

AMBIENTE, CULTIVAR E MANEJO DE REGULADOR: EFEITOS MULTIVARIADOS NA PRODUÇÃO DA ALFACE

Gabriele Lima de Souza¹

Marco Yann Capoci Julien²

Samuel Felisbino da Silva²

Gustavo de Mattos Radmann²

Rayssa Rocha Camargo Vasconcelos²

Luiz Leonardo Ferreira³

Resumo: A alface destaca-se entre as hortaliças folhosas mais consumidas no mundo, sustentando cadeias produtivas intensivas e altamente sensíveis a variações microclimáticas. Desta forma objetivou-se com o trabalho avaliar o efeito do ambiente protegido, associado a cultivares responsivas e a frequências intermediárias de aplicação de reguladores de crescimento, na maximização dos atributos de qualidade comercial e rendimento da alface, de modo a fornecer subsídios para recomendações de manejo em sistemas de produção. O estudo foi realizado no município de Mineiros-GO. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram organizados em esquema fatorial $5 \times 2 \times 2$, correspondendo a cinco frequências de aplicação de um regulador de crescimento, duas variedades de alface (Aruana e Gloriosa) e dois ambientes de cultivo (com e sem tela de sombreamento). Os dados foram coletados 38 dias após o transplântio das mudas. As análises estatísticas foram conduzidas no ambiente R. Recomenda-se conduzir a cultura em ambiente protegido com tela (sombreamento moderado), priorizando a cultivar Gloriosa (ou materiais com resposta semelhante) e adotando frequência intermediária de aplicação do regulador (2–3 aplicações).

Palavras-chave: *Lactuca sativa*. Ambiente protegido. Cultivar. Regulador de crescimento. Seleção multivariada.

¹ Graduanda em Engenharia Agrônômica – 202410181@fimes.edu.br

² Graduando(a) em Engenharia Agrônômica.

³ Professor Titular do Centro Universitário de Mineiros – GO.

INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa* L.) destaca-se entre as hortaliças folhosas mais consumidas no mundo, sustentando cadeias produtivas intensivas e altamente sensíveis a variações microclimáticas. A competitividade do segmento depende de atributos de qualidade comercial (formação e peso da cabeça, textura e coloração) e de regularidade de oferta, o que explica o interesse por tecnologias de ambiente protegido, cultivares responsivas e manejos com reguladores do crescimento. Nesse contexto, o aprimoramento de práticas que atenuem estresses abióticos e ampliem a estabilidade fenotípica é prioridade de pesquisa e de manejo.

A diversidade varietal da alface é ampla e condiciona a adaptação a ambientes quentes, luminosidade e sistemas de cultivo. Estudos recentes evidenciam variação fenotípica expressiva na interação genótipo $\times$ ambiente em tolerância ao calor e desempenho pós-colheita, indicando que a escolha da cultivar é fator estruturante do sucesso produtivo (Belisle *et al.*, 2024; Lafta *et al.*, 2021). Sob condições controladas de luz, diferenças marcantes entre cultivares também foram registradas, reforçando que respostas fisiológicas e produtivas dependem do genótipo e do regime luminoso (Nguyen *et al.*, 2022). Em complemento, o ajuste de intensidade luminosa mostra impacto direto sobre crescimento e eficiência energética do sistema; sob iluminação uniforme, variações de intensidade resultaram em diferenças de rendimento e no balanço entre custo e produtividade (Zou *et al.*, 2025).

Entre as estratégias de modulação do microclima, a tela de sombreamento tem sido empregada para reduzir radiação, vento e carga térmica. De acordo com Kabir *et al.* (2024) esta tecnologia melhora o desempenho das hortaliças, ainda que o benefício dependa do nível de sombreamento, da época e do sistema de cultivo, com relatos de respostas neutras ou até negativas quando a interceptação de luz é excessiva. Em sistemas de campo, o uso criterioso de telas tende a favorecer a expansão foliar e acúmulo de biomassa, contribuindo para maior estabilidade de produção. Paralelamente, abordagens de agricultura de precisão mostram que a variação do solo pode prever o desempenho da alface, sugerindo oportunidades para decisões de manejo (Breure *et al.*, 2021).

