

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

JÉSSICA THAÍS DEMARCHI

**EFEITO DE ALTAS CONCENTRAÇÕES DE CO₂ NO DESENVOLVIMENTO DO
FEIJOEIRO DO TIPO PRETO (*PHASEOLUS VULGARIS* L.)**

ERECHIM

2025

JÉSSICA THAÍS DEMARCHI

**EFEITO DE ALTAS CONCENTRAÇÕES DE CO₂ NO DESENVOLVIMENTO DO
FEIJOEIRO DO TIPO PRETO (*PHASEOLUS VULGARIS* L.)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas – Bacharelado da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Biologia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Afonso Hartmann

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Galon

ERECHIM

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Demarchi, Jéssica Thaís
EFEITO DE ALTAS CONCENTRAÇÕES DE CO2 NO
DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO DO TIPO PRETO (PHASEOLUS
VULGARIS L.) / Jéssica Thaís Demarchi. -- 2025.
35 f.:il.

Orientador: Dr. Paulo Afonso Hartmann
Co-orientador: Dr. Leandro Galon
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Ciências Biológicas, Erechim,RS, 2025.

1. Agricultura sustentável. 2. Crescimento vegetal.
3. Mudanças climáticas. I. Hartmann, Paulo Afonso,
orient. II. Galon, Leandro, co-orient. III. Universidade
Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

JÉSSICA THAÍS DEMARCHI

**EFEITO DE ALTAS CONCENTRAÇÕES DE CO₂ NO DESENVOLVIMENTO DO
FEIJOEIRO DO TIPO PRETO (*PHASEOLUS VULGARIS* L.)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas – Bacharelado da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Biologia

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 27/06/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Paulo Afonso Hartmann – UFFS
Orientador

Prof. Dr. Leandro Galon – UFFS
Coorientador

Prof.^a Dr.^a Sandra Maria Maziero – UFFS
Avaliadora

Prof.^a Dr.^a Helen Treichel – UFFS
Avaliadora

Dedico este trabalho ao meu pai, Gilberto,
que na sua juventude desejou ser biólogo
e que cultivou em mim a admiração
e o respeito ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço por estar em um país que dispõe de ensino público de qualidade nas universidades federais. A Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Erechim foi, ao longo dos últimos quatro anos, o espaço que possibilitou a realização do sonho de tornar-me bióloga.

À meu pai e minha mãe, que jamais pouparam esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos na vida. Também ao meu amado irmão, que me surpreende positivamente a cada dia com sua conduta e visão de mundo. Obrigada por me enxergarem e por me validarem, vocês são a maior inspiração de vida pra mim e sou grata por fazer parte dessa família.

Aos meus professores, colegas, ao LABECO (Laboratório de Ecologia e Conservação) e todos aqueles que integraram minha jornada na UFFS, obrigada pelos aprendizados, pelas orientações e pela paciência.

Ao meu coorientador, professor Galon, agradeço pela viabilização dos experimentos apresentados neste trabalho e pela constante disposição em colaborar.

Ao meu orientador, professor Paulo, que ministrou as disciplinas que mais me inspiraram ao longo do curso. Considero sua trajetória profissional na área da Biologia como uma referência. Sua compreensão diante das minhas dúvidas e prontidão em oferecer ajuda foram fundamentais ao longo deste percurso.

Aos discentes do curso de Agronomia que em diversos momentos me auxiliaram em diferentes processos dos experimentos com as plantas de feijoeiro. Em especial ao Lucas, pela presença constante e pelo apoio nas diferentes etapas.

Aos meus colegas/amigos Davi, Júlia e Laísa, vocês sabem o quanto eu sou feliz por terem sido vocês o meu grupo inseparável de amigos na faculdade. Tenho muita admiração por cada um de vocês e tenho certeza que serão profissionais excelentes, espero do fundo do coração que a nossa amizade siga para além da UFFS.

À todos os amigos que se fizeram presentes na minha vida nessa caminhada. Em especial à Débora, Laura, Gui, Bibi, Hiago, Breno, Hemili, Duda, Luquinhas, Dioni e Samuel. Cada um sabe a importância que teve na minha vida e o espaço que ocupa no meu coração.

A ciência está longe de ser um instrumento perfeito de conhecimento. É apenas o melhor que temos. Nesse aspecto, como em muitos outros, ela se parece com a democracia. A ciência, por si mesma, não pode defender linhas de ação humana, mas certamente pode iluminar as possíveis consequências de linhas alternativas de ação (Sagan, 2005, p. 32).

RESUMO

O aumento das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), impulsionado por atividades antrópicas, tem provocado alterações nos sistemas climáticos globais, afetando a estabilidade ecológica e agrícola. Dentre as diversas consequências observadas, percebem-se as mudanças na fisiologia vegetal e nos padrões de crescimento, que podem impactar serviços ecossistêmicos essenciais e a segurança alimentar. Este estudo teve por objetivo investigar os efeitos de altas concentrações de CO₂ sobre o desenvolvimento de plantas de feijoeiro do tipo preto (*Phaseolus vulgaris*). Para tal, foram conduzidos experimentos em ambiente controlado, utilizando câmara climática com regulação de intensidade luminosa, temperatura, umidade e concentrações de CO₂. As plantas de feijoeiro foram expostas a concentrações elevadas de CO₂ (cerca de 1000 ppm em média) durante um período de 22 dias, correspondente ao tempo de senescência constatado sob essas condições. Adicionalmente, foi realizado um experimento comparativo em casa de vegetação, sob níveis ambientes de CO₂. As variáveis indicadoras de crescimento da cultura, como comprimento e massa seca, foram mensuradas para avaliar como elevados níveis de CO₂ podem afetar as plantas de feijoeiro. Os resultados indicam que altas concentrações de CO₂ podem ser prejudiciais ao desenvolvimento das plantas de feijoeiro do tipo preto. Embora o CO₂ seja um elemento essencial à fotossíntese e, conseqüentemente, ao metabolismo vegetal, os dados demonstraram que sua elevação exacerbada — acima de 1000 ppm — pode desencadear respostas fisiológicas adversas, como senescência precoce e limitação do desenvolvimento. Conclui-se que o metabolismo do feijoeiro não está adaptado e nem preparado para suportar elevadas concentrações de CO₂.

Palavras-chave: agricultura sustentável, crescimento vegetal; mudanças climáticas.

ABSTRACT

The rising of atmospheric carbon dioxide (CO₂) levels due to anthropogenic activities, have been altering global climate systems and affecting ecological and agricultural stability. Among the various consequences, changes in plant physiology and growth patterns can have impacts on essential ecological services and food security. This study aimed to investigate the effects of elevated CO₂ levels on the vegetative growth of *Phaseolus vulgaris* (black bean), a crop of considerable agricultural and nutritional relevance. To this end, two controlled-environment experiments were conducted in a climate chamber, where light intensity, temperature, humidity, and CO₂ concentrations were adjusted. Bean plants were exposed to high CO₂ concentrations (approximately 1000 ppm on average) over a 22 day period, which corresponded to their senescence time observed under these conditions. Additionally, a comparative experiment was carried out in a greenhouse under ambient CO₂ levels. Growth indicators, including height and dry biomass, were measured to assess growth responses to CO₂ enrichment. Although CO₂ is an essential component of photosynthesis and, consequently, of plant metabolism, the data demonstrated that excessive increases — above 1000 ppm — can trigger adverse physiological responses in black bean plants, such as premature senescence and restricted growth. The metabolism of black bean plants doesn't seem to be neither adapted nor prepared to withstand high CO₂ concentrations.

