

Curso Superior de Bacharelado em Agronomia

SARAH ALINE DA SILVA RODRIGUES

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA SOLUÇÃO NUTRITIVA NA PRODUÇÃO DE ALFACE (*Lactuca sativa L.*) CULTIVADA EM SISTEMA HIDROPÔNICO COM MONITORAMENTO AUTOMATIZADO

Planaltina - DF

2026

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA SOLUÇÃO NUTRITIVA NA PRODUÇÃO DE ALFACE (*Lactuca sativa L.*) CULTIVADA EM SISTEMA HIDROPÔNICO COM MONITORAMENTO AUTOMATIZADO.

Sarah Aline da Silva Rodrigues [1]

Nilton Nélio Cometti [2]

RESUMO

RODRIGUES, Sarah. Influência da temperatura da solução nutritiva na produção de alface (*Lactuca sativa L.*) cultivada em sistema hidropônico com monitoramento automatizado. 2026. Artigo (Bacharelado em Agronomia) — Instituto Federal de Brasília, Brasília, 2026.

Este estudo avalia a influência de diferentes temperaturas da solução nutritiva sobre os processos fisiológicos e a produtividade da alface crespa BRS Leila cultivada em sistema hidropônico do tipo *Deep Flow Technique* (DFT) com monitoramento automatizado. O experimento, conduzido entre março e abril de 2026 no Instituto Federal de Brasília – Campus Planaltina, adota um delineamento unifatorial com quatro tratamentos térmicos: 22, 25, 28 e 31 ±1 °C. Analisaram-se variáveis fisiológicas, como taxa fotossintética e transpiração, além de variáveis de crescimento e acúmulo de fitomassa. Os resultados demonstram que a temperatura da solução nutritiva afeta diretamente o desenvolvimento da cultura, sendo que o tratamento de 28 °C proporcionou a maior eficiência fisiológica e o maior acúmulo de massa fresca e seca. Por outro lado, as temperaturas de 22 °C e 31 °C limitam o crescimento vegetativo e reduzem a eficiência fotossintética. Conclui-se que a temperatura de 28 °C estabelece o ponto de maior equilíbrio funcional para a cultivar avaliada, evidenciando a relevância do controle térmico automatizado para a otimização da produção de alface em climas tropicais.

Palavras-chave: DFT; BRS Leila; hidroponia.

[1] Graduanda em Agronomia pelo Instituto Federal de Brasília — *Campus* Planaltina. E-mail: sarah.rodrigues1@estudante.ifb.edu.br

[2] Professor no Instituto Federal de Tecnologia e Educação de Brasília — Campus Planaltina. Doutor em Agronomia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. E-mail: nilton.cometti@ifb.edu.br.

ABSTRACT

RODRIGUES, Sarah. Influence of nutrient solution temperature on lettuce (*Lactuca sativa L.*) production grown in a hydroponic system with automated monitoring. 2026. Article (Bachelor's degree in Agronomy) — Federal Institute of Brasília, Brasília, 2026**.**

This study evaluates the influence of different nutrient solution temperatures on the physiological processes and productivity of BRS Leila curly lettuce grown in a Deep Flow Technique (DFT) hydroponic system with automated monitoring. The experiment, conducted between March and April 2026 at the Federal Institute of Brasília – Planaltina Campus, adopts a unifactorial design with four thermal treatments: 22, 25, 28 and 31 ±1 °C. Physiological variables such as photosynthetic rate and transpiration, as well as growth parameters and phitomass accumulation, are analyzed. The results demonstrate that the temperature of the nutrient solution directly affects crop development, with the 28 °C treatment providing the highest physiological efficiency and the greatest accumulation of fresh and dry mass. On the other hand, temperatures of 22 °C and 31 °C limit vegetative growth and reduce photosynthetic efficiency. It is concluded that the temperature of 28 °C establishes the point of greatest functional equilibrium for the evaluated cultivar, highlighting the relevance of automated thermal control for optimizing lettuce production in tropical climates.

Keywords: DFT; BRS Leila; hydroponics.

Data de aprovação: 02/06/2026

1 INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa L.*) é uma das hortaliças folhosas mais cultivadas e consumidas no mundo, destacando-se pelo valor nutricional, ciclo curto e ampla aceitação no mercado (Faquin *et al.,* 1996). Trata-se de uma planta de clima temperado, que se desenvolve melhor em temperaturas amenas, enquanto que o calor excessivo acelera o ciclo, podendo antecipar o pendoamento e reduzir o tamanho das plantas, dependendo do genótipo (Henz e Suinaga, 2009).

No Brasil, caracterizado por possuir clima predominantemente tropical, a produção de alface enfrenta desafios relacionados ao estresse térmico, pois altas temperaturas comprometem o crescimento e a produtividade. Além disso, sabe-se que no cenário atual os estudos apontam que as mudanças climáticas impactam diretamente a agricultura, comprometendo o rendimento e os ganhos financeiros (Ray *et al.*, 2015). Nesse contexto, de acordo com estudos da Embrapa Hortaliças, plantar alface ao ar livre no Brasil poderá se tornar cada vez mais difícil nas próximas décadas, com praticamente todo o território nacional em risco alto ou muito alto até o fim do século (Embrapa, 2025). Diante desse cenário, a adoção de estratégias de adaptação torna-se fundamental, como o uso de cultivares tolerantes ao calor e a produção em sistemas de cultivo protegido. Experimentos recentes mostraram que as cultivares de alface crespa BRS Leila e BRS Mediterrânea, desenvolvidas por pesquisadores da Embrapa Hortaliças, apresentaram melhor desempenho quando a temperatura é elevada de 25 °C para 30 °C, mantendo crescimento adequado, enquanto outras cultivares testadas não se desenvolvem bem, ressaltando a importância de variedades adaptadas ao clima tropical (Embrapa, 2024).

Com isso, a hidroponia surge como alternativa eficiente, permitindo o controle da temperatura, da umidade, da incidência de pragas e doenças, e maior aproveitamento de água e nutrientes (Cometti, 2003; Sanchez, 2007). Além disso, torna-se fundamental o uso eficiente dos fertilizantes usuais para o sistema hidropônico.

A solução nutritiva é o elemento central desse sistema, fornecendo diretamente às raízes todos os nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Sua composição, concentração e temperatura influenciam o crescimento, a formação de folhas, a absorção de água e a produtividade da alface, sendo fatores críticos em regiões de clima quente, onde o aquecimento excessivo em temperaturas elevadas podem comprometer o crescimento das plantas, pois favorecem a ocorrência de hipoxia radicular, caracterizada pela deficiência de oxigênio nas raízes (Sena *et al.,* 2023). Nesse contexto, a aeração do sistema torna-se indispensável, especialmente em sistemas do tipo DFT (Deep flow technique), nos quais as raízes permanecem submersas na solução nutritiva durante todo o cultivo. A aeração contínua garante concentrações adequadas de oxigênio dissolvido, fundamentais para a respiração radicular e para o funcionamento dos processos fisiológicos das plantas.

Dentre os sistemas hidropônicos existentes para o cultivo da alface, destaca-se o NFT (fluxo laminar de nutrientes), amplamente utilizado na produção de alface, e o DFT (Deep flow technique ou técnica de fluxo profundo), em que a solução nutritiva permanece em um reservatório de 20 a 50 cm, sustentando as plantas sobre placas flutuantes e reduzindo a flutuação da temperatura devido ao maior volume da solução (Cometti, Genucio e Zonta., 2019).

Além disso, é possível realizar o uso de monitoramento automatizado que permite ajustar continuamente a temperatura e os nutrientes, garantindo condições ideais de cultivo. Apesar de existirem poucos estudos que analisam diretamente a influência da temperatura da solução nutritiva na produção de alface, pesquisas realizadas no Instituto Federal do Espírito

Santo em 2010 indicam que, em regiões quentes, controlar a temperatura da solução é mais relevante do que limitar a quantidade de nutrientes, pois soluções resfriadas favorecem maior crescimento, maior acúmulo de água na planta e manutenção da produtividade (Cometti *et al.*, 2013).

Nesse sentido, o estudo da influência da temperatura da solução nutritiva em sistemas hidropônicos é importante para o aprimoramento do manejo da cultura da alface, especialmente no país tropical como o Brasil de clima quente, onde o aquecimento excessivo da solução pode comprometer a produtividade.

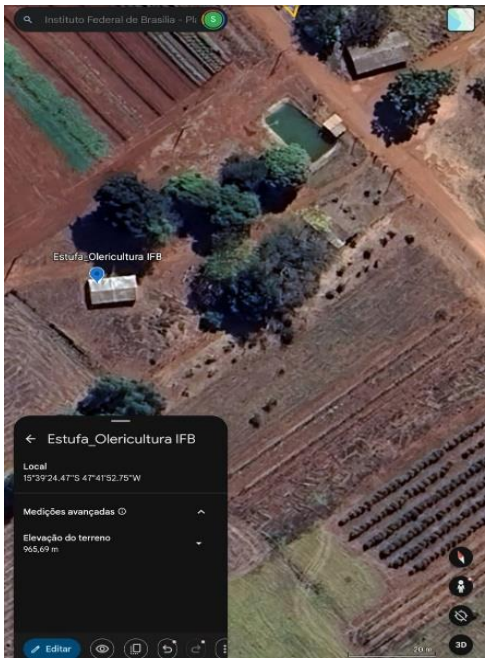
Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência de diferentes temperaturas da solução nutritiva sobre os processos fisiológicos da alface crespa BRS Leila e seus efeitos na produtividade, em sistema hidropônico do tipo DFT, com controle automatizado e ajuste contínuo da temperatura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento

A atividade foi conduzida em casa de vegetação na Unidade de Ensino, Produção, Pesquisa e Extensão – (UEP) de Olericultura *Campus* Planaltina, no Distrito Federal, localizada nas coordenadas geográficas 15°39'24.5"S e 47°41'52.8"W conforme descrito na Figura 1. A região apresenta clima tropical do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, caracterizado como tropical com inverno seco, típico do bioma Cerrado, com altitude de aproximadamente 965 m. O experimento foi conduzido no período entre março a abril de 2026**.**

Figura 1 — Localização do desenvolvimento do experimento.



Fonte: Google Earth, 2026.

