reagente Folin-Ciocalteu, sendo baseado em uma reação de oxidação-redução alcalina, onde o íon fenolato é oxidado e o reagente de Folin é reduzido. Após a reação, uma cor azul é produzida, e a leitura desta é realizada em uma absorbância de 700 nm.

c) Teores de clorofilas *a*, *b* e carotenoides (mg g⁻¹ MF): foram coletados 0,025 a 0,030 g de matéria fresca de cotilédones, colocados em acetona 80%. Após dois dias, realizou-se a leitura de clorofilas *a*, *b* e carotenoides a 663, 647 e 470 nm, respectivamente, conforme Lichtenthaler (1987). Todas as leituras serão realizadas em espectrofotômetro (Du 600 Series).

3.2.5 Análise de dados

Os dados de cada característica foram submetidos a análise de variância (Teste F). O teste Tukey foi aplicado para comparar as médias dos fatores época de colheita e fotoperíodo e estudo de regressão polinomial foi realizado para o fator DFFF, escolhendo a equação significativa ($p < 0,05$) e com maior coeficiente de determinação para melhor representar a distribuição das médias. Foi utilizado o programa AgroEstat (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015).

3.3 RESULTADOS

Os resultados das análises de variância para os atributos de qualidade do repolho-roxo microvegetal encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo da análise de variância de dados para teores de clorofilas *a* (Clor *a*), *b* (Clor *b*), carotenoides (Carot), de vitamina C (Vit C) e de compostos fenólicos (CF) do repolho-roxo microvegetal em função da época de colheita (EC), do fotoperíodo (FP) e intensidade (INT) de luz branca.

	Clor <i>a</i>	Clor <i>b</i>	Carot	Vit C	CF
EC	2,90 ^{ns}	6,98*	17,64**	2151,46**	1497,19**
FP	0,03 ^{ns}	13,21**	7,39**	5,33*	27,26**
EC x FP	0,35 ^{ns}	4,48*	6,11*	2,57 ^{ns}	2,51 ^{ns}
INT	1,91 ^{ns}	3,42*	2,83*	15,02**	1,52 ^{ns}
EC x INT	0,82 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,38 ^{ns}	1,27 ^{ns}	1,13 ^{ns}
FP x INT	1,30 ^{ns}	3,54*	1,33 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,86 ^{ns}
EC x FP x INT	0,90 ^{ns}	0,46 ^{ns}	1,98 ^{ns}	1,13 ^{ns}	2,21 ^{ns}
C.V.parcelas (%)	16,68	33,14	32,42	6,88	8,45
C.V.subparcelas (%)	9,64	13,89	19,00	4,60	8,42
C.V.subsubparcelas (%)	13,72	16,77	15,71	4,94	15,86

^{ns} e ** correspondem a não significativo ($p > 0,05$) e significativo ($p < 0,01$) pelo teste F, respectivamente; C.V. = coeficiente de variação.

De acordo com a análise de variância dos dados, não houve efeito dos fatores isolados ou em interação na clorofila *a* (Tabela 1), que apresentou teor médio de $5,27 \mu\text{g g}^{-1}$. No entanto, houve ajuste de equação em que se observou aumento de 9,1% no teor de clorofila *a* com o aumento da intensidade de luz branca de 150 para $450 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 1).

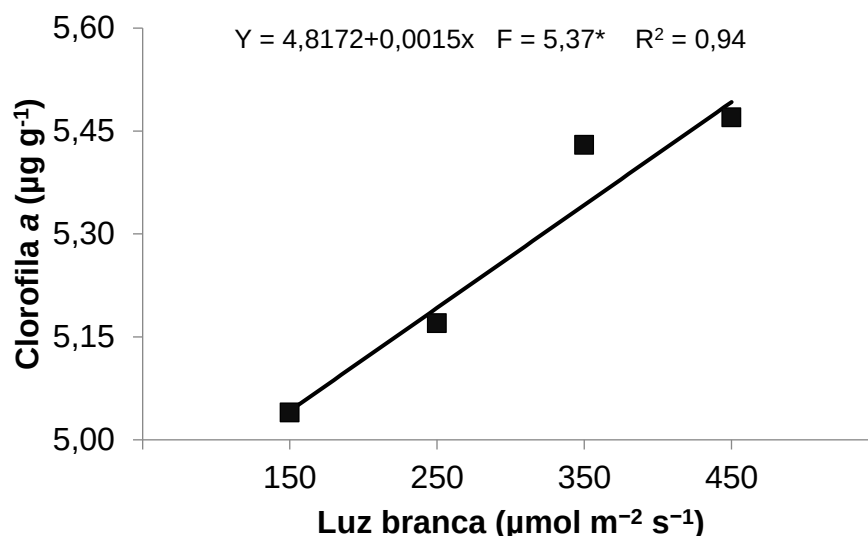


Figura 1. Teor de clorofila *a* do repolho-roxo microvegetal em função da intensidade de luz branca (B). * = $p < 0,05$

Com relação à clorofila *b*, verificou-se efeito da época de colheita e fotoperíodo isoladamente e da interação desses fatores (Tabela 1). Quando a colheita foi realizada com 4 dias, não houve efeito do fotoperíodo, com teor médio de 6,23. Na colheita com 6 dias, maior fotoperíodo (20 h) proporcionou maior teor de clorofila *b* que com fotoperíodos inferiores. Para efeito da época de colheita em cada fotoperíodo, verificou-se diferença somente com 20 h de luz, em cujo fotoperíodo o atraso na colheita proporcionou maior teor de clorofila *b* (Tabela 2). Também, constatou-se efeito isolado da intensidade e da interação deste com o fotoperíodo (Tabela 1). De acordo com a interação fotoperíodo e intensidade, somente houve ajuste de equação para fotoperíodo nas intensidades de 250 e 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 2a). Os valores médios observados com 150 e 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ foram 6,24 e 7,00 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente, enquanto com 250 e 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, os máximos de 8,60 e 8,05 $\mu\text{g g}^{-1}$ foram obtidos com 20 h de luz. Para intensidade em cada fotoperíodo, somente verificaram-se ajustes nos fotoperíodos de 12 e 20 h de luz branca com máximos de 7,11 $\mu\text{g g}^{-1}$ e 8,55 $\mu\text{g g}^{-1}$ com 450 e 315 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente (Figura 2b).

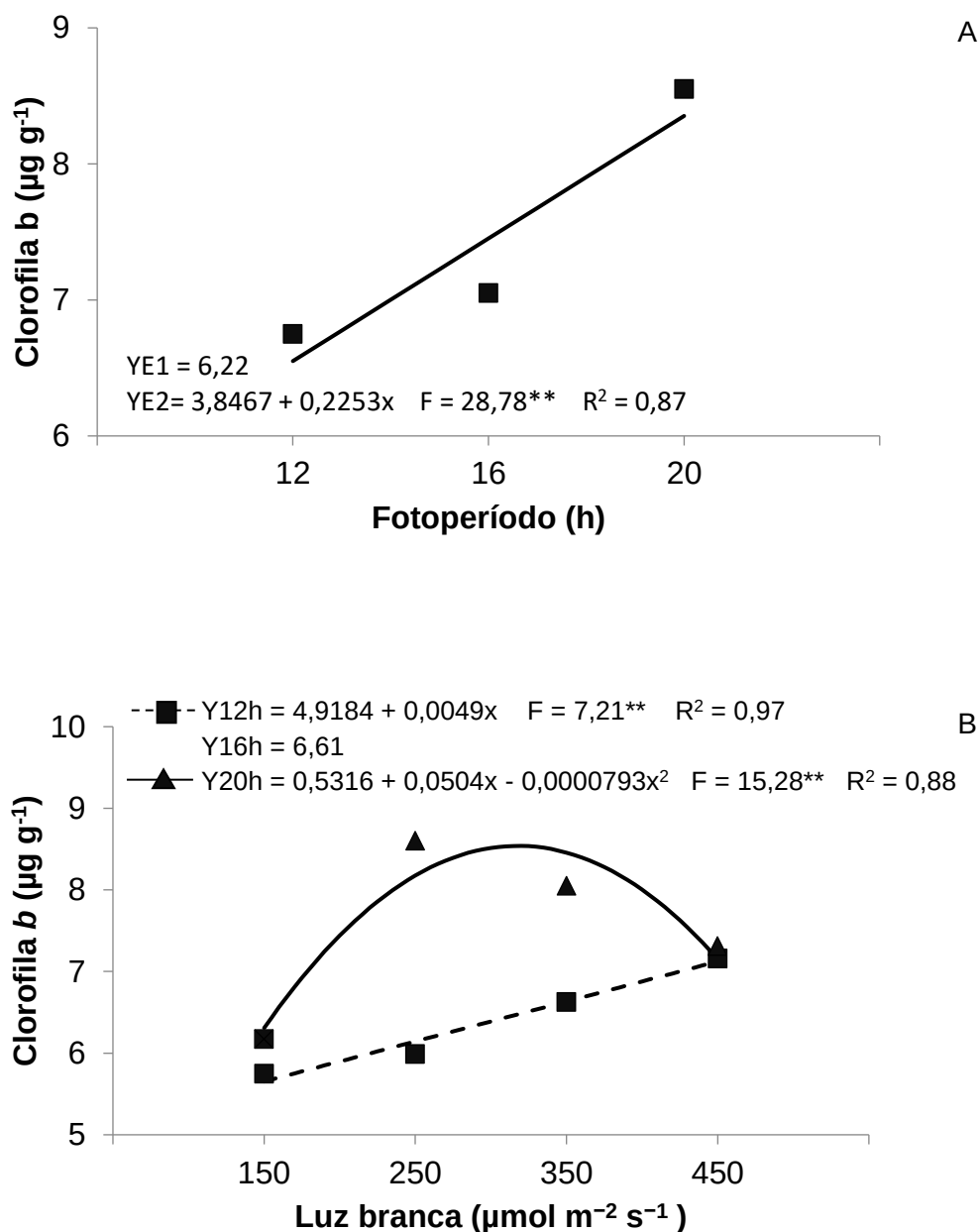


Figura 2. Teor de clorofila *b* do repolho-roxo microvegetal em função da interação época de colheita e fotoperíodo (A) e da interação fotoperíodo e intensidade de luz branca (B).

Os carotenoides foram influenciados pela época de colheita e pelo fotoperíodo isoladamente, e pela interação desses fatores (Tabela 1). Houve aumento no teor de carotenoides à medida que maior foi o fotoperíodo quando a colheita foi realizada aos 4 dias após iniciada iluminação, atingindo $11,20 \mu\text{g g}^{-1}$ (Figura 3a). Por outro lado, com a colheita realizada aos 6 dias, não foi ajustada equação, cuja média foi $7,53 \mu\text{g g}^{-1}$. A intensidade de luz isoladamente influenciou o

teor de carotenoides, com máximo de $9,29 \mu\text{g g}^{-1}$ com $450 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 3b), teor que foi 13,3% maior que o teor observado em microvegetais cultivados com $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($8,20 \mu\text{g g}^{-1}$).