Keywords: climate change; plant growth; sustainable agriculture.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1 ÁREA DE ESTUDO	14
3.2 EXPERIMENTOS E COLETA DE DADOS	14
3.3 ANÁLISE DE DADOS	19
4 RESULTADOS	20
4.1 DADOS COMPARATIVOS DO COMPRIMENTO DAS PLANTAS	20
4.1.1 PARTE AÉREA	20
4.1.2 PARTE RADICULAR	21
4.2 DADOS COMPARATIVOS DA MASSA SECA DAS PLANTAS	22
4.2.1 PARTE AÉREA	22
4.2.2 PARTE RADICULAR	23
5 DISCUSSÃO	26
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
7 REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

O aumento das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂) constitui um dos principais fatores responsáveis pelas mudanças climáticas globais, ameaçando a estabilidade ambiental e a saúde dos ecossistemas (KABIR *et al.*, 2023). As atividades humanas, como a urbanização, o crescimento industrial, o desmatamento e a agricultura intensiva, são os principais vetores da elevação nas emissões de CO₂, intensificando o efeito estufa e contribuindo para o aquecimento global (VICTOR, KENNEL, 2014; KABIR *et al.*, 2023).

As emissões globais de CO₂ atingiram mais de 50 Gt em 2024. Nos últimos 125 anos a concentração atmosférica do gás cresceu aproximadamente 25%, superando 380 ppm (partes por milhão) em 2000 e atingindo 426 ppm em 2025 (KABIR *et al.*, 2023; LAN *et al.*, 2025), sem perspectiva de redução em curto prazo.

As projeções futuras das concentrações de CO₂ utilizam cenários como os SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*) e os RCP (*Representative Concentration Pathways*), que consideram diferentes trajetórias socioeconômicas e níveis de emissão de gases de efeito estufa até 2100. A combinação desses cenários permite estimar variações nas concentrações atmosféricas de CO₂, que podem alcançar entre 420 (já ultrapassado) e 590 ppm no período de 2041 a 2060 e até 1030 ppm entre 2081 e 2100, a depender das políticas e estratégias adotadas para mitigação climática (CHENG *et al.*, 2022).

Essas transformações têm como principal efeito a elevação das temperaturas, seja a nível regional ou global, o que tem consequência nos sistemas ecológicos complexos, como por exemplo a polinização (CROWLEY *et al.*, 2021). O agravamento de eventos extremos de calor, precipitação e a amplificação polar estão associados a fatores locais e mecanismos de retroalimentação, resultando em maior variabilidade climática (STUECKER *et al.*, 2018). A dinâmica dos ecossistemas marinhos também é afetada pelo aumento das concentrações de CO₂, o que provoca alterações globais na química dos oceanos e perda de biodiversidade (NAGELKERKEN, CONNELL, 2015; MEINSHAUSEN *et al.*, 2017).

As altas concentrações de CO₂ na atmosfera podem resultar no aumento da ocorrência de desastres climáticos, como incêndios florestais, derretimento de geleiras e colapso do permafrost - eventos que aceleram ainda mais a liberação de carbono na atmosfera (TAYLOR *et al.*, 2012; TURETSKY *et al.*, 2019; FENG *et al.*, 2020).

O aumento da concentração de CO₂ também influencia diretamente os processos fisiológicos das plantas, afetando o crescimento, o desenvolvimento, a assimilação de

nutrientes e a qualidade dos cultivos (DRAKE *et al.*, 1997). A elevação nas concentrações atmosféricas de CO₂ é considerada um fator potencialmente fertilizante para as plantas, uma vez que contribui para o aumento da taxa líquida de fotossíntese e para a melhoria da eficiência no uso da água pelas plantas. Tal efeito é particularmente mais evidente em espécies fotossintéticas do tipo C3 devido às restrições impostas à assimilação de carbono pelas perdas associadas à fotorrespiração (CALLEJA-CABRERA *et al.*, 2020).

Embora o enriquecimento atmosférico de CO₂ possa potencializar a fotossíntese e a fixação de carbono em plantas do tipo C3, há evidências de que esse fenômeno também pode reduzir o teor de nitrogênio e micronutrientes, comprometendo o valor nutricional das culturas e a segurança alimentar global (TAUSZ-POSCH, BOURGAULT, 2019; DAKORA *et al.*, 2025).

De modo geral, as taxas mais altas de fotossíntese e maior eficiência no uso da água em diversas espécies vegetais, como consequência de altos níveis de CO₂ podem resultar em maior acúmulo de biomassa e alterações nos padrões fenológicos (KIZILDENIZ, 2014; BORETTI, 2025). No entanto, esses benefícios estão frequentemente condicionados a fatores ambientais, como a disponibilidade hídrica, indicando que estresses como a seca podem atenuar os efeitos positivos de altos níveis de CO₂ (ALLEN *et al.*, 2020).

Por outro lado, concentrações elevadas de CO₂ podem acelerar o processo de senescência em determinadas espécies, como o girassol, por meio do aumento do estresse oxidativo e da redução dos pigmentos fotossintéticos ao longo do tempo (MATA *et al.*, 2012; DUAN *et al.*, 2015). A resposta das plantas ao aumento do CO₂ é complexa e dependente da espécie, sendo que alguns trabalhos relatam incrementos expressivos nas taxas fotossintéticas e no crescimento. Enquanto outros destacam desequilíbrios nutricionais, como a deficiência de fósforo (BOUAIN *et al.*, 2022), que podem limitar o desenvolvimento mesmo sob elevadas concentrações de CO₂. Tais achados ressaltam a importância da homeostase nutricional na mediação das respostas vegetais frente ao aumento do CO₂ atmosférico (RAVI *et al.*, 2022; XIA *et al.*, 2024).

Os modelos experimentais, como o enriquecimento de CO₂ em ambiente aberto (FACE – *Free-Air CO₂ Enrichment*), revelam que a variabilidade nas concentrações de CO₂ pode levar à subestimação das respostas vegetais em comparação a ambientes com níveis constantes. Por exemplo, flutuações no CO₂ durante experimentos FACE resultaram em respostas aproximadamente 65% inferiores às observadas sob condições estáveis, o que evidencia a necessidade de maior controle nos delineamentos experimentais (ALLEN *et al.*, 2020). Além disso, estudos de longo prazo indicam que interações com plantas vizinhas e

comunidades microbianas do solo desempenham papéis importantes na determinação dos efeitos do CO₂ elevado sobre o crescimento vegetal e a saúde do solo (MATA *et al.*, 2012; DUAN *et al.*, 2015).

Apesar do crescente corpo de conhecimento, os efeitos do aumento do CO₂ sobre o desenvolvimento das plantas ainda carecem de maiores informações. Embora o aumento da fotossíntese e da eficiência no uso da água possa favorecer o crescimento vegetal, fatores como a disponibilidade de nutrientes, o estresse hídrico e os danos oxidativos exercem influência decisiva sobre os resultados.