2.2 Estrutura experimental

O experimento foi conduzido em estufa do setor da UEP olericultura, coberta com plástico transparente e com laterais revestidas com telas de sombreamento de 50%. Para reduzir a intensidade solar incidente sobre as plantas, foi instalado uma tela de 35% posicionado a uma altura de 90 cm acima da bancada onde o experimento foi posicionado (Figura 2). A bancada de madeira possuía dimensão de 2,4 m de comprimento e 1,23 m de largura. O experimento foi composto por quatro tratamentos, correspondentes às temperaturas da solução nutritiva sendo 22±1°C, 25±1°C, 28±1°C e 31±1°C sendo respectivamente o T1, T2, T3 e T4. Cada tratamento foi aplicado a uma floreira, considerada unidade experimental, contendo quatro vasos com uma planta em cada vaso. Ao todo, foram utilizadas quatro floreiras com dimensões de 80 cm × 20 cm × 17 cm, sem perfurações, destinadas ao armazenamento de água, e 16 vasos com capacidade de 1,9 L para a solução nutritiva. Em cada floreira foram adicionados 6,0 L de água, enquanto cada vaso recebeu 1,2 L de solução nutritiva.

Os vasos foram cobertos com placas de isopor perfuradas, utilizadas como suporte para as plantas, mantendo as raízes suspensas na solução e reduzindo a incidência de luz. O caule foi fixado com espuma para sustentação das plantas. As floreiras foram revestidas com isopor para reduzir as trocas térmicas com o ambiente, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 — Estufa onde o experimento foi conduzido (A) e local do experimento coberto com tela a 35% (B).



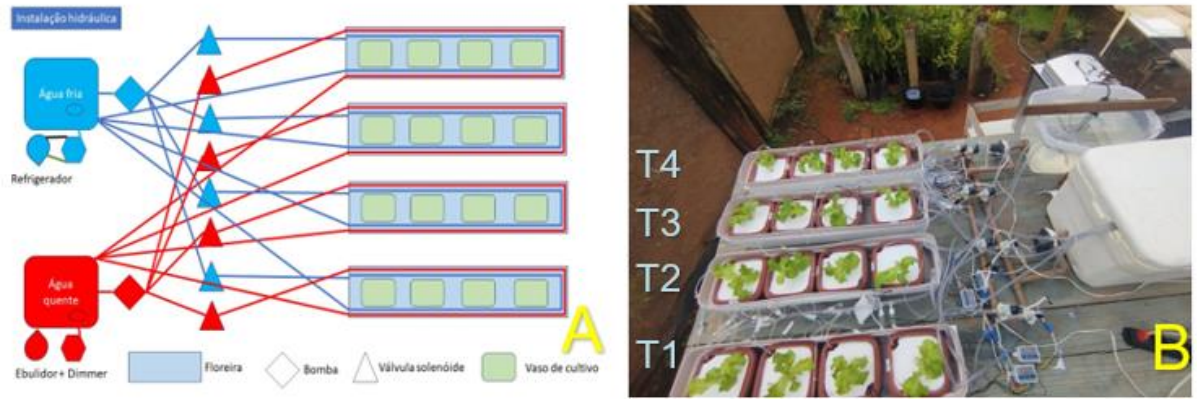
Fonte: Fotos da autora;

A circulação da água nos reservatórios ocorreu por duas eletrobombas conectadas a tubulações de PVC com conexões tipo “T” de ¾, responsáveis pelo fluxo até as linhas de distribuição. O sistema também contou com oito válvulas solenoides e nove controladores digitais de temperatura. Destes, oito realizaram o acionamento automático das válvulas, sendo quatro destinadas ao controle da água aquecida e quatro da água fria, conforme os tratamentos de cada floreira. O nono controlador foi conectado a um dimmer para controle da potência do ebulidor de 1.000 W, programado para aquecer a água do reservatório até 45 °C. Para o resfriamento, utilizou-se um banho maria ultratermostatizado modelo Lima Tec 204/10, programado no próprio equipamento para manter a água a 12 °C no reservatório com água fria.

Ao todo, o sistema elétrico foi estruturado de forma a integrar os controladores de temperatura, válvulas solenoides e equipamentos de aquecimento e resfriamento conforme demonstra a Figura 3. Os controladores digitais foram conectados às válvulas solenoides,

permitindo o acionamento automático conforme a temperatura programada para cada tratamento. Dessa forma, o sistema operou de maneira automatizada, assegurando o controle preciso da temperatura da água em cada tratamento.

Figura 3 — Esquema da instalação elétrica e hidráulica do sistema térmico do projeto (A) e sistema instalado em pleno funcionamento (B).



Fonte: Elaborada pelos autores;

Para o monitoramento da temperatura da água, o sensor térmico NTC foi inserido por submersão no segundo vaso de cada floreira, sendo utilizado como ponto de referência para obtenção da temperatura média da solução nutritiva. Para garantir a uniformidade da temperatura da solução nutritiva em todos os vasos, foram acopladas nas válvulas solenoides as mangueiras conectadas às saídas dos canais de água aquecida e resfriada. Essas mangueiras foram conduzidas para contornar o interior de cada floreira, permitindo o retorno contínuo da água aos respectivos reservatórios, funcionando de forma constante para cada tratamento conforme mostra a Figura 4.

Esse sistema possibilitou a recirculação da água aquecida e fria, contribuindo para a estabilidade térmica e o funcionamento contínuo do sistema. Os vasos contendo a solução ficaram submersos na floreira com água para que pudesse haver a transferência de calor da água da floreira para a solução nutritiva por meio da condução térmica.

Figura 4 — Sistema de recirculação de água para as floreiras com controle de temperatura (A) e floreira do T4 com vasos submersos em água com temperatura controlada (B).



Fonte: Fotos da autora;

Além disso, foi instalado um sistema de aeração em todos os 16 vasos, utilizando um compressor de ar modelo Minjiang PS-950, com quatro saídas. A distribuição do ar foi realizada por mangueiras e pinças de rolete de equipo hospitalar, permitindo a regulagem individual do fluxo de ar e garantindo adequada oxigenação das raízes durante todo o cultivo. As mangueiras foram padronizadas em todos os vasos, sendo mantidas a 10 cm de profundidade e fixadas com abraçadeiras, assegurando oxigenação uniforme entre os tratamentos e evitando variações que pudessem interferir nos resultados experimentais como demonstra abaixo nas Figuras 5 A e B.

Adicionalmente, foi construída uma cobertura de isopor para proteger os equipamentos eletrônicos, como controladores de temperatura e eletrobombas, reduzindo a exposição direta ao sol. A estrutura foi ajustada de modo a não causar interferências no experimento como é possível acompanhar na Figura 5C.

Figura 5 — Ajuste da mangueira do aerador para 10 cm (A), vasos com mangueira fixada com abraçadeira em pleno funcionamento(B) e sistema de cobertura dos componentes eletrônicos (C).



Fonte: Fotos da autora;

Para o monitoramento das condições meteorológicas na estufa, foi utilizado um datalogger construído com Arduino Uno e sensor BME 280, responsável pelo registro contínuo de temperatura em e umidade do interior da estufa durante o período em que o experimento foi executado.

2.3 Condução do experimento

As mudas da cultivar BRS Leila foram adquiridas de viveiro certificado da região. A semeadura foi realizada em 06 de fevereiro, utilizando substrato comercial em células de cultivo. Em 09 de março, data da aquisição, procedeu-se à lavagem das raízes para remoção do excesso de substrato e, posteriormente, ao transplante das mudas para o berçário em sistema hidropônico do tipo NFT (Nutrient Film Technique) da UEP Olericultura do IFB como mostra a Figura 6 abaixo. A escolha da cultivar fundamentou-se em sua ampla adaptação a diferentes sistemas de cultivo, bem como em seu ciclo precoce, estimado em aproximadamente 35 dias em condições de clima quente e 45 dias em clima ameno. De acordo com a Revista Cultivar (2018), a cultivar BRS Leila apresenta elevada tolerância ao calor e formação cônica. Trata-se de uma alface do tipo crespa, de folhas verdes, desenvolvida pela Embrapa com foco na adaptação a altas temperaturas e às mudanças climáticas. Dessa forma, a cultivar foi selecionada para avaliação no presente estudo.

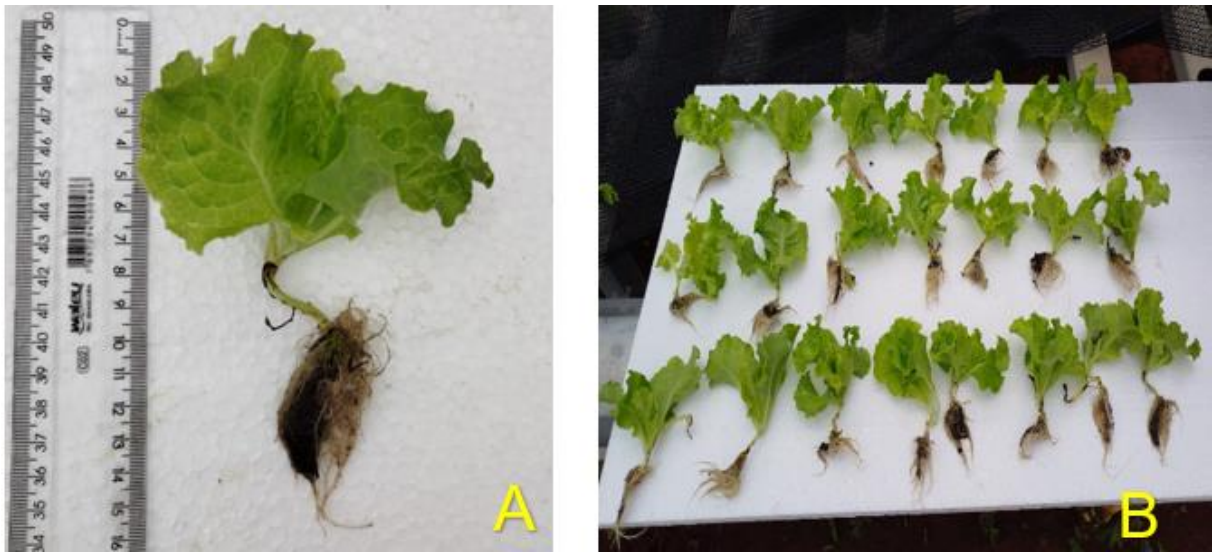
Figura 6 — Mudas de alface BRS Leila (A) e mudas após o transplante no berçário do sistema NFT do setor de UEP Olericultura (B).