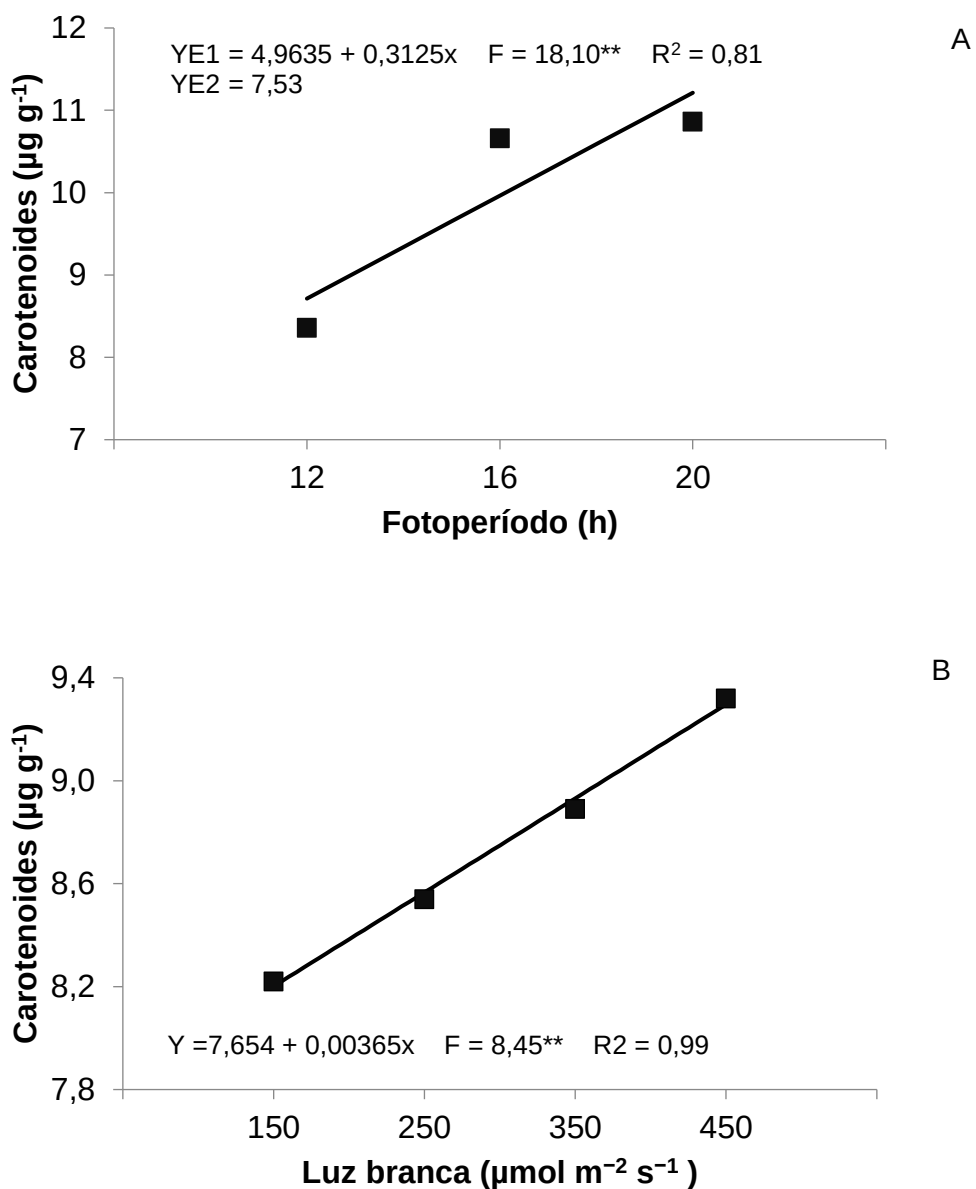


Figura 3. Teor de carotenoides do repolho-roxo microvegetal em função da interação época de colheita e fotoperíodo (A) e intensidade de luz branca (B).

O teor de vitamina C foi influenciado pelos fatores isoladamente (Tabela 1). A colheita mais tardia possibilitou microvegetais mais ricos em vitamina C, quase 100% maior sendo $10,57$ e $20,79 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ de repolho-roxo microvegetal, respectivamente. O teor de vitamina C aumentou linearmente com o incremento do

fotoperíodo e da intensidade de luz branca (Figuras 4 a,b) proporcionando microvegetais mais ricos em 3,6 e 9,3% em vitamina C quando se comparam teores obtidos entre os mínimos e máximos de fotoperíodo e intensidade luminosa.

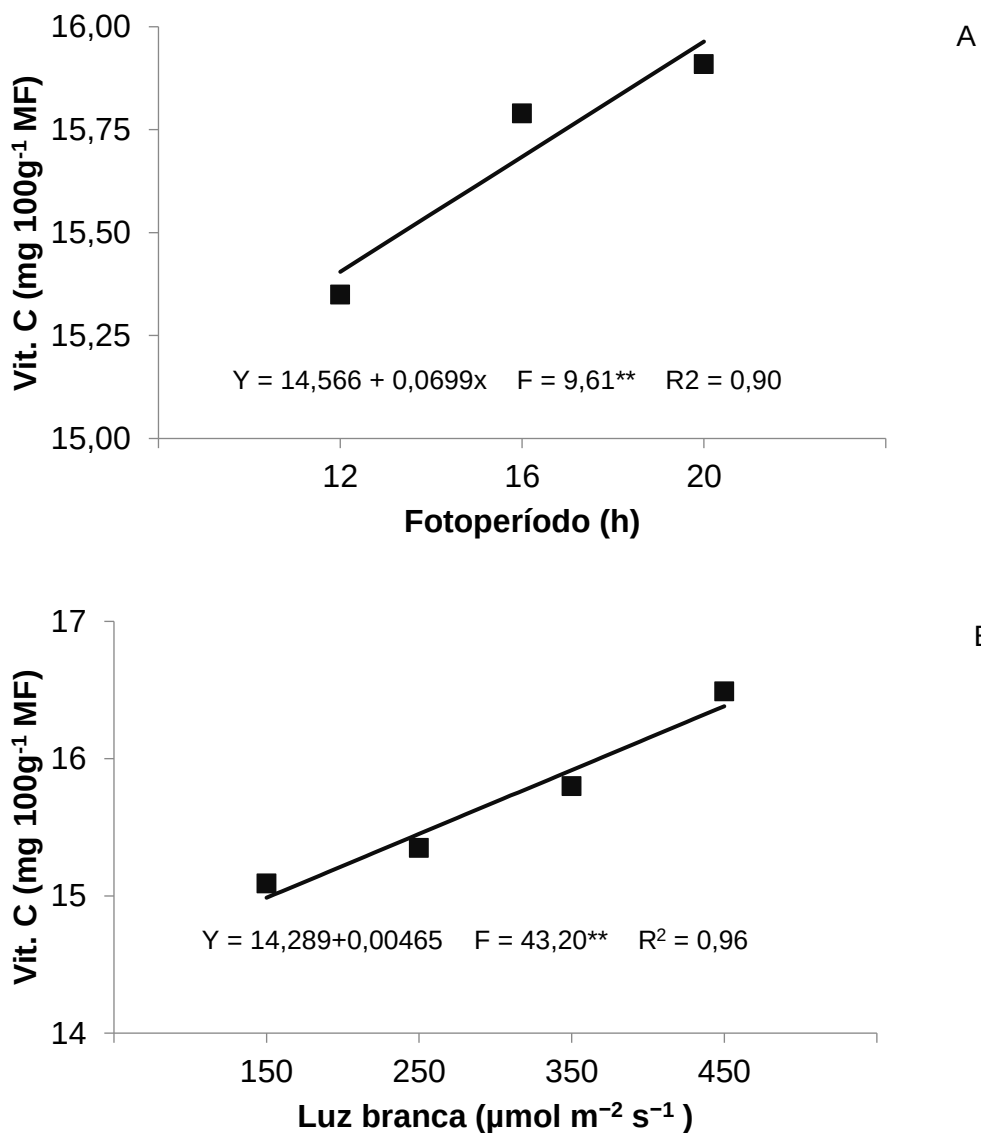


Figura 4. Teor de vitamina C do repolho-roxo microvegetal em função do fotoperíodo (A) e intensidade de luz branca (B). ** = $p < 0,01$

O teor de compostos fenólicos foram influenciados somente pela época de colheita e fotoperíodo. Assim como observado para teor de vitamina C, a colheita aos 6 dias de luz proporcionou teor muito maior (62,32 mg EAG 100g⁻¹) em relação ao observado em microvegetais colhidos com 4 dias (31,11 mg EAG 100g⁻¹). Houve

ajuste de equação se segundo grau para as médias do teor de compostos fenólicos em função do fotoperíodo, sendo máximo com o fotoperíodo de 12 h (Figura 5).

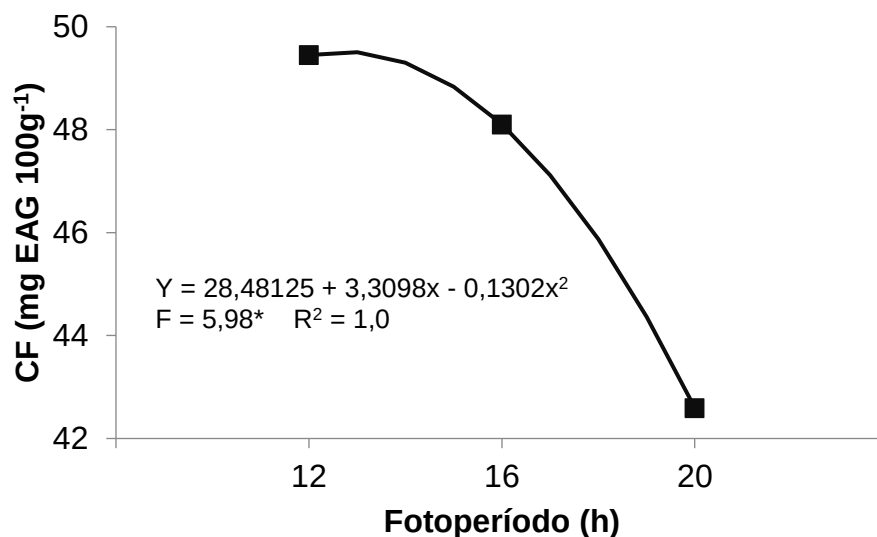


Figura 5. Teor de compostos fenólicos do repolho-roxo microvegetal em função do fotoperíodo. EAG = Equivalente de ácido gálico. * = $p < 0,05$

3.4 DISCUSSÃO

Os carotenoides são importantes nos vegetais pela função que desempenham na fotossíntese (Cazzonelli et al., 2011). Segundo Fayeizadeh et al. (2024), o fato de microvegetais de majoricção produzirem maior teor carotenoide sob iluminação contínua (24 h), em relação aos tratamentos com 6 a 18 h, se deve ao fato de pigmentos, como os carotenoides, lidarem com o estresse foto-oxidativo. Na saúde humana, seus benefícios são na prevenção de doenças cardiovasculares, degenerativas, diabetes tipo 2, obesidade e cânceres, entre outras (Rodriguez et al., 2018; Frede et al., 2023). As brássicas são espécies que apresentam elevados teores de carotenoides, se tornando uma fonte adequada de alimentação (Lee et al., 2023).

As características da luz tais como a qualidade e quantidade são extremamente importantes para gerar mudanças no teor de carotenoides, os quais estão fortemente relacionados com os processos fotossintéticos (Brazaitytė, et al., 2015; Zhang et al., 2020; Alfari et al., 2021; Harbart et al., 2023). No presente

estudo, o uso de luz branca, caracterizada por mistura dos comprimentos de onda nas faixas do azul (25,4%), verde (23,8%), amarelo/laranja (21,3%), vermelho (27,1%) e vermelho distante (2,3%), favoreceu o aumento no teor de carotenoides em microvegetais de repolho-roxo à medida que maiores foram o tempo de irradiação (Figura 3a) e intensidade (Figura 3b). Brazaityté et al. (2015) observaram que altas intensidades ($330\text{-}440\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$) de diferentes comprimentos de ondas (azul, vermelho, vermelho distante, laranja, amarelo e verde) em microvegetais da família Brassicaceae acumularam mais carotenoides que sob irradiâncias mais baixas. O efeito do fotoperíodo também concorda com os observados por Fayeizadeh et al. (2024), que verificaram teores mais altos de carotenoides em microvegetais de majericão irradiados com luz azul e vermelha e fotoperíodo de 24 h que sob fotoperíodos de 6 a 18 h, e por Shibaeva et al. (2022), em que alto fotoperíodo (24h) aumentou o teor de carotenoides em microvegetais de brassicáceas em comparação quando cultivados sob menores fotoperíodos.

Kochetova et al. (2022) mostraram que a intensidade e a qualidade da luz regulam a via biossintética dos carotenoides. Altas intensidades da luz modulam expressão das enzimas e etapas das vias biossintéticas dos carotenoides, levando a aumentar o acúmulo preferencial de zeaxantina. Frede et al. (2023) mostraram que a luz azul sozinha não é suficiente para aumentar o teor de carotenoides, o qual é favorecido por outros comprimentos presentes no espectro visível. Frede et al. (2019) relataram que a irradiação com luz branca aumentou a produção de luteína e β -caroteno pakchoi (*B. rapa* ssp. *chinensis*) comparado ao tratamento com luz azul ou vermelha monocromáticas. Resultado semelhante foi observado por Lee et al. (2023), em que microvegetais de couve apresentaram teores mais altos de carotenoides, incluído luteína, 13- *cis* - β -caroteno, α -caroteno, β -caroteno e 9- *cis* - β -caroteno, sob luz branca em comparação à luz vermelha ou azul monocromaticas.

A vitamina C é uma das vitaminas mais importantes na dieta humana (Zhang et al., 2020) e os vegetais representam a principal fonte dessa vitamina (Paciolla et al., 2019), entre os quais, as brassicáceas possuem altos teores deste antioxidante (Xiao et al., 2019, Podsędek A 2007). A qualidade, quantidade e duração da luz influenciam fortemente a síntese de vitamina C (Qian et al., 2016; Zhang et al., 2020), o que foi constatado na presente pesquisa. O teor de vitamina C foi aumentou

linearmente com o incremento do fotoperíodo e da intensidade de luz branca (Figuras 4 a, b). Segundo Lee et al. (2000), Bartoli et al. (2006) e Ntagkas et al. (2018), o teor de vitamina C aumenta significativamente sob condições altas de irradiação. Yan et al. (2019) observaram que o aumento da intensidade (200, 250 e 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de lâmpada branca acrescida de vermelha-azul com relações R:B de 2,7 e 3,6 respectivamente, gerou maior teor de vitamina C em alface. Em plantas como a cebolinha (*Allium fistulosum* L), a vitamina C foi maior quando tratada com iluminação branca+azul seguida de branca sozinha e branca + vermelha em altas intensidades de luz (500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Gao et al., 2022). Segundo Maruta et al. (2022), a biossíntese do ascorbato é rigidamente controlada e dependente da intensidade da luz e da fotossíntese para aumentar o seu teor nas folhas.

