REVISTA AGROAMBIENTAL

Lista de Periódicos Disponível em Periódicos

ARTIGO ORIGINAL

Página inicial do periódico: REVAGRO

PELAGRA MOÇAMBIQUE

Plasticidade morfofisiológica e dinâmica de partição de biomassa de *Mentha arvensis* sob gradiente de intensidade luminosa

Morphophysiological plasticity and dynamics of biomass partitioning of Mentha arvensis under light intensity gradient

[1a] Yanick Leontino Langa, [b] Hemelyn Soares Magalhães, [c] Keila Jamille Alves Costa, [d] Gracinda Albino Luís

[a] *Centro Zonal Nordeste (CznD), Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), Moçambique.*
[b] *Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Brasil.*
[c] *Departamento de Biologia, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Brasil.*
[d] *Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Mussa Bin Bique, Nampula, Moçambique.*

Informações do Artigo

Palavras-Chaves:
Micropropagação;
Fotomorfogênese;
Plasticidade Fenotípica;
Biomassa Seca;
Planta Medicinal.

RESUMO

A radiação luminosa constitui um dos principais moduladores ecofisiológicos em sistemas in vitro, influenciando diretamente crescimento, partição de biomassa e mecanismos fotoprotetores. Este estudo avaliou as respostas morfofisiológicas e foto-oxidativas de Mentha arvensis ao gradiente de intensidade luminosa (28–130 µmol m^{-2} s^{-1}), utilizando delineamento inteiramente casualizado com cinco níveis de irradiância. A produção de biomassa total respondeu significativamente ao gradiente ($P < 0,001$), ajustando-se a um modelo quadrático robusto (R^2 ajust. = 0,50), com ponto ótimo em 103,3 µmol m^{-2} s^{-1}. A biomassa foliar apresentou padrão semelhante (R^2 ajust. = 0,60), refletindo priorização do aparato fotossintético sob irradiância intermediária. O crescimento da parte aérea exibiu curva quadrática inversa (R^2 ajust. = 0,397), com estiolamento pronunciado em baixa luz e morfologia mais robusta em intensidades intermediárias, enquanto a biomassa radicular mostrou resposta linear positiva até 97 µmol m^{-2} s^{-1}. Em alta irradiância (130 µmol m^{-2} s^{-1}), observou-se queda na biomassa e ativação de mecanismos foto-oxidativos, incluindo provável atuação de enzimas antioxidantes. A máxima eficiência de uso da luz (1,157 mg µmol^{-1} fóton) ocorreu em 51 µmol m^{-2} s^{-1}, e o limiar crítico para fotoinibição foi identificado em 94 µmol m^{-2} s^{-1}. Esses resultados revelam elevada plasticidade fenotípica de M. arvensis frente à luz e fornecem parâmetros ecofisiológicos precisos para otimizar protocolos de micropropagação e estratégias de cultivo visando maior produtividade e qualidade de metabólitos secundários.

***Keywords*:**
Micropropagation;
Photomorphogenesis;
Phenotypic Plasticity;
Dry Biomass
Medicinal Plant.

Light intensity is a key ecophysiological factor in in vitro systems, directly modulating growth, biomass partitioning, and photoprotective mechanisms. This study investigated the morphophysiological and photo-oxidative responses of Mentha arvensis to a light gradient (28–130 µmol m^{-2} s^{-1}) under a completely randomized design with five irradiance levels. Total biomass production exhibited a significant quadratic response ($P < 0.001$; adjusted $R^2 = 0.50$), with an optimum at 103.3 µmol m^{-2} s^{-1}. Leaf biomass followed a similar pattern (adjusted $R^2 = 0.60$), indicating prioritization of the photosynthetic apparatus under intermediate irradiance. Shoot length displayed an inverted quadratic curve (adjusted $R^2 = 0.397$), with pronounced etiolation under low light and more robust morphology at intermediate intensities. Root biomass showed a positive linear response up to 97 µmol m^{-2} s^{-1}. High irradiance (130 µmol m^{-2} s^{-1}) induced biomass decline and activation of photo-oxidative defense mechanisms, likely involving antioxidant enzymes. Maximum light-use efficiency (1.157 mg µmol^{-1} photon) occurred at 51 µmol m^{-2} s^{-1}, and the critical threshold for photoinhibition was identified at 94 µmol m^{-2} s^{-1}. These results highlight the high phenotypic plasticity of M. arvensis in response to light and provide precise ecophysiological parameters for optimizing micropropagation protocols and cultivation strategies aimed at maximizing productivity and secondary metabolite quality.

[1] Para correspondência: langa.yanick@gmail.com

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.17396746

Submetido: 15/10/2025 | Aceite: 20/10/2025

1. INTRODUÇÃO

A Família Lamiaceae representa um dos grupos botânicos mais importantes para a economia global das plantas aromáticas, destacando-se a espécie *Mentha arvensis* L. pelo seu alto valor industrial devido ao elevado teor e à composição química diferenciada de seus óleos essenciais. A análise química revela que os principais constituintes são os monoterpenos oxigenados, com destaque para o mentol (aprox. 45-77%), mentona (cerca de 5-9%), isomentona, e acetato de mentila, que conferem propriedades farmacológicas como analgésicas, anti-inflamatórias e refrescantes (Santana et al., 2020; Watanabe et al., 2023; Embrapa, 2016).