Fonte: Fotos da autora;

Após o estabelecimento inicial no sistema NFT, as plantas foram conduzidas até atingirem o estágio adequado de desenvolvimento. As plantas permaneceram no berçário do sistema NFT em pleno funcionamento até o dia 25 de março, quando apresentavam quatro folhas definitivas e aproximadamente 8 cm de altura. No dia do transplante para o sistema DFT, realizou-se a seleção das mudas, com o objetivo de padronizar e garantir a uniformidade das plantas, conforme ilustrado na Figura 7 A e B. O transplantio para os vasos de cultivo no sistema DFT foi realizado no final da tarde. A solução nutritiva do reservatório do sistema NFT foi posteriormente transferida para os vasos do sistema DFT, após a conferência da condutividade elétrica (CE) e do potencial hidrogeniônico (pH) (Figura 8A), que já se encontravam ajustados em aproximadamente 1.500 $\mu S/cm^{-1}$ e na faixa de 5,5 a 6,5, respectivamente, conforme recomendações para a cultura. O monitoramento da CE e do pH da solução nutritiva foi realizado diariamente utilizando-se medidores digitais portáteis distintos, sendo um condutivímetro digital para determinação da CE e um medidor digital de pH, visando o acompanhamento e a manutenção das condições adequadas ao cultivo. Também foi verificado o adequado funcionamento do sistema, incluindo os aeradores em todos os vasos. As plantas foram fixadas em placas de isopor, com o caule envolto em espuma conforme demonstra na Figura 8C.

Figura 7 — Muda após 16 dias no sistema NFT (A) e seleção das mudas a ser transplantada no sistema DFT (B).



Fonte: Fotos da autora;

Figura 8 — Conferência da condutividade elétrica (CE) e do potencial hidrogeniônico (pH) da solução nutritiva do reservatório (A), transplantio das mudas da cultivar BRS Leila para os vasos do experimento, em 25 de março (B) e mudas fixadas em placas de isopor para o sistema DFT (C).



Fonte: Fotos da autora;

As plantas apresentaram bom desenvolvimento, e a contagem das análises foi iniciada a partir de 25 de março. As plantas permaneceram no sistema DFT até completarem 20 dias após o transplantio (DAT).

2.4 Sistema hidropônico DFT

O sistema DFT (Deep Film Technique) é a técnica em que se caracteriza pela produção de plantas em que as raízes são submersas em uma lâmina mais profunda de solução nutritiva, com aeração contínua para garantir uma adequada oxigenação conforme demonstra a Figura 9. Esse sistema apresenta como principais vantagens a maior estabilidade térmica e nutricional, devido ao maior volume de solução, além de apresentar menor suscetibilidade a variações abruptas de pH, CE e temperatura. Essas características são relevantes para o cultivo de alface,

pois contribuem para redução de estresses fisiológicos e favorecem o crescimento uniforme das plantas.

No experimento em questão, o sistema DFT foi utilizado na fase de desenvolvimento após o estabelecimento inicial das mudas, permitindo assim, um melhor controle das condições experimentais, principalmente a temperatura da solução nutritiva.

Figura 9 — Planta com raiz submersa em solução nutritiva no sistema DFT (A) e Vaso do T1R2 apresentando aeração em pleno funcionamento (B).



Fonte: Fotos da autora;

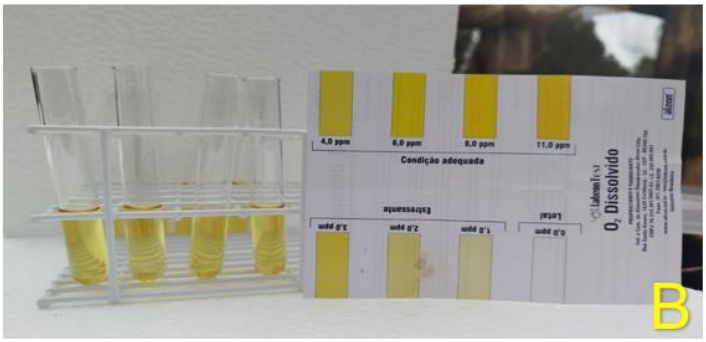
2.4.1 *Aeração do sistema DFT*

A aeração no sistema DFT é necessária para manter níveis adequados de oxigênio dissolvido na solução nutritiva, favorecendo a respiração radicular, o desenvolvimento das plantas e a estabilidade do sistema, sendo um fator importante para o sucesso do cultivo hidropônico.

A fim de assegurar essas condições, a aeração do sistema foi monitorada semanalmente por meio de teste visual para determinação do oxigênio dissolvido na solução nutritiva, foi realizado com o kit Labcon Test O_2 dissolvido, conforme as instruções do fabricante. O teste foi realizado em todos os tratamentos, como demonstrado na Figura 10.

Figura 10 — Reagentes e amostra da solução nutritiva para realização do teste de O_2 dissolvido (A) e amostras do teste de O_2 dissolvido em tubos de ensaio e tabela de comparação (B).





Fonte: Fotos da autora;

Para o teste, os resultados foram registrados imediatamente após a análise de cada amostra, que posteriormente foi acondicionada em tubos de ensaio para melhor visualização.

2.5 Solução nutritiva

A solução nutritiva é o principal meio de fornecimento de água e nutrientes essenciais às plantas no cultivo de sistemas hidropônicos, sendo indispensável para o pleno crescimento e desenvolvimento das plantas. Sua composição envolve fertilizantes sendo macro e micronutrientes em concentrações ajustadas de acordo com a necessidade da cultura. No cultivo da alface, o manejo da solução é fundamental e necessita de atenção quanto à condutividade elétrica (CE) e ao pH, variáveis que influenciam diretamente a disponibilidade e absorção de nutrientes pelas raízes.

A solução nutritiva foi preparada utilizando fertilizantes à base de nitrato de cálcio, ferro quelatizado (Fe-EDDHA) e Hidrogood Fert®. O Hidrogood Fert® apresenta formulação NPK 09-10-29, acrescida de magnésio, enxofre e micronutrientes, contendo nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn). O nitrato de cálcio foi utilizado como fonte complementar de cálcio (Ca) e nitrogênio (N), enquanto o Fe-EDDHA forneceu ferro quelatado de elevada estabilidade na solução nutritiva. Essa formulação foi adaptada pelo professor Nilton Cometti e já é usualmente adotada no Instituto Federal de Brasília – *Campus* Planaltina. A composição da solução nutritiva encontra-se apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 — Composição da solução nutritiva, preparada a partir de fertilizante comercial, utilizada no cultivo de alface no IFB – *Campus* Planaltina.

VOLUME DA SOLUÇÃO CONCENTRADA	SOLUÇÃO (A)	SOLUÇÃO (B)
	Nitrato de Cálcio + Fe-EDDHA	Hidrogood Fert
20L	2.000 g + 120 g	2.640 g
	Para 3.000 L de solução	
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (EC)	**SOLUÇÃO (A)**	**SOLUÇÃO (B)**
1.500 µS/cm^{-1}	1.500 g + 90 g	2.000 g
1.500 µS/cm^{-1}	15L	15L
100 µS/cm^{-1}	1 L	1 L

Fonte: Adaptado por Cometti.

A solução nutritiva foi preparada em caixa d'água com capacidade de 3.000 L, utilizando-se água como base. Foram adicionados 1.500 g de nitrato de cálcio, 90 g de Fe-EDDHA e 2.000 g do fertilizante comercial Hidrogood Fert®, conforme recomendação do fabricante, com o objetivo de atingir condutividade elétrica (CE) de aproximadamente 1.500µS cm^{-1}, adequada para o cultivo hidropônico de alface.

Adicionalmente, foi preparada uma solução estoque para reposição da solução concentrada. Para o volume de 20 L, utilizaram-se 2.000 g de nitrato de cálcio, 120 g de Fe-EDDHA e 2.640 g do fertilizante comercial Hidrogood Fert®. Essa solução foi utilizada para correção da condutividade elétrica sempre que necessário, compensando o consumo de nutrientes pelas plantas seguindo o a adição orientada no Quadro 1.

A solução nutritiva do sistema DFT foi renovada integralmente a cada sete dias, ou conforme a necessidade. Durante o período experimental, realizaram-se monitoramentos diários da condutividade elétrica (CE) e do pH. A correção do pH foi realizada por meio da adição de solução de hidróxido de potássio (KOH) a 1 mol L^{-1}, enquanto a condutividade elétrica foi ajustada mediante a adição de solução estoque, visando à manutenção de condições adequadas ao desenvolvimento das plantas.

2.6 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em esquema unifatorial, tendo como único fator avaliado a temperatura da solução nutritiva. Foram estabelecidos quatro tratamentos, correspondentes às temperaturas de 22, 25, 28 e 31 ±1 °C, denominados T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Cada floreira recebeu um tratamento, sendo alocados quatro vasos por floreira, com uma planta em cada vaso, totalizando quatro floreiras e 16 plantas avaliadas ao longo do experimento.

2.7 Variáveis avaliadas

Foram avaliadas variáveis fisiológicas e de crescimento das plantas de alface ao final do período experimental de 20 DAT. As variáveis fisiológicas foram obtidas por meio de analisador portátil de gases por infravermelho (IRGA) modelo LCi T (ADC BioScientific Ltd., sendo avaliadas: taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), taxa de transpiração (E) e concentração interna de CO_2 (Ci). As avaliações com o equipamento ocorreram no horário entre 9:00 horas e 11:00 horas da manhã.

As variáveis de crescimento foram a massa fresca de folhas, caule e raiz (MFF, MFC e MFR), obtida por pesagem imediata após a colheita, e a massa seca (MSF, MSC e MSR), determinada após secagem do material vegetal em estufa com circulação de ar forçado a 55 °C até massa constante. Adicionalmente, o volume das raízes (VOLR) foi determinado em proveta, em laboratório, pelo método do volume radicular baseado no Princípio de Arquimedes. Em seguida, as raízes foram previamente preparadas, sendo secas com papel toalha e acondicionadas em sacos de papel, pesadas e secas na estufa de secagem.