Segundo com Shibaeva et al. (2022), o aumento do fotoperíodo pode gerar produção de antioxidantes fotoprotetores para evitar estresse foto-oxidativo por excesso de luz, sendo, portanto, um importante fator para aumento do teor de vitamina C como observado para intensidade e a qualidade da luz (Truffault, 2017; Loi et al., 2020). Microvegetais de manjerição tiveram aumento de 60% no teor de vitamina C em fotoperíodo de 24 horas em comparação a 8 horas de luz (Fayezizadeh et al., 2024). O mesmo foi observado para alface quando esta foi cultivada com fotoperíodos de 14h a 16 h em relação a fotoperíodos menores (Yan et al., 2019).

As clorofilas são componentes-chave na dieta humana pois ajudam a prevenir doenças como cânceres, sinusites, acúmulo de líquido e erupções cutâneas (Podsędek et al., 2023). Nas plantas, estão envolvidos diretamente com a taxa fotossintética e fixação de carbono das plantas (Al murad et al., 2021; Bantis et al., 2021), sendo seus teores nas plantas altamente dependentes das condições luminosas (Bulgari et al., 2021). Em microvegetais, o aumento da clorofila é uma característica muito importante comercialmente, pois sua coloração verde intensa é indicadora de boa qualidade do vegetal (Maru et al., 2024). Segundo Samuolienė et al. (2013) teores mais altos de irradiância são ideais para melhorar o crescimento normal e qualidade nutricional de microvegetais de brassicáceas, devido a promover a expressão de genes envolvidos na biossíntese de clorofila, levando a mudança de cor de amarelo-claro a verde.

No presente estudo, o teor de clorofila *a* aumentou em 9,1% com o aumento da intensidade da luz branca de 150 para 450 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, enquanto a clorofila *b* teve máximo com 318 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. São raros os estudos com luz branca em microvegetais, no entanto, os resultados ora obtidos concordam com outros estudos que avaliaram intensidades de outros comprimentos de onda e outras espécies. O aumento da intensidade de 30 a 90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz vermelha/azul/verde gerou maior teor de clorofilas em repolho e em couve-chinesa foram obtidos com 90 e 70 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz vermelha/azul/verde (1:1:1), respectivamente, que menores intensidades (Liu et al., 2022), assim como também observado por Gao et al. (2021), para brócolis ao avaliar intensidades de 30 a 90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com luz azul/vermelho/verde, o conteúdo de Chl *a*, Chl *b* e Chl *a* + Chl *b* aumentaram em 15,3%, 24,0% e 17,3% respectivamente entre a maior e menor intensidade. Meas et al. (2020) observaram que 280 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ proporcionou maior teor de clorofila em microvegetais de amaranto que em intensidades menores (30–230 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Gerovac et al. (2016), avaliando intensidades (105, 210 e 315 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de luz R₇₄:G₁₈:B₈ em microvegetais de couve-rábano, verificaram que o teor de clorofila na maior intensidade (315 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foi maior em 11 % ou 13% àqueles obtidos com 105 ou 210 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente. Samuolienė et al. (2013) verificaram que intensidades luminosas de 440 e 545 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com comprimentos de onda azul, vermelho e vermelho distante, geraram maiores teores de clorofila em microvegetais de mostarda e pak choi vermelho que sob 220 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Segundo Bantis et al. (2018), o principal fotorreceptor envolvido na biossíntese da clorofila, é o criptocromo, o qual absorve principalmente a luz azul e verde, e sua ação está conectada com outros fotorreceptores como o fitocromo, que absorvem o vermelho e o vermelho distante, comprimentos presentes nas lâmpadas utilizadas no experimento nas proporções de azul-1:verde-0,94:vermelho-1,07:vermelho distante-0,09. Outro benefício da luz branca sobre a monocromática vermelha é que esta é responsável pela redução do ácido 5-aminolevulínico, um precursor necessário da biossíntese da clorofila.

Maiores fotoperíodos permitem aumentar a fotossíntese e consequentemente atuar sobre os teores de pigmentos. Pennisi et al. (2020) avaliaram intensidades de luz integral diária (14,4, 18 e 21,6 $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) obtidas pela alteração do fotoperíodo

(16, 20 e 24 h d⁻¹ de luz) e constataram incremento linear no teor de clorofila em manjericão, rúcula e chicória. Segundo Liu et al. (2022) verificaram maiores teores de clorofila *b* em microvegetal de couve-chinesa sob 16 h de luz que sob 12 h, assim como observado por Lanoue et al. (2022), em que 24 horas de luz proporcionou maior teor de clorofila *b* em manjericão-roxo que sob 16 h.

Os compostos fenólicos são fortemente influenciados pelo fotoperíodo e contribuem na atividade antioxidante total e coloração das plantas (Ali et al., 2009; Hernandez-Adasme et al., 2022; Acharya et al., 2021). Além disso, os compostos fenólicos são promotores na saúde humana, tendo um efeito preventivo em doenças cardiovasculares, cânceres, diabetes e doenças associadas ao estresse oxidativo (Zhang et al., 2022).

A época de colheita influenciou o teor de compostos fenólicos, sendo o maior valor (62,32 mg EAG 100g⁻¹) em microvegetais colhidos aos 6 dias de luz, cerca de 100% maior que o obtido com a colheita 2 dias mais cedo. O fotoperíodo foi outro fator a influenciar o teor de compostos fenólicos. No entanto, ao contrário do que foi observado sobre o seu efeito nos teores de pigmentos (clorofila, carotenoides) e vitamina C, o aumento no fotoperíodo promoveu incremento no teor de compostos fenólicos de 12 para 12,7 h e persistindo o aumento do fotoperíodo, houve decréscimos até 20 h (Figura 4) quando o teor foi 14% menor que o máximo obtido (49,5 mg EAG 100 g⁻¹ massa fresca). Os resultados observados concordam com o relatado em literatura. Segundo Liu et al. (2022) também observaram que maiores fotoperíodos (20 h) geraram microvegetais de repolho com menor teor de polifenóis que sob menores fotoperíodos (12 a 18h). Ali et al. (2009) mostraram que amaranto vermelho, amaranto verde, acelga, beterraba e espinafre vermelho apresentaram maior teor de polifenóis sob fotoperíodos menores (12 h) que em fotoperíodos maiores (18 e 24 h), ainda que o melhor fotoperíodo pode variar entre espécies e cultivares (Perez-Lopez et al., 2018; Hernandez-Adasme et al., 2023; Fayeizadeh et al., 2024). Hernandez-Adasme et al. (2023) e Vaštakaitė et al. (2015) observaram que o teor de fenóis aumentou quando beterraba e pak-choi vermelho, respectivamente, foram cultivados sob fotoperíodo de 24 h em comparação a menores fotoperíodos.

3.5 CONCLUSÃO

A qualidade do repolho-roxo microvegetal, avaliada por teores de pigmentos (clorofilas e carotenoides), compostos fenólicos e vitamina C, pode ser modificada mediante manejo dos fatores intensidade e fotoperíodo de luz branca, com o teor de compostos fenólicos respondendo de modo oposto ao observado para os demais atributos de qualidade, que aumentaram mediante aumentos no fotoperíodo e intensidade de luz branca.

O fator época de colheita é também um fator importante sobre a qualidade do microvegetal, às vezes em interação com o fator luz. De modo geral, o atraso na colheita aumentou teores de clorofilas, vitamina C e compostos fenólicos.

3.6 REFERÊNCIAS

Acharya J, Gautam S, Neupane P, Niroula A (2021) Pigments, ascorbic acid, and total polyphenols content and antioxidant capacities of beet (*Beta vulgaris*) microgreens during growth. **International Journal of Food Properties** 24:1175-1186. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1955924>

Ali MB, Khandaker L, Oba S (2009) Comparative study on functional components, antioxidant activity and color parameters of selected colored leafy vegetables as affected by photoperiods. **Journal of Food, Agriculture & Environment** 7:392-398.

Al Murad M, Razi K, Jeong BR, Samy P M A, Muneer S (2021) Light emitting diodes (LEDs) as agricultural lighting: Impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops. **Sustainability** 13:1985. <https://doi.org/10.3390/su13041985>

Alrifai O, Hao X, Liu R, Lu Z, Marcone M F, Tsao R (2021) LED-induced carotenoid synthesis and related gene expression in Brassica microgreens. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 69:4674-4685. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00200>

Bantis F (2021) Light spectrum differentially affects the yield and phytochemical content of microgreen vegetables in a plant factory. **Plants** 10:2182. <https://doi.org/10.3390/plants10102182>

Bantis F, Smirnakou S, Ouzounis T, Koukounaras A, Ntagkas N, Radoglou K (2018) Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). **Scientia horticultrae** 235:437-451. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.058>

Barbosa JC e Maldonado JW (2015) Experimentação agrônômica & AgroEstat: Sistemas para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda., 396 p.

Bartoli CG, Yu J, Gomez F, Fernández L, McIntosh L, Foyer CH (2006) Inter-relationships between light and respiration in the control of ascorbic acid synthesis and accumulation in *Arabidopsis thaliana* leaves. **Journal of Experimental Botany** 57: 1621-1631. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl005>

Brazaitytė A, Sakalauskienė S, Samuolienė G, Jankauskienė J, Viršilė A, Novičkovas A, Duchovskis P (2015) The effects of LED illumination spectra and intensity on carotenoid content in Brassicaceae microgreens. **Food chemistry** 173:600-606. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.077>

Bulgari R, Negri M, Santoro P, Ferrante A (2021) Quality evaluation of indoor-grown microgreens cultivated on three different substrates. **Horticulturae** 7:96. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7050096>

Cazzonelli CI (2011) Carotenoids in nature: insights from plants and beyond. **Functional Plant Biology** 38:833-847. <https://doi.org/10.1071/FP11192>

Drozdowska M, Leszczyńska T, Koronowicz A, Piasna-Słupecka E, Domagała D, Kusznierecz B (2020) Young shoots of red cabbage are a better source of selected nutrients and glucosinolates in comparison to the vegetable at full maturity. **European Food Research and Technology** 246:2505–2515. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03593-x>

Fayezizadeh MR, Ansari NA, Sourestani MM, Hasanuzzaman M (2024). Variations in photoperiods and their impact on yield, photosynthesis and secondary metabolite production in basil microgreens. **BMC Plant Biology** 24:712. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05448-z>

Frede K, Schreiner M, Baldermann S (2019) Light quality-induced changes of carotenoid composition in pak choi (*Brassica rapa ssp. chinensis*). **Journal of photochemistry and photobiology B: Biology** 193:18–30. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.02.001>

Frede K, Winkelmann S, Busse L, Baldermann S (2023) The effect of LED light quality on the carotenoid metabolism and related gene expression in the genus Brassica. **BMC Plant Biology** 23:328. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04326-4>

Furlani PR, Silveira LCP, Bolonhesi D, Faquin V (1999) **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: IAC, 52 p. (Boletim Técnico, 180)

Gao M, He R, Shi R, Zhang Y, Song S, Su W, Liu H (2021) Differential effects of low light intensity on broccoli microgreens growth and phytochemicals. **Agronomy** 11:537. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030537>

Gao S, Kong Y, Lv Y, Cao B, Chen Z, Xu K (2022) Effect of different LED light quality combination on the content of vitamin C, soluble sugar, organic acids, amino acids, antioxidant capacity and mineral elements in green onion (*Allium fistulosum* L.). **Food Research International** 156:111329. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111329>

Gerovac J R, Craver JK, Boldt JK, Lopez RG (2016) Light intensity and quality from sole-source light-emitting diodes impact growth, morphology, and nutrient content of Brassica microgreens. **HortScience** 51:497-503. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.5.497>

Harbart V, Frede K, Fitzner M, Baldermann S (2023) Regulation of carotenoid and flavonoid biosynthetic pathways in *Lactuca sativa* var *capitata* L. in protected cultivation. **Frontiers in Plant Science** 14:1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1124750>

Hernández-Adasme C, Palma-Dias R, Escalona VH (2023) The effect of light intensity and photoperiod on the yield and antioxidant activity of beet microgreens produced in an indoor system. **Horticulturae** 9:493. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040493>

Hernández-Adasme CA, Silva Ascencio HP, Escalon V (2022) In-door germination and seedling growth of green and red lettuce under LED-light spectrum and subsequent effect on baby leaf lettuce. **Italian Journal of Agronomy** 17:1982 <https://doi.org/10.4081/ija.2022.1982>

Kochetova GV, Avercheva OV, Bassarskaya EM, Zhigalova TV (2022) Light quality as a driver of photosynthetic apparatus development. **Biophysical Reviews** 14:779-803. <https://doi.org/10.1007/s12551-022-00985-z>

Lanoue J, St Louis S, Little C, Hao X (2022) Continuous lighting can improve yield and reduce energy costs while increasing or maintaining nutritional contents of microgreens. **Frontiers in Plant Science** 13:983222. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.983222>

Larrauri JA, Rupérez P, Saura-Calixto F (1997) Efeito da temperatura de secagem na estabilidade de polifenóis e atividade antioxidante de cascas de bagaço de uva vermelha. **Jornal de química agrícola e alimentar** 45:1390-1393.