No campo do manejo fisiológico, os reguladores/biostimulantes emergem como ferramentas para modular crescimento e tolerância a estresses. Aplicações foliares de ácido salicílico têm reduzido a absorção e o acúmulo de cádmio na alface, com reflexos positivos no crescimento (Tang *et al.*, 2023). O cálcio em formulação nano tem sido associado a ganhos de produtividade e atributos fisiológicos, quando aplicado em doses e frequências adequadas

(Salama *et al.*, 2024). Por sua vez, substâncias húmicas, aplicadas via raiz e via folha, mitigam o estresse salino e melhoram o desempenho, sustentando a ideia de “janela ótima” de dose e frequência (Atero-Calvo *et al.*, 2024). Em síntese, a literatura recente concorda que há um ponto ótimo fisiológico, onde os incrementos além desse limiar, não se traduzem necessariamente, em maior produtividade ou qualidade da alface.

Frente à multiplicidade de respostas e descritores (peso e diâmetro da cabeça, frações comerciais, atributos de caule), métodos multivariados tornam-se centrais para integrar evidências. O índice MGIDI tem se consolidado como ferramenta para uma seleção multivariada mais eficaz em experimentos biológicos (Olivoto & Nardino, 2021), com avanços recentes que ampliam sua aplicabilidade e interpretabilidade em dados agrônômicos complexos (Olivoto *et al.*, 2022). Tal abordagem permite quantificar a proximidade de cada tratamento a um ideótipo previamente definido, conciliando múltiplos objetivos (produtividade e qualidade).

À luz desse panorama, este estudo foi delineado para avaliar, de forma integrada, os efeitos do ambiente de cultivo (com e sem tela de sombreamento), das cultivares e da frequência de aplicação de regulador de crescimento sobre características morfoagronômicas da alface. Especificamente, buscou-se quantificar efeitos principais e interações por Manova e modelos lineares mistos, explorar relações entre variáveis com HE plots e análise de rede, além de ranquear tratamentos pela proximidade ao ideótipo por meio do MGIDI.

Desta forma objetivou-se com o trabalho avaliar o efeito do ambiente protegido, associado a cultivares responsivas e a frequências intermediárias de aplicação de reguladores de crescimento, na maximização dos atributos de qualidade comercial e rendimento da alface, de modo a fornecer subsídios para recomendações de manejo em sistemas de produção.

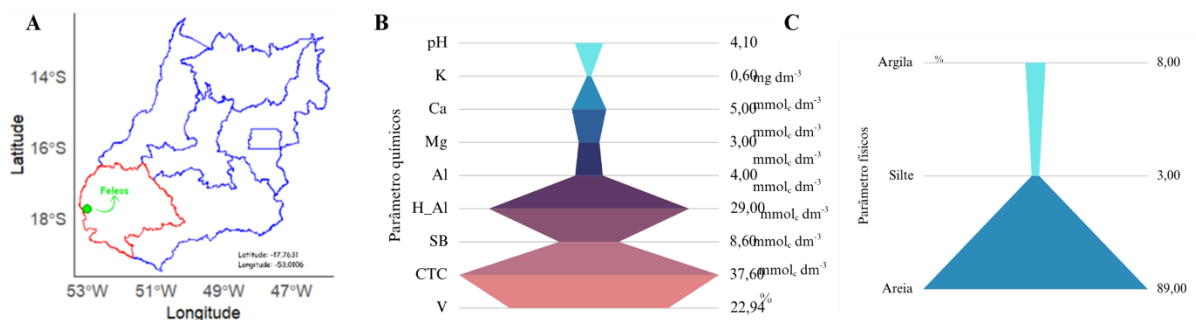
MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental Luiz Eduardo de Oliveira Sales, no município de Mineiros-GO, situado entre as coordenadas geográficas de 17°34'10'' latitude Sul e 52°33'04'' longitude Oeste, com altitude média de 760 m (Figura 1). Durante a condução do experimento foi verificada as médias de temperatura média, precipitação, radiação solar e umidade relativa do ar (Figura 2) (R Core Team, 2025).