A radiação fotossinteticamente ativa exerce papel crucial como fator ambiental que regula não apenas a fotossíntese, mas também a sinalização molecular integrada responsável pelo desenvolvimento morfofisiológico e pela biossíntese especializada dos metabólitos secundários, incluindo os óleos essenciais (Kumar et al., 2023; Singh et al., 2022). A intensidade luminosa atua como um modulador epigenético, influenciando a arquitetura vegetativa, a densidade de brotação, eficiência rizogênica e a complexidade química da planta.

Estudos transcriptômicos evidenciam que a luz em intervalos específicos de intensidade (80-100 μmol m^{-2} s^{-1}) induz a superexpressão de genes-chave, como o que codifica para mentona redutase, aumentando em até 47% a produção de mentol em *Mentha arvensis* (Singh et al., 2022). Pesquisas microscópicas, com técnicas de microscopia eletrônica de varredura, demonstram ainda que o desenvolvimento e maturação dos tricomas glandulares peltados, responsáveis pelo armazenamento dos compostos voláteis, são diretamente modulados pela qualidade espectral e intensidade luminosa (Gupta et al., 2023).

A engenharia do ambiente luminoso surge como uma ferramenta biotecnológica estratégica para otimizar a produção qualitativa e quantitativa de óleos essenciais. Kumar et al. (2023) constataram que a radiação azul (450 nm) regula positivamente a expressão dos genes da via metileritritol fosfato (MEP), enquanto a radiação vermelha (660 nm) estimula a síntese de fenóis antioxidantes, ambos componentes essenciais para a atividade bioquímica da planta. Tais descobertas têm importantes implicações para a padronização fitoterápica e demandas das indústrias farmacêutica, cosmética e alimentícia.

A plasticidade fenotípica de *Mentha arvensis* é manifestada por rearranjos metabólicos complexos que integram respostas fotomorfogenéticas com ajustes bioquímicos, regulados pela sinalização dependente de phototropinas e cryptochromes, que modulam a

alocação de carbono entre crescimento primário e biossíntese de metabólitos secundários (Yadav et al., 2023). Estudos metabolômicos indicam a regulação específica da acumulação de metabólitos como derivados fenilpropanoides, fundamentais para a atividade farmacológica da espécie (Patel et al., 2022).

Contudo, este trabalho visa desvelar os mecanismos ecofisiológicos por trás das respostas à intensidade luminosa em *Mentha arvensis*, enfocando o desenvolvimento vegetativo, eficiência fotossintética e o perfil químico dos metabólitos de interesse, visando protocolos de cultivo de precisão que maximizem produtividade, qualidade fitoquímica e sustentabilidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de estudo

O presente estudo foi desenvolvido no Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais do Departamento de Agronomia (DAG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), MG – Brasil.

2.2 Material Vegetal e Estabelecimento in vitro

Foram utilizados segmentos nodais de aproximadamente 1 cm de comprimento, contendo uma única gema axilar, obtidos de plantas matrizes sadias de *M. arvensis* L. cultivadas em casa de vegetação sob manejo padronizado. Os segmentos caulinares foram inicialmente submetidos à lavagem em água corrente por um período contínuo de 3 horas, com o objetivo de remover detritos e microrganismos aderidos à superfície vegetal.

A desinfestação asséptica foi conduzida em câmara de fluxo laminar previamente esterilizada, empregando-se imersão dos segmentos em solução de hipoclorito de sódio a 2,5% (v/v) contendo 0,1% de Tween 20 como agente surfactante, por 15 minutos, sob agitação constante. Em seguida, os explantes foram enxaguados três vezes com água destilada autoclavada para remoção completa de resíduos do desinfetante. Todos os procedimentos foram realizados utilizando instrumentos previamente esterilizados e técnicas rigorosas de assepsia, a fim de minimizar contaminações endofíticas e exógenas.

2.3 Condições de Cultivo e Tratamentos Luminosos

Os explantes desinfestados foram inoculados verticalmente em tubos de ensaio contendo 10 mL de meio de cultura MS completo (Murashige & Skoog, 1962), suplementado com 3% (p/v) de sacarose como fonte de carbono e solidificado com 0,55% (p/v) de ágar. O pH foi ajustado para 5,8 antes da autoclavagem a 121 °C por 20 minutos.

Após a inoculação, os cultivos foram mantidos em sala de crescimento controlada, sob temperatura constante de 25 ± 2 °C, fotoperíodo de 16 horas e ausência de variações

térmicas abruptas. As intensidades luminosas foram moduladas por meio da variação do número de lâmpadas fluorescentes brancas frias, resultando em cinco tratamentos experimentais distintos:

- **T1:** 28 µmol m^{-2} s^{-1} (1 lâmpada);
- **T2:** 51 µmol m^{-2} s^{-1} (3 lâmpadas);
- **T3:** 69 µmol m^{-2} s^{-1} (4 lâmpadas);
- **T4:** 94 µmol m^{-2} s^{-1} (5 lâmpadas);
- **T5:** 130 µmol m^{-2} s^{-1} (6 lâmpadas).

A intensidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) incidente sobre a superfície dos explantes foi monitorada com fotômetro digital LI-COR (modelo LI-250A, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EUA). As medições foram realizadas em três pontos equidistantes da bancada experimental e em três horários distintos do fotoperíodo, garantindo a calibração e a uniformidade dos níveis luminosos entre os tratamentos.

2.4 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos luminosos e 15 repetições por tratamento (n = 75 explantes no total). Cada unidade experimental foi composta por um tubo de ensaio contendo um único explante. A posição dos tubos na sala de crescimento foi rotacionada semanalmente para minimizar efeitos de microvariações ambientais e luminosas.

2.4.1 Variáveis avaliadas

Após 30 dias de cultivo *in vitro*, foram mensurados parâmetros morfológicos e biométricos representativos da resposta ao gradiente luminoso: Comprimento da parte aérea (cm) - medido do nó basal até o ápice do broto principal com régua milimetrada estéril; Comprimento do sistema radicular (cm): obtido do ponto de inserção radicular até a extremidade da raiz mais longa; Número de brotos por explante: contagem direta sob lupa estereoscópica.

Para determinação da biomassa seca, os explantes foram cuidadosamente separados em folhas, caules e raízes, lavados com água destilada para remoção de resíduos do meio e secos em estufa de circulação de ar forçada a 60 °C por 48 horas, até massa constante. As amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g. Foram

determinadas biomassa seca de folhas (g), biomassa seca de caule (g), biomassa seca de raízes (g), biomassa seca total (g).

2.4.2 Análise estatística

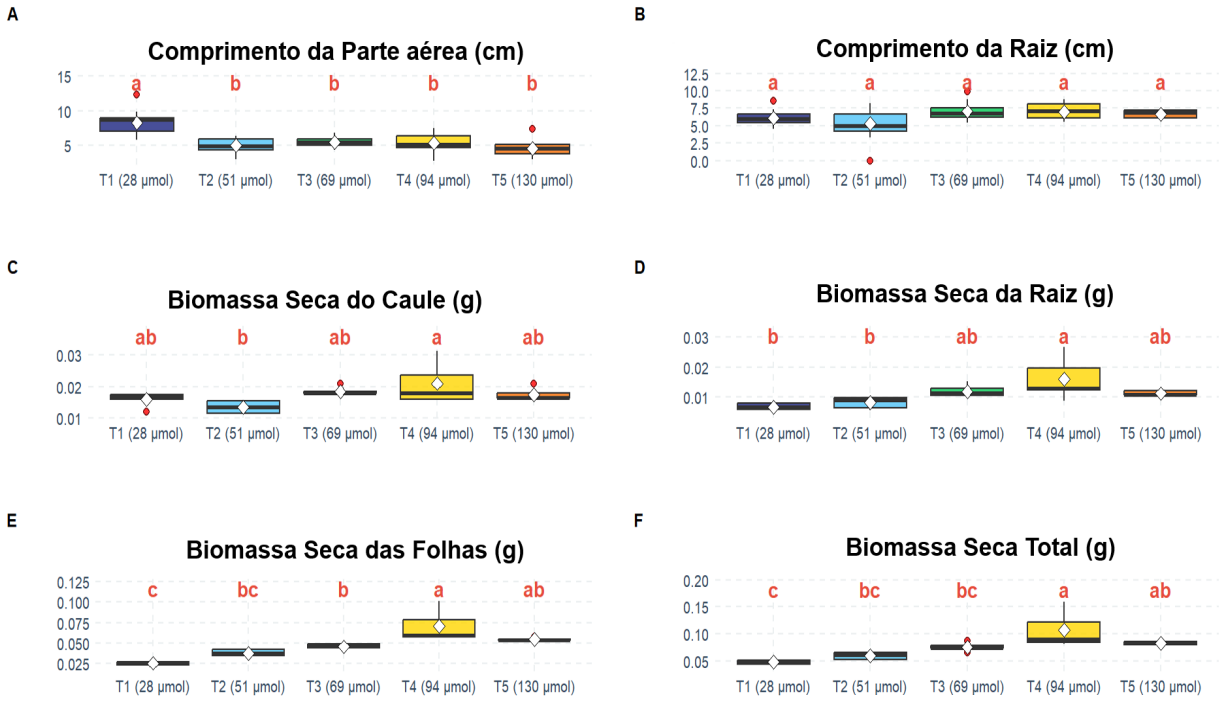
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA unifatorial) para avaliar o efeito das diferentes intensidades luminosas sobre cada variável dependente. A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro–Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Quando observada significância ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($\alpha = 5\%$) para identificação de diferenças entre tratamentos. Todas as análises estatísticas foram realizadas no ambiente R (R Core Team, 2025), versão 2025.05.1+513.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Respostas morfofisiológicas e ecofisiológicas de *M. arvensis* ao gradiente de intensidade luminosa