Lee S, Park CH, Kim JK, Ahn K, Kwon H, Kim JK, Yeo HJ (2023) LED lights influenced phytochemical contents and biological activities in kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) microgreens. **Antioxidants** 12:1686. <https://doi.org/10.3390/antiox12091686>

Lee SK, Kader AA (2000) Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. **Postharvest biology and technology** 20:207-220. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00133-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00133-2)

Liu K, Gao M, Jiang H, Ou S, Li X, He R, Liu H (2022) Light intensity and photoperiod affect growth and nutritional quality of brassica microgreens. **Molecules** 27:883. <https://doi.org/10.3390/molecules27030883>

Lichtenthaler HK (1987) Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in enzymology** 148: 350-382.

Loi M, Villani A, Paciolla F, Mulè G, Paciolla C (2020) Challenges and opportunities of light-emitting diode (LED) as key to modulate antioxidant compounds in plants. A review. **Antioxidants** 10:42. <https://doi.org/10.3390/antiox10010042>

Maru RN, Wesonga J, Okazawa H, Kavoo A, Neondo JO, Mazibuko DM, Orsini F (2024) Evaluation of Growth, Yield and Bioactive Compounds of Ethiopian Kale (*Brassica carinata* A. Braun) Microgreens under Different LED Light Spectra and Substrates. **Horticulturae** 10:436. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10050436>

Maruta T (2022). How does light facilitate vitamin C biosynthesis in leaves?. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry** 86:1173-1182. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbac096>

Massa GD, Kim HH, Wheeler RM, Mitchell CA (2008) Plant productivity in response to LED lighting. **HortScience** 43:1951-1956. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1951>

Meas S, Luengwilai K, Thongket T (2020) Enhancing growth and phytochemicals of two amaranth microgreens by LEDs light irradiation. **Scientia Horticulturae** 265: 109204. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109204>

Narouei Z, Goli SA H, Sabzalian MR, Shirvani A, Moradabbasi M (2024) Effect of light emitting diodes (LEDs) irradiation on the functional quality and shelf life of basil microgreens. **Journal of Essential Oil Research** 1-13. <https://doi.org/10.1080/10412905.2024.2371830>

Negri M, Bulgari R, Santoro P, Ferrante A (2019) Evaluation of different growing substrates for microgreens production. In: III INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GROWING MEDIA, COMPOSTING AND SUBSTRATE ANALYSIS, **Anais...** Milano: Actahorticulturae, p. 109-114.

Nozue H Gomi M (2018) Usefulness of broad-spectrum white LEDs to envision future plant factory. In.: Kozai T (Ed.) **Smart Plant Factory**. Singapore, p. 197–210.

Ntagkas N, Woltering EJ, Marcelis LF (2018) Light regulates ascorbate in plants: An integrated view on physiology and biochemistry. **Environmental and Experimental Botany** 147:271-280. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.10.009>

Paciolla C, Fortunato S, Dipierro N, Paradiso A, De Leonardis S, Mastropasqua L, De Pinto MC (2019) Vitamin C in plants: from functions to biofortification. **Antioxidants** 8:519. <https://doi.org/10.3390/antiox8110519>

Park CH, Kim NS, Park JS, Lee SY, Lee JW, Park SU (2019). Effects of light-emitting diodes on the accumulation of glucosinolates and phenolic compounds in sprouting canola (*Brassica napus* L.). **Foods** 8:76. <https://doi.org/10.3390/foods8020076>

Patsadu N, Saradhulhat P, Chompoo J, Budiarto R, Abdullakasim S (2023) Exogenous L-arginine and light-emitting diode light supplementation to enhance growth, quality and antioxidant activity in green perilla microgreens. **Agriculture and Natural Resources** 57:817-826. <https://doi.org/10.34044/j.anres.2023.57.5.08>

Pennisi G, Orsini F, Landolfo M, Pistillo A, Crepaldi A, Nicola S, Gianquinto G (2020) Optimal photoperiod for indoor cultivation of leafy vegetables and herbs. **European Journal of Horticultural Science** 85:329-338. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.4>

Pérez-López U, Sgherri C, Miranda-Apodaca J, Micaelli F, Lacuesta M, Mena-Petite A, Muñoz-Rueda A (2018) Concentration of phenolic compounds is increased in lettuce grown under high light intensity and elevated CO₂. **Plant Physiology and Biochemistry** 123:233-241. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.12.010>

Podsędek A (2007) Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review. **LWT-Food science and Technology** 40:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.07.023>

Podsędek A, Frąszczak B, Sosnowska D, Kajszyk D, Szymczak K, Bonikowski R (2023) LED light quality affected bioactive compounds, antioxidant potential, and nutritional value of red and white cabbage microgreens. **Applied Sciences** 13:5435. <https://doi.org/10.3390/app13095435>

Ponting JD (1943) Extraction of ascorbic acid from plant materials. Relative suitability of various acids. **Indutst. Eng. Chem. Anal. Ed.**, 15:389-391.

Qian H, Liu T, Deng M, Miao H, Cai C, Shen W, Wang Q (2016). Effects of light quality on main health-promoting compounds and antioxidant capacity of Chinese kale sprouts. **Food chemistry** 196:1232-1238. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.055>

Rodriguez-Concepcion M, Avalos J, Bonet ML, Boronat A, Gomez-Gomez L, Hornero-Mendez D, Zhu C (2018) A global perspective on carotenoids: Metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health. **Progress in lipid research** 70:62-93. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2018.04.004>

Samuolienė G, Brazaitytė A, Jankauskienė J, Viršilė A, Sirtautas R, Novičkovas A, Duchovskis P (2013) LED irradiance level affects growth and nutritional quality of *Brassica* microgreens. **Central European Journal of Biology** 8:1241-1249. <https://doi.org/10.2478/s11535-013-0246-1>

Shibaeva TG, Sherudilo EG, Rubaeva AA, Titov AF (2022) Continuous LED lighting enhances yield and nutritional value of four genotypes of Brassicaceae microgreens. **Plants** 11:176. <https://doi.org/10.3390/plants11020176>

Tantharapornrerk N, Vichitsoonthonkul T, Techavuthiporn C, Photchanachai S (2023) Growth and antioxidant system of Chinese kale microgreens in response to different illumination of light sources. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science** 51:108-122. <https://doi.org/10.1080/01140671.2021.1958876>

Truffault V, Fry SC, Stevens RG, Gautier H (2017) Ascorbate degradation in tomato leads to accumulation of oxalate, threonate and oxalyl threonate. **The Plant Journal** 89:996-1008. <https://doi.org/10.1111/tpj.13439>

Turner ER, Luo Y, Buchanan RL (2020) Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: A review. **Journal of food science** 85:870-882. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15049>

Vaštakaitė V, Viršilė A, Brazaitytė A, Jankauskienė J, Samuolienė G, Novičkovas A, Duchovskis P (2015). The effect of light-emitting diodes (LEDs) photoperiod on nutritional quality of Brassicaceae microgreens. In: **FOODBALT-2015: 10TH BALTIC CONFERENCE ON FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY" FUTURE FOOD: INNOVATIONS, SCIENCE AND TECHNOLOGY"** Kaunas, Lithuania: **Resumo...** Kaunas University of Technology. Department of food science and technology, p. 66-66.

Vrkić R, Šic Žlabur J, Dujmović M Benko B (2024) Can LED Lighting Be a Sustainable Solution for Producing Nutritionally Valuable Microgreens?. **Horticulturae** 10:249. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030249>

Wu Y, Pham Q, Wang Y, Huang H, Jiang X, Li RW, Wang TT (2023) Red cabbage microgreen modulation of gut microbiota is associated with attenuation of diet-induced obesity risk factors in a mouse model. **Food & Function** 14:6654-6664. <https://doi.org/10.1039/D3FO01249B>

Xiao Z, Lester GE, Luo Y, Wang Q (2012) Assessment of Vitamin and Carotenoid Concentrations of Emerging Food Products: Edible Microgreens. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 60:7644–7651. <https://doi.org/10.1021/jf300459b>

Xiao Z, Rausc SR, Luo Y, Sun J, Yu L, Wang Q, Stommel JR (2019) Microgreens of Brassicaceae: Genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity. **Lwt** 101:731-737. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.076>

Yan Z, He D, Niu G, Zhai H (2019) 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** 248:138-144. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.002>

Yan Z, He D, Niu G, Zhou Q, Qu Y (2019) Growth, nutritional quality, and energy use efficiency of hydroponic lettuce as influenced by daily light integrals exposed to white versus white plus red light-emitting diodes. **HortScience** 54:1737-1744. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14236-19>

Zhang Y, Cai P, Cheng G, Zhang Y (2022) A brief review of phenolic compounds identified from plants: Their extraction, analysis, and biological activity. **Natural product communications** 17:1934578X211069721. <https://doi.org/10.1177/1934578X211069721>

Zhang X, Bian Z, Yuan X, Chen X, Lu C (2020) A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. **Trends in food science & technology** 99:203-216. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.031>

CAPÍTULO 4 - FOTOPERÍODO E IRRADIÂNCIA DE LUZ VERMELHA ADICIONAL À LUZ BRANCA NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DO REPOLHO-ROXO MICROVEGETAL

RESUMO - Os diodos emissores de luz led tem diferentes efeitos no crescimento e qualidade das plantas, e são altamente usados na agricultura interna para a produção de microvegetais, os quais são plantas consumidas em um estágio muito inicial de desenvolvimento, tendo um valor nutricional muito alto. A família Brassicaceae, são as principais espécies cultivadas como microvegetais. O presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do fornecimento de luz vermelha adicional à luz branca sobre parâmetros biométricos, bioquímicos e de qualidade do repolho-roxo microvegetal. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial $2 \times 3 + 1$, onde os fatores avaliados foram densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (20 e 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de luz vermelha adicional a 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz branca e fotoperíodo (12, 16, 20 horas por dia). A testemunha foi a irradiação dos microvegetais somente com a luz branca. A adição da luz vermelha teve um efeito positivo nas variáveis de área cotiledonar, produtividade, vitamina C e compostos fenólicos de microvegetal de repolho roxo

Palavras-chave: Alimento funcional, *Brassica oleracea* L var. *capitata* f. *rubra*, Espectro de luz, Fábrica de plantas, Intensidade luminosa

CHAPTER 4 - PHOTOPERIOD AND IRRADIANCE OF RED LIGHT ADDITIONAL TO WHITE LIGHT ON THE PRODUCTIVITY AND QUALITY OF THE MICROVEGETABLE RED CABBAGE

ABSTRACT - Light-emitting diodes (LEDs) have different effects on plant growth and quality and are widely used in indoor agriculture for microgreens production. Microgreens are plants consumed at a very early stage of development and have a high nutritional value. The Brassicaceae family includes the main species cultivated as microgreens. This study aimed to evaluate the effect of additional red light supplementation to white light on biometric, biochemical, and quality parameters of red cabbage microgreens. The experimental design was completely randomized in a $2 \times 3 + 1$ factorial scheme, where the evaluated factors were the photosynthetic photon flux density (20 and 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) of additional red light to 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of white light and photoperiod (12, 16, and 20 hours per day). The control treatment consisted of microgreens irradiated only with white light. The addition of red light had a positive effect on cotyledon area, yield, vitamin C, and phenolic compounds in red cabbage microgreens.

Keywords: Functional food, *Brassica oleracea* L var. *capitata* f. *rubra*, Light spectrum, Plant factory, Light intensity

4.1 INTRODUÇÃO

Doenças crônicas não transmissíveis (DCNT), principalmente cardiopatias, circulatórias, respiratórias, cânceres e diabetes, são responsáveis por quase 75% das mortes em todo o mundo. Muitas dessas mortes precoces não são inevitáveis e tem como principais fatores de risco o tabaco, alimentação pouco saudável, excesso de álcool, inatividade física e poluição atmosférica (World Health Organization, 2023). Para o período de 2011 a 2025, os custos socioeconômicos associados com DCNT, em países de baixa e média renda, foi estimado em US\$ 7 trilhões (Malta et al., 2017).

