

Otimização da qualidade da luz para a promoção da produção de metabolitos secundários em sistemas de produção vertical

Bruno Filipe Leites Neto

Mestrado em Engenharia Agronómica

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2022

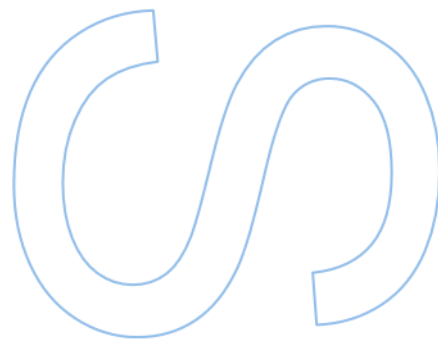
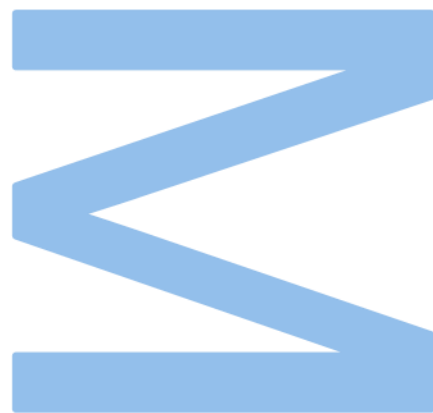
Orientador

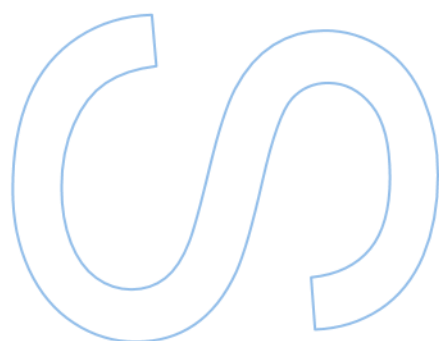
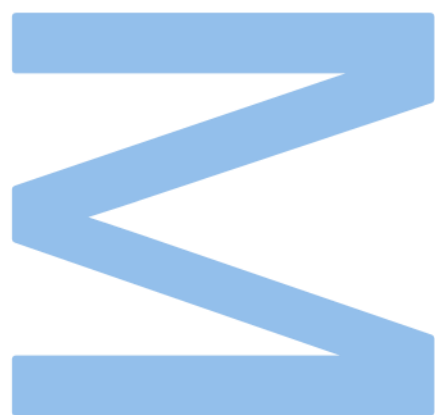
Prof. Doutora Susana Carvalho, Professora Auxiliar da FCUP

Supervisoras

Mestre Marisa Lourenço, FCUP/Viveiros Vítor Lourenço

Mestre Joana Machado, FCUP





*Dedico este trabalho à minha família e amigos
que estiveram sempre nas alturas mais complicadas
a dar suporte e a não permitir que baixasse a cabeça.*

Declaração de Honra

Eu, Bruno Filipe Leites Neto, inscrito(a) no Mestrado em Engenharia Agronómica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto declaro, nos termos do disposto na alínea a) do artigo 14.º do Código Ético de Conduta Académica da U.Porto, que o conteúdo da presente dissertação de projeto reflete as perspetivas, o trabalho de investigação e as minhas interpretações no momento da sua entrega.

Ao entregar esta dissertação de projeto, declaro, ainda, que a mesma é resultado do meu próprio trabalho de investigação e contém contributos que não foram utilizados previamente noutros trabalhos apresentados a esta ou outra instituição.

Mais declaro que todas as referências a outros autores respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, encontrando-se devidamente citadas no corpo do texto e identificadas na secção de referências bibliográficas. Não são divulgados na presente dissertação de projeto quaisquer conteúdos cuja reprodução esteja vedada por direitos de autor.

Tenho consciência de que a prática de plágio e auto-plágio constitui um ilícito académico.

Bruno Filipe Leites Neto

Avintes, 30 de outubro de 2022

Agradecimentos

Com a realização desta dissertação acabo assim mais uma etapa importante na minha caminhada académica/profissional. Visto isto, gostaria de eternizar a minha gratidão em forma de agradecimento a todos aqueles que de certa forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

À Professora Doutora Susana Carvalho, pela orientação durante todo este ano e por todo o conhecimento transmitido durante a licenciatura e mestrado, contribuindo bastante para a minha formação e interesse na área do *Vertical Farming*. Recordo com felicidade o momento em que falei com a professora do meu interesse em realizar este trabalho e recebi um feedback bastante positivo.

À Marisa Lourenço e à Joana Machado, pela supervisão e por todo o conhecimento transmitido, para além da paciência para responder às minhas dúvidas e dificuldades. Pela primeira vez experienciei como é realizar uma atividade experimental em dupla, o que me fez perceber que é de extrema importância ter competências como espírito de equipa, cooperação e entrega ao trabalho.

À equipa do nosso laboratório de Vairão, por estarem sempre prontos a ajudar qualquer colega que necessite e por todo o bom ambiente existente, facilitando bastante a integração e o trabalho em si.

Ao laboratório ICP-MS do Departamento de Química da FCUP, pela realização das quantificações de minerais e pelo tempo despendido na explicação das metodologias realizadas para manuseamento do PlasmaQuant MS.

À equipa do laboratório de Geologia e Química da FCUP, pela disponibilização do espaço e dos equipamentos necessários, bem como pela disponibilidade em nos ajudar em qualquer questão existente.

Ao staff dos Viveiros Lourenço, pela disponibilização dos espaços utilizados na produção de *C.roseus*, bem como pela prontidão na ajuda e por toda a simpatia e bom ambiente de trabalho.

À empresa Microgreens pelo fornecimento das sementes e dos tabuleiros e pela disponibilidade em nos fornecer informações relativas à produção de microverdes.

À minha família, por me terem possibilitado a oportunidade de ingressar no mestrado, mas especialmente por me darem suporte diário, especialmente naqueles dias em que duvidamos do nosso próprio trabalho.

Ao meu grupo de amigos, por me conseguirem distrair nos momentos de maior nervosismo e pressão, permitindo que andasse mais calmo e animado. Juntamente com a minha família, não teria conseguido ter a capacidade emocional para finalizar este trabalho.

Aos meus colegas do Mestrado em Engenharia Agronómica, em breve colegas de profissão, pela partilha de vivências e conhecimentos e por todos os obstáculos que passamos juntos.

Resumo

Com o aumento da população mundial e a intensificação das alterações climáticas, existe uma necessidade de repensar os sistemas de produção de plantas. Os Sistemas de Produção Vertical (SPV) possibilitam a produção em ambiente controlado, otimizando a produtividade e qualidade, sendo a iluminação artificial um dos parâmetros de maior importância nestes sistemas de produção. Através da aplicação de comprimentos de onda específicos, durante a produção de determinadas culturas, é possível otimizar certas características, o que pode apresentar um grande interesse para culturas de valor acrescentado. *Catharanthus roseus* é uma planta com interesse medicinal, pois sintetiza alcaloides anticancerígenos, maioritariamente presentes nas suas folhas. Contudo, a quantidade produzida das mesmas é baixa, sendo que as aplicações de stresses moderados durante o crescimento das plantas podem possibilitar um aumento nas concentrações desses metabolitos. Os micro verdes são plântulas de vegetais produzidos em elevadas densidades e colhidos numa fase inicial do crescimento, após as folhas cotiledonares estarem totalmente expandidas. São alimentos com elevado valor nutricional e praticidade, bastante consumidos em saladas e em restaurantes *gourmet*. Como resposta a essa procura, é necessária uma otimização a nível produtivo, com ganhos a nível nutricional. O presente estudo tem como objetivo principal otimizar a qualidade da luz de forma a promover a qualidade intrínseca de produtos de valor acrescentado produzidos em SPV. Como objetivos específicos pretende-se perceber qual a: (i) influência da duração da suplementação com radiação UV-A na morfofisiologia e síntese de alcaloides em três cultivares de *C. roseus*; e (ii) a influência da duração da suplementação de UV-C na qualidade dos microverdes. Nesse sentido, foram efetuados dois ensaios independentes em SPV.

Nesta dissertação, um ensaio com a *Catharanthus roseus*, foi realizado nos Viveiros Vítor Lourenço, na Maia e o outro com microverdes de mostarda vermelha no Pólo de Vairão da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

No Ensaio 1 comparou-se três níveis de suplementação do fotoperíodo com UV-A (2, 4 e 6h) tendo-se verificado que a suplementação de 4h de UV-A levou a uma maior produção de alcaloides em *C.roseus*. A cv. “Cora-Red” foi a que apresentou melhores resultados (um aumento de 49% em comparação com a “XDR-Polka” e em três vezes em relação à “S-Apr”). Em comparação com o controlo, as plantas expostas à radiação UV-A na cv. “Cora-Red”, apresentaram um teor de alcaloides anticancerígenos (vinblastina e vincristina) três vezes superior. No que diz respeito a produção de

biomassa (peso seco total) verificou-se uma interação entre a cultivar e a duração da exposição à radiação UV-A. Na cultivar “XDR-Polka” observou-se um aumento significativo do peso seco total com o aumento da duração da UV-A, já a cv. “S-Apr” obteve uma diminuição significativa. No que diz respeito ao Ensaio 2 uma aplicação única de UV-C nos microverdes levou a um aumento significativo do peso das plantas por tabuleiro em 26%, bem como uma produtividade superior na ordem dos 28%. Também apresentou uma tendência de aumento na concentração de minerais. A aplicação de 3 doses suplementares de UV-C, levou à produção de plantas mais pequenas, em 22%, além de não se observarem diferenças significativas nos restantes parâmetros medidos. Este estudo permitiu concluir que a radiação UV é uma ferramenta eficaz na promoção da qualidade intrínseca de várias espécies de interesse para implementação em SPV.

Palavras-chave: alcaloides, *Catharantus roseus*, iluminação artificial, microverdes, mostarda, radiação ultravioleta A, radiação ultravioleta C, sistema de produção vertical

Abstract

With the increase of the world population and the intensification of climate changes, it is necessary to rethink plant production systems. Vertical farming enables production in a controlled environment, optimizing productivity and quality with artificial lighting being one of the controlled parameters. Through the selection of different wavelengths or combinations, it is possible to optimize certain characteristics for a specific crop, having a great potential with value-added crops, such as microgreens, baby greens and medicinal plants. *Catharanthus roseus* is a plant with medicinal interest, as it synthesizes several anticancerigenous alkaloids, mostly present in its leaves. However, the amount produced is low and their extraction is expensive, making it necessary to apply a stress that allows an increase in the concentrations of these alkaloids. Microgreens are vegetables harvested at an early stage, produced in high densities. They have high nutritional value and practicality, quite consumed in salads and in gourmet restaurants. In response to this demand, it is essential to optimize production with nutritional gains. This investigation has as main objective the optimization of the light quality to promote the quality in a vertical farming, understanding the: influence of UV-A radiation in morphophysiology and production of alkaloids in *C. roseus* and the influence of supplementation of UV-C on the quality of microgreens.

During this dissertation, two trials were carried out: one with *Catharanthus roseus*, carried out at Viveiros Vítor Lourenço, in Maia, and another with microgreens (with two varieties of mustard), carried out at the Pole of Vairão of Faculdade de Ciências da Faculdade do Porto.

In Test 1, three levels of photoperiod supplementation with UV-A were compared (2, 4 and 6 h) and 4 h of UV-A led to a higher production of alkaloids in *C.roseus*. The cv. "Cora-Red" had the best results (a 49% increase compared to "XDR-Polka" and a threefold increase compared to "S-Apr"). Compared to the control, plants exposed to UV-A radiation in cv. "Cora-Red", showed a content of anticancerigenous alkaloids three times higher. About biomass production (total dry weight) an interaction between the cultivar and the duration of exposure to UV-A radiation was verified. In the cultivar "XDR-Polka" there was a significant increase in the total dry weight with the increase in the duration of UV-A, whereas cv. "S-Apr" obtained a significant decrease. In Test 2, a single application of UV-C to the microgreens resulted in a significant increase in the weight of plants per tray by 26%, as well as a higher productivity of around 28%. It was also

showed an increasing trend in the concentration of minerals. The application of 3 additional doses of UV-C led to the production of smaller plants, by 22%, in addition to no significant differences being observed in the remaining parameters measured. This study allowed us to conclude that UV radiation is an effective tool in promoting the intrinsic quality of several species of interest for implementation in SPV.

Keywords: alkaloids, *Catharantus roseus*, artificial lighting, microgreens, mustard, ultraviolet radiation A, ultraviolet radiation C, vertical farming system.

Créditos

Parte dos trabalhos desenvolvidos nesta dissertação foram apresentados numa comunicação em painel num Congresso Internacional:

Machado J, Neto BFL, Carvalho SMP. 2022. Effect of hormetic doses of UV-C light on biometric traits of red mustard microgreens. In: *Smart and Circular Agriculture towards Sustainability 2022*. Porto, Portugal: 21-22 julho.

Índice

Lista de Tabelas	xi
Lista de Figuras	xii
Lista de Abreviaturas	xvi
Introdução.....	1
Objetivos.....	3
1. Revisão Bibliográfica	4
1.1. Sistema de produção vertical (SPV)	4
1.2. Iluminação artificial em culturas protegidas	5
1.2.1. Luz vermelha	8
1.2.2. Luz azul	8
1.2.3. Luz branca	8
1.2.4. Radiação ultravioleta-A.....	9
1.2.4. Radiação ultravioleta-C.....	9
1.3. Exemplo de culturas com potencial para SPV	10
1.3.1. <i>Catharanthus roseus</i>	10
1.3.1.1. Produção de alcaloides.....	12
1.3.1.2. Utilização de UV-A na produção de alcaloides.....	14
1.3.2. Microverdes	15
1.3.2.1. Mostarda.....	17
2. Materiais e Métodos.....	19
2.1. Influência da radiação UV-A nos parâmetros morfo-fisiológicos e na produção de alcaloides em <i>Catharanthus roseus</i>	19
2.1.1. Condições de crescimento e delineamento experimental.....	19
2.1.2. Medições realizadas	21
2.1.3. Quantificação de alcaloides	21
2.2. Influência da suplementação de luz UV-C no crescimento e qualidade de microverdes.....	23

2.2.1. Design experimental	23
2.2.2. Parâmetros morfofisiológicos	24
2.2.3.1. Quantificação de minerais.....	24
2.3. Análise estatística.....	25
3.Resultados.....	26
3.1. Influência da radiação UV-A nos parâmetros morfo-fisiológicos e na produção de alcaloides em <i>Catharanthus roseus</i>	26
3.1.1. Parâmetros morfofisiológicos	26
3.1.2. Quantificação de alcaloides	30
3.2. Influência da suplementação de luz UV-C no crescimento e qualidade de microverdes mostarda vermelha	34
3.2.1. Parâmetros morfofisiológicos	34
3.2.2. Análises de minerais	37
4.Discussão	39
4.1. Influência da radiação UV-A nos parâmetros morfo-fisiológicos e na produção de alcaloides em <i>Catharanthus roseus</i>	39
4.2. Influência da suplementação de luz UV-C no crescimento e qualidade de microverdes.....	42
Conclusões e trabalhos futuros.....	44
Referências Bibliográficas	45
Anexo	59

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Exemplos de estudos de produção em ambiente de fábrica de plantas	7
Tabela 2 - Exemplos de trabalhos de produção de <i>C.roseus</i> em sistema de produção vertical.	12
Tabela 3 - Exemplos de estudos de produção de microverdes em sistemas de produção vertical.	16
Tabela 4 - Exemplos de estudos de produção de mostarda em sistemas de produção vertical.	18
Tabela 5 - Descrição das etapas do programa de digestão.	25
Tabela 6 - Concentrações médias dos alcaloides analisados (catarantina (CAT), vindolina (VDL), anidrodrovinblastina (AVLB), vinblastina (VLB) e vincristina (VCR)), e respetiva soma dos mesmos, em µg/mg de peso fresco (PF), da <i>Catharanthus roseus</i> cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h,4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão associado. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz.	59

Lista de Figuras

Figura 1 - Via biossintética dos alcaloides anticancerígenos, vimblastina e vincristina em <i>C. roseus</i> (Dutta et al., 2005).	13
Figura 2 – Três cultivares de <i>C.roseus</i> utilizadas na experiência: a) Sunstorm S-Apr, b) XDR XDR-Polka Dot e c) Cora Red.	19
Figura 3 - Disposição da câmara fitoclimática representando os três compartimentos e respetivos tratamentos UV-A (365nm): 2h, 4h e 6h. Em cada um dos compartimentos encontra-se também representadas as réplicas realizadas divididas em tabuleiros e como se procedeu a sua rotação realizada de três em três dias.....	20
Figura 4 - Fotografia do compartimento A da câmara fitoclimática no início da terceira semana de crescimento, com as plantas de <i>C.roseus</i> dispostas de forma randomizada nos tabuleiros das respetivas réplicas.	20
Figura 5 - Amostras durante o banho de limpeza ultrassónica (VWR USC300TH).	22
Figura 6 - Secagem do MeOH através da injeção de N ₂	22
Figura 7 – Câmara fitoclimática e respetiva disposição dos microverdes de mostarda vermelha.....	23
Figura 8 - Microverdes de mostarda vermelha antes do início da suplementação com UV-C (dia 7).....	24
Figura 9 – (A) Peso seco total médio e (B) Peso seco médio das folhas, por planta após a colheita de <i>Catharanthus roseus</i> cvs. <i>Sunstorm Apricot</i> (S-Apr), <i>XDR-Polka Dot</i> (XDR-Polka) e <i>Cora Red</i> (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h,4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz (A: $p=0,0037$; B: $p=0,0079$).	26
Figura 10 - Altura média (cm) após a colheita de <i>Catharanthus roseus</i> cvs. <i>Sunstorm Apricot</i> (S-Apr), <i>XDR-Polka Dot</i> (XDR-Polka) e <i>Cora Red</i> (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas entre as cultivares ($p<0,0001$).....	27
Figura 11 - (A) Número de folhas médio e (B) Número de entrenós do caule principal médio por planta após a colheita de <i>Catharanthus roseus</i> cvs. <i>Sunstorm Apricot</i> (S-Apr), <i>XDR-Polka Dot</i> (XDR-Polka) e <i>Cora Red</i> (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h,4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem (A) a diferenças significativas da interação cultivar x	

tratamento luz ($p=0,0002$) e (B) a diferenças significativas entre cultivares (B: $p<0,0001$).