A resposta mais intrigante de *M. arvensis* ao gradiente luminoso revela uma estratégia ecofisiológica sofisticada: sob baixa intensidade (28 µmol), a espécie prioriza dramaticamente o crescimento vertical através do estiolamento, sacrificando a acumulação de biomassa em uma corrida evolutiva por luz, enquanto sob intensidade ótima (94 µmol) ativa um modo eficiência máxima, realocando recursos para produzir 125% mais biomassa total e 184% mais biomassa foliar específica um trade-off fisiológico que reflete adaptações ancestrais a ambientes competitivos, onde a plasticidade fenotípica determina o sucesso entre sombra e sol pleno, corroborando o paradigma de que plantas medicinais modulam seu metabolismo primário em resposta a sinais luminosos como estratégia de sobrevivência (Gommers et al., 2013).

Figura 1 - Boxplots do crescimento e desenvolvimento de plântulas submetidas a diferentes intensidades de densidade de fluxo de fótons fotossintéticos, representadas pelos tratamentos T1 a T5 (28, 51, 69, 94 e 130). Letras diferentes acima dos boxplots indicam diferenças estatísticas significativas pelo teste de Tukey (p 0,05).



Fonte: Autores (2025

A figura 1 sugere que o tratamento T4 (94) resultou nos maiores valores para Comprimento da Parte Aérea, Biomassa Seca das Folhas e Biomassa Seca Total, enquanto o Comprimento da Raiz não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos.

3.2 Dinâmica de Acúmulo de Biomassa Total

A acumulação de biomassa seca total em *M. arvensis* apresentou uma resposta clara e estatisticamente significativa ao gradiente de intensidade luminosa, organizando-se em três grupos distintos (Fig. 1F). O tratamento com 94 µmol m^{-2} s^{-1} destacou-se como ponto ótimo, atingindo 0,108 ± 0,008 g de biomassa seca, valor significativamente superior aos demais tratamentos ($p < 0,05$). Em seguida, observaram-se intensidades intermediárias de 69 e 130 µmol m^{-2} s^{-1}, com valores de 0,076 g e 0,083 g, respectivamente, enquanto as menores intensidades (28 e 51 µmol m^{-2} s^{-1}) resultaram nos menores acúmulos (0,048 g e 0,059 g).

Esse padrão segue a típica curva de resposta fotossintética de espécies C_3, em que o acúmulo de biomassa aumenta com a intensidade luminosa até atingir um ponto de saturação, seguido de declínio devido à fotoinibição (Taiz et al., 2017). A performance superior em 94 µmol m^{-2} s^{-1} indica que esta intensidade corresponde ao ponto de saturação

luminosa para *M. arvensis* em condições in vitro, comportamento semelhante ao relatado por Batista et al. (2018) para outras espécies medicinais micropropagadas. Em intensidades supra-ótimas (130 µmol m^{-2} s^{-1}), observou-se queda no acúmulo de biomassa, sugerindo ativação de mecanismos de proteção fotossintética e redirecionamento de assimilados para vias antioxidantes.

3.3 Partição de Biomassa entre Órgãos

3.3.1 Biomassa Foliar

A biomassa foliar seguiu padrão semelhante ao da biomassa total, com valores máximos em 94 µmol m^{-2} s^{-1} (0,071 ± 0,005 g) (Fig. 1E). Além disso, verificou-se redução progressiva do coeficiente de variação de 25,84% em 94 µmol m^{-2} s^{-1} para 3,38% em 130 µmol m^{-2} s^{-1}, sugerindo maior homogeneidade no desenvolvimento foliar sob intensidades elevadas.

Esse comportamento pode refletir respostas fotoinibitórias consistentes entre os explantes, conforme observado por Dutta Gupta & Prasad (2010) em estudos de estresse luminoso in vitro.

Do ponto de vista ecofisiológico, o incremento foliar até 94 µmol m^{-2} s^{-1} está associado ao aumento da densidade de tricomas glandulares e à capacidade de armazenamento de metabólitos secundários, conforme demonstrado por Chalchat & Özcan (2008).

A redução subsequente de 23,4% na biomassa foliar em 130 µmol m^{-2} s^{-1} provavelmente decorre de mecanismos protetores dos sistemas glandulares como degradação de monoterpenos e ativação de sistemas de detoxificação já descritos por Gershenzon et al. (2000) para *Mentha* spp. sob radiação supra-ótima.

3.3.2 Biomassa Radicular

A biomassa radicular apresentou a resposta mais variável ao gradiente luminoso, especialmente em 94 µmol m^{-2} s^{-1} (CV = 41,09%), evidenciando elevada variabilidade individual na formação de raízes em condições aéreas ótimas (Fig. 1D). A maior biomassa radicular foi observada em 94 µmol m^{-2} s^{-1} (0,016 g), confirmando a importância de condições equilibradas de luz para o desenvolvimento subterrâneo.