O consumo diário de vegetais desempenha um papel importante, fornecendo macronutrientes para a energia e o crescimento, bem como vitaminas e fitonutrientes essenciais que nos protegem de doenças crônicas (Martin e Li, 2017). Os microvegetais são plântulas colhidas entre 7 a 28 dias após a semeadura (Metelli et al., 2023; Cano Lamadrid et al., 2023; Bhaswant et al., 2023; Signore et al., 2024), com tamanho entre 5 e 8 cm, apresentando o hipocótilo, cotilédones com ou sem a primeira folha, podendo esta ter diferentes tamanhos. Constituem-se em uma nova apresentação de vegetais frescos, os quais vêm ganhando mercado devido às suas propriedades nutraceuticas, de alto valor nutricional e funcional, podendo alcançar 40 vezes maior valor que vegetais maduros (Lone et al., 2024).

As espécies da família Brassicaceae estão entre as mais utilizadas na produção de microvegetais, principalmente por possuírem características morfológicas, sensoriais, alto conteúdo nutricional com ótimos benefícios na saúde humana (Petropoulos et al., 2017; Guardiola-Márquez et al., 2023). Microvegetais de repolho-roxo, por exemplo, apresentaram 260 vezes mais betacaroteno, 70 vezes mais filloquinona e 6 vezes mais vitamina C em comparação à hortaliça madura colhida em tamanho comercial tradicional (Choe et al., 2018).

O cultivo *indoor* tem sido o sistema de produção eficiente e eficaz para os microvegetais, pois oferece um ambiente confiável por ter os fatores de produção altamente controlados. Entre eles, a luz tem sido o principal alvo de pesquisas, pois influencia não só o crescimento, mas também a qualidade dos microvegetais (Rizvi et al., 2023). Por ter alta eficiência energética e capacidade de emitir comprimentos

de onda específicos (mono ou multiespectral) (Singh et al., 2021; Frąszczak et al., 2022), o diodo emissor de luz (LED) tem sido amplamente utilizado no cultivo *indoor*.

A manipulação da luz quanto à densidade de fluxo de fótons, ao fotoperíodo e ao espectro gera modificação na morfologia, crescimento, cor, sabor, nutrição e compostos bioativos (Kyriacou et al., 2016 Turner et al., 2020). A luz vermelha tem sido o espectro luminoso mais utilizado no cultivo *indoor*, sozinho ou em combinação à luz azul, devido à sua alta eficiência em processos como a fotossíntese e fotomorfogênese (Kozai e Niu 2020). No presente estudo tem-se a hipótese de que há contribuição da luz vermelha adicional à luz branca, que foi otimizada para o cultivo de repolho-roxo microvegetal em estudo prévio. De acordo com Tantharapornrerk et al. (2021), o uso de LED branca em combinação específica com comprimentos de onda vermelha, azul e verde aumentou o conteúdo de glucosinalatos totais, compostos fenólicos e ácido ascórbico totais, em microvegetais. Semelhante entendimento tem Podsedek et al. (2023), os quais recomendam a adição de luz vermelha à luz branca em microvegetais para aumentar significativamente o conteúdo de compostos fenólicos e antocianinas em relação à luz branca sozinha. Contudo, os estudos não avaliaram o efeito em parâmetros biométricos do microvegetal repolho-roxo.

Assim, estabelecer protocolos adequados de iluminação em cultivo *indoor* são extremamente importantes, uma vez que comprimentos de onda em diferentes intensidades podem ter efeitos muito diferentes na fisiologia, metabolismo crescimento e qualidade das espécies vegetais. Diante do exposto, objetivou-se avaliar o efeito da luz vermelha adicional à luz branca em parâmetros biométricos, bioquímicos e de qualidade do repolho-roxo microvegetal.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Local experimental

O experimento foi conduzido de 10 a 18 de maio de 2023, no mesmo Laboratório citado no item Material e Métodos do Capítulo 2, sob as mesmas condições de temperatura e umidade relativa do ar.

4.2.2 Tratamentos, delineamento e unidade experimental

Sob a irradiância de luz branca com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e fotoperíodo de 20 horas por dia (testemunha), foram avaliados sete tratamentos, em esquema fatorial $2 \times 3 + 1$, resultantes da combinação de dois fatores: DFFF (20 e $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de luz vermelha e fotoperíodo (12, 16, 20 horas por dia). O tratamento adicional correspondeu à irradiância de luz branca sem aplicação de luz vermelha. O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso, com os tratamentos repetidos quatro vezes. Cada unidade experimental correspondeu a uma prateleira da estante contendo uma bandeja de repolho-roxo microvegetal.

Foram utilizadas as mesmas lâmpadas LED branca descritas no item 2.1 desta tese. As lâmpadas LED vermelha possuíam 75,9% de vermelho, 11,0% de infravermelho, 1,3% de amarelo/laranja, 0,2% de verde e 11,7% de azul. A distribuição da radiação à bandeja foi aferida utilizando-se o mesmo espectralradiômetro citado no item 2.1.

4.2.3 Instalação e condução do experimento

Foram usadas bandejas de polipropileno retangulares de maior dimensão que a usada no item 2.1, sendo $20 \times 13 \times 4,5$ cm de comprimento, largura e altura, respectivamente, nas quais também foram realizados furos de 2 mm de diâmetro, equidistantes em 3 cm, para umedecimento do substrato com solução nutritiva por capilaridade. Os procedimentos de preenchimento da bandeja com substrato (mesmo substrato), semeadura da mesma cultivar de repolho-roxo, na mesma densidade (300 g m^{-2}), umedecimento e empilhamento das bandejas no escuro por três dias, quando foram transferidas para o Laboratório Cultivo *Indoor* para aplicação dos tratamentos. A distância entre as lâmpadas e os cotilédones dos microvegetais foi de 27 cm.

Previamente ao início da irradiância dos tratamentos, foram disponibilizados solução nutritiva na bandeja maior para atender à bandeja de microvegetal (unidade experimental). Utilizou-se a mesma solução nutritiva proposta por Furlani et al.

(1999), adotando-se o mesmo critério para reposição de solução nutritiva às bandejas, que foi a completa absorção de solução nutritiva disponibilizada.

A colheita foi realizada aos cinco dias (120 horas) após o início da aplicação de luz vermelha, quando as plântulas apresentavam os cotilédones completamente expandidos, sem a visualização da primeira folha.

4.2.4 Características avaliadas

a) Área cotiledonar (cm^2 por planta): cotilédones de 50 plântulas por unidade experimental tiveram as suas áreas quantificadas por meio do medidor eletrônico de área, modelo LI 3100 (LI-COR®).

b) Comprimento do hipocótilo (cm): hipocótilos de 50 plântulas foram medidos com auxílio de uma régua graduada.

c) Produtividade: os microvegetais de uma bandeja foram colhidos cortando-se o hipocótilo rente ao substrato e imediatamente pesados em balança com 0,01 g de precisão. A produtividade foi estimada e expressa em g m^{-2} .

d) Teor de clorofila e carotenoides: discos cotiledonares de repolho roxo microvegetal em torno de 0,025 a 0,030g de massa fresca foram colocados em Eppendorf contendo 2 mL de acetona ao 80%, protegidos da luminosidade com papel alumínio, posteriormente as amostras foram colocadas na geladeira por 48 horas a 4 °C. Para determinação dos teores de cada pigmento, foi realizada a leitura em espectrofotômetro de 470 nm para carotenoides; 645 nm e 663nm para clorofila A e B segundo metodologia proposta por Lichtenthaler (1987).

e) Teor de vitamina C: por titulação com AsA (TILLMAN): Em ambiente escuro 1g de folhas foi macerada em nitrogênio líquido N_2 em 10 ml, de ácido oxálico (0,5%), utilizando pilão e almofariz (Ponting, 1943). Posteriormente esta foi filtrada a vácuo em papel de filtro Whatman No. 1 e o filtrado foi coletado. Se adicionou 4,0 mL de ácido oxálico (0,5%) as alíquotas triplicatas de 1,0 ml do extrato que foram filtradas, o extrato foi homogeneizado e foram tituladas com DCPIP 3,73 mM (2,6-diclorofenolindofenol), até que o filtrado ficasse com uma cor rosa persistente. Por último o volume de DCPIP adicionado foi comparado com uma curva padrão de concentrações de ácido ascórbico.

f) Teor de compostos fenólicos: realizado por espectrofotometria de um extrato obtido segundo Larrauri, Ruperez e Saura-Calixto (1997) com a utilização de soluções de acetona 70% e metanol 50% e posterior adição do reagente Folin-Ciocalteu, sendo baseado em uma reação de oxidação-redução alcalina, onde o íon fenolato é oxidado e o reagente de Folin é reduzido. Após a reação, uma cor azul é produzida, e a leitura desta é realizada em uma absorbância de 700 nm.

4.2.5 Análise de dados

Os dados de cada característica foram submetidos a análise de variância (Teste F). O teste Tukey foi aplicado para comparar as médias do fator fotoperíodo e estudo de regressão polinomial foi realizado para o fator DFFF, escolhendo a equação significativa ($p < 0,05$) e com maior coeficiente de determinação para melhor representar a distribuição das médias. Foi utilizado o programa AgroEstat (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015).

4.3 RESULTADOS

De acordo com a análise de variância dos dados, houve efeito significativo do fotoperíodo e, também, os tratamentos (fatorial) diferiram do adicional (sem luz vermelha) sobre a área cotiledonar. O comprimento do hipocótilo não foi influenciado pelos fatores fotoperíodo e intensidade de luz e tratamento adicional, enquanto a produtividade foi influenciada pela irradiância de luz vermelha em relação à sua ausência (Tabela 1).

Maior área cotiledonar do microvegetal foi observada à medida que maior foi o fotoperíodo (Figura 1) com acréscimo de 11,7% a cada 4 horas de luz vermelha adicionada ao fotoperíodo de 12 h. Microvegetais que receberam luz vermelha apresentaram área cotiledonar 22,9% maior que microvegetais cultivados somente com luz branca ($1,61 - 1,31 \text{ cm}^2 \text{ microvegetal}^{-1}$). A intensidade de luz vermelha não influenciou a área cotiledonar, que apresentou média de $1,61 \text{ cm}^2 \text{ microvegetal}^{-1}$ ($1,56$ e $1,67 \text{ cm}^2 \text{ microvegetal}^{-1}$ para 20 e $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente) assim como não houve interação dos fatores fotoperíodo e intensidade de luz vermelha.

Tabela 1. Resumo da análise de variância de dados para área cotiledonar (AC), comprimento de hipocótilo (CH), produtividade e fluorescência da clorofila do repolho-roxo microvegetal em função do fotoperíodo (FP) e intensidade (INT) de luz vermelha e tratamento adicional (TA, sem luz vermelha).

	AC	CH	Produtividade	Fluorescência
	Valores de F			
FP	6,88**	0,63 ^{ns}	2,78 ^{ns}	2,31 ^{ns}
INT	3,67 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,25 ^{ns}	1,91 ^{ns}
FP x INT	0,85 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,40 ^{ns}
TA x (FP x INT)	15,98**	1,10 ^{ns}	29,50**	0,00 ^{ns}
C.V. (%)	8,87	5,79	5,30	3,57

^{ns} e ** correspondem a não significativo ($p > 0,05$) e significativo ($p < 0,01$) pelo teste F, respectivamente; C.V. = coeficiente de variação.

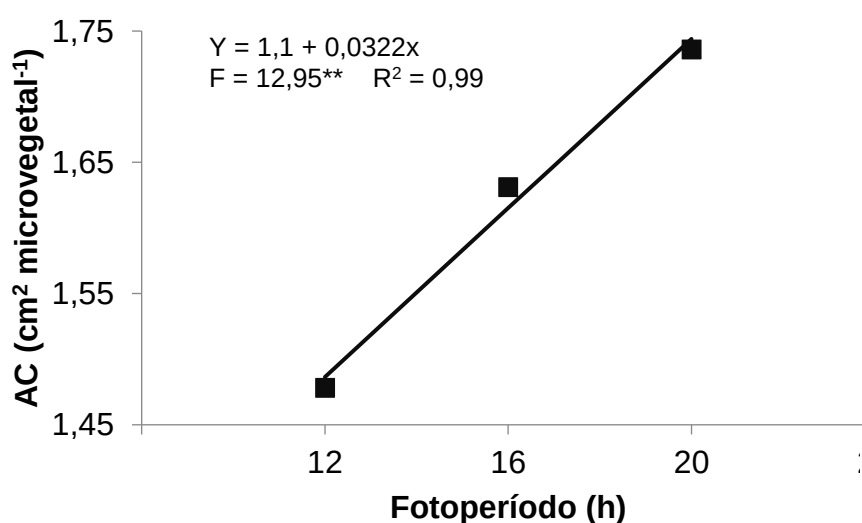


Figura 1. Área cotiledonar do repolho-roxo microvegetal em função do fotoperíodo de luz vermelha. ** = $p < 0,01$

Fotoperíodo e intensidade de luz vermelha não influenciaram o comprimento do hipocótilo do repolho-roxo microvegetal. Também, não houve efeito da interação dos fatores. Os comprimentos do hipocótilo de repolho-roxo irradiado com luz vermelha e que não receberam luz vermelha foram 6,95 e 7,18 cm, não diferindo entre si. Considerando os fatores e tratamento adicional, o comprimento médio do

hipocótilo foi 6,98 cm. Não houve ajuste significativo de equação polinomial ($p > 0,05$) para representar as médias observadas.