Além disso, a área foliar das plantas foi estimada por método digital, utilizando-se scanner para obtenção das imagens das folhas e posterior análise no software ImageJ. As imagens foram calibradas com escala de referência de 1 cm, permitindo a conversão das medidas em pixels para valores reais de área foliar. A estimativa da área foliar total foi realizada com base na relação entre a massa fresca total das folhas da planta (MFF), a área foliar da amostra escaneada (AFS) e a massa da amostra utilizada para determinação da área foliar (ARAF), conforme o cálculo AFP = (MFF × AFS) / ARAF, em que AFP corresponde à área foliar total da planta (cm^2). A determinação da área foliar por digitalização e processamento de imagens é amplamente utilizada em estudos de análise de crescimento vegetal devido à rapidez, precisão e baixo custo operacional do método (Schneider, Rasband e Eliceiri, 2012).

2.8 Análise estatística

Os dados obtidos foram tabulados em planilhas eletrônicas no Microsoft Excel e submetidos à análise estatística por meio de estatística descritiva, com determinação das médias e dos desvios-padrão para cada variável avaliada em função das temperaturas da solução nutritiva. Posteriormente, os resultados foram representados graficamente para análise do comportamento das variáveis em resposta aos tratamentos aplicados.

2.9 Ferramentas digitais de apoio à elaboração do trabalho

Durante a elaboração deste trabalho, foram utilizadas ferramentas digitais de apoio à escrita e organização textual, incluindo o modelo de linguagem ChatGPT (GPT-5.5), da OpenAI, para revisão e aprimoramento da clareza e coesão textual. A plataforma Jenni AI (2026), como suporte na indicação e organização de referências bibliográficas e o Manus AI (2026), utilizado para apoio na organização estrutural e formatação do trabalho. Após o uso dessas ferramentas, todo o conteúdo foi revisado, ajustado e validado pela autora, garantindo conformidade com o método científico, sendo de inteira responsabilidade da mesma as informações apresentadas neste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a temperatura da solução nutritiva influenciou diretamente o crescimento da cultivar no estudo. As variáveis fisiológicas e de produção de biomassa apresentaram respostas distintas entre os tratamentos avaliados, evidenciando alterações no desempenho da cultivar em função das condições térmicas da solução nutritiva. De maneira geral, observou-se que o desempenho das plantas submetidas à temperatura de 28 °C, indicam condições mais favoráveis ao metabolismo e ao crescimento vegetal. Em contrapartida, os tratamentos submetidos às temperaturas de 22, 25 e 31 °C apresentaram tendência de redução em algumas variáveis fisiológicas e de crescimento, sugerindo limitações no desempenho da cultura nessa faixa térmica.

De modo geral, os resultados relacionados à produção de fitomassa e às variáveis fisiológicas apresentaram comportamento semelhante entre os tratamentos avaliados, evidenciando tendência consistente nas respostas das plantas às diferentes temperaturas da solução nutritiva.

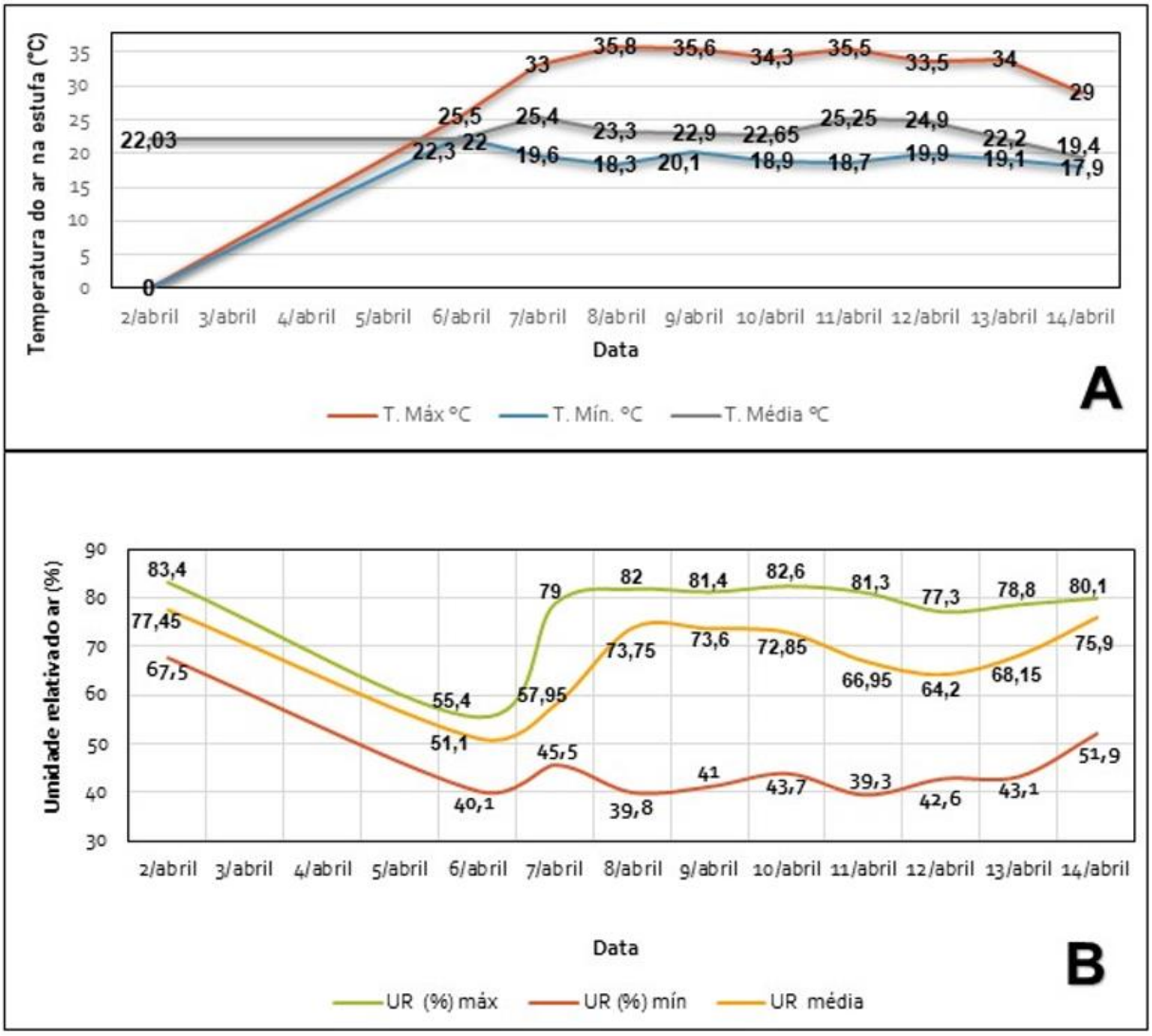
3.1 Condições meteorológicas da casa de vegetação

Os dados médios de temperatura (°C) e umidade relativa (UR) observados ao longo do experimento estão apresentados na Figura 11. A temperatura média variou entre 19,4 e 25,4°C, enquanto a umidade relativa média variou entre 51,1 e 77,45%. Além disso, observou-se comportamento inversamente proporcional entre temperatura e umidade relativa, com redução da UR nos períodos de maior temperatura.

De forma geral, as condições ambientais permaneceram adequadas para o desenvolvimento das plantas durante o experimento. Não foi possível realizar a coleta de dados entre os dias 25/02/2026 e 05/03/2026 devido a uma falha técnica no sistema de monitoramento, porém os registros voltaram a ser realizados normalmente a partir do dia 06/03/2026.

Esses resultados estão de acordo com o que é descrito na literatura para a cultura da alface. Segundo Radin (2004), essa hortaliça apresenta melhor desempenho em condições de temperatura moderada e umidade relativa entre 60% e 80%, faixa que favorece processos fisiológicos como crescimento vegetativo e expansão foliar. Assim, observa-se que, apesar de algumas oscilações e do período sem registro, as condições ambientais predominantes durante o experimento permaneceram, em grande parte, próximas às recomendadas para o adequado desenvolvimento da cultura.

Figura 11 — Temperatura no interior da casa de vegetação(A) e Umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação (B).



Fonte: Dados da pesquisa;

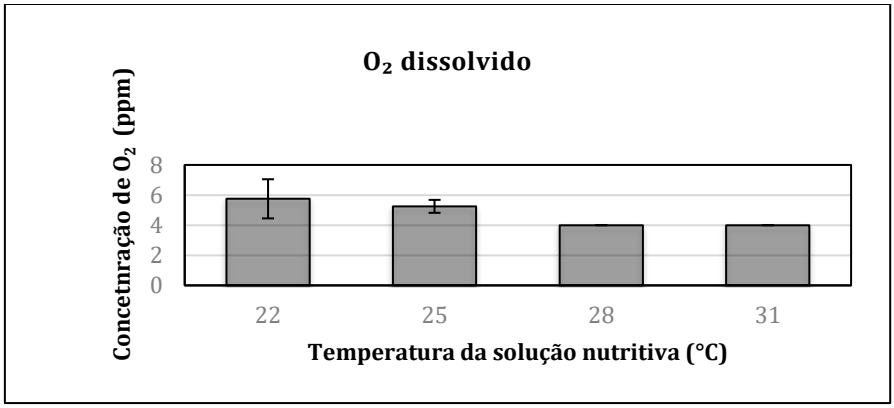
Assim, observa-se que o ambiente de cultivo se manteve, em sua maior parte do tempo, dentro da faixa considerada adequada para o desenvolvimento da alface, uma vez que temperaturas entre 20 e 25 °C são geralmente apontadas como ideais para a cultura (Maldonade, Mattos e Moretti, 2014), reduzindo as interferências externas nos tratamentos aplicados. Vale ressaltar ainda que a cultivar BRS Leila apresenta tolerância a temperaturas mais elevadas, característica que pode ter contribuído para o desempenho observado mesmo em condições térmicas superiores à faixa considerada ideal para a cultura.

3.2 O_2 dissolvido na solução nutritiva

Os valores de O_2 dissolvido (OD) da solução nutritiva observados durante o período experimental estão apresentados na Figura 12 e foram obtidos por meio do kit Labcon Test O_2. As avaliações foram realizadas aproximadamente a cada quatro dias, sendo finalizadas quando se observou estabilização dos valores. Verificou-se a variação dos níveis de OD em função das temperaturas da solução nutritiva, sendo observados menores valores nos tratamentos com

temperaturas mais elevadas. Os resultados corroboram com o trabalho de Cometti (2013), que relata que foi observada a diminuição do oxigênio dissolvido na solução nutritiva à medida que a temperatura da solução nutritiva aumentou. Sena *et al.*, (2023) destacam que a temperatura da solução nutritiva e o oxigênio são variáveis interdependentes e que, quando há elevação da temperatura da solução acima de 35°C, ocorre impacto negativo na produtividade.