..... 28

Figura 12 - Área foliar média (cm^2) por planta após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas entre as cultivares ($p<0,0001$)..... 29

Figura 13 - Taxa fotossintética média ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) média por planta após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. n.s. – sem diferença significativa ($p=0,1466$). 29

Figura 14 - Condutância estomática ($\mu\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) média por planta após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas entre as cultivares ($p=0,0043$). 30

Figura 15 - Concentração total dos alcaloides quantificados (CAT, VDL, AVLB, VLB e VCR), mg/planta, durante a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz ($p=0,0116$). 31

Figura 16 – Concentração de (A) CAT e (B) VDL (mg/planta) após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz (A: $p=0,0247$; B: $p=0,0483$). Abreviação: CAT: Catarantina; VDL: Vindolina. 31

Figura 17 - Concentração de VLB (mg/planta) após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz ($p=0,0359$). Abreviação: VBL: Vinblastina. 33

Figura 18 - Concentração de VCR (mg/planta) após a colheita de <i>Catharanthus roseus</i> cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz ($p=0,0017$). Abreviação: VCR: Vincristina.	33
Figura 19 – Aspeto geral dos <i>microverdes</i> de mostarda vermelha no momento de colheita (Ctr-controlo; 1x-uma aplicação suplementar de UV-C; 3x – três aplicações suplementares de UV-C).	34
Figura 20 - Peso fresco médio, em gramas, por tabuleiro de microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos ($p=0,0061$). UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7, 8 e 9) de Ultravioleta-C.	34
Figura 21 – Produtividade média, em gramas por centímetro quadrado, dos microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos ($p=0,0059$). UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7, 8 e 9) de Ultravioleta-C.	35
Figura 22 – Altura média, em centímetros, dos microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos ($p=0,0036$). UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7, 8 e 9) de Ultravioleta-C.	36
Figura 23 – Teor de matéria seca, em percentagem, dos microverdes de mostarda vermelha após colheita e secagem a 100°C durante 48h, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos ($p=0,0258$). UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7, 8 e 9) de Ultravioleta-C.	36
Figura 24 - Concentrações médias de cada macronutriente, em mg/100g de peso seco (PS), dos microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de	

luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos (A) $p=0,6813$; (B) $p=0,9585$; (C) $p=0,2047$; (D) $p=0,0724$. UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7,8 e 9) de Ultravioleta-C. Ca – cálcio; P – fósforo; Mg – magnésio; K – potássio..... 37

Figura 25 - Concentrações médias de cada micronutriente, em mg/100g de peso seco (PS), dos microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos (A) $p=0,6754$; (B) $p=0,1626$; (C) $p=0,3593$; (D) $p=0,2784$; (E) $p=0,1316$. UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7,8 e 9) de Ultravioleta-C. Cu – cobre; Fe – ferro; Mn – manganês; Na – sódio; Zn – zinco..... 38

Lista de Abreviaturas

AIT	Alcaloides Indólicos Terpenóides
AOX	Antioxidante
AVBL	Anidrovinblastina
CAT	Catarantina
HPLC/MS	High Performance Liquid Chromatography Mass Spectrometry
HPS	High Pressure Sodium
IRGA	Infra-Red Gas Analyzer
LED	Light-Emitting Diode
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density
R:B	Red Blue Ratio
SPV	Sistema De Produção Vertical
UV-A	Ultravioleta A
UV-C	Ultravioleta C
VBL	Vinblastina
VCR	Vincristina
VDL	Vindolina

Introdução

Nos últimos anos têm surgido alguns desafios que levaram a uma necessidade de repensar os sistemas de produção de plantas, desafios estes como as alterações climáticas que se têm intensificado (Benke & Tomkins, 2017), os solos agrícolas que se estão a tornar um recurso escasso devido à intensificação do seu uso e consequente degradação (Foley et al., 2011; Lambin et al., 2013), bem como o aumento da população mundial, que se estima aumentar em cerca de 2 biliões nos próximos 30 anos (United Nations, 2020). Associado a isto, a procura por vegetais tem tido aumentos expressivos devido à maior inclusão destes alimentos nas dietas, sendo necessário encontrar soluções que permitam responder a tal procura. A produção em ambiente controlado mostra-se como uma solução com bastante potencial (Dou et al., 2017). Além disso, o incremento de incidência de doenças como cancro (World Health Organization, 2022), responsáveis pela morte de milhões de pessoas, requerem a procura por tratamentos mais eficazes. No caso no cancro estima-se que 50% das substâncias utilizadas nos tratamentos oncológicos estão presentes em plantas (Twilley & Lall, 2018).

Os Sistemas de Produção Vertical (SPV) são sistemas fechados de produção que permitem o controle dos diversos parâmetros ambientais, otimizando a produtividade e a qualidade dos produtos, com sistemas de rega incluindo reutilização de água, permitindo uma redução de utilização de água na ordem dos 75-90% (Sonawane, 2018), aliada a uma produção livre de fitofarmacêuticos. Atualmente, o elevado consumo de energia e o valor de investimento inicial são os principais pontos fracos destes sistemas de produção, sendo necessário tornar estas tecnologias mais baratas e eficientes (SharathKumar et al., 2020), bem como explorar/otimizar culturas com elevado valor comercial acrescentado (ex: plantas medicinais e microverdes). Um dos parâmetros mais relevantes dos SPV é a luz, através da utilização de iluminação artificial, sendo os módulos LED's os mais utilizados (O'Sullivan et al., 2020). Através da otimização dos comprimentos de onda utilizados é possível obter respostas diferentes por parte das plantas, a nível produtivo, fisiológico e de qualidade intrínseca dos produtos (Costa et al., 2021; Naznin et al., 2016; Shimizu et al., 2011). Contudo, é necessário perceber quais são os melhores comprimentos de onda e combinações dos mesmos, bem como otimizar a duração e frequência de aplicação das mesmas em culturas de valor acrescentado tais como plantas medicinais e os *microverdes*.

Um dos exemplos de plantas medicinais com grande interesse comercial é *Catharanthus roseus*, devido à sua capacidade de produzir alcaloides, como a

vinblastina e vincristina, que possuem propriedades anticancerígenas (Levingston & Zamora, 1983; Saiman et al., 2018). Atualmente o grande objetivo passa por tornar a sua extração mais barata, pois atualmente, a quantidade que consegue ser extraída por planta é reduzida e a sua síntese química é dispendiosa. A exposição destas plantas a stresses controlados, aumentando a concentração desses alcaloides, possibilita assim a redução do custo da sua extração e dos produtos derivados. Em estudos anteriores desta equipa, foram levados a cabo um conjunto de experiências onde se pretendeu analisar a performance de nove cultivares de *C. roseus* em SPV (Prada, 2020; Silva, 2021). Segundo Prada (2020) e Lourenço et al. (2022), as cultivares “XDR-Polka”, “Cora Deep Lavender” e “Cora XDR White” são as que apresentam maior potencial para estes sistemas de produção. Já Silva (2021) concluiu que a cv. “Cora-Red” foi a variedade mais produtiva e a “S-Apr” a que maior concentração de vincristina apresentou.

Os microverdes são vegetais que são colhidos numa fase inicial de crescimento, quando as folhas cotiledonares estão totalmente expandidas, antes do surgimento das verdadeiras (Mir et al., 2017). Nos últimos anos, estão a ser cada vez mais procurados tanto para saladas como acompanhamento em pratos de restaurantes gourmet, pois possuem um valor estético e nutricional associado, tornando-as culturas com valor acrescentado, embora a sua vida de prateleira seja curta (Liping, 2013). Culturas como mostarda, rabanete, alface, são geralmente associadas a este tipo de produção, contudo existe um mercado que procura por novas espécies/variedades de microverdes (Kyriacou et al., 2019). A mostarda vermelha é uma das espécies mais produzidas como microverdes e apresenta um grande interesse derivado do seu sabor mais picante e do seu valor nutricional.

Neste caso pretende-se estudar qual o impacto do aumento do tempo de suplementação de UV-A em *C. roseus*, pois é de grande interesse perceber se essa exposição permite o aumento das concentrações de alcaloides. No caso dos microverdes, procura-se perceber se a aplicação de UV-C apresenta efeitos positivos para além da desinfecção, pois o seu potencial de otimização de alguns parâmetros produtivos não foi ainda muito explorado, nomeadamente em microverdes.

Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo geral otimizar a qualidade da luz de forma a promover a qualidade intrínseca em sistemas de produção vertical. Como objetivos específicos pretende-se analisar: (i) influência da suplementação de UV-A nos parâmetros morfo-fisiológicos e na produção de alcaloides em *C.roseus*; (ii) influência da suplementação com UV-C na produtividade e na produção de minerais nos microverdes. Tendo estes objetivos como base as seguintes questões científicas foram formuladas:

i) após 16h de fotoperíodo RB, qual o melhor tempo de suplementação de UV-A para um aumento na produção de metabolitos secundários sem impacto considerativo na produção de biomassa da *C.roseus*?

ii) a suplementação de UV-C após exposição a LEDs de espectro branco levará a um aumento da qualidade dos microverdes, sem a diminuição da sua produtividade?

1. Revisão Bibliográfica

1.1. Sistema de produção vertical (SPV)

O Sistema de Produção Vertical (SPV), também conhecido como “fábrica de plantas” ou “horticultura vertical”, é um sistema que permite a produção de plantas no interior de edifícios utilizando diferentes patamares/prateleiras de produção e recorrendo a iluminação artificial. O SPV tem um controle preciso das condições de crescimento como: temperatura, luz, concentração de CO₂ e humidade relativa, sendo completamente independente das condições climáticas externas (Benke & Tomkins, 2017; SharathKumar et al., 2020). Mais ainda, por ser um sistema fechado o SPV permite que a produção de plantas ocorra na ausência de utilização de pesticidas e herbicidas (Asseng et al., 2020; Delden et al., 2021). Possibilita assim, práticas agrícolas mais sustentáveis quando comparado com a agricultura convencional, que por vezes está associada ao uso excessivo de produtos fitofarmacêuticos e grande consumo de água (Al-Kodmany, 2018).

Um SPV permite que a produção ocorra durante todo o ano, possibilitando a programação da produção baseada na procura, garantindo assim uma maior segurança alimentar e otimização por metro quadrado (Benke & Tomkins, 2017). Leva também a uma poupança de água (na ordem dos 75-90%, segundo Sonawane (2018), através da sua reutilização pelo funcionamento em circuito fechado. Este sistema consegue assim ser uma solução com grande potencial para a reutilização de espaços urbanos sem grande valor agrícola. Como tal, os SPV também reduzem a emissão de CO₂ e o custo associado ao transporte, visto que potenciam uma maior proximidade das produções ao consumidor (Benke & Tomkins, 2017), permitindo trazer a produção de alimentos para dentro das grandes cidades.

Contudo, ainda existem alguns desafios para este tipo de sistema agrícola a nível da viabilidade económica. Os SPV requerem altos investimentos para obtenção da tecnologia e têm elevados gastos com eletricidade, assim como existe uma escassez de mão de obra especializada (de Oliveira et al., 2020). Além disso a falta de legislação e a resistência dos consumidores a esta nova forma de “fazer agricultura”, podem levar a atrasos na sua implementação e no comércio destes alimentos, sendo de extrema necessidade a divulgação dos benefícios associados às fábricas de plantas e dos seus alimentos produzidos para conhecimento geral do consumidor (Clark et al., 2022).

A produção de plantas em SPV está frequentemente associada a culturas como: microverdes, folhas para saladas, cannabis medicinal, alface, espinafre e ervas aromáticas, permitindo uma densidade elevada de produção (tanto horizontal como verticalmente) (Touliatos et al., 2016). Além do mais, possuem um crescimento rápido, existindo assim um curto intervalo de tempo entre a germinação e a colheita, permitindo um grande número de produções por ano (Beacham et al., 2019). Por fim, os ciclos curtos permitem adaptar os sistemas de acordo com a procura do mercado.

1.2. Iluminação artificial em culturas protegidas

A luz consiste num dos fatores essenciais para o desenvolvimento das plantas, pois possibilita o fornecimento de energia necessária para a fotossíntese na produção de matéria orgânica, possuindo também um importante papel como estímulo fotomorfogenético, em processos de crescimento e de diferenciação (Fukuda, 2019). Geralmente o aspeto mais salientado, relativamente à luz é a sua quantidade (intensidade), contudo a qualidade da luz é tão importante quanto a sua intensidade (Urrestarazu et al., 2018). A luz é responsável por cerca de 90 a 95% da matéria seca biossintetizada durante a fotossíntese (Tie et al., 2016). A qualidade da luz tem um papel importante no controlo dos processos metabólicos e fisiológicos, tais como: exportação de fotoassimilados, fotossíntese, acumulação de carboidratos e ciclo circadiano (Fankhauser & Staiger, 2002; Hogewoning et al., 2010; Lanoue et al., 2018; Li et al., 2013; Li et al., 2017; Oakenfull & Davis, 2017). O papel crucial da luz nas plantas levou que as mesmas desenvolvessem a capacidade de resposta quando expostas a diferentes espectros luminosos, através de fotorreceptores (fitocromos, criptocromos, fototropinas, UVR8), que permitem a deteção de parâmetros como qualidade, intensidade e duração da luz (Macedo et al., 2011; Ouzounis et al., 2015).

A luz possui um potencial de induzir stress nas plantas, apresentando interesse recorrendo à sua manipulação a nível de quantidade, qualidade e duração. As plantas têm a capacidade de se adaptarem às condições luminosas do meio (Franklin & Whitelam, 2005) podendo, deste modo, se obter maiores produções de certos metabolitos secundários ou otimização de parâmetros fisiológicos.

Como iluminação artificial na agricultura, inicialmente as lâmpadas de sódio de alta pressão (*High pressure sodium*, HPS) e as lâmpadas fluorescentes eram as mais utilizadas (Urrestarazu et al., 2018). As lâmpadas fluorescentes eram utilizadas em câmaras de crescimento, para ervas aromáticas e vegetais, pois emitem menos calor e

são energeticamente mais eficientes que as lâmpadas incandescentes. Já as lâmpadas HPS têm uma alta descarga de intensidade, sendo mais utilizadas em estufas, irradiam luz no espectro do laranja e vermelho, promovendo a fotossíntese (Zhou & Singh, 2002). As lâmpadas HPS têm uma menor eficiência irradiante pois emitem bastante calor, contudo isso permite uma redução do input de aquecimento nas produções em estufa (Ahamed et al., 2019).

Nos últimos anos, as lâmpadas HPS têm sido substituídas pelos diodos emissores de luz (*Light-emitting diodes*, LEDs). As lâmpadas LEDs possibilitam a seleção de diferentes espectros energeticamente mais eficientes, com maior vida útil e um menor consumo de energia e custo de manutenção comparando com as anteriores (Okamoto et al., 1997). Os LEDs contribuem para o aumento da produtividade e qualidade das culturas, podendo potenciar as produções a nível nutritivo, da floração ou morfológico, dependendo do objetivo traçado individualmente para a produção (Lazzarini et al., 2017). Além disso, não contêm metais pesados, havendo menos perdas de energia em forma de calor (Urrestarazu et al., 2018). Contudo, possuem um preço mais elevado no investimento necessitando ainda de padronização. É também importante referir que os LEDs necessitam mais atenção por parte dos trabalhadores a nível da proteção ocular, especialmente com a luz azul, para a qual o ser humano possui uma elevada sensibilidade, podendo tornar-se prejudicial com o excesso da sua exposição (Vicente-Tejedor et al., 2018; Yang et al., 2020).

Em ambiente de SPV os LEDs têm sido muito utilizados em diversos estudos (Tabela 1) com o objetivo de analisar e/ou otimizar a utilização de certas combinações de comprimentos de onda, fotoperíodos, etc.

Tabela 1 - Exemplos de estudos de produção em ambiente de fábrica de plantas

Objetivo	LED's	Culturas	Referência
↑ Crescimento	Luz vermelha (660nm)	Espinafre, rabanete e alface	(Yorio et al., 2001)
Avaliar efeito dos níveis de radiância e dos espectros no conteúdo e composição de carotenoides	447nm, 638nm, 665nm e 731nm	Mostarda, red pak choi e tatsoi	(Brazaitytė et al., 2015)
↑ Qualidade nutricional	Luz azul, vermelha, verde e branca	Red pak choi, mostarda e tatsoi	(Vaštakaitė-Kairienė & Viršilė, 2015)
↑ Comprimento do hipocótilo em <i>microverdes</i>	Suplementação do far-red ao Red+Blue	Mostarda e rábano	(Mir et al., 2017)
Mudanças morfológicas e de composição de brotos	Lâmpadas fluorescentes (Fl), Blue+Red (B+R), Blue+Red+Far-Red	Cenoura	(Martínez-Zamora et al., 2021)
↑ Crescimento e qualidade nutricional através de diferentes PPFD e fotoperíodos	Red:Blue:Green (1:1:1)	Couve-repolho e couve chinesa	(Liu et al., 2022)

↑ - Aumento

A combinação de LEDs mais utilizada é a de radiação azul e vermelha, em diferentes proporções, sendo considerada a combinação que responde melhor às necessidades da generalidade das plantas para aumento de rendimento (Nishimura et al., 2006), sendo que o azul e o vermelho são as duas zonas do espectro eficientemente mais absorvidas pelas clorofilas (Chen & Blankenship, 2011). Várias combinações têm sido estudadas para diversas espécies, de forma a perceber qual a que possibilita a otimização de parâmetros como produção e qualidade. De um modo geral as proporções de vermelho e azul mais frequentemente utilizadas são: 90%/10%; 80%-20% e 75%-25%. Em Costa et al. (2021) utilizou-se proporções de 1:1 e 3:1 de R/B de forma a perceber se as mesmas podem afetar as características morfofisiológicas e bioquímicas da *Brosimum gaudichaudii* (fruta-de-cera), sendo que a proporção 3:1 se traduziu em rebentos com maior taxa de crescimento e com uma maior produção de metabolitos secundários nas folhas da planta. Em estudos anteriores desta equipa foram

usadas com êxito para a produção de nove cultivares de *C. roseus* uma proporção de 75% vermelho e 25% azul (Lourenço et al., 2022).

1.2.1. Luz vermelha

A luz vermelha (620–750 nm) promove o alongamento dos caules, aumentando a altura das plantas (Runkle, 2016). Também é conhecida por promover a floração, (Zhou & Singh, 2002), devido à sensibilidade dos fitocromos A e B à luz vermelha. O peso fresco e o número de folhas aumentam nas plantas que crescem expostas a LEDs vermelhos, além de induzir a abertura estomática (Zhu et al., 2020). Contudo, a exposição prolongada a luz vermelha pode levar a baixa acumulação de carboidratos, baixa capacidade fotossintética, bem como prejudicar o crescimento da planta, caso a sua exposição seja excessiva (Miao et al., 2019).

1.2.2. Luz azul

A luz azul (450–495 nm) permite a inibição da expansão celular e leva à diminuição do alongamento do caule (Lin, 2000). Tem também influência na pigmentação e acumulação de antocianinas, bem como leva à promoção da abertura dos estomas, possuindo um papel importante nas trocas gasosas e nas relações hídricas (Lazzarini et al., 2017). Em intensidades mais altas ($>20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), a luz azul leva à inibição da floração em plantas de dias curtos e à promoção da floração nas de dias longos (Runkle, 2017). Uma planta que cresça com exposição a luz azul é mais compacta e apresenta folhas mais pequenas, mais grossas e com uma coloração mais escura (Lanoue et al., 2019). A luz azul apresenta-se então como um regulador de crescimento com grande interesse, especialmente na produção de plantas ornamentais.

1.2.3. Luz branca

A luz branca (400-740 nm) tem sido cada vez mais utilizada como fonte de luz no cultivo de plantas em SPV (Nguyen et al., 2021). Na generalidade, os LEDs brancos são LEDs azuis com revestimento de fósforo, emitindo assim fotões vermelhos e verdes também, sendo este revestimento o responsável pela qualidade espectral da luz emitida (Runkle, 2018). As luzes brancas permitem um ambiente mais agradável à visão humana (Runkle, 2018), visto que contemplam todo o espectro do visível, permitem a emissão de luz no azul e vermelho, as duas zonas mais absorvidas pelas plantas, juntamente com o verde, que apesar de ser absorvida em menor quantidade também possui efeitos positivos nas plantas.

1.2.4. Radiação ultravioleta-A

Em relação à radiação ultravioleta A (UV-A) (320-400 nm), a exposição das plantas a baixos níveis deste tipo de radiação promove a produção de compostos antioxidantes e pigmentos fotossintéticos, além de estimular o crescimento geral da planta (Brazaitytė et al., 2010; Tsormpatsidis et al., 2008). A suplementação com UV-A, leva a aumentos da concentração de clorofilas e dos carotenoides, promovendo assim, o crescimento das plantas (Foyer et al., 1994), podendo-se aferir que a radiação UV suplementar pode melhorar o rendimento e qualidade de culturas. Segundo Verdaguer et al. (2017), as respostas das plantas ao UV-A, mediadas pelos fotorreceptores (fototropinas e criptocromos) ainda não foram totalmente estudadas.

Contudo, a radiação ultravioleta A tem vindo a ser utilizada cada vez mais em experiências com o objetivo de promover ou otimizar certos parâmetros de qualidade intrínseca. Em Miao et al. (2022) verificou-se que através da aplicação de 7 dias de radiação UV-A, conseguiu-se obter um valor máximo no teor total de flavonoides das partes aéreas em *Scutellaria baicalensis* (Escutelária), verificando-se que a aplicação de UV-A permite a promoção da produção de metabólitos secundários e da atividade antioxidante dos extratos. Segundo Mariz-Ponte et al. (2019), a aplicação de uma hora de UV-A em tomate levou à acumulação de ortodifenóis nos frutos, concluindo que a suplementação de UV-A durante a fase de pré-colheita é eficaz no aumento das propriedades nutricionais do tomate e na sincronização do seu amadurecimento, tornando-o mais atrativo para os consumidores. Como último exemplo, a exposição a 10h de UV-A levou a reduções na área foliar e na produção de biomassa, contudo levou a aumentos no teor de clorofila, vitamina C, flavonoides e antocianinas na alface (He et al., 2021).