A área experimental é classificada como clima do tipo Aw (quente a seco). O solo da área experimental foi classificado NEOSSOLO Quartzarenico, com textura arenosa, topografia suavemente ondulada a plana e drenagem limitada. Para implantação deste experimento foi

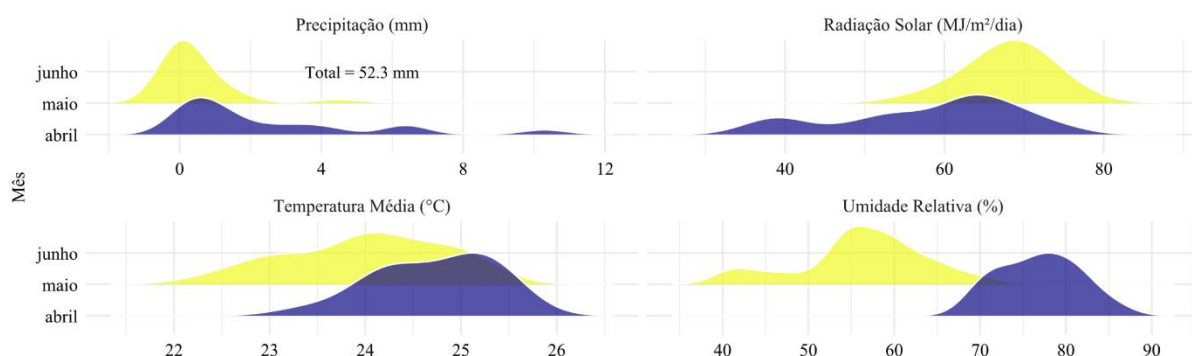
realizado a coleta de solo na camada superficial de 0-20 cm verificando-se os atributos químicos e físicos (Figura 3).

Figura 1. Localização geográfica (A) e diagnóstico dos atributos químicos (B) e físicos do solo (C), da Fazenda Experimental Luiz Eduardo de Oliveira Sales (FELEOS) no sudoeste do estado de Goiás, Brasil.



Fonte: Autores

Figura 2. Dinâmica das variáveis meteorológicas durante o ciclo da cultura.



Fonte: Autores

O experimento foi conduzido com a cultura da alface em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram organizados em esquema fatorial $5 \times 2 \times 2$, correspondendo a cinco frequências de aplicação de um regulador de crescimento, duas variedades de alface (Aruana e Gloriosa) e dois ambientes de cultivo (com e sem tela de sombreamento) (Tabela 1). Cada parcela experimental foi composta por 16 plantas, sendo selecionadas cinco plantas centrais para as avaliações, a fim de evitar efeitos de bordadura.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos por ambiente/alface e frequência.

Grupo	0	1	2	3	4
ComTela • Aruana	SARA0	SARA1	SARA2	SARA3	SARA4
ComTela • Gloriosa	SGLA0	SGLA1	SGLA2	SGLA3	SGLA4
SemTela • Aruana	NSARA0	NSARA1	NSARA2	NSARA3	NSARA4
SemTela • Gloriosa	NSGLA0	NSGLA1	NSGLA2	NSGLA3	NSGLA4

Fonte: Autores

As mudas foram produzidas em bandejas de poliestireno expandido com 200 células, durante 25 dias, utilizando substrato Carolina Soil. Os canteiros, com largura de 1,20 m, foram previamente cobertos com filme de polietileno branco (mulching) antes do transplante, realizado em 14/04/2025. As aplicações do regulador de crescimento ocorreram em 05/05/2025, 09/05/2025, 12/05/2025 e 16/05/2025, e a colheita foi realizada em 22/05/2025.

O preparo do solo incluiu correção da acidez e adubação de base, realizadas conforme recomendações (Ribeiro *et al.*, 1999). A irrigação foi conduzida por sistema de microaspersão, de modo a manter a umidade próxima à capacidade de campo. Para o controle fitossanitário, não foram utilizados defensivos químicos; o manejo de plantas daninhas, quando necessário, foi realizado manualmente.

Na ocasião da colheita, foram mensuradas as seguintes características morfoagronômicas: peso total da cabeça (CAB_PT, g), diâmetro da cabeça (CAB_D, cm), número de folhas não comerciais (FNC_UN), peso de folhas não comerciais (FNC_P, g), número de folhas comerciais (FC_UN), peso de folhas comerciais (FC_P, g), diâmetro do caule (CAU_D, cm), comprimento do caule (CAU_C, cm) e peso do caule (CAU_P, g). O número de folhas comerciais e não comerciais foi obtido por contagem manual; o peso total da cabeça, folhas e caule foi determinado por pesagem em balança digital de precisão; e as medidas lineares (diâmetro da cabeça, diâmetro e comprimento do caule) foram obtidas com régua graduada ou paquímetro digital.