Figura 12 — Valores médios de oxigênio dissolvido (OD) da solução nutritiva nos diferentes tratamentos. As barras de erro representam o desvio padrão.



Fonte: Dados da pesquisa;

Os resultados indicam que a elevação da temperatura da solução nutritiva pode comprometer processos fisiológicos relacionados à respiração e ao metabolismo radicular, afetando negativamente o desenvolvimento da alface. Esse comportamento reforça a importância do controle térmico em sistemas hidropônicos do tipo DFT, nos quais a temperatura da solução nutritiva exerce influência direta sobre o desempenho fisiológico das plantas. Em estudo conduzido com morangueiro em sistema hidropônico de fluxo profundo, temperaturas de 30 °C na zona radicular reduziram significativamente o consumo de oxigênio pelas raízes e a viabilidade celular das plantas (Sakamoto *et al.*, 2016), comportamento que pode estar relacionado aos resultados observados neste estudo com alface.

3.3 Variáveis fisiológicas (IRGA)

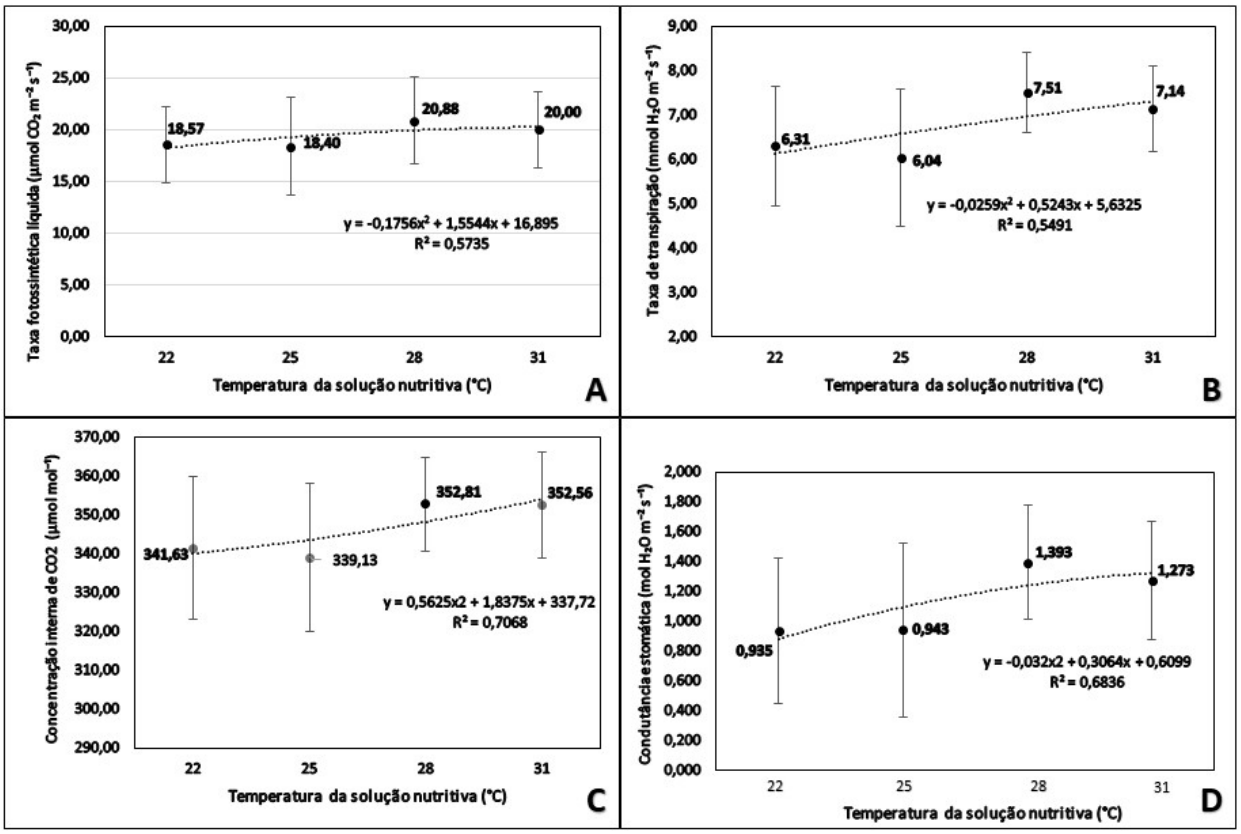
As variáveis fisiológicas analisadas demonstraram resposta consistente à variação da temperatura da solução nutritiva, evidenciando sua influência direta sobre o desempenho da alface no sistema DFT. De modo geral, observa-se que as alterações em fotossíntese, trocas gasosas e fluxo transpiratório seguem um padrão integrado de resposta, no qual o tratamento de 28 °C se destaca como condição em que apresenta tendências a uma eficiência fisiológica (Figura 13). Esse comportamento é evidenciado, inicialmente, pela taxa fotossintética líquida (A), que atingiu seu valor máximo em 28 °C (20,88 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), seguida por 31 °C (20,00 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), enquanto 22 °C e 25 °C apresentaram valores inferiores conforme demonstra o gráfico (Figura 13 A).

Embora o tratamento de 31 °C ainda mantenha elevada taxa de assimilação, esse incremento não se reflete em ganho proporcional de eficiência fisiológica geral, sugerindo maior custo metabólico associado à manutenção da fotossíntese em temperatura elevada, conforme discutido por Taiz e Zeiger (2017) ao abordarem o aumento da respiração e o desequilíbrio entre assimilação e consumo de carbono sob estresse térmico.

Em consonância com esse padrão, a condutância estomática (gs) e a transpiração (E) (Figura 13 D e B) também apresentaram tendências a maiores valores no T3 (28°C), indicando maior abertura estomática e intensificação do fluxo transpiratório. Essa condição favorece simultaneamente a difusão de CO_2 para o interior da folha e a regulação térmica da planta, reforçando o melhor equilíbrio funcional observado nesse tratamento (Larcher, 2003). Em contrapartida, em 31 °C, a redução desses parâmetros sugere início de limitação estomática associada ao estresse térmico, o que contribui para a perda relativa de eficiência fisiológica.

De forma complementar, a concentração interna de CO_2 (Ci) apresentou aumento nos tratamentos mais quentes (Figura 13 C), indicando que, apesar da manutenção da assimilação, ocorre menor eficiência de carboxilação e possível descompasso entre difusão e fixação de CO_2. Esse padrão reforça a interpretação de que parte do CO_2 disponível não é plenamente convertido em fotoassimilados sob condições de maior temperatura, refletindo limitações bioquímicas e maior influência das perdas respiratórias, conforme discutido por Larcher (2003). Além disso, temperaturas elevadas podem aumentar a atividade fotorrespiratória e diminuir a eficiência fotossintética das plantas em condições atmosféricas normais de CO_2 (Marenco e Lopes, 2009).

Figura 13 — Taxa fotossintética líquida (A), taxa de transpiração (B), concentração interna de CO_2 (C) e condutância estomática (D) de alface (*Lactuca sativa* L., cv. BRS Leila) cultivada em sistema hidropônico DFT submetida a diferentes temperaturas da solução nutritiva (22, 25, 28 e 31 °C).



Fonte: Dados da pesquisa;

Ao integrar essas respostas, observa-se que o comportamento fisiológico segue uma tendência coerente entre variáveis, com tendências a maior integração funcional em 28 °C e perda progressiva de eficiência em temperaturas mais elevadas e nos resultados de T1 e T2. Nesse contexto, destaca-se que o tratamento de 25 °C (T2) apresentou um comportamento

pontualmente inferior em relação a 22 °C em algumas variáveis, o que se afasta da tendência geral esperada. Essa discrepância foi identificada exclusivamente na análise descritiva dos dados, sem evidência de causa experimental específica durante a condução do estudo. Assim, considerando a ausência de falhas sistemáticas e a consistência dos demais tratamentos, esse comportamento é interpretado como variação experimental inerente ao conjunto de dados, não comprometendo a tendência fisiológica observada nem a interpretação global dos efeitos da temperatura.

No geral, os resultados estão coerentes com a literatura, pois segundo Taiz e Zeiger, (2017) em espécies C3 o aumento da temperatura pode estimular a atividade enzimática da fotossíntese, mas também intensificar a fotorrespiração e reduzir a eficiência do uso de carbono, afetando negativamente a fotossíntese líquida em temperaturas elevadas. De maneira convergente, Frantz, Cometti e Bugbee (2004), ao estudarem alface em sistema hidropônico, observaram que temperaturas da zona radicular entre 27 e 30 °C favorecem o ganho líquido de carbono e a expansão foliar, promovendo maior eficiência fotossintética.

De forma geral, os resultados indicam que 28 °C representa a condição de maior equilíbrio funcional entre fotossíntese, condutância estomática, transpiração e concentração interna de CO_2, enquanto em 31°C observa-se um início da curva na linha de tendência à redução da eficiência fisiológica global associada ao início de descompensação metabólica. Esse comportamento pode estar relacionado ao estresse térmico em espécies C3, no qual altas temperaturas podem afetar negativamente a fotossíntese, respiração, relações hídricas e estabilidade de membranas, comprometendo o desempenho fisiológico das plantas (Wahid *et al.*, 2007). Em complementação, Flexas e Medrano (2002) reforçam que a limitação do desempenho fotossintético sob condições de estresse está fortemente associada à redução da disponibilidade de CO_2 nos cloroplastos, regulada principalmente pelas condutâncias estomática e mesofílica, o que compromete o balanço energético da planta. Além disso, as respostas observadas também podem estar associadas às características genéticas da cultivar BRS Leila, uma vez que cultivares desenvolvidas pela Embrapa Hortaliças citada anteriormente apresentam diferentes níveis de adaptação a condições térmicas elevadas. Estudos da Embrapa indicam que alfaces desenvolvidas pelo programa da instituição apresentaram desenvolvimento satisfatório em temperaturas de até 30 °C por períodos prolongados, reforçando sua tolerância ao calor e estabilidade fisiológica sob condições de estresse térmico (Embrapa, 2024).