1.2.4. Radiação ultravioleta-C

A radiação ultravioleta-C (UV-C) (200-280 nm) corresponde ao intervalo de comprimentos de onda mais energético dentro das UV. Como tal, possui uma forte ação germicida e devido à sua alta energia produz radicais livres resultantes da sua atividade ionizante, podendo ser responsável por causar danos nos organismos (Stevens et al., 1998). Nas plantas, os seus efeitos dependem da dose e intensidade da radiação aplicada e das próprias espécies, variedades e o estado fenológico em que se encontram (Sofo, 2020).

Na literatura encontram-se estudos em que este tipo de radiação é aplicada de segundos até minutos (de Oliveira et al., 2016; Vàsquez et al., 2020). É comumente

utilizada no controlo de podridões e no aumento do tempo de vida de prateleira de frutos e legumes (Stevens et al., 1997; Wilson et al., 1994), devido ao seu potencial germicida e de indução de resistência nas plantas. Segundo Vasquez et al. (2017), a aplicação de quatro doses de 1 min de UV-C ($0,87 \text{ kJ m}^{-2}$) com intervalos de dois dias na produção de alface, levou a um aumento da resistência da planta à podridão cinzenta, além de se ter verificado um aumento no teor total de fenóis. No caso de estudo de Yin et al. (2016), concluiu-se que a aplicação de 10 minutos de UV-C após a colheita, levou à regulação das respostas de defesa e de stress na vinha, bem como levou a uma promoção na biossíntese do resveratrol nos bagos de uva.

Relativamente às concentrações de macro e micronutrientes verificou-se no trabalho de Sidibé et al. (2021) que a aplicação de 1 minuto de UV-C ($0,4 \text{ kJ m}^{-2}$) levou a um aumento das concentrações totais de minerais para a raiz e folha da alface, sendo que no caso da folha esse aumento se deveu a um incremento significativo das concentrações de potássio e de enxofre. No caso de Olaiya et al. (2016), foi aplicada uma única dose durante 120 e 240 minutos de UV-C ($0,002 \text{ kJ m}^{-2}$), traduzindo-se num aumento significativo da concentração de cálcio, magnésio e potássio no pepino para os 240 min de UV-C e na concentração de magnésio e potássio no tomate para a aplicação de 120 min de UV-C.

Apesar de se verificar tais benefícios na sua aplicação, a maioria dos estudos são relativos à aplicação em estufas (de Oliveira et al., 2016; Vasquez et al., 2017), havendo ainda poucos estudos relativamente à aplicação de UV-C em SPV (Lee et al., 2014).

1.3. Exemplo de culturas com potencial para SPV

Abaixo encontram-se descritas as duas culturas que iremos usar neste estudo fazendo um enquadramento às mesmas.

1.3.1. *Catharanthus roseus*

C. roseus, de nome comum vinca, é uma planta herbácea pertencente à família das *Apocynaceae*, sendo originária de Madagáscar. A *C.roseus* é uma dicotiledónea e é considerada um subarbusto, pode atingir alturas de até 1m e com a maturação apresenta caules lignificados (Mishra & Verma, 2017). É uma planta perene com uma floração anual apresentando flores hermafroditas com 5 pétalas, que podem ser de diversas colorações nas diferentes variedades. As suas folhas simples são ovais ou oblongas estando dispostas em pares opostos. Os seus frutos são folículos que estão dispostos em pares, apresentando um comprimento de 2 a 4 cm (Gajalakshmi et al.,

2013). Relativamente à sua parte reprodutiva, é uma planta monoica, possibilitando assim a autopolinização, podendo ocorrer polinização cruzada dependendo das condições ambientais existentes. Após a germinação e para condições ambientais normais, a *C. roseus* demora cerca de 6 a 8 semanas até iniciar a sua floração (CABI, 2015). A *C. roseus* sintetiza uma grande variedade de compostos que são utilizados em funções biológicas importantes e na proteção contra ataques de herbívoros e fungos (Mishra & Verma, 2017).

Quanto à sua produção, a *C. roseus* é uma planta de fácil cultivo, não sendo exigente a nível de água nem de fertilizações. A humidade relativa ideal está na ordem dos 80-85% e a temperatura na ordem dos 20-25°C. Apesar da sua tolerância a locais húmidos, é necessário ter em atenção a gestão da rega, visto que o excesso de água pode levar ao apodrecimento das raízes e ao aparecimento de fungos e pragas (Schmelzer, 2022).

A vinca é comercializada maioritariamente como planta sazonal ornamental, contudo esta também tem um elevado valor associado à sua capacidade de produção de alcaloides nos diversos órgãos da planta. A nível farmacêutico, a *C. roseus* tem sido bastante estudada devido à sua capacidade de produzir alcaloides anticancerígenos de elevado valor comercial, nomeadamente a vinblastina (VLB) e a vincristina (VCR) (Levingston & Zamora, 1983; Moreno et al., 1995). Estes compostos estão maioritariamente presentes na sua folhagem, sendo que através de processos de extração e purificação podem ser utilizados em tratamentos de quimioterapia (Saiman et al., 2018). Contudo, a principal limitação na sua obtenção consiste na reduzida quantidade de alcaloides medicinais que conseguem ser produzidos, extraídos e isolados por planta (Levingston & Zamora, 1983; Sottomayor et al., 2004).

Na Tabela 2 estão presentes alguns trabalhos de produção de *C. roseus* em SPV.

Tabela 2 - Exemplos de trabalhos de produção de *C.roseus* em sistema de produção vertical.

Objetivo	Iluminação	PPFD/Fotoperíodo	Referência
Perceber quais as condições ideais de qualidade de luz para maximizar a produção de alcaloides	Luz vermelha, azul, <i>R/B</i> (2:1) e lâmpadas fluorescentes brancas	150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}/16\text{h}$	(Fukuyama et al., 2013)
Verificar qual a intensidade de luz vermelha ideal para aumento da produção de vindolina e catarantina	Lâmpadas fluorescentes brancas e 35 dias depois da germinação, luz vermelha	100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}/16\text{h}$	(Fukuyama et al., 2015)
Efeito da intensidade e da qualidade da radiação na qualidade das plântulas e na floração	<i>Red:Blue</i> (87:13), <i>Red:Far-red:Blue</i> (84:7:9) <i>Red:Green:Blue</i> (74:18:8)	105, 210, e 315 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}/16\text{h}$	(Craver et al., 2018)

Os alcalóides indólicos terpenóides (AIT) são produzidos à escala industrial para obtenção dos alcaloides anticancerígenos para serem utilizados na indústria farmacêutica (Saiman et al., 2018). Contudo, os processos de extração desses alcaloides são muito caros, visto que a extração de 1000 g de VBL custa cerca de um milhão de dólares e a de VCR custa cerca de 3,5 milhões de dólares, fruto das baixíssimas concentrações presentes nas folhas da *C.roseus* (Loyola-Vargas et al., 2004). Verifica-se a necessidade de cerca de duas toneladas de folhas para apenas isolar 1g de VCR, quantidade suficiente para garantir o tratamento de um bebé, por 6 semanas (Barrales-Cureño et al., 2019).

1.3.1.1. Produção de alcaloides

Os alcaloides sintetizados por *C. roseus*, possuem várias etapas compartilhadas entre si, sendo que os intermediários da biossíntese dos AIT's derivam de duas vias metabólicas: a dos terpenoides e a do chiquimato, possuindo uma composição indólica derivado da secologanina e da tripamina (Palacios Rojas & Leech, 2004). Da via do chiquimato deriva o corismato, um precursor de aminoácidos aromáticos. A enzima antranilato sintase catalisa a conversão do corismato em triptofano, que através da sua descarboxilação pela enzima triptofano descarboxilase, fornece o grupo indol aos AIT's (Memelink et al., 2001).

A porção de terpenoides presentes nos AIT's deriva da secologanina e é sintetizada através de múltiplas conversões enzimáticas de geraniol. A hidroxilação da posição C-10 do geraniol pela hidroxilase 10 do geraniol ocorre, sendo seguida pela clivagem oxidativa do anel ciclopentano na loganina para formação da secologanina (Palacios Rojas & Leech, 2004). A secologanina é então condensada com a triptamina através da ação da enzima estrictosidina sintase, formando a estrictosidina, um precursor para vários AIT's em muitas plantas (Barrales-Cureño, 2015). No próximo passo, a estrictosidina é desglicosilada pela estrictosidina β -D-glicosidase, formando uma aglicona instável que rapidamente se converte em um intermediário dialdeído e depois em catenamina. A partir daí, a via das AIT's divide-se em três vias.

A biossíntese da vindolina (VDL) ocorre após sucessivas reações enzimáticas, tal como expresso na Figura 1, sendo a última reação uma acetilação por parte da deacetilvindolina-4-O-acetiltransferase, formando a vindolina (Sottomayor & Barceló, 2006).

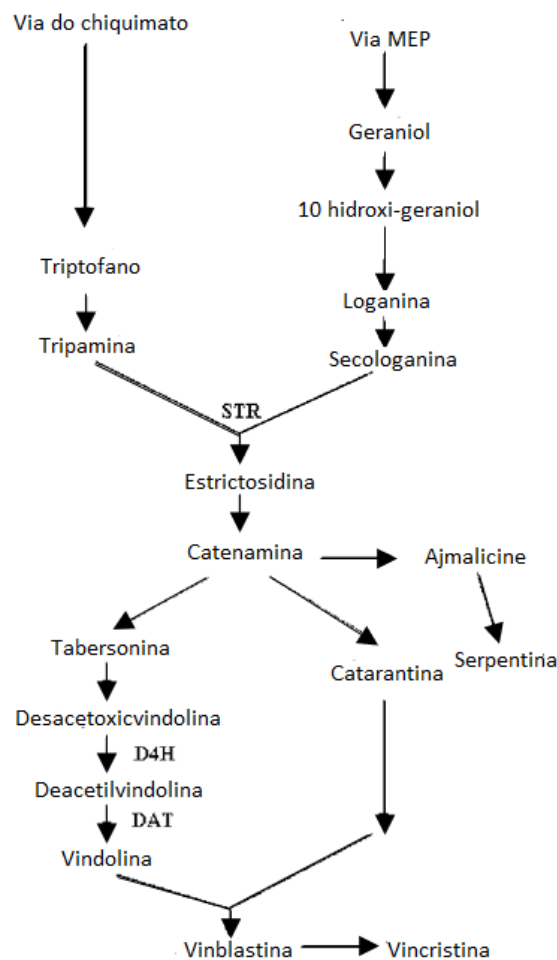


Figura 1 - Via biossintética dos alcaloides anticancerígenos, vindolastina e vincristina em *C. roseus* (Dutta et al., 2005).

Após a ligação da catarantina com a vindolina, devido às peroxidases vacuolares classe III, dá-se origem à α -3,4-anidrovinblastina (AVLB), um precursor da VBL e a VCR sendo que a VCR resulta da oxidação do seu precursor, a VBL (Sottomayor et al., 2004). Em *C. roseus* são sintetizados cerca de 120 alcaloides diferentes, em diversos órgãos da planta (Barrales-Cureño et al., 2019).

A VCR e a VBL são essencialmente utilizadas em processos de quimioterapia, nomeadamente tratamentos de linfomas de Hodgkin, leucemias e nefroblastoma (Wang et al., 2004), permitindo que as doses de bleomicina sejam mais baixas, levando a uma toxicidade global reduzida dos ciclos de quimioterapia, o que se traduz numa redução do tempo de repouso entre os mesmos (Gobbi et al., 2003). São também utilizadas como imunossuppressores no tratamento da púrpura trombocitopênica trombótica, um distúrbio que leva a formação de coágulos de sangue por todo o corpo (Joly et al., 2017).

Além das suas propriedades anticancerígenas, *C. roseus* possui diversos alcaloides com outras propriedades farmacológicas, como: antidiabéticas (Vasukeshetty et al., 2016), antimicrobianas (Patil & Ghosh, 2010), antioxidantes (Bhutkar & Bhise, 2011), anti-helmínticas (Agarwal et al., 2011).

Segundo Fukuyama et al. (2013), verificou-se que a luz vermelha é mais indicada para a produção de vindolina, um precursor da vinblastina (Liu et al., 2014), aumentando a sua concentração nas folhas quando comparada com a luz branca, luz azul ou uma combinação de luz vermelha e azul. Já a aplicação de UV próximo, apresentou um aumento na produção de vindolina na *C.roseus*, através da promoção da oxidação de catarantina, promovida pelo stress aplicado na planta, servindo como gatilho na síntese de alcaloides díméricos (Hirata et al., 1993).

1.3.1.2. Utilização de UV-A na produção de alcaloides

Num estudo levado a cabo por Fukuyama et al. (2017), as plantas de *C. roseus* foram expostas a luz vermelha, e na semana antes da colheita, expuseram-se as mesmas a luz azul e a UV-A ($150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), verificando-se um aumento na produção de vinblastina nas folhas de *C.roseus*, com a aplicação de UV-A durante os 3 últimos dias antes da colheita. Segundo Salama et al. (2020) a aplicação de 10, 20 e 30 min de UV-A, após 2 semanas numa câmara de crescimento exposta a 16h diárias de luz branca, levou a uma indução na biossíntese de isoenzimas de peroxidase e metabolitos secundários. Já em Hirata et al. (1992), quando se comparou a aplicação de luz vermelha + UV-A com apenas a exposição de luz vermelha, constatou-se que a aplicação de UV-A levou a uma redução na produção de biomassa dos rebentos.

Embora ainda seja necessário clarificar qual o impacto da UV-A na combinação de diferentes espectros, verifica-se desde já que existe um potencial emergente da aplicação de UV-A na produção de alcaloides.

1.3.2. Microverdes

Os microverdes são vegetais cultivados em grandes densidades e colhidos numa fase jovem (entre rebentos/'*sprout*' e as folhas bebé/'*baby greens*'). Estes vegetais são muito utilizados em saladas (produtos de 4^a gama) e em restaurantes *gourmet*, sendo produtos com valor acrescentado, devido à sua elevada concentração de compostos bioativos e procura por parte dos consumidores (Kyriacou et al., 2017; Pinto et al., 2015). Geralmente as plantas são colhidas de acordo com a sua altura, sendo o ideal entre os 5 a 12 cm (Saini et al., 2017), quando atingido o primeiro estágio de folha verdadeira, sendo que após a sementeira, a colheita pode se realizar entre 1 e 3 semanas (Allende, 2004). No cultivo de microverdes têm sido utilizadas misturas de substratos como turfa, vermiculite, perlite, entre outras (Liping, 2013). Após a colheita, as plantas têm de ser colocadas a refrigerar, o mais rápido possível após o embalamento, visto que se trata de produtos bastante perecíveis (Liping, 2013; Mir et al., 2017).

Os microverdes, são um dos produtos mais promissores dentro deste setor de produtos mais convenientes, sendo promovidos juntamente com uma imagem de saúde, bem-estar e comodidade (Martínez-Sánchez et al., 2012). A procura por uma maior diversidade de culturas produzidas como microverdes, aliada a um incremento da qualidade nutricional dos mesmos, podem ser uma resposta a tais tendências.

Nas últimas décadas o mercado dos microverdes tem apresentado um aumento considerável, atraindo, segundo estudos de perceção do consumidor, consumidores com filhos e com níveis maiores de escolaridade, sendo ressaltado principalmente fatores como conveniência, disponibilidade, valor nutricional e de saúde (Ragaert et al., 2004). Além disso enquadra-se dentro de um setor (frutas e vegetais acabados de cortar) que só na Europa, corresponde a 50% do mercado de produtos frescos, sendo 40% devido aos vegetais frescos, sendo mercados em crescimento, com taxas a rondar os 2-8% na Europa (Van Rijswijk, 2010).

Atualmente existem algumas limitações científicas relativamente à produção de microverdes, havendo ainda muito trabalho a ser feito, de forma a responder à procura por mais variedades e maior qualidade, nomeadamente a nível de tratamentos não químicos que sejam eficazes e sustentáveis, permitindo assim padronizar a sua produção, bem como reduzir o ciclo de produção (Kyriacou et al., 2016). Existe também

uma necessidade de selecionar variedades que possuam um equilíbrio entre a parte nutritiva e a parte organolética.

Algumas das espécies mais estudadas e comercializadas a nível da produção de microverdes pertencem à família das *Apiaceae*, *Asteraceae*, *Brassicaceae*, *Poaceae*, *Lamiaceae*, *Amaranthaceae* e *Amaryllidaceae* (Kyriacou et al., 2016). O amaranto, manjerição e mostarda são exemplos de espécies produzidas como microverdes. Na Tabela 3 estão presentes alguns estudos de produção de microverdes.

Tabela 3 - Exemplos de estudos de produção de microverdes em sistemas de produção vertical.

Objetivo	Espécies	Iluminação	PPFD/Fotoperíodo	Referência
Impacto da iluminação vermelha complementar nas propriedades antioxidantes	Manjerição	Lâmpadas HPS com suplementação de LEDs (638 nm)	300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ /16h	(Samuolienė et al., 2012)
Resposta a diferentes regimes de luz	Amaranto	Luz vermelha, amarela, verde, azul, branca e luz natural	40 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ /11.5h	(Ampim et al., 2020)
Crescimento e o teor de compostos bioativos	Manjerição	Red e Blue (2R:1B, 1R:1B e 1R:2B)	120 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ /12h	(Lobiuc et al., 2017)
Produção de biomassa e da qualidade nutricional	Amaranto e nabo	Luz branca, azul e vermelha	200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ /16h	(Toscano et al., 2021)
Aumento dos níveis de nutrientes com exposição a LEDs	Couve-rábano, brócolo e nabo	LEDs com combinação de luz azul, vermelha e far-red com suplementação de luz verde, amarela ou laranja	300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ /16h	(Samuolienė et al., 2019)
Verificar os efeitos do UV-A suplementar nas propriedades antioxidantes	Manjerição	Lâmpadas HPS; HPS + (1 e 7 dias de suplementação UV-A); HPS + suplementação UVA durante todo o crescimento	125 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ /16h	(Vaštakaitė-Kairienė et al., 2016)

Apesar de não existirem trabalhos com aplicações de UV-C em microverdes, verificou-se que para o *baby greens* de espinafre, a aplicação de 13 segundos de UV-C ($0,3 \text{ kJ m}^{-2}$), duas vezes por semana, levou a aumentos na vitamina C. Mostrou-se também como uma “ferramenta” com potencial no controlo de infeções, aumento de resistências e na qualidade de culturas colhidas mais prematuramente (Martínez-Sánchez et al., 2019). Verificou-se assim, que a aplicação de uma dose hormética de UV-C, que sentiste numa dose reduzida que possui efeito benéfico, ao contrário da toxicidade ou inibição apresentada pela aplicação de doses altas (Silva et al., 2008), permitiu a obtenção de ganhos na qualidade de plantas jovens de espinafre.

1.3.2.1. Mostarda

A mostarda (*Brassica juncea*) é uma planta bianual nativa da Ásia Central e Oriental, pertencente à família das Brassicaceae, sendo cultivada devido à suas sementes para preparação de condimentos. Esta cultura é uma fonte de fibra (Bian et al., 2015) e possui compostos como carotenoides, compostos fenólicos, glucosinolatos e nutrientes (Frazie et al., 2017) que atuam como desintoxicantes contra o stress oxidativo (Wu et al., 2004). A mostarda é uma planta que pode chegar aos 1,5m de altura. As flores são de cor amarela e os seus frutos são síliquas.

Geralmente são cultivadas duas variedades como microverdes, uma vermelha e outra verde, sendo que entre as duas, a variedade vermelha é aquela que possui um sabor mais picante, adicionando valor comercial no seu consumo em saladas. A mostarda vermelha possui folhas roxas com partes esverdeadas, podendo possuir comprimentos na ordem dos 30 cm (CABI, 2017). Até à data foram realizados um conjunto de estudos relativos à produção de microverdes de mostarda (Tabela 4).

Tabela 4 - Exemplos de estudos de produção de mostarda em sistemas de produção vertical.