Compreender como o CO₂ elevado afeta os padrões de desenvolvimento em leguminosas como o feijoeiro do tipo preto é essencial para a previsão de desdobramentos agrícolas em cenários climáticos futuros (LV *et al.*, 2024).

À medida que as concentrações globais de CO₂ continuam a aumentar, os dados obtidos nesta pesquisa podem subsidiar estratégias de mitigação e adaptação. Iniciativas educacionais voltadas à conservação ambiental, ao reflorestamento e à redução das emissões de gases de efeito estufa constituem componentes fundamentais desses esforços (YANG *et al.*, 2021; CHENG *et al.*, 2022). Também pode-se recomendar ou se indicar a integração da produção agrícola com a floresta, o sistema agroflorestal, para com isso se aumentar a mitigação do efeito de CO₂ liberado ao ambiente na fase do desenvolvimento das culturas anuais de interesse agrícola.

A hipótese da presente pesquisa é de que a elevação da concentração de CO₂ favorece o crescimento do feijoeiro do tipo preto. Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo investigar os efeitos de altas concentrações de CO₂ sobre o desenvolvimento de plantas do feijoeiro do tipo preto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Investigar os efeitos de altas concentrações de CO₂ sobre o desenvolvimento de plantas de feijoeiro do tipo preto (*Phaseolus vulgaris* L.).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comprimento das raízes e da parte aérea das plantas de feijoeiro do tipo preto sob altas concentrações de CO₂.
- Avaliar a massa seca da parte aérea e radicular das plantas de feijoeiro do tipo preto sob altas concentrações de CO₂.
- Comparar o desenvolvimento de plantas de feijoeiro do tipo preto cultivadas em concentração de CO₂ ambiente com plantas cultivadas em altas concentrações de CO₂.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido nas instalações da área experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Erechim, nas coordenadas geográficas: latitude 27° 43' 30,97" S, longitude 52° 17' 40,15" W e altitude de 650 m. A UFFS – Campus Erechim está localizada no município de Erechim, no norte do Estado do Rio Grande do Sul, no sul do Brasil. Originalmente coberta pelo bioma da Mata Atlântica, a paisagem da área de estudo é caracterizada pela predominância de Floresta Ombrófila Mista (LEITE, KLEIN, 1990; BUDKE *et al.*, 2010). A paisagem no entorno do Campus da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) corresponde a uma região altamente fragmentada, na qual predominam pequenos remanescentes florestais inseridos em uma matriz composta por atividades agropecuárias. A região apresenta relevo acidentado, com altitudes variando entre 400 e 800 metros.

O clima predominante na região, segundo a classificação de Köppen, é Cfa, subtropical úmido com verão quente, chuvas uniformemente distribuídas e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, com precipitação anual entre 1.100 e 2.000 mm, e geadas severas e frequentes num período médio de ocorrência de dez a 25 dias anualmente (PEEL *et al.*, 2007; ALVARES *et al.* 2013). A precipitação é maior entre outubro e abril, influenciada por chuvas convectivas e ar úmido da Amazônia (RODRIGUES *et al.*, 2023).

A fim de constatar a concentração de CO₂ ambiente na região, foi utilizado um medidor portátil de gases, capaz de aferir a concentração de seis diferentes gases na troposfera, sendo um deles o CO₂. O modelo do medidor é o EL-60A fornecido pela EleveLab Equipamentos Científicos. Depois de realizadas as aferições em horários distintos, as concentrações de CO₂ ambientais na região do estudo ficaram entre 380 e 400 ppm.

3.2 EXPERIMENTOS E COLETA DE DADOS

Entre março e maio de 2025 foram conduzidos três experimentos para avaliar o efeito da alta concentração de CO₂ em feijoeiro do tipo preto (*Phaseolus vulgaris*). Para cada um dos três experimentos, foram semeadas dez sementes de feijão preto cultivar IPR Urutau em vasos plásticos com capacidade para 8 dm³, totalizando 18 unidades experimentais para cada um dos experimentos.

Cada vaso foi preenchido com solo peneirado classificado como Latossolo Vermelho Aluminoférrico típico (STRECK *et al.*, 2018), misturado com substrato, na proporção de 3/1. Como adubação de base foi utilizado 150 kg ha⁻¹ da fórmula 9-20-15 de N-P-K, de acordo com as recomendações técnicas à cultura do feijoeiro (CQFS-RS/SC, 2016). Após 13 dias do início de cada experimento, realizou-se o desbaste, sendo mantidas quatro plantas por vaso.

Após 16 dias do início do experimento, aplicou-se 150 kg ha⁻¹ da mesma fórmula de adubo, mais 150 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N) na forma de ureia (45% de N). Essa medida foi adotada como uma tentativa de prolongar o experimento, visto que os feijoeiros da câmara climática apresentavam sinais avançados de senescência. Este procedimento foi reproduzido em todos os experimentos.

Dois experimentos foram conduzidos em câmara climática (Figura 1) para crescimento de plantas, mais precisamente o modelo TE-4002-CO₂, um módulo da série de câmaras TE-4002 da empresa TECNAL Equipamentos Científicos. O equipamento permite regulagem de temperatura, umidade (nebulizadores ultrassônicos TE-4002-N), luminosidade (podem ser estipulados diferentes intensidades e fotoperíodos) e concentrações de CO₂ (o gás é injetado na câmara através de um cilindro externo de CO₂). Um terceiro experimento foi conduzido em casa de vegetação, a fim de observar o desenvolvimento das plantas em ambiente com concentrações naturais de CO₂ (Figura 2).

Figura 1. Condução de experimento com feijoeiro em câmara climática



Fonte: Os autores (2025).

A proposta inicial do estudo consistia na realização de dois experimentos na câmara: um tratamento e um controle. No experimento de tratamento, a concentração de CO₂ foi planejada para ficar em 650 ppm, valor estipulado com base em um acréscimo de aproximadamente 250 ppm em relação à concentração ambiente atual da região (aproximadamente 400 ppm) e levando-se em consideração cenários intermediários para concentrações futuras (CHENG *et al.*, 2022; KABIR *et al.*, 2023). No experimento controle, por sua vez, foi planejado para ficar em concentração ambiente do gás, sem acréscimo de CO₂.

Figura 2. Condução de experimento com feijoeiro na casa de vegetação



Fonte: Os autores (2025).

As configurações da câmara para os experimentos foram as seguintes:

Experimento 1 (**CAM 1**) - iluminação de 100% para o ciclo dia (12 horas) e 0% para o ciclo noite (12 horas); umidade de 85%; temperatura de 25 °C (média aproximada da temperatura da região para março e abril segundo a plataforma *Meteoblue*); e concentração de CO₂: 650 ppm. Além da umidade regulada na câmara, as plantas foram irrigadas com 250ml de água por vaso em dias alternados (com o objetivo de prevenir o estresse hídrico, uma vez que foi observado que o solo apresentava-se com déficit hídrico), quando também foi avaliado as condições gerais de crescimento e feito registro fotográfico - o mesmo se aplica para o segundo experimento conduzido na câmara.

Experimento 2 (**CAM 2**) - foram mantidas as configurações do experimento 1 relativas à luminosidade, umidade e temperatura. Foi desligada a injeção do CO₂ para o interior da câmara climática para a simulação do crescimento do feijoeiro.