De forma integrada, os resultados permitem inferir que a condição de 28 °C estabelece o ponto de maior equilíbrio funcional do sistema avaliado, promovendo melhor coordenação entre assimilação de CO_2, abertura estomática, fluxo transpiratório e concentração interna de CO_2. Por outro lado, em 31 °C observa-se o início de uma redução progressiva da eficiência fisiológica, com sinais de descompensação metabólica, ainda que a assimilação fotossintética se mantenha relativamente elevada. Esses resultados indicam que o desempenho da alface no sistema DFT é otimizado em temperatura intermediária e comprometido em temperaturas mais elevadas.

Com isso, ressalta-se a necessidade de estudos com maior número de repetições experimentais ao longo do tempo para maior robustez dos dados e consolidação das tendências observadas.

3.4 Variáveis de crescimento e produção

Os resultados obtidos evidenciam que a temperatura da solução nutritiva exerceu influência significativa sobre o crescimento e o acúmulo de biomassa da alface (cv. BRS Leila) no presente estudo, afetando diretamente tanto variáveis produtivas quanto morfológicas.

Em síntese, observa-se uma resposta quadrática nas veriáveis de crescimento, com desempenho superior na temperatura intermediária de 28 °C, enquanto os tratamentos de 22 °C e 31 °C apresentaram reduções e comportamento semelhante em praticamente todas as variáveis analisadas.

3.4.1 *Fitomassa*

Os resultados obtidos indicam que a produção da alface no presente estudo, foi influenciada pela temperatura da solução nutritiva, com melhor desempenho observado no tratamento de 28 °C. Nessa condição, verificou-se maior acúmulo de massa fresca, massa seca e fitomassa total da planta em comparação aos demais tratamentos.

Nesse sentido, a superioridade produtiva observada a 28 °C contrasta com os resultados obtidos por Sanches *et al.*, (2005), que, ao avaliarem o resfriamento da solução nutritiva em alface do grupo americana, verificaram maior produção de biomassa em temperaturas próximas a 20 °C. Essa divergência pode estar associada a diferenças genéticas entre os materiais avaliados, especialmente no que se refere à tolerância ao estresse térmico radicular.

Por outro lado, segundo Hooks *et al.*, (2022), o controle da temperatura da zona radicular em sistemas hidropônicos favoreceu o crescimento e o acúmulo de biomassa em hortaliças folhosas, principalmente em função da melhoria das condições fisiológicas do sistema radicular. Além disso, os autores destacam que a resposta produtiva varia conforme o genótipo, indicando que cultivares adaptadas a condições de maior temperatura podem apresentar melhor desempenho sob temperaturas mais elevadas da solução nutritiva.

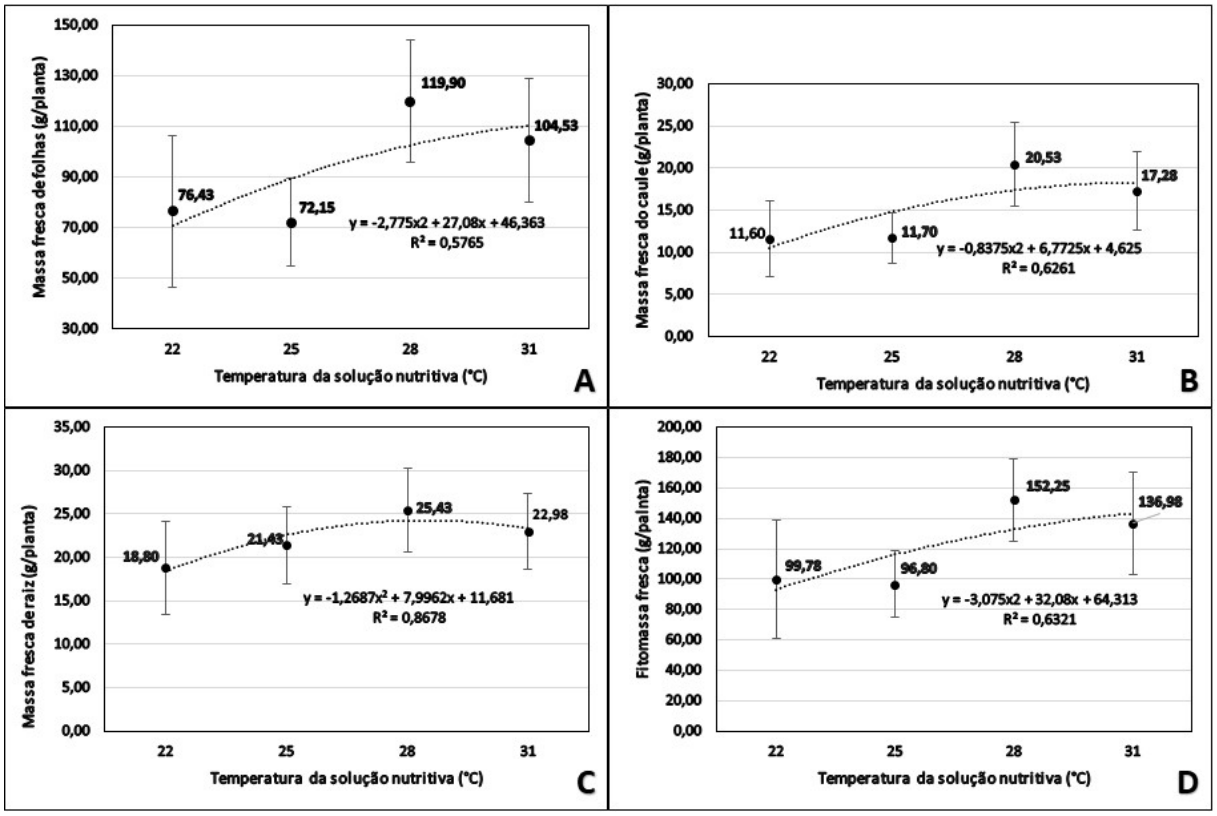
Dessa forma, os resultados obtidos podem estar relacionados a adaptação da alface cv. BRS Leila a ambientes de clima quente pode ter contribuído para a manutenção da atividade fisiológica e do crescimento vegetal mesmo sob temperaturas mais elevadas da solução nutritiva, o que foi observado no presente estudo. Tendo em vista que o crescimento e o desenvolvimento das plantas são fortemente influenciados pela temperatura do ambiente, cada espécie apresenta uma faixa térmica própria, composta por valores mínimo, ótimo e máximo para seu desenvolvimento (Hatfield e Prueger, 2015). Além disso, estudos com diferentes variedades mostram que cultivares adaptadas ao clima tropical possuem mecanismos fisiológicos que permitem manter taxas de expansão foliar e acúmulo de biomassa estáveis em condições térmicas que seriam limitantes para outras variedades (Bittencourt *et al.*, 2024; Thakulla *et al.*, 2021).

Quanto à produção, no que se refere à massa fresca e à fitomassa total das plantas (Figura 14), o maior acúmulo foi observado no tratamento de 28 °C, indicando uma condição favorável ao equilíbrio entre a absorção de nutrientes e o controle da transpiração. Em sistemas DFT, a elevada capacidade térmica da solução nutritiva contribui para maior estabilidade da zona radicular, favorecendo a manutenção da hidratação dos tecidos vegetais (ComettI *et al.*, 2013). Além disso, Nxawe, Laubscher e Ndakidemi (2009), em estudos com espinafre (*Spinacia oleracea* L.) em sistema hidropônico, verificaram que temperaturas da solução

nutritiva entre 24 e 28 °C favoreceram o crescimento vegetal, sendo o melhor desempenho observado a 28 °C.

Esses resultados corroboram a tendência observada no presente estudo, sugerindo que a faixa intermediária de temperatura pode representar um ponto de equilíbrio fisiológico favorável ao acúmulo de biomassa em diferentes espécies folhosas. Entretanto, a redução registrada a 31 °C sugere que temperaturas elevadas da solução nutritiva podem provocar desequilíbrios metabólicos, comprometendo o desempenho produtivo, mesmo em cultivares com maior tolerância ao calor.

Figura 14 — Massa fresca das folhas (A), massa fresca do caule (B), massa fresca de raiz (C) e fitomassa fresca total (D) de alface (*Lactuca sativa* L., cv. BRS Leila) cultivada em sistema hidropônico DFT submetida a diferentes temperaturas da solução nutritiva (22, 25, 28 e 31 °C). Os valores estão expressos em g planta^{-1}.



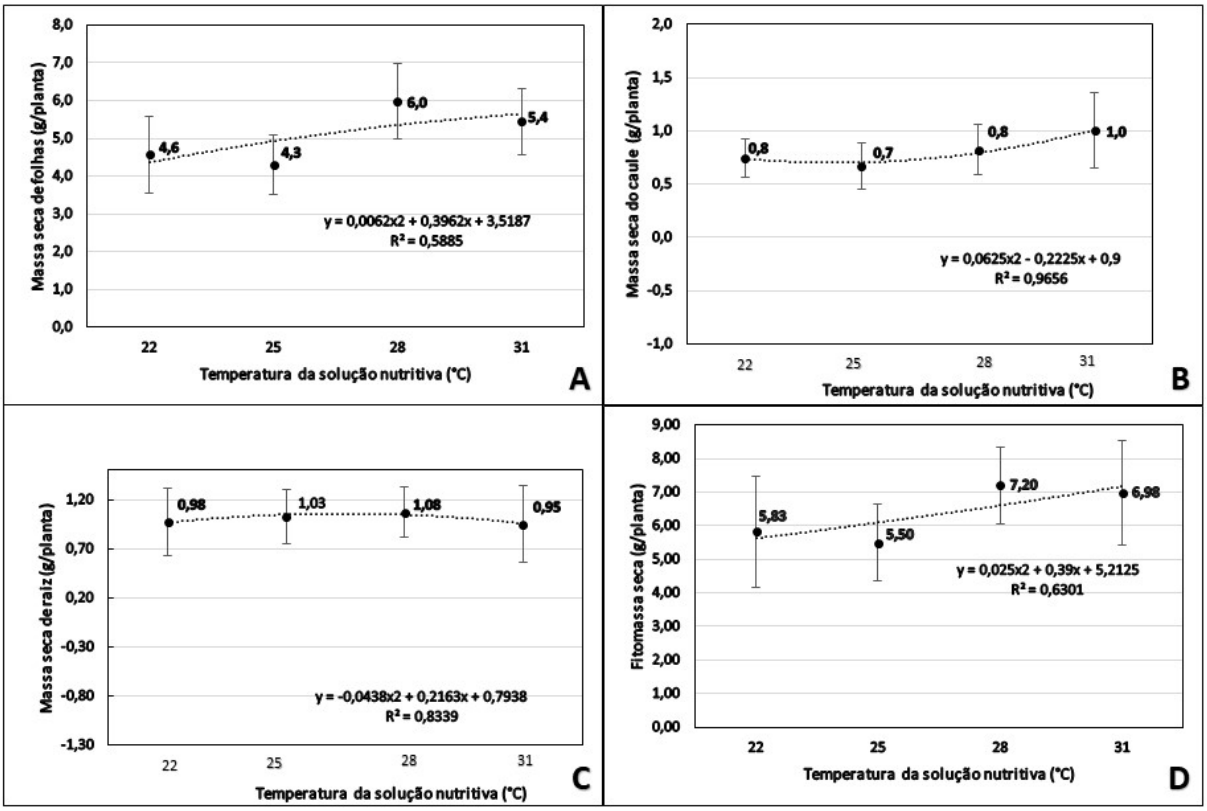
Fonte: Dados da pesquisa;