Objetivo	Iluminação	PPFD/Fotoperíodo	Referência
↑ Níveis de pigmentos do tecido caulinar	Lâmpadas incandescentes e fluorescentes brancas	275 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}/14\text{h}$	(Kopsell et al., 2012)
Impacto da iluminação vermelha complementar nas propriedades antioxidantes	Lâmpadas HPS com suplementação de LEDs (638 nm)	300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}/16\text{h}$	(Samuolienė et al., 2012)
↑ Crescimento, morfologia e conteúdo de nutrientes da intensidade e qualidade da luz	<i>Red:Green:Blue</i> (74:18:8), <i>Red:Blue</i> (87:13) e <i>Red:Far-red:Blue</i> (84:7:9)	105, 210, e 315 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}/16\text{h}$	(Gerovac et al., 2016)
↑ Rendimento e aparência, otimizando a proporção de luz azul	LEDs vermelhos e azuis (5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%)	300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}/16\text{h}$	(Ying et al., 2020)

Relativamente à aplicação de UV-C em mostarda, verificou-se para a mostarda amarela, que a exposição a uma hora de UV-C levou a um aumento nos compostos fenólicos, contudo levou a uma redução da capacidade antioxidante (Ebrahim et al., 2022).

2. Materiais e Métodos

2.1. Influência da radiação UV-A nos parâmetros morfo-fisiológicos e na produção de alcaloides em *Catharanthus roseus*

2.1.1. Condições de crescimento e delineamento experimental

A experiência foi conduzida numa câmara fitoclimática nas instalações dos Viveiros Vitor Lourenço Lda., localizada em Barca, Maia. A câmara foi programada com temperatura controlada de $24.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ e com uma humidade relativa de aproximadamente 85%. Em cada um dos três compartimentos individuais da câmara foram colocadas 3 réplicas sendo que cada réplica continha 22 plantas de cada cultivar estudada de *C. roseus*: *Sunstorm Apricot* (S-Apr), *XDR-Polka Dot* (XDR-Polka) e *Cora Red* (C-Red) (Figura 2). A escolha destas cultivares resultou de um estudo anterior de elementos desta equipa (Lourenço et al., 2022; Prada, 2020), visto que a “XDR-Polka” e a “Cora-Red” se apresentaram como mais produtivas e a “S-Apr” a que maior concentração de vincristina apresentou. As plantas foram envasadas em vasos de plástico com 8.5 cm de diâmetro, 4 semanas após a sua germinação em tabuleiros de crescimento com um substrato profissional (SIRO), sendo uma mistura formulada constituída por 50% de húmus, 17% de perlite e 15% de fibra de coco, enriquecida com fertilizante (16N-11P-10K + 2Mg + micronutrientes).



Figura 2 – Três cultivares de *C.roseus* utilizadas na experiência: a) Sunstorm S-Apr, b) XDR XDR-Polka Dot e c) Cora Red.

Para todos os três compartimentos da câmara foi mantido um fotoperíodo de 16h recorrendo à utilização de LEDs Red (660nm) + Blue (450 nm) num rácio de 2:1 e com uma intensidade luminosa total de $150 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Adicionalmente, cada um dos

compartimentos teve o seu fotoperíodo suplementado com UV-A (365 nm; 3,96 kJ.m-2) durante 2h, 4h ou 6h, respetivamente (Figura 3), após a finalização das 16h.

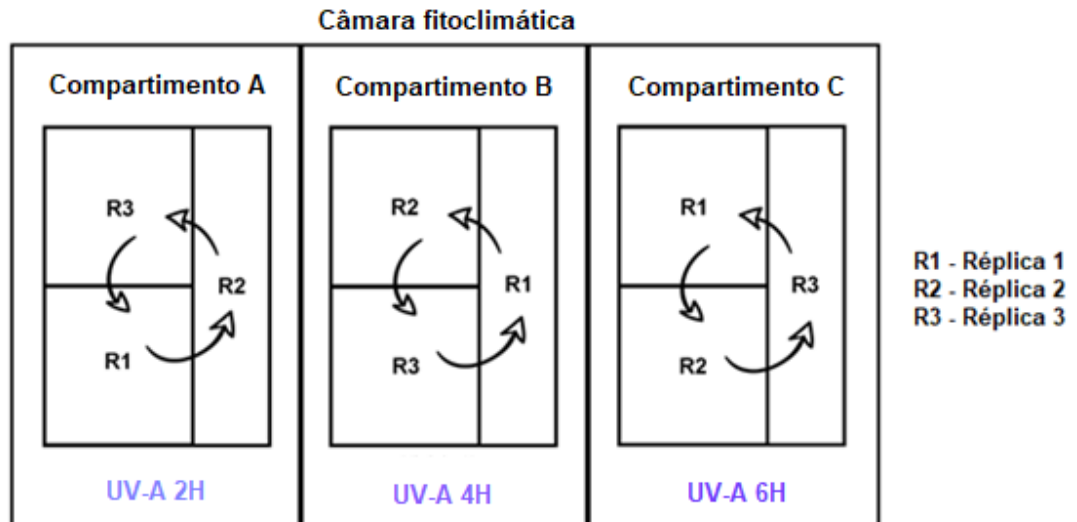


Figura 3 - Disposição da câmara fitoclimática representando os três compartimentos e respetivos tratamentos UV-A (365nm): 2h, 4h e 6h. Em cada um dos compartimentos encontra-se também representadas as réplicas realizadas divididas em tabuleiros e como se procedeu a sua rotação realizada de três em três dias.



Figura 4 - Fotografia do compartimento A da câmara fitoclimática no início da terceira semana de crescimento, com as plantas de *C.roseus* dispostas de forma randomizada nos tabuleiros das respetivas réplicas.

2.1.2. Medições realizadas

No dia 0 da experiência (28-04-2022) 10 plantas de cada cultivar de *C. roseus* (recém enraizadas) foram escolhidas aleatoriamente para se medir a altura, número de folhas, número de entrenós do caule principal e contabilizar a biomassa fresca e seca de cada órgão.

Após 34 dias, as plantas de *C.roseus* foram colhidas, tendo sido selecionadas aleatoriamente cinco plantas de cada réplica por cada cultivar e tratamento para medições morfológicas. Entre elas, foram contabilizados o número de folhas e de entrenós do caule principal, assim como a altura da planta (cm) e o seu teor em clorofilas utilizando um SPAD 502 Plus (Konica Minolta). Foi ainda realizada a medição da taxa fotossintética e condutância estomática com um IRGA (Infra-red gas analyzer, LI-6400/XT), e da sua área foliar (LI-3100). Por último, foram medidos os pesos frescos e secos dos diferentes órgãos da planta (g), sendo que os pesos secos foram medidos após as plantas estarem 48h a 100°C numa estufa de secagem. Paralelamente, 15 plantas de cada réplica por cada cultivar e tratamento foram colhidas no 34º dia e imediatamente congeladas em azoto líquido, e armazenadas a -80°C, para a quantificação de alcaloides.

Adicionalmente, a temperatura de cada compartimento foi medida de três em três minutos durante todos os 34 dias em que a experiência decorreu, utilizando um LogTag® TRIX-8 (Auckland, New Zealand). Uma vez por semana o PPFD foi também medido em cada compartimento em 13 localizações diferentes utilizando um espectrofotómetro Optimum SRI-2000 (comprimento de onda 250-850 nm; Hsinchu, Taiwan).

2.1.3. Quantificação de alcaloides

Maceraram-se as amostras que tinham sido previamente congeladas a -80°C utilizando uma trituradora alimentar e azoto líquido com o intuito de se manter o nível de congelação. De seguida pesou-se 150 mg de cada amostra para um *Eppendorf* 2 mL, sendo posteriormente armazenado a -20°C até voltar a ser utilizado.

No laboratório do Departamento de Química da FCUP, realizou-se a ressuspensão das amostras em 1 mL de metanol MeOH, sendo depois colocadas num vortex durante 2 minutos para se dissolverem totalmente.

As amostras foram posteriormente submetidas a uma limpeza ultrassónica (VWR USC300TH) durante 30 min com objetivo de eliminar possíveis contaminantes

(Figura 5). De seguida foram centrifugadas durante 10 min a 12000 rpm, à temperatura ambiente.



Figura 5 - Amostras durante o banho de limpeza ultrassónica (VWR USC300TH).

O sobrenadante foi colocado num tubo *Eppendorf* 1mL, e secou-se o MeOH através da injeção de N_2 (Figura 6). As amostras foram guardadas a $-20^{\circ}C$ até serem depois ressuspendidas novamente em 0,5 mL de MeOH. No final, as amostras foram filtradas e injetadas em HPLC/MS (High Performance Liquid Chromatography- Mass Spectrometry), (Thermo Fischer Scientific, Bremen, Alemanha).

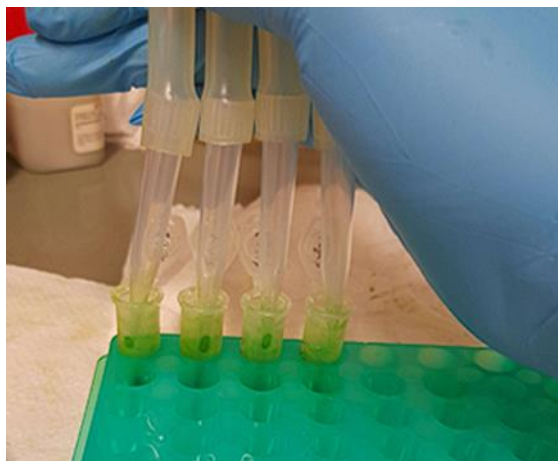


Figura 6 - Secagem do MeOH através da injeção de N_2 .

2.2. Influência da suplementação de luz UV-C no crescimento e qualidade de microverdes

2.2.1. Design experimental

As sementes de mostarda vermelha foram postas a germinar em substrato de germinação (SIRO), regado até à capacidade de campo, tendo-se regado o substrato e deixando a escorrer a água em excesso. Nos tabuleiros (24 x 16 cm), colocaram-se 3.2 g de sementes com recurso a um semeador manual de modo a serem distribuídas uniformemente. Os tabuleiros foram dispostos na câmara fitoclimática, em condições de obscuridade, a uma temperatura de 22°C e humidade relativa de 60% até emergência da radícula (4 dias após sementeira). Os tabuleiros foram empilhados dois a dois com um tabuleiro extra por cima (com substrato e água) de forma a adicionar peso, promovendo a germinação pois a pressão empurra as sementes para o meio húmido do substrato, além de facilitar a remoção das cascas das sementes (On the Grow, 2021). Ao 5º dia, os tabuleiros foram expostos a lâmpadas LEDs brancas (Systion SE-004), com um fotoperíodo de 16h, um PPFD de 450 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$, com uma temperatura de 19°C/22°C e humidade relativa de 60%. As plântulas deixadas a aclimatar durante dois dias.



Figura 7 – Câmara fitoclimática e respetiva disposição dos microverdes de mostarda vermelha.

De seguida, 0.3 kJ/m² de luz UV-C (254 nm) foram aplicados durante 13 segundos, após o fotoperíodo, em três frequências diferentes: 0 (nunca), 1 (dia 7) ou 3

vezes (dia, 7, 8 e 9). Quando as plantas atingiram o estado de colheita comercial (10 dias após sementeira) foi realizada a colheita e respetivas determinações biométricas.



Figura 8 - Microverdes de mostarda vermelha antes do início da suplementação com UV-C (dia 7).

2.2.2. Parâmetros morfofisiológicos

Para a medição do peso fresco/seco e da altura foram selecionados 3 tabuleiros de cada tratamento, tendo sido realizadas as pesagens totais de microverdes produzidos por tabuleiro e o peso de 20 plantas selecionadas, plantas que também foram medidas e separadas para medição do peso seco. Após as medições em fresco, o material vegetal foi colocado numa estufa de secagem a 100°C durante 48h, sendo que após a secagem foram realizadas as pesagens das 20 plantas selecionadas e do total produzido por tabuleiro.

2.2.3.1. Quantificação de minerais

As amostras, previamente secas como descrito acima, foram submetidas a um processo de digestão (TOPwave, Analytik Jena AG, Jena, Alemanha) para de seguida ser realizada a quantificação do teor em minerais. Para isso, pesaram-se 200 mg de amostra seca para vaso de politetrafluoretileno (PTFE), onde foram adicionados 6 ml de HNO₃ (65%, w/w) e 1 ml de H₂O₂ (30%, w/w), e levados ao micro-ondas de digestão, de modo a serem submetidos ao programa cujas condições se encontram descritas na Tabela 5.

No final da digestão, as amostras foram transferidas para tubos de *Falcon* de 50 ml, perfazendo-se o volume com adição de água ultrapura até 50 mL. Este procedimento

foi realizado para as 9 amostras, bem como para os dois materiais de referência certificados [folha de alface (BCR®-129) e farinha de trigo (ERM®-BC382)]. Em cada digestão, realizou-se ainda um branco (branco do procedimento de digestão), que consistiu na repetição do procedimento de digestão, na ausência de material biológico. Todas as amostras foram posteriormente filtradas com filtros de 0.45 µm. A análise de minerais foi realizada recorrendo a um PlasmaQuant MS, de acordo com um protocolo de ICP-MS.

Tabela 5 - Descrição das etapas do programa de digestão.

Etapa	1	2	3	4	5
Temperatura (°C)	130	170	200	100	100
Pressão (bar)	20	20	20	20	20
Tempo (min)	5	10	15	2	2
Rampa (min)	5	5	1	5	1
Potência (%)	30	40	50	30	20

2.3. Análise estatística

No trabalho realizado com *C.roseus* foram realizadas *Two-Way ANOVA*'s para comparar os dois fatores alvos de estudo, cultivar e tempo de suplementação de UV-A. Consequentemente foram realizados testes de comparações múltiplas de médias (nível de significância de 5% - teste de Tukey). Para os parâmetros onde não se verificaram diferenças significativas por parte da interação cultivar/tempo de suplementação de UV-A ($p>0,05$), foi realizada uma *One-Way ANOVA* para o fator que apresentou valor $p<0,05$, sendo posteriormente submetidos a um teste *Post-Hoc*, recorrendo ao teste de Tukey com um nível de 5% de significância. Na experiência realizada com microverdes de mostarda vermelha, foram realizadas *One-Way ANOVA*'s, sendo o fator a analisar o tempo de suplementação de UV-C. Os dados foram também submetidos ao teste de Tukey com nível de significância de 5%. Para a realização deste tratamento estatístico foi utilizado o software *GraphPad Prism 8* (Graphpad Software, San Diego, CA, USA).

3. Resultados

3.1. Influência da radiação UV-A nos parâmetros morfo-fisiológicos e na produção de alcaloides em *Catharanthus roseus*

3.1.1. Parâmetros morfofisiológicos

Em relação ao peso seco total por planta, verificou-se uma interação significativa entre a cultivar e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 9 A). Os tratamentos com 4h e 6h de UV-A suplementar levaram a uma diminuição do peso seco total da “S-Apr” em comparação com a “XDR-Polka” (51 %) e “Cora-Red” (47%). Verificou-se também um aumento do peso seco total entre as 2h e as 6h de suplementação com UV-A na “XDR-Polka”, sendo que o aumento do número de horas de UV-A se traduziu num aumento de cerca de 30%.

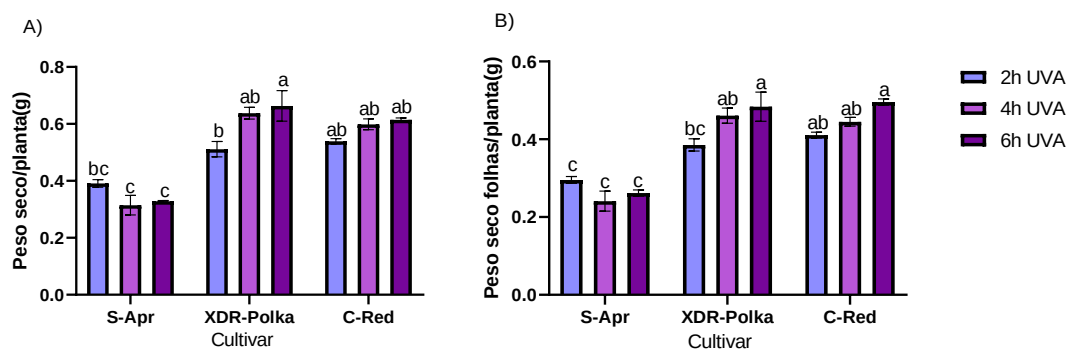


Figura 9 – (A) Peso seco total médio e (B) Peso seco médio das folhas, por planta após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. *Sunstorm Apricot* (S-Apr), *XDR-Polka Dot* (XDR-Polka) e *Cora Red* (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz (A: $p=0,0037$; B: $p=0,0079$).

Quando medido o peso seco das folhas por planta, verificou-se uma interação significativa entre a cultivar e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 9 B). A “S-Apr” foi a variedade que apresentou pesos secos foliares significativamente inferiores quando comparados com as restantes variedades para todos os tempos de suplementação. Entre os tratamentos aplicados na “XDR-Polka” verificou-se um aumento significativo de 26% entre a suplementação de 2h e de 6h de UV-A.

Relativamente à altura das plantas, não se verificou uma interação significativa entre a cultivar e o tempo de suplementação de UV-A. Contudo, uma diferença estatística foi verificada quando comparadas as variedades (Figura 10). A “XDR-Polka”

e a “Cora-Red” são 16 e 29% mais altas, respetivamente, em relação à “S-Apr”, independentemente do tratamento de luz aplicado.

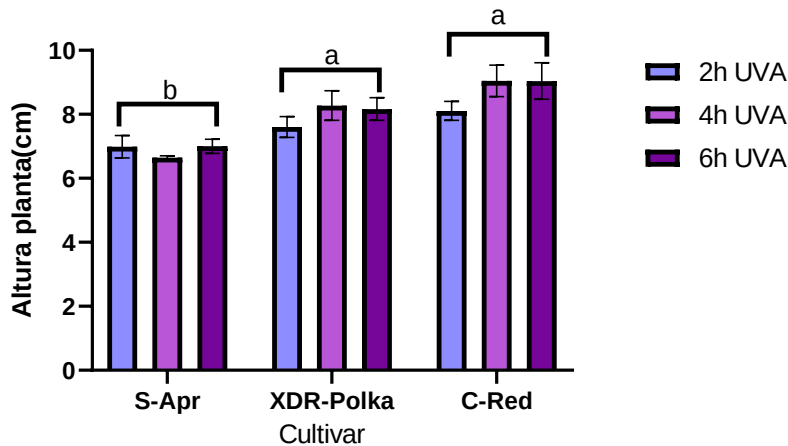


Figura 10 - Altura média (cm) após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas entre as cultivares ($p < 0,0001$).

Em relação ao número de folhas por planta verificou-se uma interação significativa entre a variedade e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 11 A). No geral, a “XDR-Polka” foi a variedade que apresentou um maior número de folhas por planta. Verificou-se também, para a “XDR-Polka” um aumento significativo de 40% e 47%, quando 4h ou 6h de UV-A foram aplicadas, respetivamente, em comparação com 2h de suplementação. Nas outras variedades não se verificaram diferenças significativas dentro do grupo.

Quando analisado o número de entrenós por planta, não se verificou interação entre a variedade e o tempo de suplementação de UV-A. Ainda assim, o fator cultivar teve efeitos significativos (Figura 11 B). A “Cora-Red” apresentou, para todos os tempos de suplementação de UV-A, um número de entrenós significativamente maior que a “XDR-Polka” (em 6%) e que a “S-Apr” (em 18%), já a “XDR-Polka” também a apresentou 12% mais entrenós que a “S-Apr”.