Experimento 3 (**CV**) - conduzido em casa de vegetação com condições de luminosidade, temperatura e concentração de CO₂ atmosférico. As plantas foram irrigadas por

sistema de microaspersão, com aplicações de água às 08:00 h, 12:00h e às 15:00h, para manter o solo na capacidade de campo e evitar estresse hídrico.

Aos 22 dias de CAM 1, as plantas da câmara climática apresentavam sinais avançados de senescência e as plantas foram colhidas, sendo que em relação ao estágio fenológico encontravam-se na fase vegetativa entre V3 e V4 (SANTOS, GAVILANES, 1998). Este foi o período estipulado para encerramento de todos os três experimentos. Após o encerramento, as plantas foram colhidas e as seguintes variáveis registradas (Figura 3):

a) Determinou-se o comprimento das plantas, tanto da parte aérea quanto da parte radicular. A aferição do comprimento das plantas foi realizada com régua graduada, sendo as medidas registradas em centímetros. Após isto foi calculada a média do comprimento das plantas, para cada experimento.

b) A massa seca, tanto para parte aérea e radicular das plantas. As plantas foram seccionadas em partes aérea e radicular, após foram dispostas em sacos de papel *kraft* e submetidas à secagem por 72 horas, em estufa com circulação forçada de ar, a uma temperatura de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$, até as plantas demonstrarem massa constante. Posteriormente, as plantas foram aferidas em balança de precisão, representando os dados em grama.

Figura 3 – Aferição das partes aérea e radicular das plantas de feijoeiro



Fonte: Os autores (2025).

3.3 ANÁLISE DE DADOS

Os dados obtidos foram analisados previamente para a normalidade (teste Shapiro-Wilk) e a homogeneidade das variâncias (teste de Levene). Após confirmação da distribuição normal e homogeneidade das variâncias, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA one-way) e as médias comparadas pelo teste de Tukey, considerando nível de significância de 5% ($p < 0,05$). A média da umidade, temperatura e da concentração de CO_2 nos experimentos da câmara climática foi calculada da seguinte forma: média diária de cada variável e posteriormente média dos 22 dias de experimento. A temperatura da casa de vegetação foi estimada com base nos dados do INMET para a cidade de Erechim em março/abril de 2025.

4 RESULTADOS

Embora tenham sido reguladas as concentrações de CO₂ de 650 ppm (CAM 1) e ambiente (sem injeção de CO₂; CAM 2), as concentrações na câmara, nos dois experimentos foram mais elevadas que o programado. A temperatura e umidade seguiram conforme o protocolo de funcionamento da câmara climática.

Dados finais de temperatura, umidade e CO₂ dos experimentos:

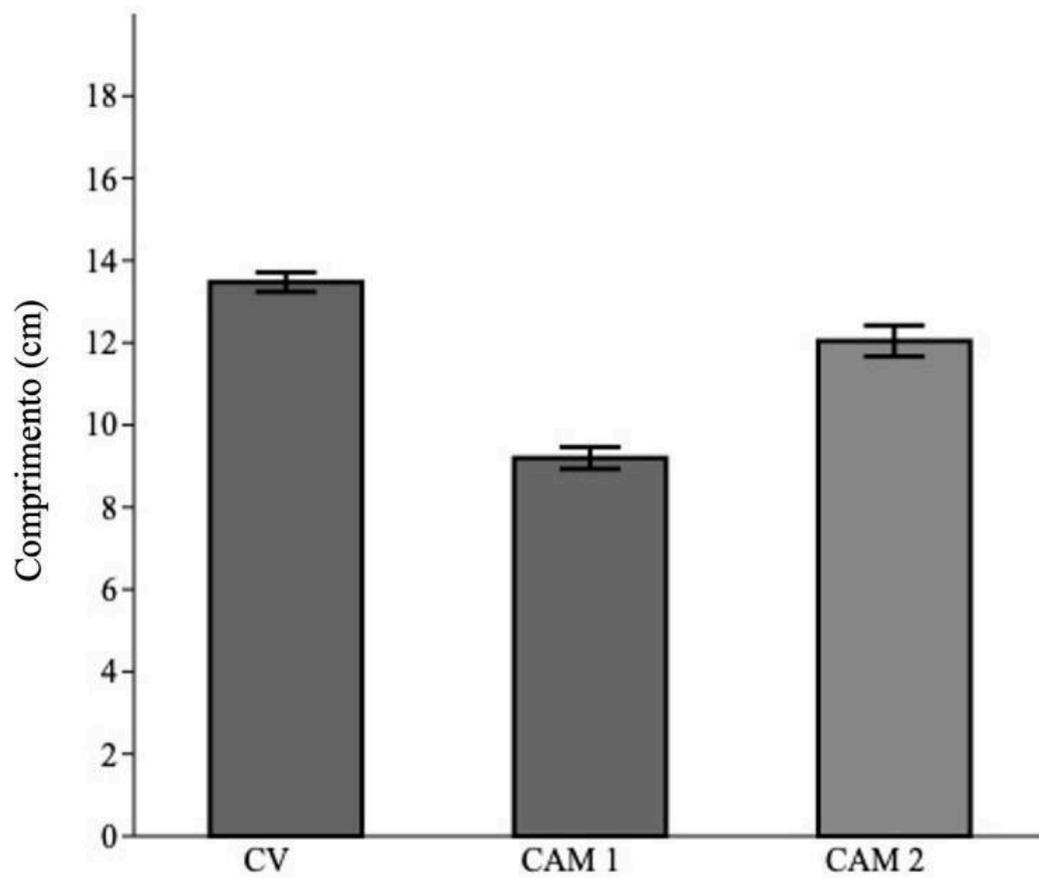
- CAM 1: Temperatura média de 25,0 °C, Umidade do ar média de 82%, CO₂ médio de 1104,71 ppm.
- CAM 2: Temperatura média de 25,0 °C, Umidade do ar média de 82%, CO₂ médio de 1049,15 ppm.
- CV: Temperatura média de 25,0 °C (considerando o período do experimento, variou de 22,0 °C a 28,0 °C), Umidade do ar média de 85% (considerando a irrigação, variou de 80 a 90%), CO₂ ambiente (aproximadamente 400 ppm dentro da casa de vegetação).

4.1 DADOS COMPARATIVOS DO COMPRIMENTO DAS PLANTAS

4.1.1 Parte aérea

As plantas cultivadas na casa de vegetação apresentaram maior comprimento da parte aérea em relação às cultivadas na câmara climática, o que fica evidente em função das diferenças significativas entre os três experimentos (Tabela 1; Figura 4). Mesmo entre os dois experimentos em câmara climática, houve diferença (Tabela 2), sendo que o crescimento das plantas de CAM 2 foi maior que em CAM 1 (Figura 4).