Em relação à massa seca (Figura 15), os resultados seguiram a mesma tendência observada para a massa fresca, evidenciando que a temperatura de 28 °C proporcionou maior eficiência na conversão de fotoassimilados em fitomassa vegetal (Grigoleto, 2013). Paralelamente a isso, os menores valores observados nos tratamentos de 22 °C e 31 °C indicam limitações fisiológicas associadas às condições térmicas extremas. Assim, em temperaturas mais baixas, esse comportamento pode estar relacionado à redução da atividade metabólica, enquanto em temperaturas mais elevadas o aumento da respiração pode intensificar o gasto energético da planta, reduzindo o acúmulo de fitomassa (Wang *et al.*, 2023).

Dessa forma, a análise das linhas de tendência dos gráficos apresentados nas Figuras 14 e 15 evidenciou comportamento semelhante entre as variáveis de massa fresca de folhas, raiz, caule e fitomassa total, indicando resposta consistente aos tratamentos aplicados. De

maneira semelhante, a massa seca de folhas e caule também apresentou tendências equivalentes, reforçando a coerência do padrão observado entre os diferentes órgãos vegetais. Contudo, a massa seca de raiz apresentou comportamento distinto, com médias crescentes ao longo dos tratamentos. Ainda assim, a fitomassa seca acompanhou o comportamento predominante das demais variáveis, refletindo a tendência geral de resposta das plantas às condições avaliadas.

Figura 15 — Massa seca das folhas (A), massa seca do caule (B), massa seca de raiz (C) e fitomassa seca total (D) de alface (*Lactuca sativa* L., cv. BRS Leila) cultivada em sistema hidropônico DFT submetida a diferentes temperaturas da solução nutritiva (22, 25, 28 e 31 °C). Os valores estão expressos em g planta^{-1}.



Fonte: Dados da pesquisa.

3.4.2 *Número de folhas, área foliar, volume radicular e teor de água.*

O número de folhas (20,50) e a área foliar (2941,76 cm²) foram maiores no tratamento de 28 °C, refletindo maior expansão foliar e, consequentemente, maior capacidade fotossintética. A área foliar constitui um dos principais determinantes da produtividade, uma vez que influencia diretamente a interceptação de luz e a produção de fotoassimilados (Figura 16 A e B) sendo amplamente reconhecida como um dos principais componentes relacionados ao rendimento das culturas (Taiz e Zeiger, 2017), além de apresentar forte relação com o desempenho produtivo em sistemas hidropônicos, nos quais o ambiente radicular controlado favorece a eficiência no uso de água e nutrientes e, consequentemente, o crescimento da parte aérea (Resh, 2013).

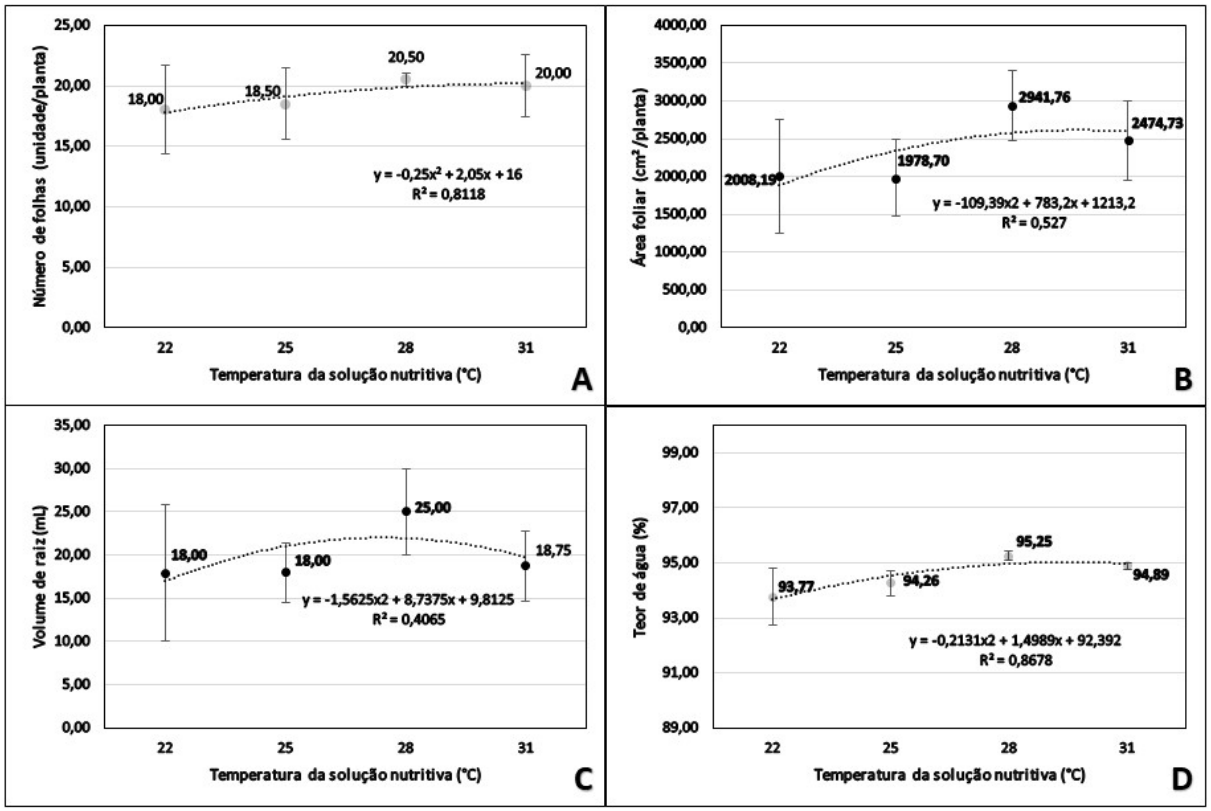
Os resultados para o volume radicular demonstram que a temperatura de 28 °C proporcionou o melhor ambiente para o crescimento das raízes, atingindo a média de 25,00 mL. A redução para 18,75 mL (em comparação aos 25,00 mL de 28 °C) reflete o impacto do estresse térmico (Figura 16 C). Nessa temperatura, ocorre uma diminuição na solubilidade do oxigênio

dissolvido na solução nutritiva, o que pode provocar hipóxia radicular e comprometer a respiração e a viabilidade das células das raízes. Essa tendência de declínio no volume radicular a partir de 31 °C corrobora a literatura já mencionada, que indica que temperaturas elevadas na zona radicular desequilibram o gasto energético da planta devido ao aumento da respiração (Sena *et al.*, 2023).

Em relação ao teor de água, observou-se maior estabilidade e/ou valores mais elevados no tratamento de 28 °C, sugerindo melhor regulação hídrica (Figura 16 D). Entretanto, no tratamento de 31 °C, a redução dessa variável pode indicar início de desbalanço hídrico, possivelmente associado ao aumento da transpiração e à limitação da absorção de água sob condições de estresse térmico, fenômeno frequentemente relatado em hortaliças folhosas sob temperaturas elevadas (Wang *et al.*, 2023).

Nesse contexto, os resultados evidenciam uma forte integração entre parte aérea e sistema radicular no tratamento de 28 °C, indicando maior equilíbrio fisiológico da planta. Esse equilíbrio favorece simultaneamente o crescimento vegetativo, a absorção de água e nutrientes e a manutenção do estado hídrico dos tecidos, resultando em um desempenho favorável à cultivar sob essa condição térmica.

Figura 16 — Número de folhas (A), área foliar (B), volume de raiz (C) e teor de água (D) de alface (*Lactuca sativa* L., cv. BRS Leila) cultivada em sistema hidropônico DFT submetida a diferentes temperaturas da solução nutritiva (22, 25, 28 e 31 °C). Os valores estão expressos em unidade planta^{-1}, cm^2 planta^{-1}, mL e %, respectivamente.



Fonte: Dados da pesquisa;

De forma abrangente, os resultados obtidos no presente trabalho indicam que a temperatura de 28 °C proporcionou o melhor desempenho da cv. BRS Leila em sistema

hidropônico DFT, favorecendo o crescimento e o acúmulo de biomassa, enquanto as temperaturas de 22 °C e 31 °C apresentaram limitações no desenvolvimento das plantas, sugerindo redução no desempenho fisiológico nas condições avaliadas. Dessa forma, observa-se a relevância do controle da temperatura da solução nutritiva no contexto do experimento, sendo recomendada a realização de novos estudos e repetições no presente sistema, visando confirmar e fortalecer a consistência dos resultados obtidos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos no presente estudo, pode-se concluir que:

1. A temperatura da solução nutritiva apresentou influência sobre o desempenho fisiológico e produtivo da alface cv. BRS Leila em sistema hidropônico DFT com controle automatizado, evidenciando seu papel determinante nas variáveis avaliadas.