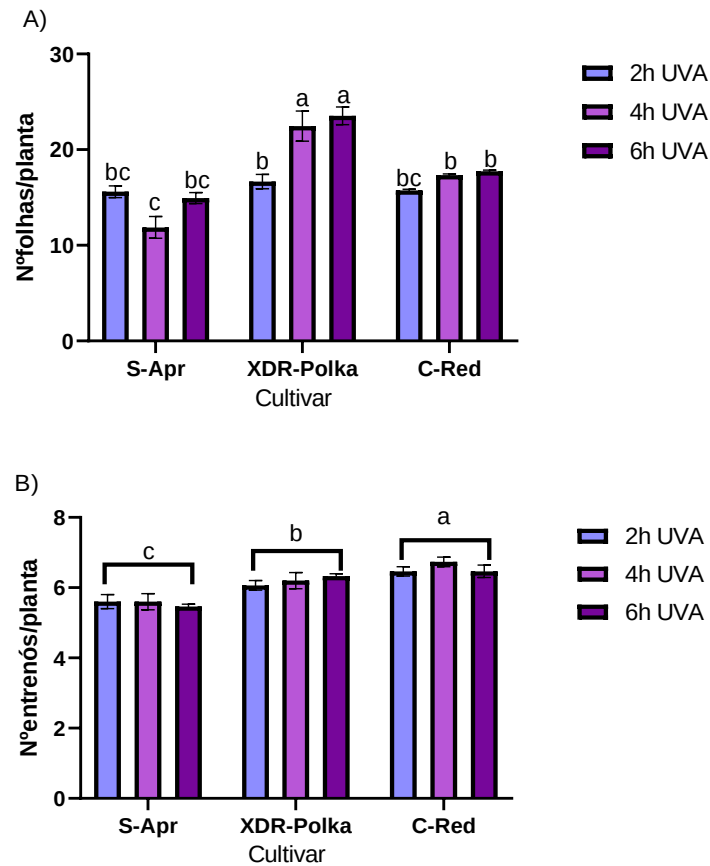


Figura 11 - (A) Número de folhas médio e (B) Número de entrenós do caule principal médio por planta após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h,4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem (A) a diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz ($p=0,0002$) e (B) a diferenças significativas entre cultivares (B: $p<0,0001$).

Relativamente à área foliar por planta não se verificou uma interação significativa entre as cultivares e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 12). Contudo, verificou-se uma diferença estatística entre cultivares. Entre a “XDR-Polka” e a “Cora-Red” não se verificaram diferenças significativas, mas quando comparadas a variedade “S-Apr” com a “XDR-Polka” e a “Cora-Red”, verifica-se que tanto para a “XDR-Polka” com para a “Cora-Red”, há um aumento na ordem dos 57% e 72%, respetivamente, para todos os tempos de suplementação com UV-A.

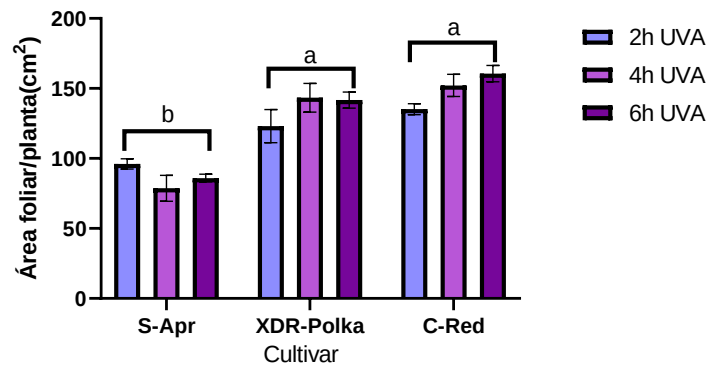


Figura 12 - Área foliar média (cm²) por planta após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas entre as cultivares ($p < 0,0001$).

Quando analisada a taxa fotossintética por planta não foi encontrada interação significativa entre o fator cultivar e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 13), além disso, não se verificaram diferenças significativas entre cultivares nem entre tempos de aplicação de UV-A suplementar.

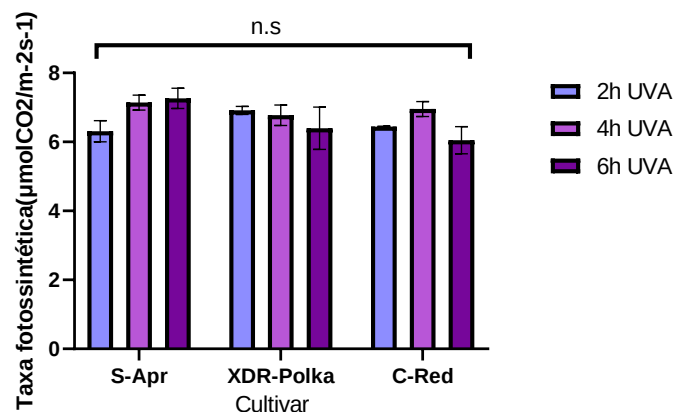


Figura 13 - Taxa fotossintética média ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) média por planta após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. n.s. – sem diferença significativa ($p = 0,1466$).

A condutância estomática consiste num indicador da abertura dos estomas, indicando a capacidade de trocas gasosas por parte das folhas (Marrichi, 2009). Relativamente à condutância estomática, não se verificou uma interação significativa entre o fator cultivar e tempo de suplementação de UV-A. Contudo, foi verificada uma diferença estatística quando comparadas as cultivares (Figura 14). A “S-Apr”, para os tempos de suplementação de UV-A de 2h ($0,61 \pm 0,046 \mu\text{mol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 4h ($0,59 \pm 0,024$

$\mu\text{mol H}_2\text{O.m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e 6h ($0,53\pm0,017 \mu\text{mol H}_2\text{O.m}^{-2}\text{s}^{-1}$), foi a variedade que apresentou uma condutância estomática significativamente maior quando comparada com as restantes. Sendo que teve um aumento médio de 29% em relação às cultivares “XDR-Polka” e “Cora-Red”.

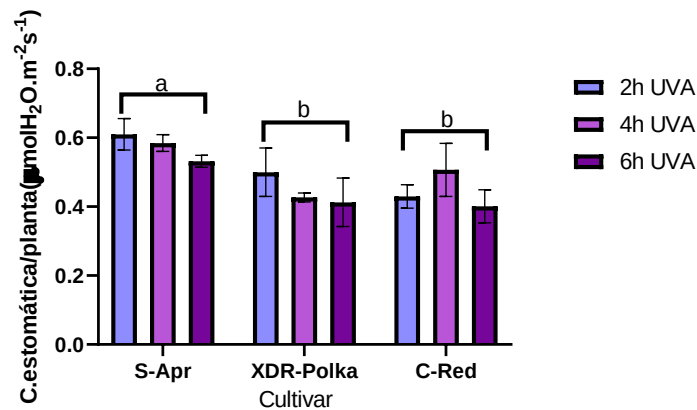


Figura 14 - Condutância estomática ($\mu\text{mol H}_2\text{O.m}^{-2}\text{s}^{-1}$) média por planta após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h,4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas entre as cultivares ($p=0,0043$).

3.1.2. Quantificação de alcaloides

Ao nível da concentração total dos alcaloides quantificados (CAT, VDL, AVLB, VLB e VCR) por planta, verificou-se uma interação significativa entre a cultivar e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 15 e Tabela 8, em Anexo). A cultivar “Cora-Red”, para todos os tempos de suplementação, foi a que apresentou os maiores valores de concentrações de alcaloides. Através da análise dos valores da “Cora-Red”, verifica-se a existência de uma concentração média de alcaloides superior para as 4h de suplementação, sendo significativamente maior em 79% do que nas 2h de UV-A. Em comparação com as 6h de UV-A, para a “Cora-Red” verificou-se uma tendência de aumento em 42% quando comparada com a concentração para 4h de UV-A. Para a cv. “S-Apr”, apesar de não se verificar uma diminuição significativa na concentração total com o aumento do número de horas de suplementação de UV-A, verificou-se que após 4h e 6h de UV-A, houve uma tendência de diminuição da concentração total dos alcaloides quantificados em 44% e 38%, respetivamente, quando comparadas com a aplicação de 2h de UV-A.

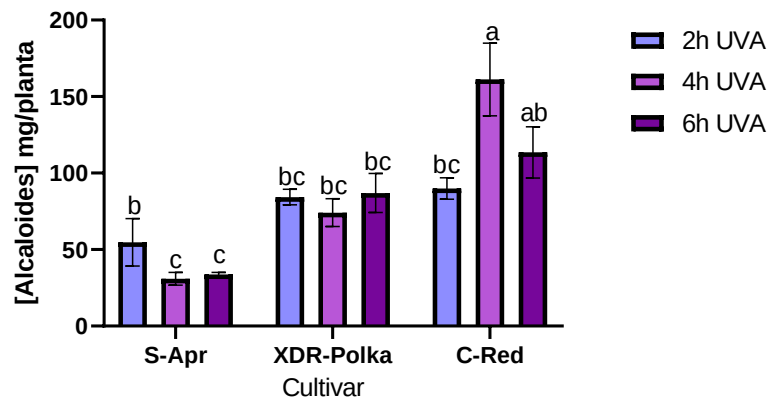


Figura 15 - Concentração total dos alcaloides quantificados (CAT, VDL, AVLb, VLB e VCR), mg/planta, durante a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h,4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz ($p=0,0116$).

Quando quantificada a concentração de CAT por planta, verificou-se uma interação significativa entre a cultivares e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 16 A e Tabela 8, em Anexo). A nível geral, a cv. “Cora-Red” foi a que apresentou concentrações superiores de CAT, sendo apenas significativa para as 4h de suplementação de UV-A, que se traduziram num aumento de 104% e 55% quando comparadas com as 2h e 6h de UV-A, respetivamente. No caso da “S-Apr” verifica-se uma ligeira tendência de diminuição da concentração de CAT com o aumento do número de horas de UV-A, diminuindo 38% e 42% quando comparadas as concentrações de 4h e 6h, respetivamente.

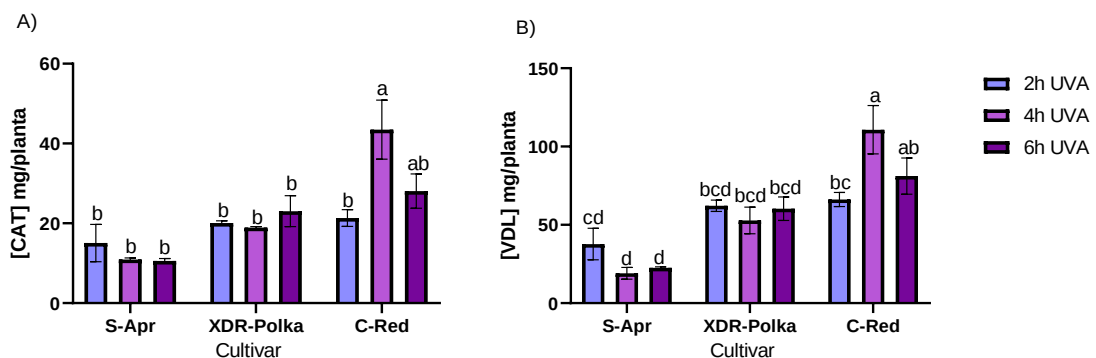


Figura 16 – Concentração de (A) CAT e (B) VDL (mg/planta) após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h,4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz (A: $p=0,0247$; B: $p=0,0483$). Abreviação: CAT: Catarantina; VDL: Vindolina.

Em relação à concentração de VDL por planta, verificou-se uma interação significativa entre a cultivares e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 16 B e Tabela 8, em Anexo). Para as 4h de suplementação de UV-A, foram registadas as maiores concentrações de VDL, sendo que para a “Cora-Red”, essa concentração foi superior em 36% e em 47% em comparação com as 6h e 2h de suplementação, respetivamente. No caso da “XDR-Polka”, não se verificou qualquer diferença significativa, nem tendência. Já na “S-Apr”, apesar de não ser significativa, observa-se uma diminuição da concentração de VDL com o aumento do número de horas de UV-A, levando a uma diminuição de 49% e 40% de VDL respetivamente das 4h e 6h de UV-A suplementar em relação à suplementação de 2h.

Relativamente à concentração de VLB por planta, verificou-se uma interação significativa entre o fator cultivar e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 17 e Tabela 8, em Anexo). A cultivar “Cora-Red”, para todos os tempos de suplementação, apresentou os maiores valores de concentração de VLB, em 252% e 170% quando comparada à “S-Apr” e “XDR-Polka” respetivamente. Entre os tempos de suplementação de UV-A para a “Cora-Red”, apesar de não significativa verificou-se uma tendência de aumento da concentração de VLB para 4h de suplementação, sendo superior em 95% relativamente às 2h de UV-A e em 115% em relação às 6h de UV-A. Para a “S-Apr”, apesar de não significativa verificou-se uma tendência de diminuição da concentração de VLB com o aumento do número de horas de UV-A. A concentração com o tratamento de 2h foi superior em média em 83% em relação às 4h e 6h de UV-A. O contrário aconteceu com a “XDR-Polka”, onde se verificou uma tendência de aumento da concentração com a aplicação de 6h de UV-A, resultando num aumento médio de 33% quando comparado com as 2h e 4h de UV-A.

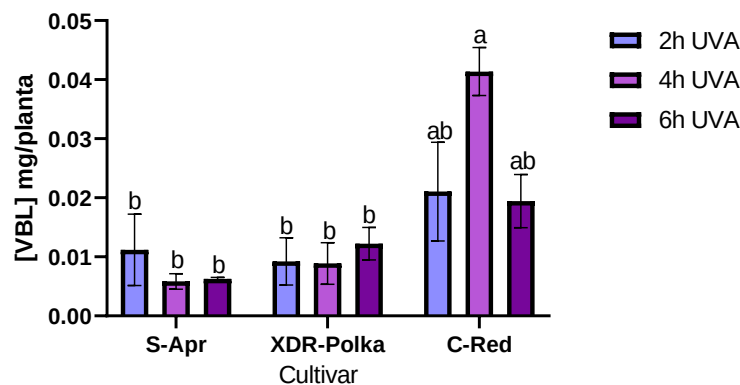


Figura 17 - Concentração de VLB (mg/planta) após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz ($p=0,0359$). Abreviação: VBL: Vinblastina.

Em relação à concentração de VCR por planta, verificou-se uma interação significativa entre a variedade e o tempo de suplementação de UV-A (Figura 18 e Tabela 8, em Anexo). A cultivar “Cora-Red” com 4h UV-A, produziu os maiores valores de concentração de VCR em sendo superior em 268% do que que nas 2h e 57% do que nas 6h de UV-A. Na “S-Apr”, apesar de não significativa verificou-se uma tendência de diminuição da concentração de VCR com o aumento do número de horas de suplementação de UV-A. A concentração após 2h foi superior em 100% em relação às 4h e 6h de UV-A. O contrário aconteceu com a “XDR-Polka”, onde se verificou uma tendência de aumento da concentração com a aplicação de 4 e 6h de UV-A, resultando num aumento de 67% quando comparado com as 2h de UV-A.

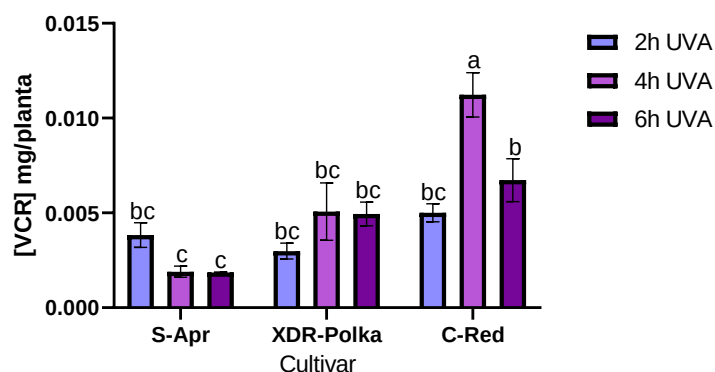


Figura 18 - Concentração de VCR (mg/planta) após a colheita de *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h, 4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão. As diferentes letras correspondem a diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz ($p=0,0017$). Abreviação: VCR: Vincristina.

3.2. Influência da suplementação de luz UV-C no crescimento e qualidade de microverdes mostarda vermelha

3.2.1. Parâmetros morfofisiológicos



Figura 19 – Aspeto geral dos *microverdes* de mostarda vermelha no momento de colheita (Ctr-controlo; 1x-uma aplicação suplementar de UV-C; 3x – três aplicações suplementares de UV-C).

Através de uma análise meramente visual é possível perceber que a aplicação de três doses de UV-C (3x) resultou em microverdes mais pequenos quando comparada aos restantes tratamentos (Figura 19).

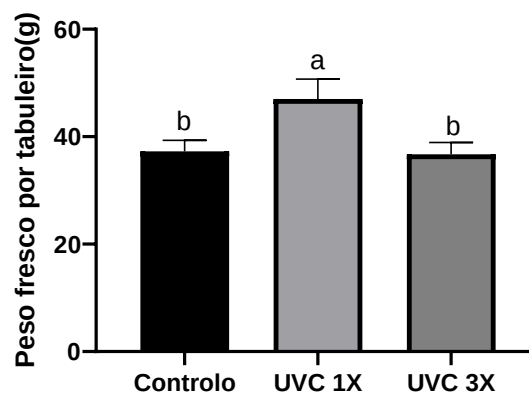


Figura 20 - Peso fresco médio, em gramas, por tabuleiro de microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas

entre os tratamentos ($p=0,0061$). UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7, 8 e 9) de Ultravioleta-C.

As análises mais rigorosas confirmaram que para o peso fresco dos microverdes existem diferenças significativas entre os diferentes tratamentos, sendo que a aplicação de uma única dose de UV-C suplementar levou a um maior peso de microverdes ($47,02 \pm 2,13\text{g}$) em comparação com o controlo ($37,26 \pm 1,19\text{g}$) e a aplicação de três doses suplementares ($36,74 \pm 1,25\text{g}$), resultando num aumento de 26% e 28%, respetivamente (Figura 20).

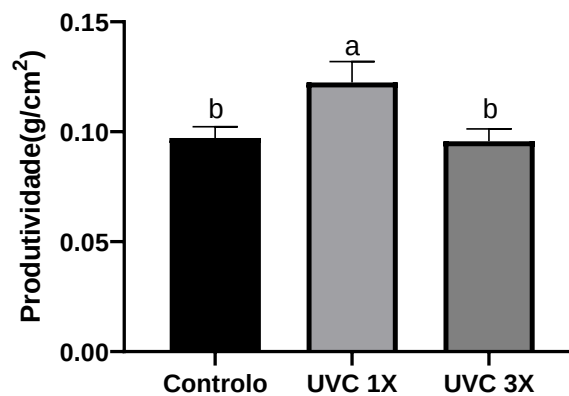


Figura 21 – Produtividade média, em gramas por centímetro quadrado, dos microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos ($p=0,0059$). UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7, 8 e 9) de Ultravioleta-C.

Relativamente à produtividade dos microverdes, através da análise dos resultados, verifica-se a existência de diferenças significativas entre os diferentes tratamentos. A aplicação de uma dose de UV-C suplementar resultou na maior produtividade ($0,122 \pm 0,006 \text{ g/cm}^2$) em comparação com o controlo ($0,097 \pm 0,003 \text{ g/cm}^2$) e a aplicação de três doses suplementares de UV-C ($0,096 \pm 0,003 \text{ g/cm}^2$), resultando num aumento de 26% e 28%, respetivamente (Figura 21).

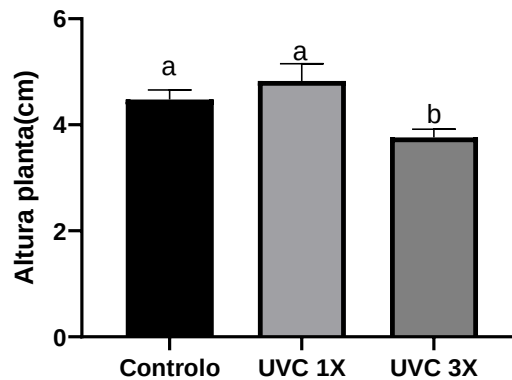


Figura 22 – Altura média, em centímetros, dos microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos ($p=0,0036$). UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7,8 e 9) de Ultravioleta-C.

No que respeita a altura das plantas a aplicação de três doses de UV-C suplementar levou a valores significativamente inferiores ($3,76 \pm 0,09\text{cm}$) em contraste com o controlo ($4,48 \pm 0,10\text{cm}$) e a aplicação de uma única dose suplementar de UV-C ($4,83 \pm 0,19\text{cm}$), resultando numa redução de 16% e 22%, respetivamente (Figura 22).