Figura 4. Comprimento da parte aérea (cm) em função da aplicação de diferentes condições de CO₂

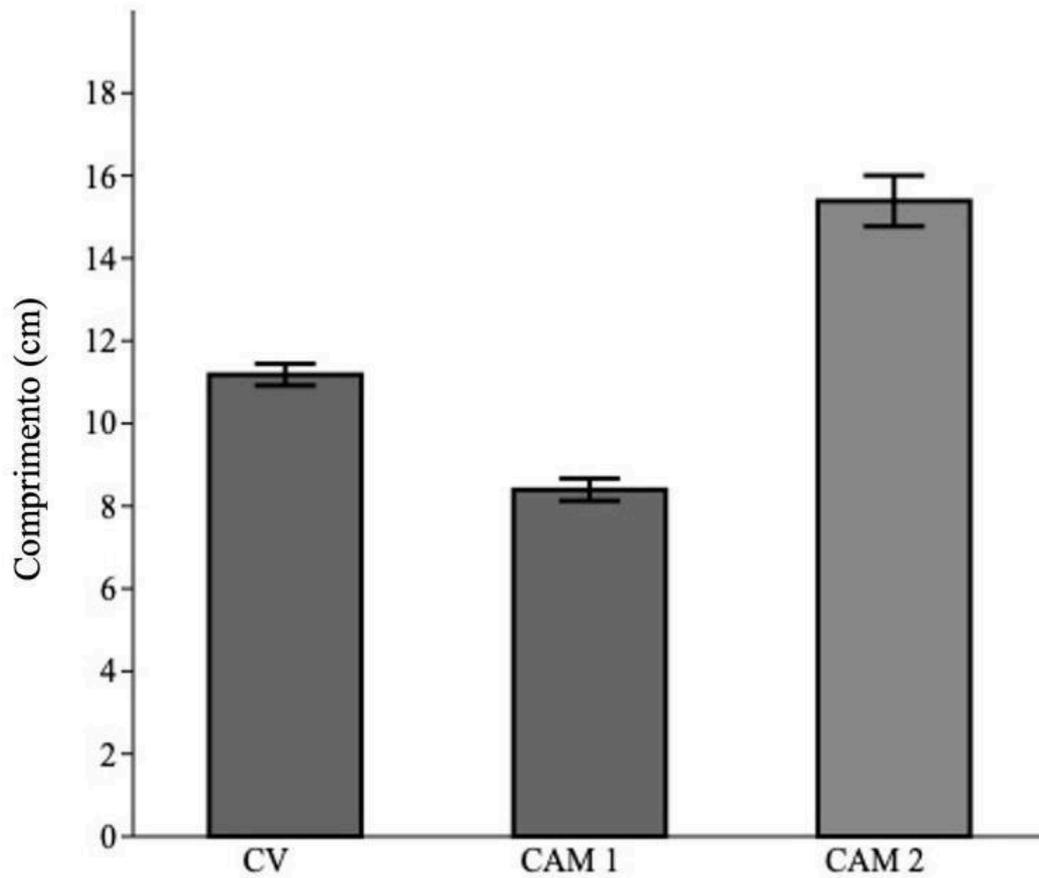


Fonte: Os autores (2025).

4.1.2 Parte radicular

Houve diferença no comprimento da parte radicular entre os três experimentos. As raízes das plantas de CAM 2 apresentaram o maior comprimento que CV e CAM 1 (Tabela 1; Figura 5). As plantas do CAM 1 foram as que apresentaram as menores raízes (Figura 5).

Figura 5. Comprimento da parte radicular (cm) em função da aplicação de diferentes condições de CO₂



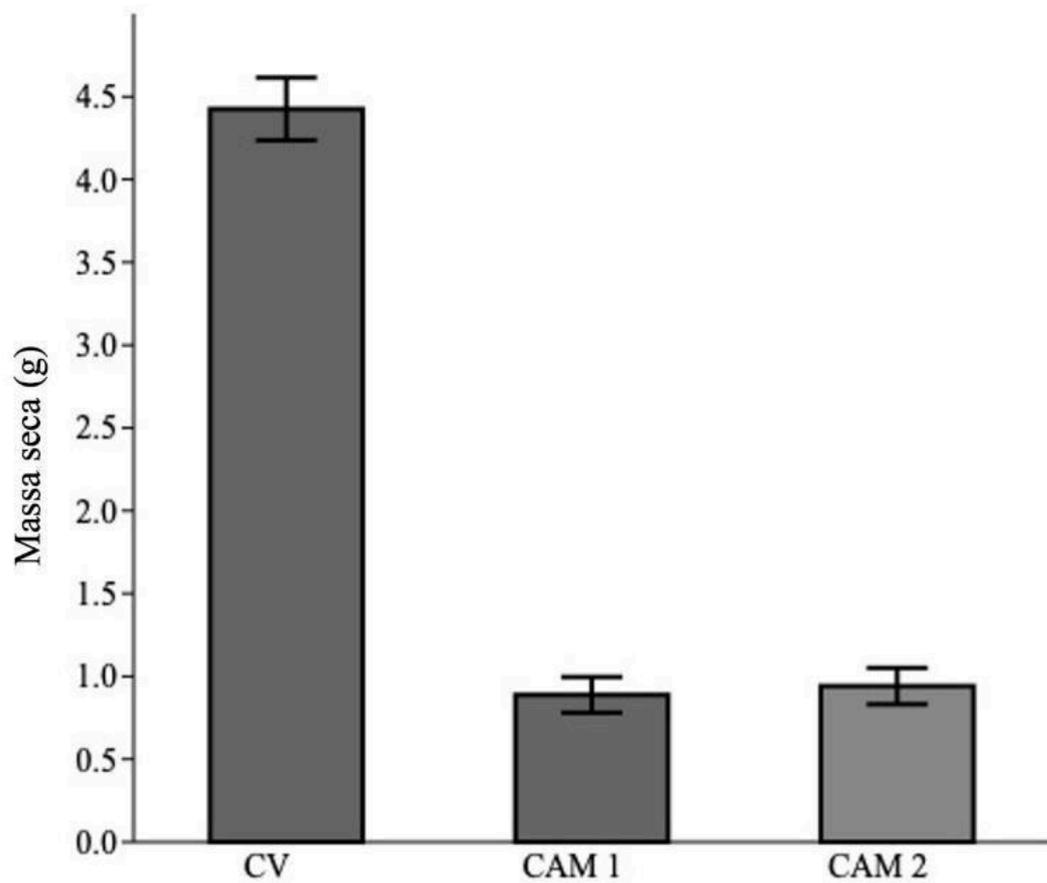
Fonte: Os autores (2025).

4.2 DADOS COMPARATIVOS DA MASSA SECA DAS PLANTAS

4.2.1 Parte aérea

Houve diferença na massa seca entre a parte aérea dos três experimentos. A maior massa seca registrada da parte aérea foi a das plantas cultivadas na CV (Tabela 1; Figura 6). Não houve diferença na média da massa seca das plantas entre CAM 1 e CAM 2 (Tabela 2).