A produtividade não foi influenciada pelos fatores isolados ou interação destes. Ainda que o teste F não tenha detectado diferença na análise de variância, houve ajuste significativo de equação polinomial e a máxima produtividade foi obtida com 20 horas de luz vermelha (Figura 2). Também, verificou-se que a produtividade de repolho-roxo microvegetal obtida com luz vermelha ($5,61 \text{ kg m}^{-2}$) foi maior que quando cultivada em sua ausência ($4,76 \text{ kg m}^{-2}$) (Tabela 1).

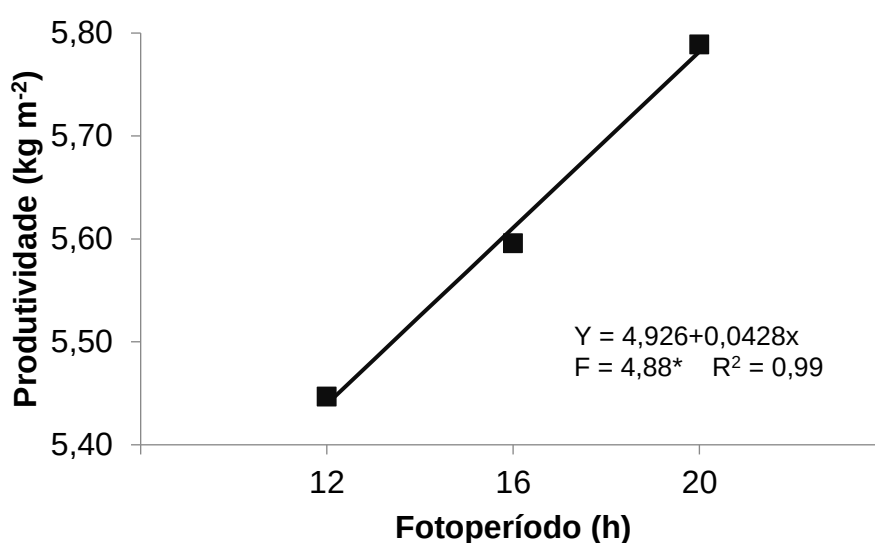


Figura 2. Produtividade do repolho-roxo microvegetal em função de fotoperíodo com luz vermelha. * = $p < 0,05$

A fluorescência da clorofila não foi influenciada pelos fatores isoladamente e pela interação. Também não houve diferença para fluorescência da clorofila de microvegetais que receberam e que não receberam luz vermelha (Tabela 2), e o valor observado foi de 0,785 em ambas condições. Não houve ajuste significativo de equação polinomial ($p > 0,05$) para representar as médias observadas.

De acordo com a análise de variância, os teores de clorofilas *a* e *b* e de carotenoides não foram influenciados pelo fotoperíodo e intensidade de luz vermelha ou pela interação destes (Tabela 2), cujas médias foram 6,00; 7,97 e 8,04 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente. Os teores dos três pigmentos em cotilédones de microvegetais cultivados sob luz vermelha, os quais foram 6,08; 7,85 e 8,13 $\mu\text{g g}^{-1}$ para clorofilas *a*,

b e carotenoides, respectivamente, também não diferiram daqueles observados em repolho-roxo microvegetal cultivados somente na luz branca, cujos teores foram 5,55; 8,62 e 7,48 $\mu\text{g g}^{-1}$ para clorofilas *a*, *b* e carotenoides, respectivamente. Os resultados para teores de pigmentos diferem dos observados por Podsedek et al. (2023), que observaram que a irradiação de repolho e repolho-roxo microvegetal com luz branca+vermelha proporcionou maiores teores de pigmentos que quando os microvegetais foram irradiados somente com luz branca.

O teor de vitamina C foi influenciado pelos fatores isolados e pela interação fotoperíodo e intensidade de luz vermelha (Tabela 2). Em ambas intensidades, observou-se maior teor de vitamina C com 20 horas de fotoperíodo, com ajustes de equação linear e quadrática para as intensidades de 20 e 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz vermelha, respectivamente. Com estas irradiâncias e 20 h de luz vermelha, os teores de vitamina C atingiram 22,92 e 24,52 mg 100g⁻¹, respectivamente (Figura 3).

Tabela 2. Resumo da análise de variância de dados para teores de clorofilas *a* (Chlor *a*), *b* (Chlor *b*), carotenoides (Carot), de vitamina C (Vit C) e de compostos fenólicos (CF) do repolho-roxo microvegetal em função do fotoperíodo (FP) e intensidade (INT) de luz vermelha e tratamento adicional (TA, sem luz vermelha).

	Chlor <i>a</i>	Chlor <i>b</i>	Carot	Vit C	CF
FP	0,47 ^{ns}	0,47 ^{ns}	1,02 ^{ns}	22,93 ^{**}	9,21 ^{**}
INT	0,53 ^{ns}	2,16 ^{ns}	0,95 ^{ns}	17,29 ^{**}	20,46 ^{**}
FP X INT	0,30 ^{ns}	1,07 ^{ns}	1,41 ^{ns}	5,96 ^{**}	2,49 ^{ns}
TA x (FP x INT)	0,86 ^{ns}	2,24 ^{ns}	3,62 ^{ns}	1298,58 ^{**}	6,32 [*]
C.V. (%)	17,74	11,83	7,86	2,21	7,76

^{ns} e ^{**} correspondem a não significativo ($p > 0,05$) e significativo ($p < 0,01$) pelo teste F, respectivamente; C.V. = coeficiente de variação.

Microvegetais de repolho-roxo apresentaram teor médio de 22,81 mg 100g⁻¹ de vitamina C quando irradiadas com luz vermelha (fotoperíodos x intensidades), o qual foi 68% maior que o teor observado em microvegetais que foram cultivados somente com luz branca.

O teor de compostos fenólicos foi influenciado pelos fatores fotoperíodo e intensidade de luz vermelha isoladamente (Tabela 2). Quanto maior o fotoperíodo, maior o teor de compostos fenólicos atingindo o máximo de 63,55 mg 100g⁻¹ (Figura

4), cerca de 19% maior que o obtido com o menor fotoperíodo avaliado. A irradiância de $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ proporcionou microvegetais com $62,88 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ de compostos fenólicos enquanto com $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ o teor foi de $54,58 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$. Microvegetais crescidos sob luz vermelha apresentaram $58,73 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ enquanto aqueles que não receberam luz vermelha apresentaram $52,63 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$.

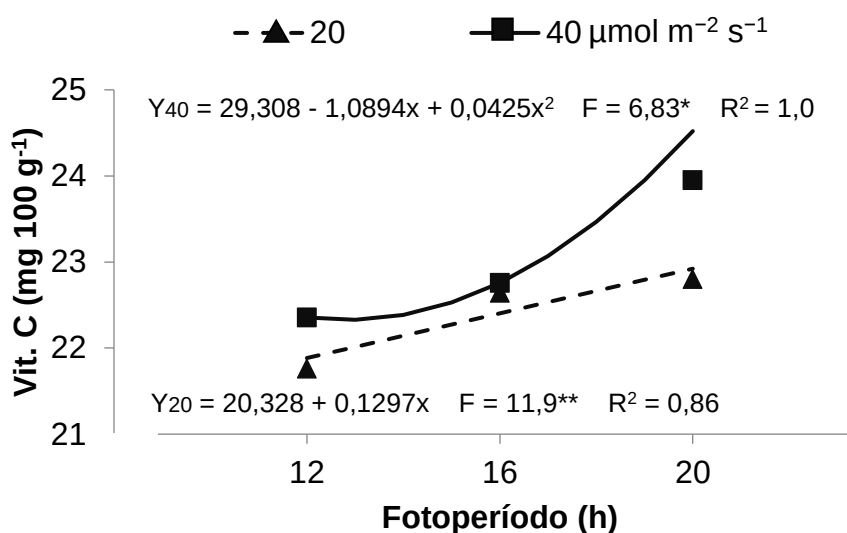


Figura 3. Teor de vitamina C do repolho-roxo microvegetal em função de fotoperíodo e intensidade de luz vermelha. * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$

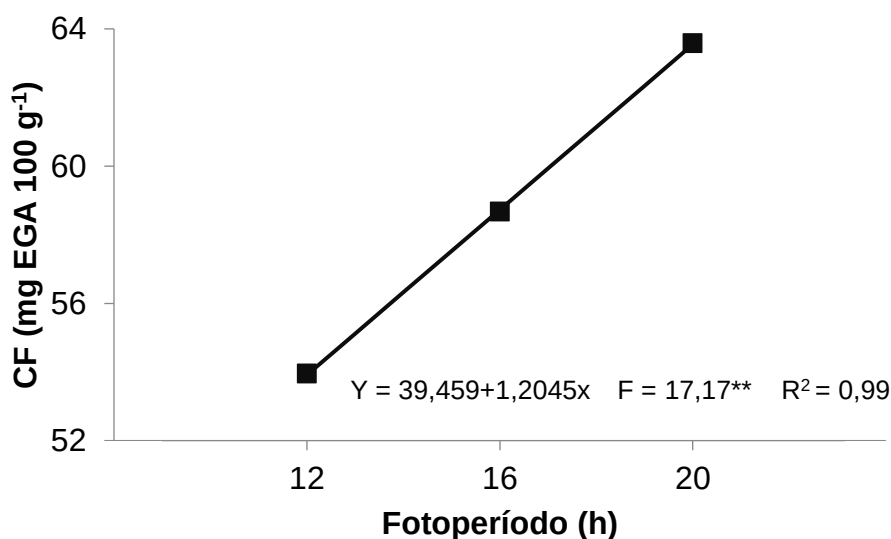


Figura 4. Teor de compostos fenólicos (CF) do repolho-roxo microvegetal em função do fotoperíodo de luz vermelha. EGA = Equivalente de ácido gálico. ** = $p < 0,01$

4.4 DISCUSSÃO

Os microvegetais da família Brassicaceae são usados com fins nutracêuticos devido a seus altos teores de nutrientes, ácido ascórbico, carotenoides e compostos fenólicos (Nair, 2023). Vários estudos relataram que fontes de iluminação artificial podem potencializar os processos fotomorfogenéticos, fotossintéticos e metabólicos de microvegetais melhorando o seu crescimento, produtividade e qualidade (Orlando et al., 2022; Kelly et al., 2022). De modo geral, Zha et al. (2018) relataram que um fotoperíodo prolongado aumenta significativamente o acúmulo de matéria seca, além do crescimento e metabolitos secundários, em diversas espécies de plantas, pois proporciona maior período de absorção de fótons, que favorece a fixação de CO₂ das plantas no ciclo de Calvin, favorecendo a atividade fotossintética (Lefsrud et al., 2006; Liu et al., 2022; Lanoue et al., 2022; Shibaeva et al., 2022). No entanto, tal efeito da luz não é rito para todas as espécies e deve ser objeto de estudo pois é dependente da qualidade de luz, fotoperíodo e intensidade.

No presente estudo, dentre as características biométrica e fatores estudados, somente foi observado efeito do fotoperíodo na área cotiledonar do repolho-roxo microvegetal. A área cotiledonar destaca-se entre as características morfológicas comerciais dos microvegetais, uma vez que visualmente é a parte que chama mais a atenção do consumidor.

Foi observado que a adição de luz vermelha à branca com fotoperíodo de 20 horas promoveu aumento de 11,7% na área cotiledonar a cada 4 horas de luz vermelha em relação ao obtido com 12 horas. Essa resposta do repolho-roxo ao acréscimo de luz vermelha concordou com resultados obtidos por outros autores, que avaliaram respostas do repolho microvegetal e outras espécies à luz vermelha frente outros espectros de luz. Kong et al. (2020) verificaram aumento da área cotiledonar de microvegetais de rúcula, repolho, couve e mostarda quando foi usada luz vermelha em comparação à iluminação com azul, azul+verde e azul+UV. Avaliando proporções de luz vermelha e azul, Ying et al. (2020) observaram que a maior proporção de vermelho (95:5) foi a ideal para obter maior área cotiledonar em microvegetal de couve e mostarda. Bantis et al. (2021) constataram aumento da área cotiledonar em microvegetais de mostarda e manjerição-verde sob maiores

intensidades de luz vermelha. Também para salsa, Carillo et al. (2022) observaram que a luz vermelha aumentou a produtividade em 16,9% em comparação a tratamentos com luz azul e mistura de luz azul e verde.