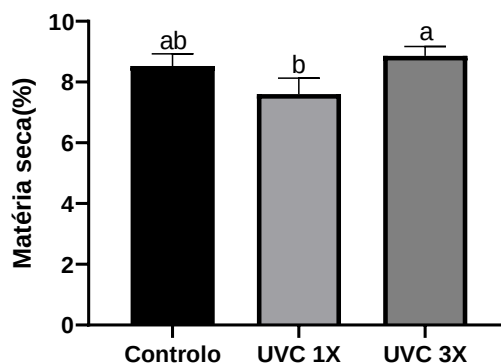


Figura 23 – Teor de matéria seca, em percentagem, dos microverdes de mostarda vermelha após colheita e secagem a 100°C durante 48h, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos ($p=0,0258$). UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7,8 e 9) de Ultravioleta-C.

Em relação ao teor de matéria seca presente nos microverdes verificou-se, através da análise dos resultados, a existência de diferenças significativas entre os diferentes tratamentos, sendo que a aplicação de três de UV-C suplementar resultou num aumento em 16% da matéria seca, quando comparado com a aplicação de uma dose de UV-C (Figura 23).

Através da análise dos resultados, percebe-se que a aplicação de três doses de UV-C suplementar não se mostrou com potencial de otimização dos parâmetros produtivos dos *microverdes* de mostarda. No caso da suplementação única, verificou-se que a mesma tem um potencial no que diz respeito à otimização da produtividade.

3.2.2. Análises de minerais

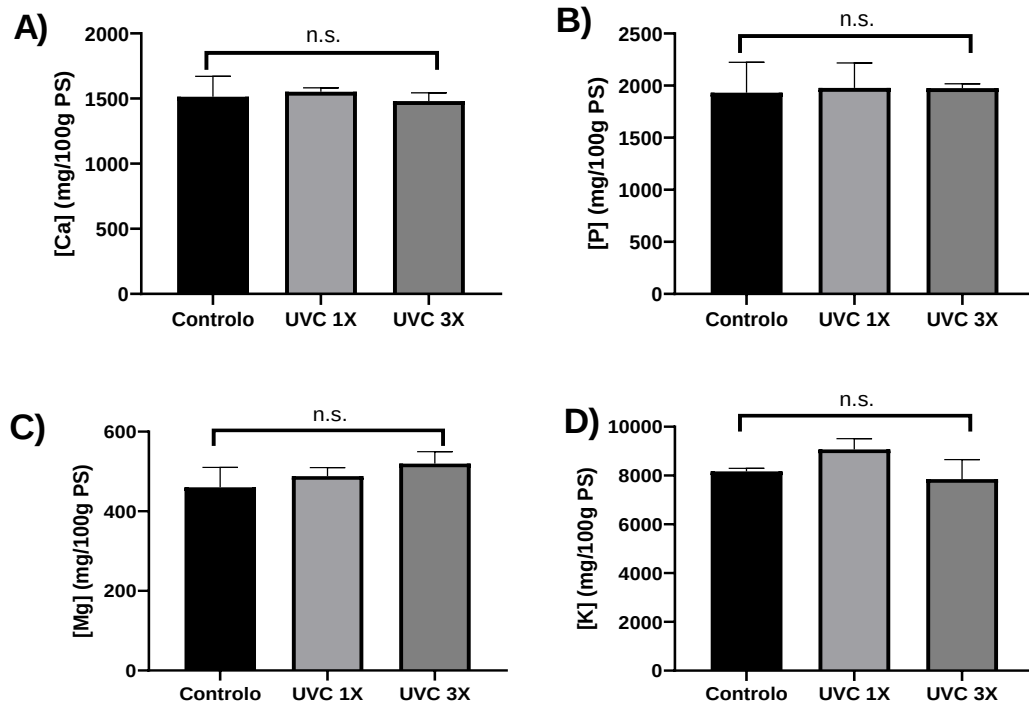


Figura 24 - Concentrações médias de cada macronutriente, em mg/100g de peso seco (PS), dos microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos (A) $p=0,6813$; (B) $p=0,9585$; (C) $p=0,2047$; (D) $p=0,0724$. UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7, 8 e 9) de Ultravioleta-C. Ca – cálcio; P – fósforo; Mg – magnésio; K – potássio.

No que respeita à quantificação de macronutrientes não foram observadas diferenças significativas entre os diferentes tratamentos. Contudo, verificou-se uma tendência de aumento da concentração de potássio, quando aplicada uma única dose de UV-C suplementar, em contraste com o controlo (11,0%) e a aplicação de três doses de UV-C (15,4%) (Figura 24).

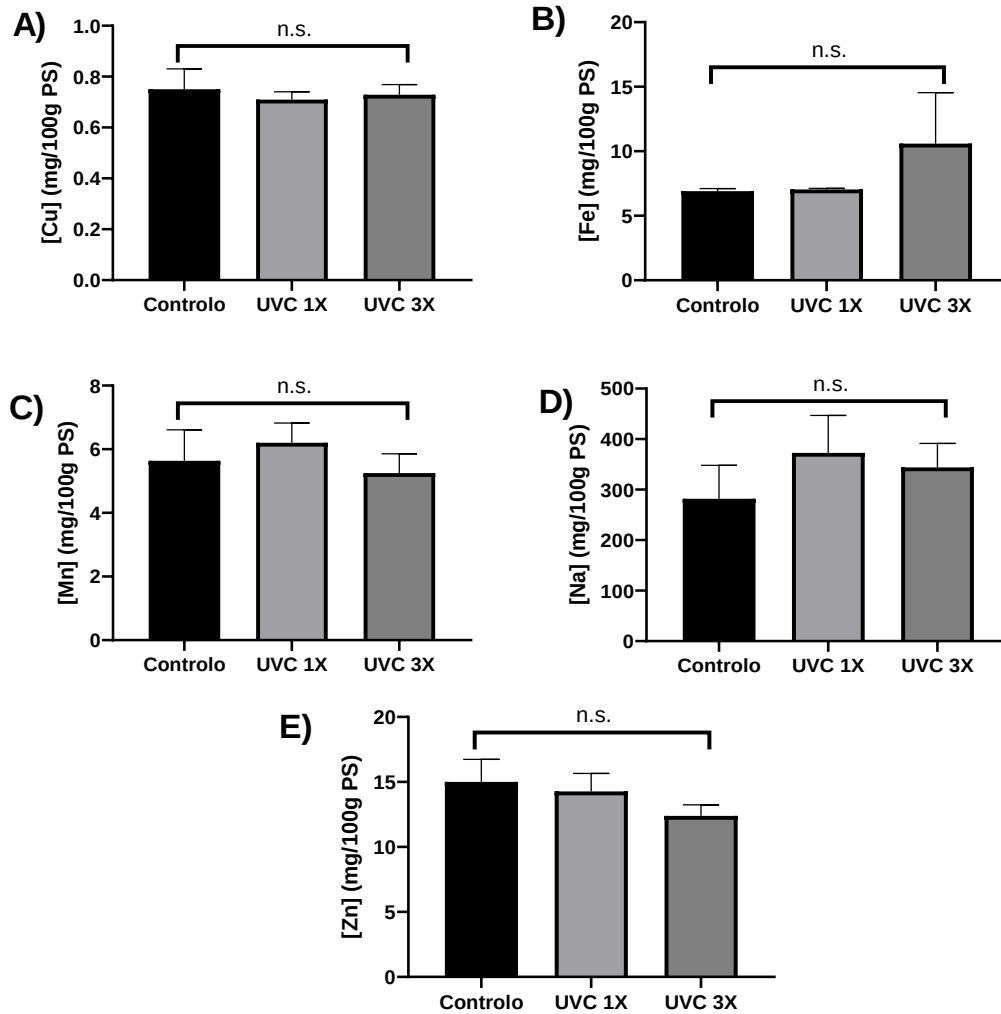


Figura 25 - Concentrações médias de cada micronutriente, em mg/100g de peso seco (PS), dos microverdes de mostarda vermelha após colheita, expostas a 16h diárias de luz branca, com suplementação única ou tripla de UV-C e controlo, com respetivo erro padrão associado, para os diferentes tratamentos aplicados. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas entre os tratamentos (A) $p=0,6754$; (B) $p=0,1626$; (C) $p=0,3593$; (D) $p=0,2784$; (E) $p=0,1316$. UVC 1X – aplicação única (dia 7) de Ultravioleta-C; UVC 3X – três aplicações (dia 7,8 e 9) de Ultravioleta-C. Cu – cobre; Fe – ferro; Mn – manganês; Na – sódio; Zn – zinco.

De igual modo, a concentração de micronutrientes também não foi significativamente influenciada pela radiação UV-C (Figura 25). Contudo, para a concentração de zinco verificou-se uma tendência de diminuição, com o aumento do número de doses de UV-C, quando comparada com o controlo, traduzindo-se numa concentração de zinco inferior em 5,1% na aplicação única de UV-C e em 21,1% na tripla aplicação. Também se verificou uma tendência de aumento da concentração de ferro com a aplicação de três doses suplementares de UV-C, levando a um aumento em 53,4% em comparação com o controlo e em 50,3% quando comparado com a aplicação de uma dose suplementar.

4. Discussão

4.1. Influência da radiação UV-A nos parâmetros morfo-fisiológicos e na produção de alcaloides em *Catharanthus roseus*

Esta experiência permite entender como se pode otimizar a produção de alcaloides anticancerígenos nas cultivares de *C. roseus* selecionadas, percebendo quais as respostas das plantas após exposição a R:B com diferentes níveis de suplementação de UV-A. A promoção da produção de VBL e VCR é importante, como forma de responder à procura do mercado farmacêutico, que requer maiores quantidades, a preços mais acessíveis.

Através da análise dos resultados apresentado, verificou-se que a “S-Apr”, apresentou tendências significativas de menor produção, quando comparada com a “XDR-Polka” e a “Cora-Red”, para todos os tempos de suplementação. A “S-Apr” teve uma resposta inferior em parâmetros como: altura, número de folhas, número de flores, área foliar e no peso fresco e seco por planta.

Ao nível da altura da planta verificou-se um efeito significativo das cultivares, sendo que o tamanho reduzido das “S-Apr” em comparação com a “XDR-Polka” e a “Cora-Red”, teve influência do fator genético associado a cada cultivar. Neste caso, a alteração do número de horas de suplementação não apresentou qualquer tipo de perturbação na altura das plantas, não apresentando qualquer sinal de stress, indo contra o esperado em experiências com UV-A em outras culturas em que 4h/dia de UV-A levou a uma diminuição (20-30%) da altura da planta (Qian et al., 2020).

Relativamente ao número de folhas, verificou-se que a interação das cultivares com a aplicação de diferentes tempos de UV-A suplementar apresentou uma influência significativa no número de folhas, sendo a mais acentuada no caso da “XDR-Polka”, onde se verificou que o incremento do número de horas de suplementação levou a um maior número de folhas. Contudo, quando comparadas com valores controlo referentes às experiências anteriores à realizada neste trabalho (Silva, 2021), verifica-se que a aplicação de UV-A levou a uma redução do número de folhas (47% na ‘S-Apr’, 31% na ‘XDR-Polka’ e 37% na C-Red), podendo-se concluir que a suplementação de UV-A ativou o mecanismo de defesa, levando a poupanças de energia e prevenindo perdas de água, sendo um provável sinal de stress (Innes et al., 2018). Ao nível da área foliar, verificou-se apenas a influência por parte do fator cultivar, sendo assim, as diferenças

foram obtidas devido ao fator genético de cada cultivar. No caso da “Cora-Red”, verifica-se que apesar de um menor número de folhas em comparação com a “XDR-Polka”, apresenta valores semelhantes ao nível da área foliar. Podendo aferir-se então que a cultivar “Cora-Red” produz menos folhas, mas de maiores dimensões em comparação à “XDR-Polka”. Contudo, quando comparadas as áreas foliares de todos os tratamentos com o controlo (Silva, 2021), visualiza-se uma redução da área das mesmas, tal como obtido em He et al. (2021) para a alface. Estando estes resultados relacionados com a redução do número de folhas, como esperado aquando da aplicação de tratamentos UV, em que levou a que as plantas diminuíssem a sua área foliar, resultando no aumento da espessura das folhas (Innes et al., 2018).

O peso seco das folhas é um parâmetro importante por ser nas folhas onde estão concentradas a VBL e a VCR. Verificou-se a existência de um efeito significativo entre as variedades e o tempo de suplementação com UV-A. No caso da “S-Apr”, o aumento do número de horas de UV-A, apresentou uma tendência de diminuição no peso seco das folhas, já no caso da “XDR-Polka” e da “Cora-Red” verificou-se tendências de aumento do peso seco, através do aumento do tempo de aplicação. Mais concretamente, no caso da “XDR-Polka”, a diferença entre os tratamentos de 2h e as 6h de UV-A, é significativa. Essas diferentes respostas, para as diferentes cultivares podem resultar do fator genético. Quando comparadas com as plantas do controlo (Silva, 2021), para “Cora-Red” e da “XDR-Polka” verificou-se uma redução do peso seco das folhas por planta, podendo este ser explicado pela já referida redução do número de folhas por planta. No caso da “S-Apr”, apesar de terem um menor número de folhas e de área foliar, mantiveram peso seco das folhas semelhante para 2h de suplementação em relação ao controlo, percebendo-se assim, que apesar de em menor número e de menor dimensão, as folhas da “S-Apr” com 2h de UV-A tiveram um aumento na produção de matéria seca.

Ao nível da taxa fotossintética, é importante perceber como é que o aumento da exposição de UV-A afeta a eficiência fotossintética, percebendo como as plantas reagem ao ambiente à sua volta. Contudo, nenhum efeito significativo foi encontrado para a interação entre a cultivar e o tempo de aplicação de UV-A suplementar, nem para os fatores individualmente. Quando comparados com os resultados obtidos no controlo (Prada, 2020; Silva, 2021) não se verificou diferenças substanciais, tal como referido em Chen et al. (2019), onde se verificou que a aplicação de UV-A não afeta a taxa fotossintética.

Relativamente à produção de alcaloides é necessário perceber se a aplicação de UV-A suplementar se traduz num incremento das concentrações de CAT, VDL, VLB, VCR. Para as concentrações de alcaloides, verificou-se que a interação “cultivar x tempo de aplicação de UV-A suplementar” possui um efeito significativo. De modo geral, a cultivar “Cora-Red”, apresentou valores de concentrações para todos os alcaloides superiores em comparação com as restantes cultivares. Para todas as cultivares verifica-se tendências diferentes em relação ao aumento do número de horas de UV-A, podendo ser explicados por fatores genéticos. No caso da “S-Apr”, verifica-se uma tendência de diminuição das concentrações para todos os alcaloides consoante o aumento do número de horas de suplementação de UV-A. Relativamente à “XDR-Polka”, apenas se verifica uma ligeira tendência no caso dos dois alcaloides anticancerígenos (VBL e VCR), sendo que para a VLB, o aumento do tempo de UV-A para 6h levou a um ligeiro aumento da concentração. Relativamente à concentração de VCR, verifica-se que para as 2h de UV-A obteve-se uma concentração média inferior quando comparada com as 4 e 6 horas. Para a “Cora-Red”, a aplicação de 4h de UV-A suplementar levou a valores significativamente mais altos da concentração de VCR, quanto às restantes concentrações tanto as 4h como as 6h apresentaram os valores significativamente superiores. Tanto para o somatório de concentrações dos alcaloides anticancerígenos (VBL+VCR) como para o total de todos os alcaloides medidos (CAT+VDL+VBL+VCR), verificaram-se as mesmas tendências referidas acima. Concluindo-se que entre os tratamentos aplicados, os melhores resultados foram obtidos com a “Cora-Red” exposta a 4h de UV-A suplementar. Comparativamente ao controlo (Silva, 2021), verificou-se que a concentração de VBL foi aumentada em todas as variedades, para todos tratamentos, sendo que para a “S-Apr” o maior aumento consistiu em 200% para 2h de UV-A, no caso da “XDR-Polka” em 257% para 6h e em 608% para 4h em “Cora-Red”. Relativamente à VCR verificou-se um decréscimo significativo quando aplicado o UV-A, exceto para a 2h em “S-Apr”, 6h na “XDR-Polka” e 4h na “Cora-Red”, onde não se registou diferenças comparando com o controlo. A nível geral, verificou-se que comparado com o controlo, as concentrações de alcaloides são superiores através da aplicação de UV-A, tal como em Ouwerkerk et al. (1999), onde se verificou que a produção de alcaloides pode ser promovida com aplicação de UV-A.

Através da análise de todos os resultados verifica-se que a aplicação de horas suplementares de UV-A, permite a obtenção de uma maior produção de alcaloides. Entre as variedades selecionadas e os tempos de suplementação escolhidos, a “Cora-Red” foi a que em nível geral apresentou resultados mais interessantes, para o objetivo

pretendido. A nível do tempo de suplementação, como descrito acima, obtiveram-se melhores resultados para diferentes tempos de aplicação de UV-A, consoante a variedade. Contudo, no caso de produção de diversas variedades em simultâneo, a suplementação de 4h de UV-A suplementar, foi a que apresentou resultados satisfatórios para todas as variedades.

4.2. Influência da suplementação de luz UV-C no crescimento e qualidade de microverdes

Esta experiência permitiu perceber o efeito da suplementação de UV-C no crescimento e na qualidade de microverdes de mostarda vermelha, tendo como objetivo a promoção dos mesmos, pois são produtos com valor associado devido ao seu interesse gastronómico e nutricional.

Ao nível da altura da planta verificou-se um efeito significativo do número de doses de suplementação com UV-C. A aplicação de três doses de UV-C levou a um decréscimo na altura dos microverdes, contrariamente a aplicação de uma dose suplementar não levou a diferenças significativas na altura comparativamente com o controlo. O sucedido vem de encontro com o referido em Bridgen (2016), onde se verificou que a aplicação de doses baixas de UV-C não possuem efeitos significativos na altura da planta. Também se verificou que a aplicação de doses elevadas de UV-C levaram a que as plantas ficassem queimadas, coisa que não se verificou nesta experiência.

Relativamente à produtividade e peso fresco por tabuleiro verificou-se um efeito significativo do número de doses de suplementação de UV-C, sendo que a aplicação de uma única dose de UV-C levou a um incremento significativo nos dois parâmetros. A aplicação de três doses de UV-C não levou a qualquer tipo de diferença significativa quando comparada com o controlo. O ocorrido corrobora com (Darras et al., 2020), onde se verificou que aplicação de doses baixas de UV-C levaram a um aumento da produtividade e do peso fresco em tomateiros.

Em relação às concentrações de macro e micronutrientes não se verificou nenhum efeito significativo por parte do número de doses de aplicação de UV-C suplementar, contudo verificaram-se tendências de: aumento na concentração de potássio quando aplicada uma única dose de UV-C; diminuição da concentração de

zinco, com o aumento do número de doses do UV-C; aumento da concentração de ferro com a suplementação de UV-C em três doses. Os resultados obtidos vão de encontro com os valores determinados em (Olaiya et al., 2016), onde não se verificaram diferenças significativas nas concentrações de Ca, Na e Fe após a aplicação de UV-C em tomate e em pepino, já no caso do Mg, verificou-se um aumento com a aplicação de UV-C, podendo-se inferir que seria necessário um maior tempo de exposição por tratamento, para obter resultados semelhantes nos microverdes de mostarda vermelha. No caso do K, também se verificou um aumento significativo da concentração com a aplicação de UV-C (Olaiya et al., 2016; Sidibé et al., 2021), tal como após a aplicação de uma dose de UV-C suplementar. Em Sidibé et al. (2021), também não se verificou diferenças significativas após a exposição a UV-C, na concentração de P, Mn e Zn. No caso do Cu, a aplicação de UV-C levou a uma redução significativa na sua concentração, podendo-se inferir que as quantidades de UV-C suplementar aplicadas na experiência com microverdes não foram altas suficiente para levar a essa redução. Para todos os tratamentos verificou-se que de todos os macro e micronutrientes analisados, os macronutrientes constituem em cerca de 99,8% de todos os minerais da análise, equiparando-se aos valores obtidos no trabalho de Xiao et al. (2016) para brássicas. O potássio é o elemento mais presente em todos os tratamentos, com percentagens entre os 64,3-67,2%, aproximando-se também do valor quantificado de 65% (Xiao et al., 2016). A nível geral, a aplicação única de UV-C foi a que, em média, apresentou uma maior concentração geral de macro e micronutrientes, resultando numa tendência de aumento na ordem dos 8,9%, quando comparada com o controlo. Já a aplicação de três doses de UV-C, resultou numa redução na ordem dos 1,4% em comparação com o controlo.