Figura 6. Massa seca da parte aérea (g) em função da aplicação de diferentes condições de CO_2

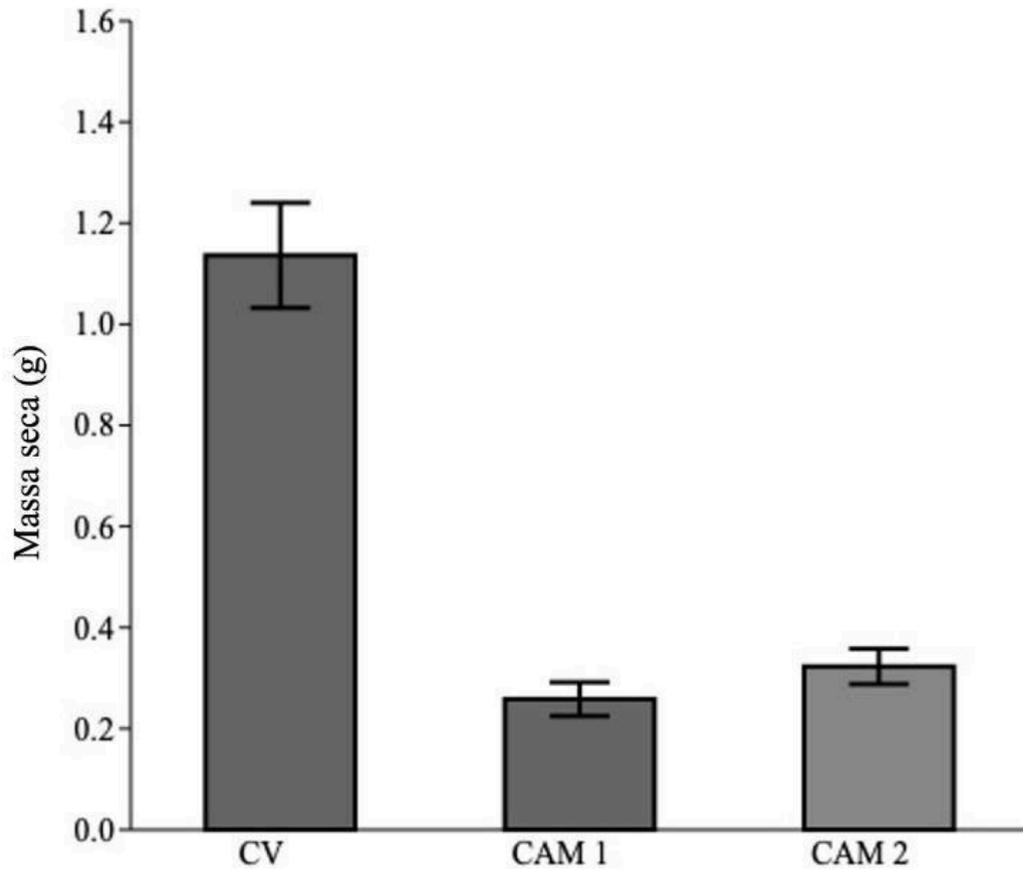


Fonte: Os autores (2025).

4.2.2 Parte radicular

Houve diferença na massa seca entre a parte radicular dos três experimentos. A maior massa seca registrada da parte radicular, assim como foi na parte aérea, foi nas plantas cultivadas na CV (Tabela 1; Figura 7). Não houve diferença na média da massa seca das plantas entre CAM 1 e CAM 2 (Tabela 2).

Figura 7. Massa seca da parte radicular (g) em função da aplicação de diferentes condições de CO_2



Fonte: Os autores (2025).

Tabela 1. Médias de comprimento e massa seca das plantas em função da aplicação de diferentes condições de CO_2

Variável	CV	CAM 1	CAM 2
Comprimento (cm)			
Parte aérea	13,47	9,19	12,04
Raiz	11,18	8,39	15,39
Massa seca (g)			
Parte aérea	4,42	0,88	0,94
Raiz	1,13	0,25	0,32

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 2. Análise das medidas de comprimento e massa seca das plantas entres os experimentos. CV = Casa de vegetação; CAM 1 = Câmara climática 1; CAM 2 = Câmara climática 2.

Variável	Entre experimentos	CVxCAM 1	CVxCAM 2	CAM 1xCAM 2
Comprimento				
Parte aérea	$F_{(2, 211)} = 52,85, P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$
Raiz	$F_{(2, 211)} = 71,50, P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$
Massa seca				
Parte aérea	$F_{(2, 50)} = 206,5, P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$	$P = 0,99$
Raiz	$F_{(2, 50)} = 53,64, P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$	$P = 0,77$

Fonte: Os autores (2025).

5 DISCUSSÃO

Uma das hipóteses para o aumento inesperado nas concentrações de CO₂ nos experimentos conduzidos em câmara climática está relacionada ao substrato utilizado no cultivo das plantas, de origem orgânica. O substrato empregado nos experimentos foi da marca Dallemole, sendo que os principais ingredientes de sua composição incluem turfa, engaço e bagaço de uva, casca de pinus, esterco bovino e cinza de acácia.

A aplicação de substratos orgânicos está associada ao aumento da liberação de CO₂ decorrente da intensificação da atividade microbiana, havendo incremento no consumo de oxigênio (O₂), indicando maior taxa de respiração microbiana. A decomposição acelerada do material orgânico, promovida pela adição desses substratos, resulta na oxidação da matéria orgânica e na consequente liberação de CO₂ como subproduto final da respiração microbiana (GIANG *et al.*, 2024).

Outro possível fator responsável pela liberação de CO₂ foi a incapacidade da umidade gerada pela câmara de manter o solo constantemente úmido, o que exigiu a adição de água em dias alternados. Isso resultou em ciclos repetidos de secagem e umidificação do solo, os quais podem aumentar significativamente a emissão de CO₂ - entre 1,3 e 3,7 vezes em comparação a condições de umidade constante. Tal aumento está associado à destruição da biomassa microbiana, que libera carbono orgânico anteriormente estabilizado por complexos metal-orgânicos reativos, tornando-o disponível para decomposição microbiana (SUZUKI *et al.*, 2025). Além disso, a câmara climática utilizada não dispõe de um sistema de exaustão para remoção do gás excedente, o que resultou em seu acúmulo no interior do equipamento.

Concentrações elevadas de CO₂ (CAM 1 e CAM 2), diferentemente do que é relatado em alguns estudos realizados com plantas e enriquecimento de CO₂ (CRUZ *et al.*, 2016; FAN *et al.*, 2020; BOUAIN *et al.*, 2022), não favoreceram o desenvolvimento da parte aérea do feijoeiro. Ao contrário, os resultados sugerem um possível favorecimento de estresse fisiológico ou de senescência precoce, o que é corroborado pela observação de sinais avançados de senescência aos 22 dias nos experimentos conduzidos na câmara climática.

O desenvolvimento da parte aérea foi superior na casa de vegetação com concentração atmosférica de CO₂ semelhante à do ambiente, indicando que, nas condições específicas deste estudo, as concentrações elevadas do CO₂ podem promover desenvolvimento reduzido da parte aérea das plantas. Embora o comprimento da parte aérea em CAM 2 tenha sido maior que em CAM 1, ambos foram inferiores ao CV.

As plantas da casa de vegetação apresentaram comprimento da parte radicular maior que CAM 1, porém inferior à CAM 2, indicando que em determinadas condições, a elevação de CO₂ pode favorecer o desenvolvimento das raízes. As plantas de CAM 1 apresentaram menor comprimento da parte radicular, coerente com os sinais de senescência precoce observados, possivelmente associados a um estresse ambiental mais intenso.