Os resultados com o aumento do fotoperíodo de luz vermelha são explicados por este comprimento de onda apresentar fótons de menor energia (Massa, 2008), que são rapidamente aproveitados pelas plantas, principalmente por pigmentos como clorofilas, carotenoides e fotorreceptores como o fitocromo (Toscano et al., 2021), que estimulados determinam a expressão de genes que coordenam fortemente respostas fotomorfogênicas e fotossintéticas, gerando mudanças na sua morfologia como a expansão foliar, entre outros processos (Wong et al., 2020; Paradiso et al., 2022). Além disso, existe forte relação entre o fotoperíodo e a qualidade da iluminação artificial, que podem influenciar mudanças na morfologia das plantas (Bergstrand, 2017; Choi et al., 2022). Ao avaliar comprimentos de onda e fotoperíodos de 4, 12 e 24 horas na alface, Vatistas et al. (2024) verificaram que o aumento de fotoperíodo com luz azul diminuiu a área foliar de alface, enquanto o contrário foi observado com o aumento no período sob luz vermelha.

A produtividade é um atributo importantíssimo para o produtor de microvegetal, uma vez que este quesito afetará o custo e a competitividade do produto no mercado. Assim, sem desmerecer a importância da qualidade do microvegetal, a produtividade é condicionante de maior ou menor otimização da estrutura produtiva, diminuindo ou aumento o custo unitário do produto.

No presente estudo, adicionar luz vermelha (média do fatorial fotoperíodo-intensidade) à luz branca (tratamento adicional, sem aplicação de luz vermelha) proporcionou aumento de 17,9% na produtividade de repolho-roxo microvegetal ($5,61 \text{ kg m}^{-2}$ - $4,76 \text{ kg m}^{-2}$). Combinações de comprimentos de onda com maior participação de luz vermelha proporcionaram incrementos de produtividades em 15 espécies de microvegetais (Fraszczak et al., 2022). Luo et al. (2024) constataram maior massa seca de brócolis microvegetal com maior proporção de luz vermelha (5:1), o que corroborou resultado de Bantis et al. (2021), em que microvegetais de mostarda, ervilha e manjerição-verde desenvolveram maior biomassa em tratamento com maior quantidade de luz vermelha. As taxas fotossintéticas são relativamente altas quando as plantas são iluminadas sob comprimento de onda vermelha

(Hogewoning et al., 2010), o que estimula a divisão celular, favorecendo o crescimento da planta, a sua expansão foliar e, conseqüentemente, aumento da biomassa (Rehman et al., 2024).

Concomitantemente ao resultado observado para melhor resposta do microvegetal ao adicional de luz vermelha à luz branca, maior produtividade de repolho-roxo microvegetal foi obtida com maior fotoperíodo de luz vermelha (Figura 2). O resultado concordou com o reportado por Meas et al. (2020), que ao avaliar fotoperíodos de 8 a 20 h, em duas variedades de amaranto microvegetal, observaram que 20 horas de luz vermelha e azul combinados maximizou a produtividade. Silva et al. (2022) observaram que ao aumentar o fotoperíodo 12 para 18 horas, com luz e luz azul (11,7%), vermelha (75,9%) e vermelho distante (11,0%), aumentou o número de folhas, área foliar e biomassa em um sistema de cultivo *indoor* para alface.

O efeito na produtividade pode ser explicado pelo efeito observado do fotoperíodo na área cotiledonar (Figura 1). Li et al. (2023) relataram que a área cotiledonar do microvegetal foi fortemente correlacionada com a massa foliar e biomassa. Assim, o aumento do fotoperíodo proporcionou maior período de captura de fótons pelo microvegetal, que está diretamente correlacionada com a fotossíntese e, conseqüentemente, maior produção de biomassa (Bojka et al., 2020). Al Murad et al. (2021) mostraram que a aplicação de luz vermelha afeta fortemente o crescimento das plantas, aumentando as massas fresca e seca, assim como a área foliar, incrementando a produtividade.

A vitamina C é um importante componente qualitativo dos microvegetais e o manejo da irradiância na produção de microvegetal deve buscar seu incremento. A vitamina C é um excelente capturador de radicais livres e atua, também, como cofator de numerosas enzimas envolvidas no metabolismo vegetal e humano. Em humanos, a vitamina C atua em vários processos fisiológicos, tais como a absorção de ferro, síntese de colágeno, estímulo à imunidade e regulação epigenética (Paciolla et al., 2019).

No presente estudo, microvegetais de repolho-roxo apresentaram teor médio de 22,81 mg 100g⁻¹ de vitamina C quando irradiadas com luz vermelha (fotoperíodos x intensidades) adicional à luz branca, teor que foi 68% maior ao de microvegetais

que foram cultivados somente com luz branca. Alface iluminada com isolada ou combinada luz azul e vermelha apresentaram maior teor de vitamina C que plantas sob luz branca (Ohashi-Kaneko et al., 2007). Em repolho e repolho-roxo microvegetal, luz vermelha adicionada à branca promoveu aumento de vitamina C em relação à luz branca (Podsdek et al., 2023). O resultado também concorda com o reportado por Kamal et al. (2020), que embora tenham avaliado proporções de comprimentos de luz vermelho em relação ao verde e azul, observaram que na maior proporção de luz vermelha:verde:azul (70:10:20) houve maior quantidade de vitamina C em brássicas. O efeito positivo da luz vermelha no teor de vitamina C concordou com os observados por Chan et al. (2011) em alface, por Samuolienė et al. (2016) em manjerição e salsa, por Loi et al. (2019) em brócolis maduro

Quanto ao fotoperíodo e intensidade da luz vermelha, o aumento destes fatores de produção promoveram incrementos no teor de vitamina C, atingindo com 20 e 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ambos com 20 h de fotoperíodo, 22,92 e 24,52 mg 100g⁻¹, respectivamente (Figura 3), que corresponderam a acréscimos de 4,8 e 9,7 % em relação aos obtidos com as mesmas irradiâncias porém com fotoperíodo de 12 h. O comprimento de onda vermelho e maior fotoperíodo promovem a abertura estomática e atividade fotossintética levando à maior fixação de CO₂ e, por conseguinte, desencadeando vários processos nas plantas, como a biossíntese de vitamina C dos microvegetais (Brazaitytė et al., 2015).

A síntese de vitamina C depende da intensidade e qualidade da luz, bem como do tempo de exposição (Paciolla et al., 2019; Loi et al., 2020 e Liu et al., (2022). Estes parâmetros da luz influenciam a fotossíntese, que tem papel importante no acúmulo de vitamina C. Se impedida de acontecer, leva a redução da expressão de genes envolvidos na biossíntese da vitamina C (Yabuta et al., 2007; Badejo et al., 2012). Ademais, a fotossíntese aumenta a disponibilidade de carboidratos solúveis, que são precursores na biossíntese de vitamina C (Paciolla et al., 2019).

O efeito positivo do maior período de exposição dos microvegetais à luz vermelha no aumento do teor de vitamina C também foi observado por Chen et al. (2022) em alface. Meas et al. (2020) verificaram que o aumento do fotoperíodo (16h)

e maior proporção de luz vermelha em relação a azul (70:30) aumentou o teor de vitamina C em amaranto.

Os efeitos positivos dos microvegetais na saúde do homem estão ligados, também, aos teores de compostos fenólicos, que são um potente anti-inflamatório e anticancerígeno, além de efeito preventivo sobre doenças cardiovasculares, diabetes e doenças associadas ao estresse oxidativo (Connolly et al., 2021; Zhang et al., 2022).

O comprimento e a intensidade da luz podem regular o conteúdo de compostos fenólicos nas plantas (Bae et al., 2017). No presente estudo, houve aumento de 19% quando os microvegetais estiveram sob fotoperíodo de 20 h em relação ao cultivado com 12 h e incremento de 15,2% com a maior intensidade de luz vermelha (Figura 4). Considerando o efeito da luz vermelha, o teor médio de fotoperíodos e intensidades proporcionou microvegetais com 11,5% maior teor de compostos fenólicos que microvegetais que não receberam luz vermelha, apenas branca.

O efeito positivo da luz vermelha adicional à luz branca observado para compostos fenólicos de repolho-roxo microvegetal (Figura 4) também foi reportado por Podsedel et al. (2023). Bian et al. (2016) relataram que maior proporção de luz vermelha em relação a luz azul (4:1) e fotoperíodo de 24 h aumentaram o teor de compostos fenólicos em alface em comparação com a luz branca. Hernandez-Adasme et al. (2023) constataram que à medida que o fotoperíodo aumentou de 12 para 16 h, associado a maior proporção de luz vermelha (75% vermelho, 23% azul e 2% vermelho distante), o teor de compostos fenólicos aumentou em 46,4%, de 8,99 para 13,16 mg GAE g⁻¹ na massa fresca de beterraba microvegetal. Loi et al. (2019) verificaram aumento contante no teor de compostos fenólicos sob maior intensidade de luz vermelha em brócolis (66 vs 27 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

De acordo com Liu et al. (2022) e Gao et al. (2021), mostraram que a maior quantidade de fotossíntese gera mais carboidratos, resultando em um aumento na biomassa, e este aumento de biomassa pode estar correlacionada positivamente com os compostos fenólicos. Segundo Wilawan et al. (2019), o processo de biossíntese de compostos fenólicos começa pela transformação de carboidratos em aminoácidos intermediários pela via Shikimate, confirmando o efeito indutivo positivo

da luz no metabolismo fenólico. Mesmo não realizando estudo sobre as vias de sintetização dos compostos fenólicos, pode-se constatar o efeito positivo do aumento do fotoperíodo e da intensidade de luz vermelha no aumento no conteúdo de compostos fenólicos que, por sua vez, pode ter reduzido estresse da planta e contribuído para os incrementos percebidos na área cotiledonar e produtividade.

4.5 CONCLUSÃO

A luz vermelha adicional à luz branca deve ser adotada para cultivo de repolho-roxo microvegetal uma vez que promove incrementos na área cotiledonar, produtividade e qualidade do repolho-roxo microvegetal.

4.6 REFERÊNCIAS

- Al Murad M, Razi K, Jeong BR, Samy PMA, Muneer S (2021) Light emitting diodes (LEDs) as agricultural lighting: Impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops. **Sustainability** 13:1985. <https://doi.org/10.3390/su13041985>
- Badejo AA, Wada K, Gao Y, Maruta T, Sawa Y, Shigeoka S, Ishikawa T (2012) Translocation and the alternative D-galacturonate pathway contribute to increasing the ascorbate level in ripening tomato fruits together with the D-mannose/L-galactose pathway. **Journal of Experimental Botany** 63:229–239.
- Bae JH, Park SY, Oh MM (2017) Supplemental irradiation with far-red light-emitting diodes improves growth and phenolic contents in *Crepidiastrum denticulatum* in a plant factory with artificial lighting. **Horticulture, Environment, and Biotechnology** 58:357-366. <https://doi.org/10.1007/s13580-017-0331-x>
- Bantis F (2021) Light spectrum differentially affects the yield and phytochemical content of microgreen vegetables in a plant factory. **Plants** 10:2182. <https://doi.org/10.3390/plants10102182>
- Barbosa JC e Maldonado JW (2015) Experimentação agrônômica & AgroEstat: Sistemas para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda., 396 p.
- Bergstrand KJI (2017) Methods for growth regulation of greenhouse produced ornamental pot-and bedding plants—a current review. *Folia Horticulturae*, 29:63-74.
- Bhaswant M, Shanmugam DK, Miyazawa T, Abe C, Miyazawa T (2023) Microgreens—A comprehensive review of bioactive molecules and health benefits. **Molecules** 2023 28:867. <https://doi.org/10.3390/molecules28020867>

Bian ZH, Cheng RF, Yang QC, Wang J, Lu C (2016) Continuous light from red, blue, and green light-emitting diodes reduces nitrate content and enhances phytochemical concentrations and antioxidant capacity in lettuce. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 141:186-195. <https://doi.org/10.21273/JASHS.141.2.186>

Bojka KUMP (2020) The role of far-red light (FR) in photomorphogenesis and its use in greenhouse plant production. **Acta Agriculturae Slovenica** 116:93-105. <https://doi.org/10.14720/aas.2020.116.1.1652>

Brazaitytė A, Sakalauskienė S, Samuolienė G, Jankauskienė J, Viršilė A, Novičkovas A, Duchovskis P (2015) The effects of LED illumination spectra and intensity on carotenoid content in Brassicaceae microgreens. **Food Chemistry** 173:600-606. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.077>

Cano-Lamadrid M, Martínez-Zamora L, Castillejo N, Cattaneo C, Pagliarini E, Artés-Hernández F (2023) How does the phytochemical composition of sprouts and microgreens from Brassica vegetables affect the sensory profile and consumer acceptability? **Postharvest Biology and Technology** 203:112411. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112411>

Carillo P, El-Nakhel C, De Micco V, Giordano M, Pannico A, De Pascale S, Roupahel, Y (2022) Morpho-metric and specialized metabolites modulation of parsley microgreens through selective LED wavebands. **Agronomy** 12:1502. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071502>

Chan TY (2011) Vegetable-borne nitrate and nitrite and the risk of methaemoglobinaemia. **Toxicology letters** 200:107-108. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2010.11.002>