Logo após os dados foram submetidos as análises estatísticas, onde inicialmente, verificaram-se as pressuposições de normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias por meio de inspeção gráfica, assegurando a adequação dos modelos lineares adotados. A análise multivariada de variância (Manova) foi conduzida considerando apenas efeitos fixos, segundo o modelo matricial:

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

em que Y representa a matriz de respostas multivariadas, X a matriz de incidência dos efeitos fixos, β o vetor de parâmetros fixos e ε o erro residual. O critério de Pillai's trace foi adotado como estatística principal.

A análise da rede bipartida foi conduzida a partir das médias por tratamento padronizadas por variável (z-score), compondo a matriz $W=[w_{iv}]$ com $w_{iv}=z_{iv}$. Para a visualização, normalizou-se a magnitude para $w'_{iv}=w_{iv}/\max|w_{iv}|\in[-1,1]$, exibindo-se arestas para $|z_{iv}|>2$; a cor codificou a direção (negativa-positiva) e a espessura

a magnitude ($|w'_{iv}|$). A estrutura foi sumarizada por grau e força ponderada dos nós para identificar hubs.

Adicionalmente, foi aplicado o índice MGIDI (Multi-trait Genotype-Ideotype Distance Index), obtido pela distância euclidiana entre cada genótipo e o ideótipo (combinação ótima das variáveis), conforme:

$$MGIDI_i = \sqrt{\sum (\gamma_{ij} - \gamma^*_j)^2}$$

em que MGIDI_i é o índice do genótipo *i*, γ_{ij} é o escore fatorial do genótipo *i* no fator *j*, γ^*_j é o escore ideal no fator *j*, e *f* é o número de fatores retidos na análise.

As análises estatísticas foram conduzidas no ambiente R, versão 4.4.2 (R CORE TEAM, 2024).

RESULTADOS

A análise multivariada de variância, utilizando o critério de Pillai's trace, revelou efeitos significativos dos fatores principais e de suas interações sobre o conjunto das características avaliadas da cultura da alface (Tabela 2). Observou-se efeito altamente significativo ($p < 0,001$) para os fatores Ambiente, Alface e Frequência de aplicação, bem como para todas as interações duplas e triplas. Esses resultados indicam que o desempenho morfoagronômico da alface depende simultaneamente da variedade utilizada, da frequência de aplicação do regulador de crescimento e das condições ambientais, com respostas integradas entre as variáveis avaliadas.

Tabela 2. Resultados da MANOVA (Pillai's trace) com efeitos fixos e análises univariadas com modelos mistos (LMM).

Efeito	Valor	Num DF	Den DF	Approx F	Significância p valor
Alface	0.84601	9	271	165.4244	***
Alface x Frequência	0.49547	36	1096	4.3043	***
Ambiente	0.65556	9	271	57.3084	***
Ambiente x Alface	0.27121	9	271	11.2053	***
Ambiente x Alface x Frequência	0.45718	36	1096	3.9286	***
Ambiente x Frequência	0.40638	36	1096	3.4428	***
Frequência	0.22289	36	1096	1.7966	**