As plantas do CAM 2 mostram os maiores comprimentos radiculares. O aumento da concentração de CO₂ pode estimular o desenvolvimento vegetal, o que pode ter favorecido um maior comprimento em CAM 2. No entanto, os resultados obtidos do comprimento da parte radicular podem ter sido influenciados pelo procedimento de coleta das amostras. Em CAM 1, no momento da extração das plantas observou-se elevada fragilidade das raízes, o que resultou na frequente ruptura dos ápices radiculares durante sua remoção, ocasionando a permanência de partes das raízes no substrato, que por sua vez não puderam ser contabilizadas quando as mesmas foram aferidas. Por outro lado, em CAM 2, adotou-se maior cautela na extração das raízes, que estavam igualmente frágeis às de CAM 1, o que possibilitou a obtenção de estruturas mais íntegras.

As raízes das plantas cultivadas na câmara climática apresentaram-se mais frágeis e com menor quantidade de rizomas em comparação àquelas cultivadas em casa de vegetação (Figura 8). Essa constatação pode ser corroborada pelos dados referentes à massa seca da parte radicular.

Figura 8. Plantas da câmara climática (A) e da casa de vegetação (B)



Fonte: Os autores (2025).

Um possível fator que pode ter contribuído para o elevado comprimento radicular observado nos experimentos conduzidos em câmara climática é a deficiência de nitrogênio (N). O N é um nutriente essencial ao desenvolvimento vegetal e figura entre os principais elementos limitantes da produtividade agrícola. Além de sua função estrutural, ele atua como regulador de diversos processos fisiológicos e bioquímicos, como a expansão foliar, o desenvolvimento do sistema radicular e a expressão gênica, sendo componente fundamental de importantes biomoléculas celulares (FERNANDES *et al.*, 2018).

Em condições de deficiência de N, observa-se aumento na razão entre a raiz e parte aérea, uma vez que a planta, priorizando a exploração do solo em busca do nutriente, direciona recursos ao crescimento do sistema radicular em detrimento do desenvolvimento da parte aérea. Entre os sintomas fisiológicos associados à deficiência de N destacam-se o amarelecimento (clorose) progressivo das folhas mais velhas, a abscisão e a redução do crescimento vegetal (FERNANDES, SOUZA, SANTOS, 2018), sintomas estes que acometeram todas as plantas de CAM 1 e CAM 2, ao contrário de CV onde nenhum destes ocorreu. A redução de N compromete tanto a qualidade nutricional das plantas quanto o equilíbrio do ciclo de nutrientes em sistemas agrícolas (GOJON *et al.*, 2023).

A assimilação de N em plantas do tipo C3, como o feijoeiro (CARNEIRO *et al.*, 2015), está parcialmente associada à fotorrespiração. Esse processo contribui para o transporte de malato dos cloroplastos para o citosol, onde ocorre a geração de NADH, cofator essencial para a atividade da enzima nitrato redutase. A elevação das concentrações de CO₂ reduz a fotorrespiração em plantas C3 e promove aumento na taxa fotossintética e no crescimento vegetal. No entanto, esses efeitos positivos tendem a ser atenuados ao longo do tempo, em um fenômeno conhecido como aclimação ao CO₂ (FERNANDES, SOUZA, SANTOS, 2018).

A redução significativa da massa seca da parte aérea sob altas concentrações de CO₂ em CAM 1 e CAM 2 sugere que, nas condições específicas deste sistema de cultivo, o CO₂ elevado pode ter induzido estresse fisiológico ou limitado a eficiência fotossintética. Os baixos valores de biomassa da parte aérea observados nas plantas da câmara estão alinhados com os sinais de senescência precoce registrados nesses ambientes. Em CV, conduzido sob condições atmosféricas naturais, o desempenho foi significativamente superior no acúmulo de massa seca da parte aérea, superando os dois ambientes com CO₂ elevado.

A ausência de diferença estatística entre CAM 1 e CAM 2, apesar das ligeiras variações nas concentrações de CO₂, indica um efeito similar e negativo sobre o desenvolvimento, reforçando a hipótese de que, em condições não otimizadas, o aumento

isolado e exacerbado (acima de 1000 ppm) de CO₂ não favorece - e pode até comprometer - o acúmulo de biomassa.

Altas concentrações de CO₂ tende a diminuir também os níveis de outros nutrientes essenciais, o que pode ter dificultado o desenvolvimento da planta e conseqüentemente a baixa massa em CAM 1 e CAM 2), possivelmente em decorrência de um efeito de diluição causado pelo aumento do acúmulo de carboidratos e pela maior eficiência no uso de nutrientes (FERNANDES, SOUZA, SANTOS, 2018).

Assim como na parte aérea, a massa seca da parte radicular foi reduzida em CAM 1 e CAM 2, representando uma queda superior a 70% em comparação ao CV. Isso parece indicar que as altas concentrações de CO₂ são desfavoráveis ao desenvolvimento do sistema radicular. A reduzida alocação de biomassa nas raízes pode comprometer a absorção de água e nutrientes, impactando negativamente o desenvolvimento geral da planta (GOJON *et al.*, 2023). As condições do ambiente na casa de vegetação foram mais favoráveis para a maior biomassa radicular.

É pertinente destacar que fatores como o uso da irrigação por microaspersão na casa de vegetação, em contraste com a pulverização de vapor d'água feita por nebulizadores ultrassônicos na câmara climática, assim como as variações naturais nas condições ambientais, especialmente em relação à luminosidade e temperatura, pode ter influenciado no desenvolvimento das plantas. Dessa forma, pode-se inferir que altas concentrações de CO₂ afetam fortemente o desenvolvimento de plantas de feijoeiro, embora seja necessário considerar a influência conjunta de outras variáveis.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a elevação da concentração atmosférica de CO₂ pode ser prejudicial ao desenvolvimento de plantas de feijoeiro do tipo preto (*Phaseolus vulgaris*), cultivar IPR Urutau. Embora o CO₂ seja um elemento essencial à fotossíntese e, conseqüentemente, ao metabolismo vegetal, os dados demonstraram que sua elevação exacerbada — acima de 1000 ppm — pode desencadear respostas fisiológicas adversas, como senescência precoce e limitação do desenvolvimento.

A partir das análises realizadas, foi possível verificar que as plantas cultivadas sob concentração ambiente de CO₂ (CV) apresentaram desempenho superior nos indicadores de desenvolvimento avaliados, especialmente massa seca. Por outro lado, os experimentos conduzidos em câmara climática revelaram desempenho inferior, com sintomas evidentes de estresse e senescência antecipada. Os potenciais efeitos positivos associados ao enriquecimento de CO₂ podem ser anulados em face a outros fatores que decorrem da alta exposição ao gás, como a depleção de N e outros minerais e estresse hídrico.

É relevante que novos estudos sobre os efeitos do CO₂ em culturas agrícolas considerem a investigação dos efeitos combinados do aumento de CO₂ com outros estressores ambientais relevantes, como deficiência hídrica, variações térmicas e limitação nutricional. A complexidade das interações entre fatores abióticos e fisiologia vegetal não são universais e dependem fortemente do contexto experimental.

Com o avanço das mudanças climáticas globais, projeta-se um aumento nas concentrações atmosféricas de CO₂, o que tem motivado uma crescente atenção da comunidade científica quanto aos impactos desse gás no desenvolvimento vegetal. Os efeitos de altas concentrações de CO₂ sobre espécies cultivadas podem variar amplamente, dependendo de múltiplos fatores como a disponibilidade de nutrientes no solo, as condições hídricas, a temperatura, a luminosidade, a arquitetura morfológica da planta e a sua estratégia fotossintética (C3 ou C4).