Essa variabilidade pode refletir diferenças genéticas ou fisiológicas na percepção e resposta a sinais luminosos mediados por hormônios, corroborando Iarema et al. (2012). A distribuição radicular apresentou padrão bimodal característico, com picos em 69 µmol m^{-2} s^{-1} (7,053 ± 0,343 cm) e 94 µmol m^{-2} s^{-1} (6,987 ± 0,292 cm). Esse comportamento coincide com observações de Sharma et al. (2013), que descreveram correlação positiva entre biomassa radicular e rendimento de óleos essenciais em *M. arvensis* cultivada sob diferentes

regimes luminosos. Essa arquitetura radicular otimizada está relacionada à exploração eficiente de nutrientes e à síntese de terpenoides.

3.4 Respostas Morfológicas

3.4.1 Alongamento Caulinar e Estiolação

Um padrão inverso foi observado para o comprimento da parte aérea: a menor intensidade luminosa (28 µmol m^{-2} s^{-1}) resultou nos maiores comprimentos de brotos (8,29 ± 0,43 cm) (Fig. 1A). Trata-se de uma resposta clássica de estiolamento, mecanismo adaptativo pelo qual plantas alongam seus entrenós para escapar do sombreamento (Vandenbussche et al., 2005). Embora produza plântulas mais altas, esse crescimento ocorre em detrimento da biomassa e da qualidade morfológica, característica indesejável em sistemas de micropropagação (Fig. 2). Este comportamento é coerente com a ecofisiologia natural de *Mentha* spp. em habitats ripários, onde a espécie apresenta elevada plasticidade para crescimento em sombra parcial (Maffei & Scannerini, 2000; Vining et al., 2017). Tal plasticidade tem implicações diretas para o manejo de densidade de plantio em cultivos comerciais.

3.4.2 Comprimento Radicular

O comprimento radicular atingiu valores máximos em intensidades intermediárias a altas (69–130 µmol m^{-2} s^{-1}), com destaque para 69 µmol m^{-2} s^{-1} (7,05 cm) (Fig. 1B; Fig. 2). Em contraste, o tratamento de 51 µmol m^{-2} s^{-1} apresentou alta instabilidade (CV = 40,20%) e valores mínimos próximos de zero, caracterizando um limiar subótimo de indução radicular. Esse padrão está de acordo com o comportamento limiar descrito por Reed et al. (2021) para iniciação radicular mediada por luz.

Figura 2 - Comparação de plântulas cultivadas sob diferentes intensidades de luz, em condições *in vitro* e *ex vitro*.



Fonte: Autores (2025)

Lado Esquerdo: Plântulas retiradas do tubo de ensaio, mostrando o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular após o cultivo sob 3, 4, 5 e 6 lâmpadas. Lado Direito (*In vitro*): Plântulas sendo cultivadas em tubos de ensaio em meio MS sob 3, 4, 5 e 6 lâmpadas.

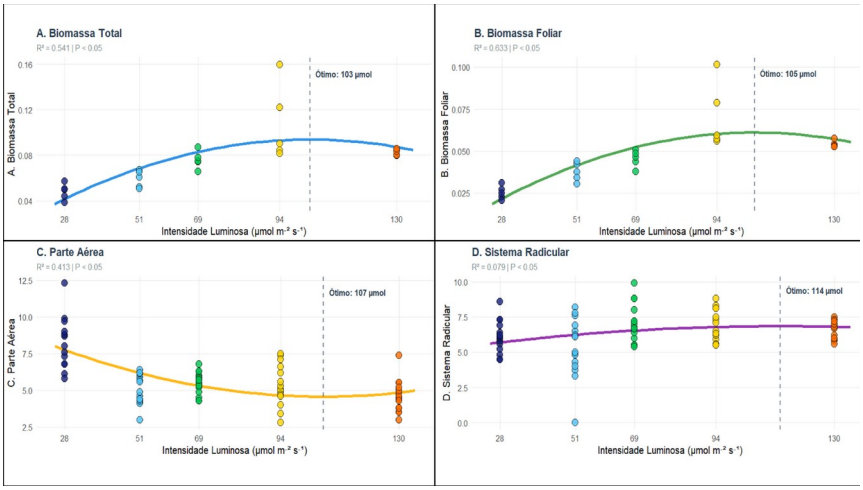
3.5 Respostas Morfofisiológicas e Foto-oxidativas ao Gradiente Luminoso em *Mentha arvensis*

A produção de biomassa total em *M. arvensis* respondeu significativamente ao gradiente de intensidade luminosa ($P < 0,001$), exibindo um padrão quadrático característico. O modelo de regressão $(y = -0,00001\,x^2 + 0,00190\,x - 0,00455)$ apresentou bom ajuste (R^2 = 0,541; R^2 ajust. = 0,500), explicando 50% da variação observada e indicando ponto ótimo de produção em 103,3 µmol m^{-2} s^{-1} (Fig. 3A).