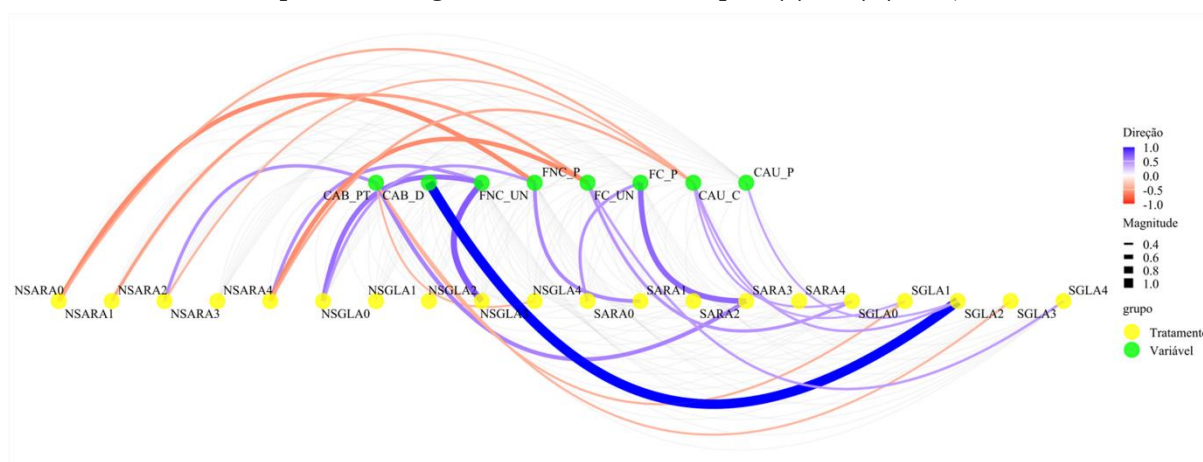
Níveis de significância: $p < 0,01$ (**), $p < 0,001$ (***).

Fonte: Autores

A análise de rede mostrou conexões claras entre tratamentos e variáveis. Entre as associações positivas mais fortes, destacaram-se SGLA2 com diâmetro da cabeça (CAB_D), NSGLA3 e NSGLA0 com folhas não comerciais (FNC_UN) e SARA3 com folhas comerciais

(FC_P). Por outro lado, NSARA0 e NSARA4 apresentaram relações negativas com peso e folhas comerciais (FNC_P e FC_UN). Na estrutura da rede, FNC_UN apareceu como variável central, enquanto CAB_D, FC_P, FNC_P e FC_UN tiveram ligações mais pontuais. Entre os tratamentos, SGLA2, NSGLA3, SARA3, NSGLA0 e NSARA0 foram os que concentraram as conexões mais relevantes. De forma prática, esses resultados indicam que alguns tratamentos (como SGLA2 e NSGLA3) estão associados a variáveis centrais de maior importância, enquanto outros (como NSARA0 e NSARA4) revelam possíveis contrapontos/limitações a considerar no manejo (Figura 3).

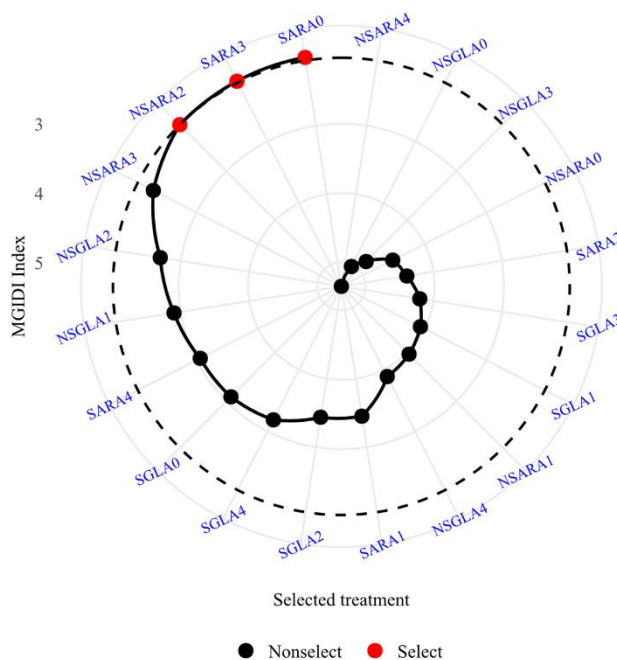
Figura 3. Rede bipartida de associações tratamento–variável na cultura da alface (cor = direção; espessura = magnitude; arestas exibidas para $|z| > 2$; $|w| > 0,4$).



Fonte: Autores

O índice de seleção MGIDI evidenciou variação expressiva entre os tratamentos avaliados, permitindo distinguir aqueles mais próximos do ideótipo definido. Pela ordenação gráfica, observou-se que os tratamentos SARA0, SARA3 e NSARA2 apresentaram os menores valores de MGIDI, sendo, portanto, selecionados como os mais promissores. Esse resultado reforça a utilidade do índice na integração multivariada das características, facilitando a identificação de genótipos com desempenho equilibrado e alinhado aos objetivos de seleção (Figura 4).