Assim, é possível verificar-se que a suplementação única de UV-C nos microverdes de mostarda vermelha apresentaram resultados interessantes tanto a nível da análise mineral como a nível produtivo. A aplicação de uma dose suplementar de UV-C apresentou um peso por tabuleiro 26% superior ao controlo e uma produtividade superior em 28%, para além do incremento de 8,9% a nível das concentrações de macro e micronutrientes, mostrando que a aplicação de UV-C permite induzir stresses benéficos a estes microverdes, desde que o seu doseamento seja controlado, visto que quando aplicadas três doses de UV-C, obteve-se plantas mais pequenas (22%) quando comparado com o controlo e uma aplicação, além de não se ter verificado diferenças significativas na produtividade e peso por tabuleiro em relação ao controlo.

Conclusões e trabalhos futuros

Com este trabalho é possível concluir que a aplicação de UV-A e UV-C, desde que em doses horméticas, contribui de forma positiva na produção de *C.roseus* e de microverdes de mostarda vermelha, respetivamente. No caso da *C. roseus* verificou-se que a suplementação de UV-A possibilita o aumento da produção de alcaloides, especialmente no caso da variedade “Cora-Red”, apesar de levar a reduções em certos parâmetros fisiológicos, como número de folhas e área foliar. Em relação aos microverdes, a aplicação de UV-C suplementar apresentou resultados interessantes a nível produtivos, como o aumento do peso por tabuleiro e da produtividade. Além disso, mostrou potencial a nível do incremento do teor de minerais.

Tendo em conta a relevância dessas culturas, devido à tendência de crescimento do consumo dos microverdes e da necessidade de extrações de alcaloides anticancerígenos devido ao aumento da incidência do cancro na população mundial, os resultados obtidos mostram um caminho a seguir na melhoria da qualidade desses produtos, tanto a nível produtivo e nutricional, através das aplicações/suplementações de UV-A e/ou UV-C.

Em trabalhos futuros seria de grande interesse explorar diferentes intensidades e tempos de suplementação de UV-C, permitindo assim perceber qual a combinação de parâmetros de aplicação que leva a uma melhor produtividade, bem como perceber a resposta de outras cultivares de microverdes à exposição do UV-C. Em relação ao trabalho com a *C.roseus*, seria de grande interesse explorar se o efeito da suplementação de 3h ou 5h de UV-A, levariam a um equilíbrio entre os bons resultados dos tempos testados. Seria também relevante experimentar a suplementação com UV-C ou até UV-B.

Assim, é possível verificar que a aplicação de UV-A apresenta bons resultados na promoção da produção de alcaloides. No caso da UV-C, verifica-se que a mesma possui potencial a nível da promoção de qualidade e produtividade, conseguindo assim contribuir para a otimização das produções em SPV.

Referências Bibliográficas

- Agarwal, S., Chettri, N., Bisoyi, S., Tazeen, A., Vedamurthy, A. B., Krishna, V., & Hoskeri, H. J. (2011). EVALUATION OF IN-VITRO ANTHELMINTHIC ACTIVITY OF CATHARANTHUS ROSEUS EXTRACT. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Drug Research*, 211-213.
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2019). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, 178, 9-33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017>
- Al-Kodmany, K. (2018). The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. *Buildings*, 8(2), 24. <https://www.mdpi.com/2075-5309/8/2/24>
- Allende, A. (2004). Microbial and quality changes in minimally processed baby spinach leaves stored under super atmospheric oxygen and modified atmosphere conditions. *Postharvest Biology and Technology*, v. 33(no. 1), pp. 51-59-2004 v.2033 no.2001. <https://handle.nal.usda.gov/10113/16324>
- Ampim, P., Obeng, E., Gonzalez, E., Weerasooriya, A., Osuji, G., & Myers, D. (2020). The Response of Egyptian Spinach and Vegetable Amaranth Microgreens to Different Light Regimes.
- Asseng, S., Guarin, J., Raman, M., Monje, O., Kiss, G., Despommier, D., Meggers, F., & Gauthier, P. (2020). Wheat yield potential in controlled-environment vertical farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 202002655. <https://doi.org/10.1073/pnas.2002655117>
- Barrales-Cureño, H. J. (2015). Pharmacological applications and in vitro biotechnological production of anticancer alkaloids of Catharanthus roseus. *Biotechnologia Aplicada*, 32, 1101-1110.
- Barrales-Cureño, H. J., Cesar, R., Garcia, I., López-Valdez, L., Jesús, A., Cortés Ruiz, J., Sanchez-Herrera, L., Caballero, M., Salazar-Magallón, J., Espinoza-Pérez, J., & Montoya, J. (2019). Alkaloids of Pharmacological Importance in Catharanthus roseus. In (pp. 1-18). <https://doi.org/10.5772/intechopen.82006>
- Beacham, A. M., Vickers, L. H., & Monaghan, J. M. (2019). Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(3), 277-283. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214>
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>

- Bhutkar, M., & Bhise, S. B. (2011). Comparative studies on antioxidant properties of *catharanthus rosea* and *catharanthus alba*. *International Journal of PharmTech Research*, 3, 1551-1556.
- Bian, Z. H., Yang, Q. C., & Liu, W. K. (2015). Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(5), 869-877. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.6789>
- Brazaitytė, A., Duchovskis, P., Urbonavičiūtė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Sakalauskaitė, J., Šabajevienė, G., Sirtautas, R., & Novičkovas, A. (2010). The effect of light-emitting diodes lighting on the growth of tomato transplants. *Zemdirbyste-Agriculture*, 97(2), 89-98.
- Brazaitytė, A., Sakalauskienė, S., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Viršilė, A., Novičkovas, A., Sirtautas, R., Miliauskienė, J., Vaštakaitė, V., Dabašinskas, L., & 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/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.077>
- Bridgen, M. P. (2016). Using ultraviolet-C (UV-C) irradiation on greenhouse ornamental plants for growth regulation.
- CABI. (2015). *Catharanthus roseus (Madagascar periwinkle)*. CABI. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/16884#tosummaryOfInvasiveness>
- CABI. (2017). *Brassica juncea (mustard)*. CABI. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/91760#todescription>
- Chen, M., & Blankenship, R. E. (2011). Expanding the solar spectrum used by photosynthesis. *Trends Plant Sci*, 16(8), 427-431. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.03.011>
- Chen, Y., Li, T., Yang, Q., Zhang, Y., Zou, J., Bian, Z., & Wen, X. (2019). UVA Radiation Is Beneficial for Yield and Quality of Indoor Cultivated Lettuce [Original Research]. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01563>
- Clark, A., Ellison, M., Robinson, G., & Hill, T. R. (2022). Consumer perceptions of vertical farming with a focus on the catering industry. *Proceedings of the Nutrition Society*, 81(OCE5), E217, Article E217. <https://doi.org/10.1017/S0029665122002506>
- Costa, É. L. G., Farnese, F. d. S., de Oliveira, T. C., Rosa, M., Rodrigues, A. A., Resende, E. C., Januario, A. H., & Silva, F. G. (2021). Combinations of Blue and Red LEDs Increase the Morphophysiological Performance and Furanocoumarin

- Production of *Brosimum gaudichaudii* Trécul in vitro [Original Research]. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.680545>
- Craver, J. K., Boldt, J. K., & Lopez, R. G. (2018). Radiation Intensity and Quality from Sole-source Light-emitting Diodes Affect Seedling Quality and Subsequent Flowering of Long-day Bedding Plant Species. *HortScience horts*, 53(10), 1407-1415. <https://doi.org/10.21273/hortsci13228-18>
- Darras, A. I., Tsikaloudakis, G., Lycoskoufis, I., Dimitriadis, C., & Karamousantas, D. (2020). Low doses of UV-C irradiation affects growth, fruit yield and photosynthetic activity of tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 267, 109357. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109357>
- de Oliveira, F. B., Forbes, H., Schaefer, D., & Syed, J. M. (2020). Lean Principles in Vertical Farming: A Case Study. *Procedia CIRP*, 93, 712-717. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.017>
- de Oliveira, I. R., Crizel, G. R., Severo, J., Renard, C., Chaves, F. C., & Rombaldi, C. V. (2016). Preharvest UV-C radiation influences physiological, biochemical, and transcriptional changes in strawberry cv. Camarosa. *Plant Physiol Biochem*, 108, 391-399. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.08.012>
- Delden, S., Sharathkumar, M., Butturini, M., Graamans, L., Heuvelink, E., Kacira, M., Kaiser, E., Klammer, R., Klerkx, L., Kootstra, G., Loeber, A., Schouten, R., Stanghellini, C., Ieperen, W., Verdonk, J., Violet-Chabrand, S., Woltering, E., Van de Zedde, R., Zhang, Y., & Marcelis, L. F. M. (2021). Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. *Nature Food*, 2. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00402-w>
- Dou, H., Niu, G., Gu, M., & Masabni, J. G. (2017). Effects of Light Quality on Growth and Phytonutrient Accumulation of Herbs under Controlled Environments. *Horticulturae*, 3(2), 36. <https://www.mdpi.com/2311-7524/3/2/36>
- Dutta, A., Taneja, J., Rai, S. P., Singh, D., Kumar, S., & Sen, J. (2005). Expression of terpenoid indole alkaloid biosynthetic pathway genes corresponds to accumulation of related alkaloids in *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. *Planta*, 220, 376-383. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1380-9>
- Ebrahim, R., Abdelrazek, A., El-Shora, H., & El-Bediwi, A. B. (2022). Ultraviolet Effect on Internal Chemical Composition, Phenolic and Glutathione of Yellow Mustard. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences. C, Physiology and Molecular Biology*, 14(1), 337-344. <https://doi.org/10.21608/eajbsc.2022.231287>

- Fankhauser, C., & Staiger, D. (2002). Photoreceptors in *Arabidopsis thaliana*: light perception, signal transduction and entrainment of the endogenous clock. *Planta*, 216(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0831-4>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., & Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Foyer, C., Lelandais, M., & Kunert, K. (1994). Photooxidative stress in plants. *Physiologia Plantarum*, 92, 696-717. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb03042.x>
- Franklin, K. A., & Whitelam, G. C. (2005). Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. *Ann Bot*, 96(2), 169-175. <https://doi.org/10.1093/aob/mci165>
- Frazie, M. D., Kim, M. J., & Ku, K. M. (2017). Health-Promoting Phytochemicals from 11 Mustard Cultivars at Baby Leaf and Mature Stages. *Molecules*, 22(10). <https://doi.org/10.3390/molecules22101749>
- Fukuda, N. (2019). Chapter 2.2 - Plant Growth and Physiological Responses to Light Conditions. In M. Anpo, H. Fukuda, & T. Wada (Eds.), *Plant Factory Using Artificial Light* (pp. 71-77). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00008-7>
- Fukuyama, T., Ohashi-Kaneko, K., Hirata, K., Muraoka, M., & Watanabe, H. (2017). Effects of Ultraviolet A Supplemented with Red Light Irradiation on Vinblastine Production in *Catharanthus roseus*. *Environmental Control in Biology*, 55(2), 65-69. <https://doi.org/10.2525/ecb.55.65>
- Fukuyama, T., Ohashi-Kaneko, K., Ono, E., & Watanabe, H. (2013). Growth and alkaloid yields of *Catharanthus roseus* (L.) G. Don cultured under red and blue LEDs. *Shokubutsu Kankyo Kogaku*, 25(4), 175-182. <https://doi.org/10.2525/shita.25.175>
- Fukuyama, T., Ohashi, K., & Watanabe, H. (2015). Estimation of Optimal Red Light Intensity for Production of the Pharmaceutical Drug Components, Vindoline and Catharanthine, Contained in *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. *Environmental Control in Biology*, 53, 217-220. <https://doi.org/10.2525/ecb.53.217>
- Gajalakshmi, S., Vijayalakshmi, S., & Devi, R. V. (2013). Pharmacological activities of *Catharanthus roseus*: a perspective review. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, 4(2), 431-439.
- Gerovac, J. R., Craver, J. K., Boldt, J. K., & Lopez, R. G. (2016). Light Intensity and Quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Growth, Morphology, and

- Nutrient Content of Brassica Microgreens. *HortScience*, 51(5), 497-503.
<https://doi.org/10.21273/hortsci.51.5.497>
- Gobbi, P. G., Broglia, C., Merli, F., Dell'Olio, M., Stelitano, C., Iannitto, E., Federico, M., Bertè, R., Luisi, D., Molica, S., Cavalli, C., Dezza, L., & Ascari, E. (2003). Vinblastine, bleomycin, and methotrexate chemotherapy plus irradiation for patients with early-stage, favorable Hodgkin lymphoma. *Cancer*, 98(11), 2393-2401. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cncr.11807>
- He, R., Zhang, Y., Song, S., Su, W., Hao, Y., & Liu, H. (2021). UV-A and FR irradiation improves growth and nutritional properties of lettuce grown in an artificial light plant factory. *Food Chemistry*, 345, 128727. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128727>
- Hirata, K., Asada, M., Yatani, E., Miyamoto, K., & Miura, Y. (1993). Effects of Near-Ultraviolet Light on Alkaloid Production in *Catharanthus roseus* Plants. *Planta Med*, 59(1), 46-50. <https://doi.org/10.1055/s-2006-959602>
- Hirata, K., Horiuchi, M., Asada, M., Ando, T., Miyamoto, K., & Miura, Y. (1992). Stimulation of dimeric alkaloid production by near-ultraviolet light in multiple shoot cultures of *Catharanthus roseus*. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 74(4), 222-225. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0922-338X\(92\)90114-A](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0922-338X(92)90114-A)
- Hogewoning, S., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., 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>
- Innes, S. N., Solhaug, K. A., Arve, L. E., & Torre, S. (2018). UV radiation as a tool to control growth, morphology and transpiration of poinsettia (*Euphorbia pulcherrima*) in variable aerial environments. *Scientia Horticulturae*, 235, 160-168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.067>
- Joly, B. S., Coppo, P., & Veyradier, A. (2017). Thrombotic thrombocytopenic purpura. *Blood, The Journal of the American Society of Hematology*, 129(21), 2836-2846.
- Kopsell, D. A., Pantanizopoulos, N. I., Sams, C. E., & Kopsell, D. E. (2012). Shoot tissue pigment levels increase in 'Florida Broadleaf' mustard (*Brassica juncea* L.) microgreens following high light treatment. *Scientia Horticulturae*, 140, 96-99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.04.004>
- Kyriacou, M. C., De Pascale, S., Kyratzis, A., & Roupheal, Y. (2017). Microgreens as a component of space life support systems: A cornucopia of functional food. *Frontiers in Plant Science*, 1587.

- Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Graziani, G., Pannico, A., Soteriou, G. A., Giordano, M., Ritieni, A., De Pascale, S., & Rouphael, Y. (2019). Functional quality in novel food sources: Genotypic variation in the nutritive and phytochemical composition of thirteen microgreens species. *Food Chemistry*, 277, 107-118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.098>
- Kyriacou, M. C., Rouphael, Y., Di Gioia, F., Kyrtatzis, 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, 103-115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.005>
- Lambin, E. F., Gibbs, H., Ferreira, L., Grau, R., Mayaux, P., Meyfroidt, P., Morton, D., Rudel, T. K., Gasparri, N., & Munger, J. (2013). Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. *Global Environmental Change*, 23, 892-901. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.05.005>
- Lanoue, J., Leonardos, E. D., & Grodzinski, B. (2018). Effects of Light Quality and Intensity on Diurnal Patterns and Rates of Photo-Assimilate Translocation and Transpiration in Tomato Leaves [Original Research]. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00756>
- Lanoue, J., Leonardos, E. D., & Grodzinski, B. (2019). 4.68 - Artificial Lighting Technologies for Agricultural Production. In M. Moo-Young (Ed.), *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)* (pp. 818-832). Pergamon. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64046-8.00468-7>
- Lazzarini, L., Pacheco, F., Torres, S., Coelho, A., Medeiros, A. P., Medeiros, R., Bertolucci, S., Bertolucci, V., Brasil, J., Pinto, J. E., Doria, J., & Soares, J. (2017). USO DE DIODOS EMISSORES DE LUZ (LED) NA FISILOGIA DE PLANTAS CULTIVADAS – REVISÃO USE OF LIGHT-EMITTING DIODE (LED) IN THE PHYSIOLOGY OF CULTIVATED PLANTS – REVIEW. 137-144. <https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v16n1p137-144>
- Lee, M.-J., Son, J. E., & Oh, M.-M. (2014). Growth and phenolic compounds of *Lactuca sativa* L. grown in a closed-type plant production system with UV-A, -B, or -C lamp. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(2), 197-204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.6227>
- Levingston, R., & Zamora, R. (1983). Medicine Trees of the Tropics. *Unasylva*, 35. <http://hdl.handle.net/10535/8426>
- Li, H., Tang, C., & Xu, Z. (2013). The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis in vitro. *Scientia Horticulturae*, 150, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.009>

- Li, Y., Xin, G., Wei, M., Shi, Q., Yang, F., & Wang, X. (2017). Carbohydrate accumulation and sucrose metabolism responses in tomato seedling leaves when subjected to different light qualities. *Scientia Horticulturae*, 225, 490-497.
- Lin, C. (2000). Plant blue-light receptors. *Trends in Plant Science*, 5(8), 337-342. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01687-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01687-3)
- Liping, K. (2013). Postharvest biology, quality and shelf life of buckwheat microgreens. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie*, v. 51(no. 1), pp. 73-78-2013 v.2051 no.2011. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.017>
- Liu, J., Zhu, J., Tang, L., Wen, W., Lv, S., & Yu, R. (2014). Enhancement of vindoline and vinblastine production in suspension-cultured cells of *Catharanthus roseus* by artemisinic acid elicitation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(1), 175-180. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1432-z>
- Liu, K., Gao, M., Jiang, H., Ou, S., Li, X., He, R., Li, Y., & Liu, H. (2022). Light Intensity and Photoperiod Affect Growth and Nutritional Quality of Brassica Microgreens. *Molecules*, 27(3), 883. <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/3/883>
- Lobiuc, A., Vasilache, V., Oroian, M., Stoleru, T., Burducea, M., Pintilie, O., & Zamfirache, M.-M. (2017). Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in Acyanic and Cyanic *Ocimum basilicum* L. Microgreens. *Molecules*, 22(12), 2111. <https://www.mdpi.com/1420-3049/22/12/2111>
- Lourenço, M. S. C., Prada, J. E. C., Heuvelink, E., & Carvalho, S. M. P. (2022). Production of *Catharanthus roseus* in vertical farming systems : dynamic analyses of plant morphological responses of nine cultivars to N-UV supplementation. *Acta Horticulturae*, 1337, 217-224. <https://edepot.wur.nl/569630>
- Loyola-Vargas, V. M., Sánchez-Iturbe, P. G., Canto-Canché, B., Gutiérrez-Pacheco, L. C., Galaz-Ávalos, R. M., & Moreno-Valenzuela, O. A. (2004). Biosíntesis de los alcaloides indólicos. Una revisión crítica. *Revista de la Sociedad Química de Mexico*, 48, 67-94.
- Macedo, A. F., Leal-Costa, M. V., Tavares, E. S., Lage, C. L. S., & Esquibel, M. A. (2011). The effect of light quality on leaf production and development of in vitro-cultured plants of *Alternanthera brasiliana* Kuntze. *Environmental and Experimental Botany*, 70(1), 43-50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.012>
- Mariz-Ponte, N., Martins, S., Gonçalves, A., Correia, C. M., Ribeiro, C., Dias, M. C., & Santos, C. (2019). The potential use of the UV-A and UV-B to improve tomato

- quality and preference for consumers. *Scientia Horticulturae*, 246, 777-784. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.058>
- Marrichi, A. H. C. (2009). *Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de Eucalyptus e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor* Universidade de São Paulo].
- Martínez-Sánchez, A., Guirao-Martínez, J., Martínez, J. A., Lozano-Pastor, P., & Aguayo, E. (2019). Inducing fungal resistance of spinach treated with preharvest hormetic doses of UV-C. *LWT*, 113, 108302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108302>
- Martínez-Sánchez, A., Luna, M. C., Selma, M. V., Tudela, J. A., Abad, J., & Gil, M. I. (2012). Baby-leaf and multi-leaf of green and red lettuces are suitable raw materials for the fresh-cut industry. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.07.010>
- Martínez-Zamora, L., Castillejo, N., Gómez, P. A., & Artés-Hernández, F. (2021). Amelioration Effect of LED Lighting in the Bioactive Compounds Synthesis during Carrot Sprouting. *Agronomy*, 11(2), 304. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/2/304>
- Memelink, J., Kijne, J. W., van der Heijden, R., & Verpoorte, R. (2001). Genetic modification of plant secondary metabolite pathways using transcriptional regulators. *Adv Biochem Eng Biotechnol*, 72, 103-125. https://doi.org/10.1007/3-540-45302-4_4
- Miao, N., Yun, C., Shi, Y., Gao, Y., Wu, S., Zhang, Z., Han, S., Wang, H., & Wang, W. (2022). Enhancement of flavonoid synthesis and antioxidant activity in *Scutellaria baicalensis* aerial parts by UV-A radiation. *Industrial Crops and Products*, 187, 115532. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115532>
- Miao, Y., Chen, Q., Qu, M., Gao, L., & Hou, L. (2019). Blue light alleviates 'red light syndrome' by regulating chloroplast ultrastructure, photosynthetic traits and nutrient accumulation in cucumber plants. *Scientia Horticulturae*, 257, 108680. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108680>
- Mir, S. A., Shah, M. A., & Mir, M. M. (2017). Microgreens: Production, shelf life, and bioactive components. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2730-2736. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1144557>
- Mishra, J. N., & Verma, N. K. (2017). A brief study on *Catharanthus roseus*: A review. *Intern J Res Pharmacy Pharmaceut Sci*, 2(2), 20-23.