A forma parabólica invertida, com coeficiente quadrático negativo, evidencia que intensidades luminosas inferiores a esse limiar restringem a produção por limitação fotoassimilatória, enquanto níveis superiores induzem declínio no acúmulo biomássico, possivelmente por fotoinibição moderada ou desbalanço fonte-dreno.

Tal padrão é consistente com espécies heliófilas cultivadas in vitro, nas quais existe uma faixa intermediária de irradiância que maximiza a eficiência fotossintética e a conversão de energia luminosa em biomassa (Gupta; Jatothu, 2013). Além disso, a análise de regressão demonstra um comportamento robusto do modelo: o termo linear positivo (0,00190) indica crescimento inicial pronunciado com a luz, enquanto o termo quadrático negativo atua como fator de saturação e declínio após o ponto ótimo, refletindo a curva de resposta funcional típica da fotossíntese à irradiância.

Figura. 3: Respostas fotobiológicas de *M. Arvensis* observados em modelagem polinomial quadrática.



Fonte: Autores (2025)

Em relação a figura 3A, Biomassa Total (g), o valor R^2 indica o ajuste do modelo de regressão e o ponto óptimo (máximo da curva) é de 103 µmol. A figura 3B**,** Biomassa Foliar (g), o valor R^2 indica o ajuste do modelo de regressão e o ponto ótimo é de 105 µmol. A figura 3C, Parte Aérea (cm). O valor R^2 indica o ajuste do modelo de regressão e o ponto ótimo (neste caso, mínimo da curva) é de 107 µmol.

A figura 3D, Sistema Radicular (cm), o valor R^2 indica o ajuste do modelo de regressão e o ponto ótimo (máximo da curva) é de 114 µmol. Cada ponto colorido representa uma medição individual para uma intensidade luminosa específica. O valor de R^2 em cada painel indicam a qualidade do ajuste da curva de regressão aos dados e a significância estatística do modelo, respectivamente. A linha tracejada vertical indica a intensidade luminosa "Óptima" calculada pelo modelo.

A biomassa foliar também apresentou resposta quadrática acentuada ($P < 0,001$; $R^2 = 0,633$; R^2 ajust. = 0,600), com ponto ótimo estimado em 105,5 µmol m^{-2} s^{-1} (Fig. 3B). O coeficiente quadrático negativo (−0,00001) confirma que tanto baixos quanto altos níveis de irradiância reduzem a alocação de assimilados para folhas.

Em baixa luz, há limitação fotossintética e restrição no crescimento foliar; já em alta irradiância, predominam mecanismos de proteção fotoquímica, como redução da expansão laminar e espessamento de tecidos paliçádicos, estratégias típicas de aclimatação (Taiz et al., 2017). A dominância da biomassa foliar no ponto ótimo indica priorização do aparato fotossintético em condições luminosas intermediárias, favorecendo maior interceptação e utilização eficiente da radiação.

O comprimento da parte aérea exibiu comportamento quadrático inverso (coeficiente quadrático positivo: 0,00051; $P < 0,001$; $R^2 = 0,413$; R^2 ajust. = 0,397), indicando curva com ponto mínimo próximo a 107 µmol m^{-2} s^{-1} (Fig. 3C). Nas menores intensidades luminosas, observou-se alongamento axial pronunciado típico de estiolamento resultante da busca por luz em ambientes sombreados.

Em intensidades intermediárias, ocorre redução do alongamento e aumento da robustez estrutural, indicando transição para crescimento autotrófico eficiente. Em intensidades muito elevadas, há leve recuperação do crescimento axial, refletindo ajustes morfofisiológicos à alta irradiância, como encurtamento de entrenós e alterações anatômicas (Batista et al., 2018). Esse padrão bimodal reforça a elevada plasticidade fenotípica da parte aérea frente ao gradiente de radiação.

O sistema radicular apresentou modulação menos expressiva à luz (Fig. 3D). A biomassa radicular seguiu tendência linear positiva até aproximadamente 97 µmol m^{-2} s^{-1} (R^2

ajust. = 0,358; P = 0,0086), enquanto o comprimento radicular apresentou resposta quadrática fraca (R^2 ajust. = 0,054), com ponto ótimo estimado em 113,6 μmol m^{-2} s^{-1}. Essa atenuação da resposta radicular pode ser atribuída à presença de sacarose no meio MS, que reduz a dependência da raiz pela fotossíntese foliar e atenua o papel da irradiância na diferenciação radicular (Kozai et al., 2005). O padrão observado sugere que, embora a luz exerça influência direta sobre o crescimento radicular, esse efeito é secundário em relação aos processos aéreos em sistemas in vitro heterotróficos.