Figura 4. Índice de Seleção MGIDI para os tratamentos avaliados, destacando os genótipos selecionados.



Fonte: Autores

Desta forma, os resultados mostram de forma convergente — pelas análises multivariadas, modelos mistos e abordagens gráficas — que o desempenho morfoagronômico da alface é fortemente condicionado pela interação entre ambiente, cultivar e frequência de aplicação. O ambiente protegido (com tela) apresentou vantagem consistente, sobretudo quando associado à cultivar Gloriosa e a frequências intermediárias (2–3 aplicações), com ganhos em atributos diretamente vinculados ao peso total da cabeça (CAB_PT), notadamente diâmetro da cabeça (CAB_D), peso de folhas comerciais (FC_P) e comprimento do caule (CAU_C). A rede de associações revelou conexões positivas concentradas em tratamentos de melhor desempenho e evidenciou trade-offs com FNC_P e FC_UN em tratamentos menos responsivos, sugerindo limites fisiológicos à intensificação do manejo. Por fim, o índice MGIDI sintetizou as múltiplas respostas e apontou SARA0, SARA3 e NSARA2 como os tratamentos mais próximos do ideótipo, reforçando a robustez das conclusões obtidas e oferecendo base objetiva para as recomendações de manejo discutidas na sequência.

DISCUSSÃO

A Manova (Pillai's trace) evidenciou efeitos principais e interações significativas entre ambiente, cultivar e frequência de aplicação. Tal padrão é compatível com a cultura da alface, cuja produção e qualidade apresentam forte componente de interação genótipo × ambiente,

inclusive sob condições de calor; triagens recentes apontam ampla variação genotípica e interação consistente em materiais subtropicais e tolerantes ao estresse térmico, o que sustenta diferenças entre combinações de manejo e genótipo observadas no presente estudo (Belisle *et al.*, 2024; Lafta *et al.*, 2021).

No tocante ao ambiente, observou-se superioridade sob tela/sombreamento. Em cenários quentes, a literatura descreve que telas atenuam radiação e vento, reduzem o estresse térmico e favorecem a expansão foliar e o acúmulo de biomassa — mecanismo condizente com a vantagem registrada. Por outro lado, há relatos de redução de massa fresca e diâmetro de cabeça quando o sombreamento é excessivo ou em sistemas hidropônicos sob condições amenas, reforçando que o benefício é dependente do contexto (nível de sombreamento, estação e sistema de cultivo). Esses elementos contribuem para explicar a vantagem do cultivo protegido registrada neste trabalho (Kabir *et al.*, 2024; Zou *et al.*, 2025; Tang *et al.*, 2023).

A resposta não linear à frequência de aplicações é igualmente descrita na literatura recente com reguladores/bioestimulantes: substâncias como ácido salicílico e quitossana tendem a elevar diâmetro e peso de cabeça em doses e modos de aplicação adequados, sem ganhos adicionais quando se ultrapassa a faixa ótima. Resultados positivos análogos são relatados para polímeros/biopolímeros foliares e substâncias húmicas sob restrição nutricional, corroborando a existência de uma “janela” de estímulo fisiológico — em consonância com o melhor desempenho em frequências intermediárias observado aqui (Atero-Calvo *et al.*, 2024; Salama *et al.*, 2024).

As diferenças entre cultivares detectadas são congruentes com avaliações multiambiente, nas quais materiais de diferentes tipos exibem contrastes de rendimento e qualidade sob variações de luz e microclima; esse quadro auxilia na interpretação das interações com o ambiente protegido e com a frequência de aplicação verificadas no conjunto de tratamentos (Nguyen *et al.*, 2022).

O emprego do índice MGIDI para ranquear tratamentos multicaracterísticos — que, no presente estudo, destacou SARA0, SARA3 e NSARA2 — encontra respaldo em estudos recentes que demonstram maior poder de seleção e interpretabilidade quando se busca equilíbrio entre inúmeros traços, superando limitações de índices clássicos e integrando resultados de PCA/FA. Tal evidência reforça a robustez da abordagem adotada e a conclusão de que esses tratamentos representam o melhor compromisso entre produtividade e qualidade (Olivoto e Nardino, 2021; Olivoto *et al.*, 2022).