É fundamental compreender com maior profundidade os limites fisiológicos das plantas frente ao aumento de CO₂, bem como identificar as condições ambientais sob as quais esse enriquecimento pode ser vantajoso — promovendo maior eficiência fotossintética, acúmulo de biomassa e produtividade — ou, ao contrário, prejudicial, induzindo desequilíbrios nutricionais, estresse fisiológico e senescência precoce. Tal conhecimento é essencial para a formulação de estratégias de manejo adaptativo, capazes de mitigar os efeitos

negativos do aquecimento global sobre a agricultura e a ecologia vegetal de forma mais ampla.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, L. H. et al. Fluctuations of CO₂ in Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) depress plant photosynthesis, growth, and yield. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 284, p. 107899, 2020.
- ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BORETTI, A. Evaluating water use efficiency and CO₂ absorption in plants under rising atmospheric carbon dioxide levels. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 266, p. 106409, 2025.
- BOUAIN, N. et al. Plant growth stimulation by high CO₂ depends on phosphorus homeostasis in chloroplasts. **Current Biology**. v. 32, n. 20, p. 4493-4500, e4, 2022.
- BUDKE, J. C; JARENKOW, J. A; OLIVEIRA-FILHO, A. T. 2010. Intermediary disturbance increases tree diversity in riverine forest of southern Brazil. **Biodiversity and Conservation**, v. 19, p. 2371-2387, 2010.
- CALLEJA-CABRERA, J. et al. Root growth adaptation to climate change in crops. **Frontiers in Plant Science**. v. 11, p. 544, 2020.
- CARNEIRO, J. E. et al. **Feijão: do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, 2015.
- CHENG, W. et al. Global monthly gridded atmospheric carbon dioxide concentrations under the historical and future scenarios. **Scientific data**. v. 9, 2022.
- CROWLEY, L. M. et al. Elevated CO₂ Impacts on Plant–Pollinator Interactions: a Systematic Review and Free Air Carbon Enrichment Field Study. **Insects**. v. 12, n. 6, p. 512, 2021.
- CRUZ, J. L. et al. Elevated CO₂ concentrations alleviate the inhibitory effect of drought on physiology and growth of cassava plants. **Scientia Horticulturae**. v. 210, p. 122-129, 2016.
- DAKORA, F. D. et al. Exploring the Impacts of Elevated CO₂ on Food Security: Nutrient Assimilation, Plant Growth, and Crop Quality. **Engineering**. v. 44, 2025.
- DRAKE, B. G. et al. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂?. **Annual Review of Plant Biology**. v. 48, n. 1, p. 609-639, 1997.
- DUAN, B. et al. Long-term responses of plant growth, soil microbial communities and soil enzyme activities to elevated CO₂ and neighbouring plants. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 213, p. 91-101, 2015.

- FAN, X. et al. Carbon dioxide fertilization effect on plant growth under soil water stress associates with changes in stomatal traits, leaf photosynthesis, and foliar nitrogen of bell pepper (*Capsicum annuum* L.). **Environmental and Experimental Botany**. v. 179, p. 104203, 2020.
- FENG, L. et al. The generation of gridded emissions data for CMIP6. **Geoscientific Model Development**. v. 13, n. 2, p. 461-482, 2020.
- FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (Orgs.). **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Viçosa: SBCS, 2018.
- GIANG, N. C. et al. Effects of organic substrate amendments on selected organic fractions and biochemical parameters under different soils. **Scientifica**. v. 2024, n. 1, p. 9997751, 2024.
- GOJON, A. et al. The decline of plant mineral nutrition under rising CO₂: physiological and molecular aspects of a bad deal. **Trends in Plant Science**. v. 28, n. 2, p. 185-198, 2023.
- KABIR, M. et al. Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. **Journal of King Saud University – Science**. v. 35, n. 5, p. 102693, 2023.
- KIZILDENIZ, T. et al. Assessing the growth dynamics of alfalfa varieties (*medicago sativa* cv. bilensoy 80 and nimet) response to varied carbon dioxide (CO₂) concentrations. **Heliyon**, v. 10, n. 7, 2024.
- LAN, X. et al. Thoning: Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2025-06 <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>
- LEITE, P.F; KLEIN, R.M. Geografia do Brasil. Região Sul Rio de Janeiro, **IBGE**. 1990.
- LV, D. et al. Elevated CO₂ concentration enhances plant growth, photosynthesis, and ion homeostasis of soybean under salt-alkaline stress. **Environmental and Experimental Botany**. v. 228, p. 106000, 2024.
- MATA, L. et al. Growth under elevated atmospheric CO₂ concentration accelerates leaf senescence in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 169, n. 14, p. 1392-1400, 2012.
- MEINSHAUSEN, M. et al. Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling (CMIP6). **Geoscientific Model Development**. v. 10, 2057–2116. 2017.
- NAGELKERKEN, I.; CONNELL, S. D. Global alteration of ocean ecosystem functioning due to increasing human CO₂ emissions. **PNAS**. v. 112, n. 43, p. 13272-13277, 2015.

- PEEL, M. C. et al. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.
- RAVI, V. et al. Assessment of photosynthetic efficiency of greater yam and white yam subjected to elevated carbon dioxide. **South African Journal of Botany**, v. 145, p. 397-404, 2022.
- RODRIGUES, A. A. et al. Tendência e variabilidade da chuva no Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 177-207, 2023.
- SANTOS, J. B.; GAVILANES, M. L. Botânica. In: VIEIRA, C.; PAULA JR, T. J.; BORÉM, A. (Orgs.). **Feijão: aspectos gerais e cultura no estado de minas**. Viçosa: UFV, 1998. p. 55-81.
- STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2018.
- STUECKER, M. F. et al. Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks. **Nature Climate Change**. v. 8, n. 12, p. 1076-1081, 2018.
- SUZUKI, Y. et al. Comprehensive increase in CO₂ release by drying–rewetting cycles among Japanese forests and pastureland soils and exploring predictors of increasing magnitude. **SOIL**. v. 11, n. 1, p. 35-49, 2025.
- TAUSZ-POSCH, S.; BOURGAULT, M. T. M. Elevated CO₂ effects on crops: Advances in understanding acclimation, nitrogen dynamics and interactions with drought and other organisms. **Plant Biology**. v. 22, p. 38-51, 2020.
- TAYLOR, K. E. et al. An overview of CMIP5 and the experiment design. **American Meteorological Society**. v. 93, n. 4, p. 485-498, 2012.
- TURETSKY, M. R. et al. Permafrost collapse is accelerating carbon release. **Nature**. v. 569, n. 7754, p. 32-34, 2019.
- VICTOR, D. G.; KENNEL, C. F. Ditch the 2 °C warming goal. **Nature**. v. 514, n. 7520, p. 30-31, 2014.
- XIA, J. et al. CO₂ enrichment accelerates alpine plant growth via increasing water-use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 352, p. 110036, 2024.
- YANG, D. et al. The first global carbon dioxide flux map derived from tansat measurements. **Advances in Atmospheric Sciences**. v. 38, 2021.