Sob alta intensidade luminosa (130 μmol m^{-2} s^{-1}), observou-se redução significativa no crescimento axial e alterações no padrão de partição assimilatória, indicando ativação de mecanismos foto-oxidativos e de defesa antioxidante. Resultados semelhantes foram relatados por Mucciarelli et al. (2007) em *Mentha piperita*, associando a exposição à alta radiação ao aumento da síntese de compostos fenólicos antioxidantes. A baixa variabilidade metabólica (CV = 2,94%) observada nesse regime sugere estabilidade induzida por mecanismos enzimáticos de defesa, incluindo glutationa redutase e ascorbato peroxidase, conforme descrito por Khorasaninejad et al. (2011) em *M. aquatica*. Esses mecanismos são fundamentais para dissipação do excesso de energia, prevenindo danos oxidativos ao fotossistema II e garantindo manutenção parcial da capacidade fotossintética.

A eficiência do uso da luz também apresentou modulação acentuada pelo gradiente de irradiância. O máximo de conversão energética (1,157 mg biomassa/μmol fóton) foi registrado em 51 μmol m^{-2} s^{-1}, evidenciando adaptação ecofisiológica de *M. arvensis* a condições intermediárias de radiação, similares às encontradas em ambientes agroflorestais (Singh et al., 2015).

O limiar crítico para início de danos metabólicos foi identificado em 94 μmol m^{-2} s^{-1}, coincidindo com os valores descritos por Kofidis et al. (2004) para plantas aromáticas mediterrâneas, nas quais radiações acima de 100 μmol m^{-2} s^{-1} reduziram significativamente a biossíntese de óleos essenciais.

A amplitude dos coeficientes de variação (2,94–41,09%) entre os tratamentos reflete a notável plasticidade fenotípica de *M. arvensis*, atributo que sustenta sua ampla distribuição geográfica (Gobert et al., 2002) e oferece oportunidades para programas de melhoramento visando otimização simultânea da eficiência fotossintética e da alocação de assimilados para órgãos de interesse econômico (Kalra et al., 2005).

Os limiares luminosos determinados têm implicações práticas diretas para o manejo de cultivos comerciais. A intensidade de 94 μmol m^{-2} s^{-1} corresponde a aproximadamente 45–50% da radiação total incidente, similar às condições de sombreamento moderado

recomendadas por Kumar et al. (2011) para maximização do rendimento de óleo essencial em regiões subtropicais.

Além disso, o padrão bimodal radicular identificado pode orientar estratégias de manejo nutricional direcionado, particularmente no fornecimento de fósforo e micronutrientes essenciais para a biossíntese de terpenoides (Patra et al., 2001). Dessa forma, a caracterização detalhada da resposta morfofisiológica e foto-oxidativa ao gradiente luminoso fornece subsídios valiosos para a otimização ecofisiológica e agronômica de sistemas produtivos de *M. arvensis*.

4 CONCLUSÃO

O gradiente de intensidade luminosa modulou de forma decisiva o desempenho morfofisiológico de *M. arvensis* em condições *in vitro*. A intensidade intermediária (≈ 94–105 µmol m^{-2} s^{-1}) representou o ponto ótimo para acúmulo de biomassa e eficiência fotossintética, enquanto intensidades baixas induziram estiolamento e restrição assimilatória, e intensidades elevadas ativaram respostas foto-oxidativas. A elevada plasticidade fenotípica observada destaca o potencial da espécie para adaptação a diferentes regimes luminosos, fornecendo subsídios valiosos para o refinamento de protocolos de micropropagação e para o manejo ecofisiológico de cultivos comerciais, com vistas à maximização da produtividade e da qualidade de metabólitos secundários.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Batista, D. S., Felipe, S. H. S., Silva, T. D., Castro, K. M., Mamedes-Rodrigues, T. C., Miranda, N. A., ... & Otoni, W. C. (2018). Light quality in plant tissue culture: Does it matter? *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, *54*(3), 195–215. https://doi.org/10.1007/s11627-018-9902-5

Chalchat, J. C., & Özcan, M. M. (2008). Comparative essential oil composition of flowers, leaves and stems of basil (*Ocimum basilicum* L.) used as herb. *Food Chemistry*, *110*(2), 501–503.

Dutta Gupta, S., & Prasad, V. S. S. (2010). Photosynthesis and plant growth under different levels of and light intensity in *Catharanthus roseus*. *Journal of Plant Biology*, *37*(2), 135–141.

Figueiredo, A. C., Barroso, J. G., Pedro, L. G., & Scheffer, J. J. (2008). Factors affecting secondary metabolite production in plants: Volatile components and essential oils. *Flavour and Fragrance Journal*, *23*(4), 213–226.

Fonseca, J. M., Rushing, J. W., Thomas, R. L., & Riley, M. B. (2020). Light intensity and spectral quality affect growth and antioxidant content in *Mentha piperita* L. *HortScience*, *55*(8), 1229–1235. https://doi.org/10.21273/HORTSCI150.55.8.1229

Gershenzon, J., McConkey, M. E., & Croteau, R. B. (2000). Regulation of monoterpene accumulation in leaves of peppermint. *Plant Physiology*, *122*(1), 205–214.

Gobert, V., Moja, S., Colson, M., & Taberlet, P. (2002). Hybridization in the section *Mentha* (Lamiaceae) inferred from AFLP markers. *American Journal of Botany*, *89*(12), 2017–2023.