- Moreno, P. R. H., van der Heijden, R., & Verpoorte, R. (1995). Cell and tissue cultures of *Catharanthus roseus*: A literature survey. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 42(1), 1-25. <https://doi.org/10.1007/BF00037677>
- Naznin, T., Lefsrud, M., Gravel, V., & Hao, X. (2016). Using different ratios of red and blue LEDs to improve the growth of strawberry plants. *Acta Horticulturae*, 1134, 125-130. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.17>
- Nguyen, T. K. L., Cho, K. M., Lee, H. Y., Cho, D. Y., Lee, G. O., Jang, S. N., Lee, Y., Kim, D., & Son, K.-H. (2021). Effects of White LED Lighting with Specific Shorter Blue and/or Green Wavelength on the Growth and Quality of Two Lettuce Cultivars in a Vertical Farming System. *Agronomy*, 11(11), 2111. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/11/2111>
- Nishimura, T., Zobayed, S., Kozai, T., & Goto, E. (2006). Effect of Light Quality of Blue and Red Fluorescent Lamps on Growth of St. John's Wort (*Hypericum perforatum* L.). *Shokubutsu Kankyo Kogaku*, 18, 225-229. <https://doi.org/10.2525/shita.18.225>
- O'Sullivan, C. A., McIntyre, C. L., Dry, I. B., Hani, S. M., Hochman, Z., & Bonnett, G. D. (2020). Vertical farms bear fruit. *Nature Biotechnology*, 38(2), 160-162. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0400-z>
- Oakenfull, R. J., & Davis, S. J. (2017). Shining a light on the Arabidopsis circadian clock. *Plant Cell Environ*, 40(11), 2571-2585. <https://doi.org/10.1111/pce.13033>
- Okamoto, K., Yanagi, T., & Kondo, S. (1997). GROWTH AND MORPHOGENESIS OF LETTUCE SEEDLINGS RAISED UNDER DIFFERENT COMBINATIONS OF RED AND BLUE LIGHT.
- Olaiya, C., Karigidi, K., Ogunleye, A., & Kareem, R. (2016). Possible Enhancement of Nutrients and Antioxidant Capacity of Two Tropical Fruits by UV Radiation Treatment. 46.
- Ouwerkerk, P. B. F., Hallard, D., Verpoorte, R., & Memelink, J. (1999). Identification of UV-B light-responsive regions in the promoter of the tryptophan decarboxylase gene from *Catharanthus roseus*. *Plant Molecular Biology*, 41(4), 491-503. <https://doi.org/10.1023/A:1006321100550>
- Ouzounis, T., Rosenqvist, E., & Ottosen, C.-O. (2015). Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review. *HortScience horts*, 50(8), 1128-1135. <https://doi.org/10.21273/hortsci.50.8.1128>
- Palacios Rojas, N., & Leech, M. (2004). Análisis de iridoides y expresión de genes que codifican enzimas tempranas en la síntesis de alcaloides indol terpenoicos en *Catharanthus roseus* Analysis of iridoids content and expression studies of genes

- encoding early enzymes in the indol terpenoid biosynthesis pathway in *Catharanthus roseus*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 6.
- Patil, P., & Ghosh, J. (2010). Antimicrobial Activity of *Catharanthus roseus* – A Detailed Study. *British Journal of Pharmacology and Toxicology*, 1, 40-44.
- Pinto, E., Almeida, A. A., Aguiar, A. A., & Ferreira, I. M. (2015). Comparison between the mineral profile and nitrate content of microgreens and mature lettuces. *Journal of Food Composition and Analysis*, 37, 38-43.
- Prada, J. (2020). *Impact of near-UV light on several Catharanthus roseus cultivars: a morpho-physiological analysis* <https://hdl.handle.net/10216/132124>
- Qian, M., Rosenqvist, E., Flygare, A.-M., Kalbina, I., Teng, Y., Jansen, M. A. K., & Strid, Å. (2020). UV-A light induces a robust and dwarfed phenotype in cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) without affecting fruit yield. *Scientia Horticulturae*, 263, 109110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109110>
- Ragaert, P., Verbeke, W., Devlieghere, F., & Debevere, J. (2004). Consumer perception and choice of minimally processed vegetables and packaged fruits. *Food Quality and Preference*, 15(3), 259-270. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(03\)00066-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-3293(03)00066-1)
- Runkle, E. (2016). *Red Light and Plant Growth*. GPN. Retrieved 30 August 2022 from <https://gpnmag.com/article/red-light-and-plant-growth/>
- Runkle, E. (2017). *Effects of Blue Light on Plants*. GPN. Retrieved 31 August 2022 from <https://gpnmag.com/article/effects-of-blue-light-on-plants/>
- Runkle, E. (2018). *White LEDs for Plant Applications*. GPN. <https://gpnmag.com/article/white-leds-for-plant-applications/>
- Saiman, M. Z., Miettinen, K., Mustafa, N. R., Choi, Y. H., Verpoorte, R., & Schulte, A. E. (2018). Metabolic alteration of *Catharanthus roseus* cell suspension cultures overexpressing geraniol synthase in the plastids or cytosol. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 134(1), 41-53. <https://doi.org/10.1007/s11240-018-1398-5>
- Saini, R. K., Ko, E. Y., & Keum, Y.-S. (2017). Minimally processed ready-to-eat baby-leaf vegetables: Production, processing, storage, microbial safety, and nutritional potential. *Food Reviews International*, 33(6), 644-663. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1204614>
- Salama, I. M., Eliwa, N. E., & Mohamed, M. H. (2020). Effect of UV-A on vincristine biosynthesis and related peroxidase isozyme changes in *Catharanthus roseus*. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13(1), 808-814. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/16878507.2020.1777658>

- Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Sirtautas, R., Sakalauskienė, S., Jankauskienė, J., Duchovskis, P., & Novičkovas, A. (2012). THE IMPACT OF SUPPLEMENTARY SHORT-TERM RED LED LIGHTING ON THE ANTIOXIDANT PROPERTIES OF MICROGREENS.
- Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Viršilė, A., Miliuskienė, J., Vaštakaitė-Kairienė, V., & Duchovskis, P. (2019). Nutrient Levels in Brassicaceae Microgreens Increase Under Tailored Light-Emitting Diode Spectra [Original Research]. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01475>
- Schmelzer, G. H. (2022). *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. PROTA4U. <https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?h=M4&t=Catharanthus,roseus&p=Catharanthus+roseus#Synonyms>
- SharathKumar, M., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2020). Vertical Farming: Moving from Genetic to Environmental Modification. *Trends Plant Sci*, 25(8), 724-727. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.05.012>
- Shimizu, H., Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. (2011). Light Environment Optimization for Lettuce Growth in Plant Factory. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 605-609. <https://doi.org/https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02683>
- Sidibé, A., Charles, M. T., Nicolas, O., & Beaulieu, C. (2021). Preharvest UV-C affects lettuce resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *vitians* and quality. *Scientia Horticulturae*, 285, 110094. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110094>
- Silva, B. (2021). *Strategies to promote anti-cancer alkaloids production in Catharanthus roseus* <https://hdl.handle.net/10216/139599>
- Silva, M., Aragão, N., Barbosa, M., Jeronimo, E., & Carlin, S. (2008). Hormetic effect of glyphosate on the initial development of sugarcane. *Bragantia*, 68, 973-978.
- Sofo, A. (2020). UV-C rays to simulate the exposition of photosynthetic organisms to solar radiation in space environments. *International Journal of Plant Biology*, 2020. <https://doi.org/10.4081/pb.2020.8379>
- Sonawane, M. S. (2018). Status of vertical farming in India. *International Journal of Applied Science and Technology*, 9(4), 122-125.
- Sottomayor, M., & Barceló, A. R. (2006). The Vinca Alkaloids: From Biosynthesis and Accumulation in Plant Cells, to Uptake, Activity and Metabolism in Animal Cells. In R. Atta ur (Ed.), *Studies in Natural Products Chemistry* (Vol. 33, pp. 813-857). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1572-5995\(06\)80041-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1572-5995(06)80041-4)

- Sottomayor, M., Lopes Cardoso, I., Pereira, L. G., & Ros Barceló, A. (2004). Peroxidase and the biosynthesis of terpenoid indole alkaloids in the medicinal plant *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. *Phytochemistry Reviews*, 3(1), 159-171. <https://doi.org/10.1023/B:PHYT.0000047807.66887.09>
- Stevens, C., Khan, V. A., Lu, J. Y., Wilson, C. L., Pusey, P. L., Igwegbe, E. C. K., Kabwe, K., Mafolo, Y., Liu, J., Chalutz, E., & Droby, S. (1997). Integration of Ultraviolet (UV-C) Light with Yeast Treatment for Control of Postharvest Storage Rots of Fruits and Vegetables☆. *Biological Control*, 10, 98-103.
- Stevens, C., Khan, V. A., Lu, J. Y., Wilson, C. L., Pusey, P. L., Kabwe, M. K., Igwegbe, E. C. K., Chalutz, E., & Droby, S. (1998). The germicidal and hormetic effects of UV-C light on reducing brown rot disease and yeast microflora of peaches. *Crop Protection*, 17(1), 75-84. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(98\)80015-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0261-2194(98)80015-X)
- Tie, X., Huang, R.-J., Dai, W., Cao, J., Long, X., Su, X., Zhao, S., Wang, Q., & Li, G. (2016). Effect of heavy haze and aerosol pollution on rice and wheat productions in China. *Scientific Reports*, 6(1), 29612. <https://doi.org/10.1038/srep29612>
- 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(8), 1584. <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/8/1584>
- Touliatos, D., Dodd, I. C., & McAinsh, M. (2016). Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. *Food and Energy Security*, 5(3), 184-191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fes3.83>
- Tsormpatsidis, E., Henbest, R. G. C., Davis, F. J., Battey, N. H., Hadley, P., & Wagstaffe, A. (2008). UV irradiance as a major influence on growth, development and secondary products of commercial importance in Lollo Rosso lettuce 'Revolution' grown under polyethylene films. *Environmental and Experimental Botany*, 63(1), 232-239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.12.002>
- Twilley, D., & Lall, N. (2018). The role of natural products from plants in the development of anticancer agents. In *Natural Products and Drug Discovery* (pp. 139-178). Elsevier.
- United Nations. (2020). *Population*. UN. Retrieved 30 August 2022 from <https://www.un.org/en/global-issues/population>
- Urrestarazu, M., Burés, S., & Kotiranta, S. (2018). Artificial lighting in agriculture. 4-33. https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/iluminaci_n_artificial_en_agricuIt?e=8490508/57420774

- Van Rijswijk, C. (2010). *EU Fresh-cut Fruits and Vegetables Market Update*.
- Vásquez, H., Ouhibi, C., Forges, M., Lizzi, Y., Urban, L., & Aarouf, J. (2020). Hormetic doses of UV-C light decrease the susceptibility of tomato plants to *Botrytis cinerea* infection. *Journal of Phytopathology*, 168(9), 524-532. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jph.12930>
- Vasquez, H., Ouhibi, C., Lizzi, Y., Azzouz, N., Forges, M., Bardin, M., Nicot, P., Urban, L., & Aarouf, J. (2017). Pre-harvest hormetic doses of UV-C radiation can decrease susceptibility of lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.) to *Botrytis cinerea* L. *Scientia Horticulturae*, 222, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.017>
- Vaštakaitė-Kairienė, V., & Viršilė, A. (2015). *Light-emitting diodes (LEDs) for higher nutritional quality of Brassicaceae microgreens* (Vol. 1).
- Vaštakaitė-Kairienė, V., Viršilė, A., Brazaitytė, A., Samuoliene, G., J, J., Sirtautas, R., & Duchovskis, P. (2016). *THE EFFECT OF UV-A SUPPLEMENTAL LIGHTING ON ANTIOXIDANT PROPERTIES OF OCIMUM BASILICUM L. MICROGREENS IN GREENHOUSE*. <https://doi.org/10.15544/RD.2015.031>
- Vasukeshetty, Kalakotla, S., Jayaveera, K. N., & Allenki, V. (2016). A COMPARATIVE EVALUATION OF GYMNEMIC ACIDS AND EXTRACT OF SYLVESTRE FOR ITS ANTI-HYPERGLYCEMIC ACTIVITY. *INDO AMERICAN JOURNAL OF PHARMACEUTICAL RESEARCH*, 06, 6119-6124.
- Verdaguer, D., Jansen, M. A. K., Llorens, L., Morales, L. O., & Neugart, S. (2017). UV-A radiation effects on higher plants: Exploring the known unknown. *Plant Science*, 255, 72-81. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.11.014>
- Vicente-Tejedor, J., Marchena, M., Ramírez, L., García-Ayuso, D., Gómez-Vicente, V., Sánchez-Ramos, C., de la Villa, P., & Germain, F. (2018). Removal of the blue component of light significantly decreases retinal damage after high intensity exposure. *PloS one*, 13(3), e0194218.
- Wang, S., Zheng, Z., Weng, Y., Yu, Y., Zhang, D., Fan, W., Dai, R., & Hu, Z. (2004). Angiogenesis and anti-angiogenesis activity of Chinese medicinal herbal extracts. *Life Sciences*, 74(20), 2467-2478. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lfs.2003.03.005>
- Wilson, C. L., Ghaouth, A. E., Chalutz, E., Droby, S., Stevens, C., Lu, J. J.-Y., Khan, V. A., & Arul, J. (1994). Potential of induced resistance to control postharvest diseases of fruits and vegetables. *Plant Disease*, 78, 837-844.
- World Health Organization. (2022). *Cancer*. WHO. https://www.who.int/health-topics/cancer#tab=tab_1

- Wu, X., Beecher, G. R., Holden, J. M., Haytowitz, D. B., Gebhardt, S. E., & Prior, R. L. (2004). Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States. *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(12), 4026-4037.
- Xiao, Z., Codling, E., Luo, Y., Nou, X., Lester, G., & Wang, Q. (2016). Microgreens of Brassicaceae: Mineral composition and content of 30 varieties. *Journal of Food Composition and Analysis*, 49, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.04.006>
- Yang, J., Hendrix, D. A., & Giebultowicz, J. M. (2020). The dark side of artificial light. *The Biochemist*, 42(5), 32-35. <https://doi.org/10.1042/bio20200060>
- Yin, X., Singer, S. D., Qiao, H., Liu, Y., Jiao, C., Wang, H., Li, Z., Fei, Z., Wang, Y., Fan, C., & Wang, X. (2016). Insights into the Mechanisms Underlying Ultraviolet-C Induced Resveratrol Metabolism in Grapevine (*V. amurensis* Rupr.) cv. “Tonghua-3” [Original Research]. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00503>
- 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>
- Yorio, N. C., Goins, G. D., Kagie, H. R., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2001). Improving Spinach, Radish, and Lettuce Growth under Red Light-emitting Diodes (LEDs) with Blue Light Supplementation. *HortScience HortSci*, 36(2), 380-383. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.36.2.380>
- Zhou, Y., & Singh, B. R. (2002). Red light stimulates flowering and anthocyanin biosynthesis in American cranberry. *Plant Growth Regulation*, 38(2), 165-171. <https://doi.org/10.1023/A:1021322418740>
- Zhu, M., Geng, S., Chakravorty, D., Guan, Q., Chen, S., & Assmann, S. M. (2020). Metabolomics of red-light-induced stomatal opening in *Arabidopsis thaliana*: Coupling with abscisic acid and jasmonic acid metabolism. *Plant J*, 101(6), 1331-1348. <https://doi.org/10.1111/tpj.14594>

Anexo

Tabela 6 - Concentrações médias dos alcaloides analisados (catarantina (CAT), vindolina (VDL), anidrodrovinblastina (AVLB), vinblastina (VLB) e vincristina (VCR)), e respetiva soma dos mesmos, em µg/mg de peso fresco (PF), da *Catharanthus roseus* cvs. Sunstorm Apricot (S-Apr), XDR-Polka Dot (XDR-Polka) e Cora Red (C-Red), expostas a 16h diárias de R:B, num rácio de 2:1, com suplementação de 2h,4h e 6h de UV-A, com respetivo erro padrão associado. As diferentes letras correspondem às diferenças significativas da interação cultivar x tratamento luz.

cv.	UV-A (t)	CAT (µg/mg PF) (p=0,011)	VDL (µg/mg PF) (p=0,003)	AVBL (µg/mg PF) (p=0,048)	VLB (µg/mg PF) (p=0,001)	VCR (µg/mg PF) (p=0,001)	Total (µg/mg PF) (p=0,008)
S-Apr	2h	4,53±1,24 ^{ab}	11,40±2,74 ^b	0,59±0,27 ^b	0,003±0,002 ^b	0,001±1,6 e ^{-4b}	16,52±4,14 ^b
	4h	4,23±0,58 ^b	7,19±1,19 ^b	0,33±0,09 ^b	0,002±4,3e ^{-4b}	0,001±5,1 e ^{-5b}	11,76±1,49 ^b
	6h	3,74±0,19 ^b	7,99±0,10 ^b	0,23±0,02 ^b	0,002±6,0 e ^{-4b}	0,001±2,9 e ^{-6b}	11,96±0,30 ^b
XDR-Polka	2h	4,62±0,29 ^{ab}	14,23±0,62 ^{ab}	0,45±0,17 ^b	0,002±0,001 ^b	0,001±5,0 e ^{-5b}	19,30±0,89 ^{ab}
	4h	3,46±0,15 ^b	9,76±1,82 ^b	0,42±0,21 ^b	0,002±0,001 ^b	0,001±2,5 e ^{-4b}	13,64±1,98 ^b
	6h	4,71±1,01 ^{ab}	12,31±2,13 ^{ab}	0,75±0,34 ^b	0,003±0,001 ^b	0,001±1,7 e ^{-4b}	17,77±3,44 ^{ab}
C-Red	2h	4,83±0,58 ^{ab}	14,98±1,37 ^{ab}	0,56±0,20 ^a	0,005±0,002 ^{ab}	0,001±9,9 e ^{-5b}	20,37±2,07 ^{ab}
	4h	9,05±2,04 ^a	22,95±4,48 ^a	1,44±0,40 ^a	0,009±0,001 ^a	0,002±1,85 e ^{-4a}	33,45±6,80 ^a
	6h	5,77±0,928 ^{ab}	16,64±2,37 ^{ab}	0,89±0,45 ^a	0,004±0,001 ^{ab}	0,001±2,7 e ^{-4b}	23,30±3,58 ^{ab}