Chen XL, Li YL, Wang LC, Yang QC, Guo WZ (2022) Responses of butter leaf lettuce to mixed red and blue light with extended light/dark cycle period. **Scientific Reports** 12:6924. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10681-3>

Choe U, Yu LL, Wang TT (2018) The science behind microgreens as an exciting new food for the 21st century. **Journal of agricultural and food chemistry** 66: 11519-11530. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03096>

Choi KY, Shawon MRA, Kim JK, Yoon YJ, Park SJ, Na JK (2022) Effect of white LED light on the growth of apple seedlings in controlled environment system. **Horticulturae** 8:692. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080692>

Connolly A, Cermeño M, Alashi AM, Aluko RE, FitzGerald RJ (2021) Generation of phenolic-rich extracts from brewers' spent grain and characterisation of their in vitro and in vivo activities. **Innovative Food Science and Technologies** 68:102617. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102617>

Frąszczak B, Kula-Maximenko M (2022) The biometric parameters of microgreen crops grown under various light conditions. **Agriculture** 12:576. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050576>

Furlani PR, Silveira LCP, Bolonhesi D, Faquin V (1999) **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: IAC, 52 p. (Boletim Técnico, 180)

Gao M, He R, Shi R, Zhang Y, Song S, Su W, Liu H (2021) Differential effects of low light intensity on broccoli microgreens growth and phytochemicals. **Agronomy** 11:537. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030537>

Guardiola-Márquez CE, García-Sánchez CV, Sánchez-Arellano ÓA, Bojorquez-Rodríguez EM, Jacobo-Velázquez DA (2023) Biofortification of Broccoli Microgreens (*Brassica oleracea* var. *italica*) with Glucosinolates, Zinc, and Iron through the Combined Application of Bio-and Nanofertilizers. **Foods** 12:3826. <https://doi.org/10.3390/foods12203826>

Hernández-Adasme C, Palma-Dias R, Escalona VH (2023) The effect of light intensity and photoperiod on the yield and antioxidant activity of beet microgreens produced in an *indoor* system. **Horticulturae** 9:493. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040493>

Hogewoning SW, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, Van Ieperen W, Harbinson J (2010) Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. **Journal of experimental botany** 61:3107-3117. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq132>

Kamal KY, Khodaeiaminjan M, El-Tantawy AA, Moneim DA, Salam AA, Ash-Shormillesy SMAI, Attia A, Ali MAS, Herranz R, El-Esawi MA, Nassrallah AA, Ramadan MF (2020) Evaluation of growth and nutritional value of *Brassica* microgreens grown under red, blue and green LEDs combinations. **Physiologia plantarum** 169:625-638. <https://doi.org/10.1111/ppl.13083>

Kelly N, Vaštakaitė-Kairienė V, Runkle ES (2022) *Indoor* lighting effects on plant nutritional compounds. In.: Kozai T, Niu G, Masabni JG (Eds.) **Plant factory basics, applications and advances**. Academic Press, p. 329-349

Kozai T, Niu G (2020) Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In.: Kozai T, Niu G, Takagaki M (Eds.) **Plant Factory An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production** Academic Press, p. 477-487

Kong Y, Zheng Y (2020) Growth and morphology responses to narrow-band blue light and its co-action with low-level UVB or green light: A comparison with red light in four microgreen species. **Environmental and Experimental Botany** 178:104189. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104189>

Kyriacou MC, Rouphael Y, Di Gioia F, Kyrtzsis A, Serio F, Renna M, De Pascale S, Santamaria P. (2016) Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. **Trends in Food Science & Technology** 57:103-15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.005>

Lanoue J, St Louis S, Little C, Hao X (2022) Continuous lighting can improve yield and reduce energy costs while increasing or maintaining nutritional contents of microgreens. **Frontiers in Plant Science** 13:983222
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.983222>

Larrauri JA, Rupérez P, Saura-Calixto F (1997) Efeito da temperatura de secagem na estabilidade de polifenóis e atividade antioxidante de cascas de bagaço de uva vermelha. **Jornal de química agrícola e alimentar** 45:1390-1393.

Lefsrud MG, Kopsell DA, Augé RM, Both AJ (2006) Biomass production and pigment accumulation in kale grown under increasing photoperiods. **HortScience** 41:603-606. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.3.603>

Li Y, Zhou B, Teng Z, Zhang M, Yu L, Luo Y, Sun J (2023) Improved metabolomic approach for evaluation of phytochemicals in mustard, kale, and broccoli microgreens under different controlled environment agriculture conditions. **Journal of Agriculture and Food Research** 14:100719
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100719>

Liu K, Gao M, Jiang H, Ou S, Li X, He R, Liu H (2022) Light intensity and photoperiod affect growth and nutritional quality of brassica microgreens. **Molecules** 27:883. <https://doi.org/10.3390/molecules27030883>

Loi M, Liuzzi VC, Fanelli F, De Leonardis S, Creanza TM, Ancona N, Mulè G (2019) Effect of different light-emitting diode (LED) irradiation on the shelf life and phytonutrient content of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). **Food Chemistry** 283:206-214. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.021>

Loi M, Villani A, Paciolla F, Mulè G, Paciolla C (2020) Challenges and opportunities of light-emitting diode (LED) as key to modulate antioxidant compounds in plants. A review. **Antioxidants** 10:42. <https://doi.org/10.3390/antiox10010042>

Lone JK, Pandey RG (2024) Microgreens on the rise: Expanding our horizons from farm to fork. **Heliyon** 10:25870 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25870>

Luo L, Zhang G, Liang W, Wu D, Sun Q, Hao Y (2024). Effects of LED Light Quality on Broccoli Microgreens Plant Growth and Nutrient Accumulation. **Journal of Plant Growth Regulation** 1:9. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11326-7>

Massa GD, Kim HH, Wheeler RM, Mitchell CA (2008) Plant productivity in response to LED lighting. **HortScience** 43:1951-1956.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1951>

Malta DC, Bernal RTI, Lima MG, Araújo SSCD, Silva MMAD, Freitas MIDF, Barros M BDA (2017) Noncommunicable diseases and the use of health services: analysis of the National Health Survey in Brazil. **Revista de saude publica** 51:4.
<https://doi.org/10.1590/S1518-8787.2017051000090>

Meas S, Luengwilai K, Thongket T (2020) Enhancing growth and phytochemicals of two amaranth microgreens by LEDs light irradiation. **Scientia Horticulturae** 265:109204. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109204>

Martin C, Li J. (2017) Medicine Is Not Health Care, Food Is Health Care: Plant Metabolic Engineering, Diet and Human Health. **New Phytologist Foundation** 216:699-719 <https://doi.org/10.1111/nph.14730>

Metelli G, Lampazzi E, Pagliarello R, Garegnani M, Nardi L, Calvitti M, Gugliermetti L, Alessi RR, Benvenuto E, Desiderio A (2023) Design of a modular controlled unit for the study of bioprocesses: Towards solutions for Bioregenerative Life Support Systems in space. **Life Sciences in Space Research** 36:8-17. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2022.10.006>

Nair BR, Lekshmi GP (2023) Microgreens: A Future Super Food. In.: Sukumara ST, Keerthi TR (Eds.) **Conservation and Sustainable Utilization of Bioresources**. Singapore: Springer, p. 103-122

Ohashi-Kaneko K, Takase M, Kon N, Fujiwara K, Kurata K (2007) Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. **Environmental Control in Biology** 45:189–198. <https://doi.org/10.2525/ecb.45.189>

Orlando M, Trivellini A, Incrocci L, Ferrante A, Mensuali A (2022) The inclusion of green light in a red and blue light background impact the growth and functional quality of vegetable and flower microgreen species. **Horticulturae** 8:217. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030217>

Paciolla C, Fortunato S, Dipierro N, Paradiso A, De Leonardis S, Mastropasqua L, De Pinto M C (2019) Vitamin C in plants: from functions to biofortification. **Antioxidants** 8:519. <https://doi.org/10.3390/antiox8110519>

Paradiso R, Proietti S (2022) Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: The state of the art and the opportunities of modern LED systems. **Journal of Plant Growth Regulation** 41:742-780. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>

Petropoulos S, Di Gioia F, Ntatsi G (2017) Vegetable organosulfur compounds and their health promoting effects. **Current pharmaceutical design** 23:2850-2875. <https://doi.org/10.2174/1381612823666170111100531>

Ponting JD (1943) Extraction of ascorbic acid from plant materials. Relative suitability of various acids. **Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition** 15:389-391.

Podsędek A, Frąszczak B, Sosnowska D, Kajszyk D, Szymczak K, Bonikowski R (2023) LED Light Quality Affected Bioactive Compounds, Antioxidant Potential, and Nutritional Value of Red and White Cabbage Microgreens. **Applied Sciences** 13:5435 <https://doi.org/10.3390/app13095435>

Rehman M, Pan J, Mubeen S, Ma W, Luo D, Cao S, Chen P (2024) Morpho-physio-biochemical, molecular, and phytoremedial responses of plants to red, blue, and green light: a review. **Environmental Science and Pollution Research** 1-20. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32532-6>

Rizvi A, Sharma M, Saxena S (2023) Microgreens: A Next Generation Nutraceutical for Multiple Disease Management and Health Promotion. **Genetic Resources and Crop Evolution** 70:311-332. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01506-3>

Shibaeva TG, Mamaev AV, Sherudilo EG, Titov AF (2022) The role of photosynthetic daily light integral in plant response to extended photoperiods. **Russian Journal of Plant Physiology** 69:7. <https://doi.org/10.1134/S1021443722010216>

Tantharapornrerk N, Vichitsoonthonkul T, Techavuthiporn C, Photchanachai S (2021) Growth and antioxidant system of Chinese kale microgreens in response to different illumination of light sources. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science** 51:108-122 <https://doi.org/10.1080/01140671.2021.1958876>

Toscano S, Cavallaro V, Ferrante A, Romano D, Patané C (2021) Effects of different light spectra on final biomass production and nutritional quality of two microgreens. **Plants** 10:1584. <https://doi.org/10.3390/plants10081584>

Turner ER, Luo Y, Buchanan RL (2020) Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: A review. **Journal of food science** 85:870-882. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.15049>

Samuolienė G, Brazaitytė A, Viršilė A, Jankauskienė J, Sakalauskienė S, Duchovskis P (2016) Red light-dose or wavelength-dependent photoresponse of antioxidants in herb microgreens. **PloS one** 11: e0163405

Signore A, Somma A, Leoni B, Santamaria P (2024) Optimising Sowing Density for Microgreens Production in Rapini, Kale and Cress. **Horticulturae** 10:274. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030274>

Silva LM, Cruz LP, Pacheco VS, Machado EC, Purquerio LFV, Ribeiro RV (2022) Energetic efficiency of biomass production is affected by photoperiod in indoor lettuce cultivation. **Theoretical and Experimental Plant Physiology** 34:265-276. <https://doi.org/10.1007/s40626-022-00246-0>

Singh D, Basu C, Meinhardt-Wollweber M, Roth B (2015) LEDs for energy efficient greenhouse lighting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 49:139-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.117>

Vatistas C, Avgoustaki DD, Monedas G, Bartzanas T (2024) The effect of different light wavelengths on the germination of lettuce, cabbage, spinach and arugula seeds in a controlled environment chamber. **Scientia Horticulturae** 331:113118. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113118>

Wilawan N, Ngamwonglumlert L, Devahastin S, Chiewchan N (2019) Changes in enzyme activities and amino acids and their relations with phenolic compounds contents in okra treated by LED lights of different colors. **Food and Bioprocess Technology** 12:1945-1954. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02359-y>

Wong CE, Teo ZWN, Shen L, Yu H (2020) Seeing the lights for leafy greens in *indoor* vertical farming. **Trends in Food Science & Technology** 106:48-63. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.031>

World Health Organization (2023) Reducing risks and detecting early to prevent and manage noncommunicable diseases. 4p.

Yabuta Y, Mieda T, Rapolu M, Nakamura A, Motoki T, Maruta T, Yoshimura K, Ishikawa T, Shigeoka, S. (2007) Light regulation of ascorbate biosynthesis is dependent on the photosynthetic electron transport chain but independent of sugars in Arabidopsis. **Journal of Experimental Botany** 58:2661-2671. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm124>

Ying Q, Kong Y, Jones-Baumgardt C, Zheng Y (2020) Responses of yield and appearance quality of four Brassicaceae microgreens to varied blue light proportion in red and blue light-emitting diodes lighting. **Scientia Horticulturae** 259:108857. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108857>

Zha L, Liu W (2018) Effects of light quality, light intensity, and photoperiod on growth and yield of cherry radish grown under red plus blue LEDs. **Horticulture, Environment, and Biotechnology** 59:511-518. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0048-5>

Zhang Y, Cai P, Cheng G, Zhang Y (2022) A brief review of phenolic compounds identified from plants: Their extraction, analysis, and biological activity. **Natural product communications** 17:1934578X211069721. <https://doi.org/10.1177/1934578X211069721>