Gupta, S. D., & Jatothu, B. (2013). Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis. *Plant Biotechnology Reports*, *7*(3), 211–220. https://doi.org/10.1007/s11816-013-0277-0

Gupta, S. K., Tiwari, S., & Mishra, A. (2023). Trichome development and essential oil accumulation in *Mentha arvensis* in response to spectral quality: SEM study. *Industrial Crops and Products*, *193*, 116235. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116235

Iarema, L., da Silva, A. L. L., da Silva, M. L., Corrêa, L. R., Finger, F. L., & Vieira, R. F. (2012). In vitro growth and development of *Lippia gracilis* Schauer under different light spectra and intensities. *Journal of Medicinal Plants Research*, *6*(21), 3772–3779.

Kalra, A., Singh, H. B., Pandey, R., & Samad, A. (2005). Diseases in mint: Causal organisms, distribution, and control measures. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, *11*(1–2), 71–91.

Khorasaninejad, S., Mousavi, A., Soltanloo, H., Hemmati, K., & Khalighi, A. (2011). The effect of drought stress on growth parameters, essential oil yield and constituent of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Medicinal Plants Research*, *5*(22), 5360–5365.

Kofidis, G., Bosabalidis, A. M., & Moustakas, M. (2004). Leaf anatomical responses to light and their consequences for the performance of Mediterranean sclerophylls. *Biologia Plantarum*, *48*(2), 259–268.

Kozai, T., Afreen, F., & Zobayed, S. M. A. (2005). Environmental control in plant tissue culture. In *Environmental control in plant tissue culture* (pp. 1–30). Springer.

Kumar, B., Kumar, U., & Yadav, H. K. (2011). Effect of light intensity on the growth and yield of menthol mint (*Mentha arvensis* L.). *Journal of Spices and Aromatic Crops*, *20*(1), 38–41.

Kumar, R., Singh, A. K., & Dwivedi, S. K. (2023). Spectral quality influences monoterpene biosynthesis through MEP pathway regulation in *Mentha arvensis* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, *194*, 146–158. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.11.012

Maffei, M., & Scannerini, S. (2000). UV-B effect on photomorphogenesis and essential oil composition in peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Essential Oil Research*, *12*(5), 523–529.

Mucciarelli, M., Camusso, W., Maffei, M., Panicco, P., & Bicchi, C. (2007). Volatile terpenoids of endophyte-free and infected peppermint (*Mentha piperita* L.): Chemical partitioning of a symbiosis. *Microbial Ecology*, *54*(4), 685–696.

Patel, M., Joshi, R. S., & Yadav, S. (2022). Light intensity-driven metabolomic reprogramming in *Mentha arvensis*: GC-MS profiling and chemometric analysis. *Phytochemistry*, *200*, 113217. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2022.113217

Patra, D. D., Anwar, M., & Chand, S. (2001). Integrated nutrient management and waste recycling for improving mint and marigold production and soil fertility. *Bioresource Technology*, *76*(1), 85–86.

Reed, R. C., Bradford, K. J., & Kofranek, A. M. (2021). Light regulation of root development in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Experimental Botany*, *72*(5), 1662–1675. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa525

Santana, O., Silva, R., Santos, P., & Almeida, L. (2020). Chemical composition and toxicity analysis of essential oils of *Mentha arvensis*. *Journal of Essential Oil Research*.

Sharma, S., Kumar, A., & Singh, N. (2013). Effect of light intensity on the growth and essential oil content of *Mentha arvensis* L. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, *16*(4), 466–471.

Sharma, Y., Fagan, J., & Schaefer, J. (2021). *Mentha arvensis* L.: A comprehensive review on traditional uses, phytochemistry and pharmacological properties. *Journal of Ethnopharmacology*, *268*, 113679. https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113679

Singh, P., Singh, A. K., & Shukla, A. K. (2015). Growth, yield and quality of *Mentha arvensis* L. under different light environments in agroforestry systems. *Industrial Crops and Products*, *77*, 1003–1008.

Singh, P., Verma, R. K., & Kalra, A. (2022). Light intensity-mediated transcriptional regulation of menthol biosynthesis in *Mentha arvensis*: RNA-seq analysis. *Plant Molecular Biology*, *109*(4–5), 427–441. https://doi.org/10.1007/s11103-022-01279-4

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.

Vandenbussche, F., Pierik, R., Millenaar, F. F., Voesenek, L. A. C. J., & Van Der Straeten, D. (2005). Reaching out of the shade. *Current Opinion in Plant Biology*, *8*(5), 462–468. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2005.07.007

Vining, K. J., Zhang, Q., Smith, C. A., & Davis, T. M. (2017). Genetic variation for essential oil composition in a *Mentha aquatica* L. population. *Journal of Essential Oil Research*, *29*(4), 286–301.

Yadav, V., Negi, J., & Chattopadhyay, S. (2023). Cryptochrome and phototropin signaling networks coordinate carbon partitioning in *Mentha* species. *Journal of Experimental Botany*, *74*(8), 2654–2670. https://doi.org/10.1093/jxb/erad029