Em síntese, os resultados convergem para: (i) papel determinante da interação G×E na alface, (ii) benefício do sombreamento em condições quentes — dependente da intensidade e do sistema de cultivo —, (iii) respostas compatíveis com um “ótimo” fisiológico a reguladores/bioestimulantes, (iv) centralidade do diâmetro e do peso de cabeça como descritores de rendimento e (v) utilidade do MGIDI para a seleção de tratamentos com desempenho multivariado superior. Esses pontos conferem solidez às conclusões e orientam recomendações práticas: adoção de telas com sombreamento moderado em períodos quentes, frequências de aplicação intermediárias e seleção de cultivares responsivas ao microclima local.

CONCLUSÃO

Recomenda-se conduzir a cultura em ambiente protegido com tela (sombreamento moderado), priorizando a cultivar Gloriosa (ou materiais com resposta semelhante) e adotando frequência intermediária de aplicação do regulador (2–3 aplicações). Esse arranjo tende a maximizar peso e qualidade comercial da cabeça, sobretudo quando se monitora diâmetro da cabeça, peso de folhas comerciais e comprimento do caule para orientar o ponto de colheita. Aplicações mais intensas (4–5) não mostraram benefícios adicionais e devem ser evitadas por implicarem custos sem retorno proporcional.

REFERENCIAS

ATERO-CALVO, S., MAGRO, F., MASETTI, G., NAVARRO-LEÓN, E., BLASCO, B., & RUIZ, J. M. (2024). Salinity stress mitigation by radicular and foliar humic substances application in lettuce plants. **Plant Growth Regulation**, 104(1), 151-167.

BELISLE, C. E., SANDOYA, G. V., KREUTZ, G. F., & SARGENT, S. A. (2024). Screening Subtropical Lettuce Accessions for Heat Tolerance by Incorporating Accelerated Shelf Life Testing. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, 149(4), 206–216.

BREURE, T. S., MILNE, A. E., WEBSTER, R., HAEFELE, S. M., HANNAM, J. A., MORENO-ROJAS, S., & CORSTANJE, R. (2021). Predicting the growth of lettuce from soil infrared reflectance spectra: the potential for crop management. **Precision Agriculture**, 22(1), 226-248.

KABIR, M. Y., NAMBEESAN, S. U., & DÍAZ-PÉREZ, J. C. (2024). Shade nets improve vegetable performance. **Scientia Horticulturae**, 334, 113326.

LAFTA, A., SANDOYA, G., & MOU, B. (2021). Genetic Variation and Genotype by Environment Interaction for Heat Tolerance in Crisphead Lettuce. **HortScience**, 56(2), 126–135.

NGUYEN, C. D., CREECH, M., XIANG, D., SANDOYA, G., KOPSELL, D., & HUO, H. (2022). Performance of different lettuce cultivars grown hydroponically under fluorescent and light-emitting diode light growth conditions. **HortScience**, 57(11), 1447-1452.

OLIVOTO, T., & NARDINO, M. (2021). MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. **Bioinformatics**, 37(10), 1383-1389.

OLIVOTO, T., DIEL, M. I., SCHMIDT, D., & LÚCIO, A. D. (2022). MGIDI: a powerful tool to analyze plant multivariate data. **Plant Methods**, 18(1), 121.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G; ALVAREZ V, V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5.** Aproximação. Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

SALAMA, D. M., OSMAN, S. A., MAHMOUD, S. H., EL-TANAHY, A. M., & ABD EL-AZIZ, M. E. (2024). Improving the productivity and physiological characteristics of lettuce plants using spraying calcium as a nanofertilizer. **Horticulturae**, 10(11), 1157.

TANG, W., LIANG, L., XIE, Y., LI, X., LIN, L., HUANG, Z. & TANG, Y. (2023). Foliar application of salicylic acid inhibits the cadmium uptake and accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Frontiers in Plant Science**, 14, 1200106.

ZOU, J., LUO, S., SHI, M., WANG, D., LIU, W., SHEN, Y. & JIANG, Y. (2025). Effects of different light intensities on lettuce growth, yield, and energy consumption optimization under uniform lighting conditions. **PeerJ**, 13, e19229.