2. A condição de 28 °C indicou melhores resultados entre os tratamentos avaliados, refletido em maior acúmulo de biomassa e superior desenvolvimento vegetativo e foliar. Enquanto isso, as temperaturas de 22 °C e 31 °C restringiram o crescimento e o acúmulo de massa, indicando redução na eficiência fisiológica da cultura fora da faixa intermediária testada.

3. O objetivo proposto foi atendido, uma vez que foi possível quantificar a resposta da cultura às diferentes temperaturas da solução nutritiva no sistema montado. Entretanto, recomenda-se a realização de estudos complementares e repetições experimentais ao longo do tempo, visando aumentar a robustez estatística e a consistência dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

BITTENCOURT, R. F. P. de M. *et al*. Morphophysiology and postharvest quality of hydroponic lettuce cultivars grown under high temperature. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 5, e277774, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n5e277774. Acesso em: 14 maio 2026.

COMETTI, Nilton Nélio et al. Cooling and concentration of nutrient solution in hydroponic lettuce crop. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 287–292, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000200018. Acesso em: 14 maio 2026.

COMETTI, Nilton Nélio**. Nutrição mineral da alface (Lactuca sativa L.) em cultura hidropônica – sistema NFT.** 2003. Tese (Doutorado em Agronomia) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2003. Disponível em: https://rima.ufrrj.br/jspui/bitstream/20.500.14407/9091/3/2003%20-%20Nilton%20Nelio%20Cometti.pdf. Acesso em: 2 mar. 2026.

COMETTI, Nilton Nélio; GENUNCIO, Gláucio da Cruz; ZONTA, Everaldo (orgs.). **Hidroponia para técnicos**. 1. ed. Brasília: Editora IFB, 2019. 157 p.

EMBRAPA. Alfaces da Embrapa se desenvolveram em temperaturas de 30 °C durante 45 dias. **Portal Embrapa – Notícias**, 4 jun. 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/89694749/alfaces-da-embrapa-se-desenvolveram-em-temperaturas-de-30c-durante-45-dias. Acesso em: 2 mar. 2026.

EMBRAPA. Calor pode inviabilizar cultivo de alface em campo aberto no Brasil até o fim do século. **Portal Embrapa – Notícias**, 2 set. 2025. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/102729113/calor-pode-inviabilizar-cultivo-de-alface-em-campo-aberto-no-brasil-ate-o-fim-do-seculo. Acesso em: 2 mar. 2026.

FAQUIN, Valdemar; FURTINI NETO, Antônio Eduardo; VILELA, Luiz Antônio Augusto. **Produção de alface em hidroponia**. Lavras: UFLA, 1996. 50 p.

FLEXAS, Jaume; MEDRANO, Hipólito. Energy dissipation in C3 plants under drought. **Functional Plant Biology,** v. 29, n. 10, p. 1209–1215, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1071/FP02015. Acesso em: 14 maio 2026.

FRANTZ, Jonathan M.; COMETTI, Nilton Nélio; BUGBEE, Bruce G. Effect of root-zone temperature on growth and photosynthesis of lettuce in hydroponics. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 129, n. 3, p. 331–338, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.21273/JASHS.129.3.0331. Acesso em: 14 maio 2026.

GRIGOLETO, Marlon Wander. **Influência da temperatura e vazão da solução nutritiva sobre o crescimento, acúmulo de pigmentos e nitrato de alface**. 2013. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013. Disponível em: https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/2766. Acesso em: 15 maio 2026.

HATFIELD, Jerry L.; PRUEGER, John H. Temperature extremes: effect on plant growth and development**. Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4–10, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001. Acesso em: 14 maio 2026.

HENZ, Gilmar Paulo; SUINAGA, Fábio. **Tipos de alface cultivados no Brasil**. Brasília: Embrapa, 2009. (Comunicado Técnico, 75).

HOOKS, T. *et al.* Effect of nutrient solution cooling in summer and heating in winter on the performance of baby leafy vegetables in deep-water hydroponic systems. **Horticulturae,** v. 8, n. 8, art. 749, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/horticulturae8080749. Acesso em: 14 maio 2026.

LARCHER, Walter**. Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups**. 4. ed. Berlin: Springer, 2003.

MALDONADE, Iriani Rodrigues; MATTOS, Leonora Mansur; MORETTI, Celso Luiz. **Manual de boas práticas agrícolas na produção de alface**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2014. 44 p.

MARENCO, Ricardo Antonio; LOPES, Nei Fernandes. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral.** 3. ed. Viçosa: UFV, 2009. 486 p.

NXAWE, S.; LAUBSCHER, C. P.; NDAKIDEMI, P. A. Effect of regulated irrigation water temperature on hydroponics production of spinach (*Spinacia oleracea* L.). **African Journal of Agricultural Research**, v. 4, n. 12, p. 1442–1446, 2009.

RADIN, B. et al. Crescimento de cultivares de alface conduzidas em estufa e a campo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 178–181, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0102-05362004000200003. Acesso em: 14 maio 2026.

RAY, Deepak K. et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6, art. 5989, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1038/ncomms6989. Acesso em: 14 maio 2026.

RESH, Howard M**. Hydroponic food production: a definitive guidebook of soilless food-growing methods**. 6. ed. Woodbridge: Woodbridge Press Publishing Company, 2003.

REVISTA CULTIVAR. Embrapa apresenta alfaces tolerantes às altas temperaturas na Hortitec. **Revista cultuvar**, 14 jun. 2018. Disponível em: https://revistacultivar.com.br/noticias/embrapa-apresenta-alfaces-tolerantes-as-altas-temperaturas-na-hortitec. Acesso em: 20 abr. 2026.

SAKAMOTO, M. et al. Influence of root zone temperature on growth and fruit quality of hydroponically grown strawberry plants**. Journal of Agricultural Science**, v. 8, n. 5, p. 122–131, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.5539/jas.v8n5p122. Acesso em: 14 maio 2026.

SANCHES, C. E. J. et al. Cultivo hidropônico da alface do grupo americana com resfriamento da solução nutritiva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 45., 2005, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABH, 2005.

SANCHEZ, Sergio Veraguas. **Avaliação de cultivares de alface crespa produzidas em hidroponia tipo NFT em dois ambientes protegidos em Ribeirão Preto (S*P*).** 2007. 63 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

SCHNEIDER, Caroline A.; RASBAND, Wayne S.; ELICEIRI, Kevin W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1038/nmeth.2089. Acesso em: 14 maio 2026.

SENA, E. O. L. P. et al. Concentração dos nutrientes e temperatura como fatores limitantes no cultivo hidropônico. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 10, p. 15418–15440, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.55905/oelv21n10-049. Acesso em: 14 maio 2026.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

THAKULLA, D. et al. Nutrient solution temperature affects growth and °Brix parameters of seventeen lettuce cultivars grown in an NFT hydroponic system. **Horticulturae,** v. 7, n. 9, art. 321, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/horticulturae7090321. Acesso em: 14 maio 2026.

WAHID, Abdul A. et al. Heat tolerance in plants: an overview. **Environmental and Experimental Botany,** Amsterdam, v. 61, n. 3, p. 199–223, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011. Acesso em: 14 maio 2026.

WANG, Li Chun et al. Performance analysis of two typical greenhouse lettuce production systems: commercial hydroponic production and traditional soil cultivation. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, art. 1165856, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1165856. Acesso em: 14 maio 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me sustentar quando o cansaço parecia maior do que minhas forças, por me erguer em cada momento de incerteza e por me conduzir com cuidado em toda esta jornada. Houve dias em que o silêncio parecia pesado e o caminho incerto, mas foi a fé que me manteve em pé e me fez seguir adiante. Sem Ele, nada disso seria possível. “O coração do homem planeja o seu caminho, mas o Senhor lhe dirige os passos.” (Provérbios 16:9).

À minha família, meu alicerce e maior fonte de amor, por acreditarem em mim sempre, por toda a compreensão, cuidado, orações e carinho. Agradeço pelo apoio constante, pela paciência nos dias difíceis e por cada palavra de incentivo que me fez seguir em frente. Cada conquista minha também pertence a vocês: Minha mãe, Mariluce Rodrigues; Meu pai, Joel Rodrigues; E meus irmãos, Daniel Rodrigues e Raquel Rodrigues. Agradeço também à minha avó, Maria Helena, e aos meus tios e primos, estejam perto ou longe, por todo carinho e apoio.

Ao meu orientador, Professor Niton Cometti, pela dedicação, paciência e orientação ao longo deste trabalho, além de ter aceitado prontamente o convite para me orientar. Sou muito grata por toda a trajetória construída desde 2018, quando participei, sob sua orientação, de um projeto de automação em sistemas hidropônicos ainda como estudante do curso técnico. Retornei ao campus para cursar Agronomia e aproveitei cada oportunidade para aprender e adquirir experiência científica, sempre com uma visão voltada à inovação e tecnologia. Por isso, concluir meu TCC nessa área tornou este momento ainda mais especial. Muito obrigada por todos os ensinamentos e pela confiança ao longo desses anos!

Aos meus amigos e colegas, tanto do Instituto quanto de fora dele, agradeço por tornarem essa caminhada mais leve e significativa. Em especial, Amanda Nascimento, Carolaini, Ellen Nascimento, Gabriel Oliveira, Grazielle Dias, Kauanny Guimarães, Maria Vitória, Mikael Laurindo e Sâmilla Teles, entre outros, obrigada pelo apoio, pelas trocas de experiências e por compartilharem comigo os desafios e conquistas ao longo desse projeto e também desses anos de curso. Sinto-me honrada por fazer parte da Turma 01 (02/2021) de Agronomia do *campus* ao lado de pessoas tão especiais. Iniciar e concluir essa etapa da graduação com vocês tornou essa jornada ainda mais marcante. Desejo que todos construam uma linda trajetória na Agronomia e alcancem o sucesso profissional, pois todos vocês merecem.

Agradeço ao IFB *Campus* Planaltina, a todo o corpo docente, técnicos e servidores, pelo compromisso, dedicação e suporte ao longo desta trajetória acadêmica. Vocês tornam tudo isso possível.

Por fim, agradeço ao programa FABIN – Fábrica de Ideias Inovadoras do IFB, que me proporcionou a oportunidade de atuar como bolsista e viver experiências fundamentais para minha formação e para a construção deste trabalho, despertando ainda mais meu interesse pela inovação e pela pesquisa