

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento inicial de *Cedrela fissilis* Vell.: efeitos do aumento da concentração de *CO2* e da temperatura**

Ana Júlia Carvalho Defeo  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**ANA JÚLIA CARVALHO DEFEIO**

**Impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento inicial de *Cedrela fissilis* Vell.: efeitos do aumento da concentração de *CO2* e da temperatura**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Juraci Alves de Oliveira

Coorientador: Vinícius Melo da Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

D313i  
2025 Defeo, Ana Júlia Carvalho, 2000-  
Impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento inicial de *Cedrela fissilis* Vell.: efeitos do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e da temperatura / Ana Júlia Carvalho Defeo. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (37 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Juraci Alves de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Biologia Vegetal, 2025.

Referências bibliográficas: f. 34-37.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.523>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Cedrela fissilis*. 2. Mudanças climáticas. 3. Fotossíntese. 4. Plantas - Metabolismo. 5. Plantas - Crescimento. I. Oliveira, Juraci Alves de, 1965-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Biologia Vegetal. Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal. III. Título.

CDD 22. ed. 583.77

**ANA JÚLIA CARVALHO DEFEO**

**Impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento inicial de *Cedrela fissilis* Vell.: efeitos do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e da temperatura**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

---

Ana Júlia Carvalho Defeo  
Autora

---

Juraci Alves de Oliveira  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 22/08/2025 às 22:27:59 e pelo orientador em 26/08/2025 às 09:47:51. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **XSS7.ZF9V.DDW4** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais, por todo amor  
e carinho, mesmo à distância,  
Dedico.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e fé que me sustentaram nos momentos de incerteza, mostrando que cada desafio era parte do caminho e não o fim dele.

À minha mãe, Raquel, que sempre foi presença e fortaleza, me ensinando o significado de resiliência e determinação; sou grata pelo amor e amparo. Ao meu pai, Angelo, pelo esforço e sacrifícios que possibilitaram meus sonhos; sou grata pela confiança e apoio. Ao meu irmão, Eduardo, por ser companhia leve e constante, e, especialmente neste último ano de mestrado, por dividir a casa, angústias, risadas e jantares recheados de conversas e filmes.

Aos meus avós e à minha família, em especial, à Tia Ana, Tio Renato e Laura por todo o carinho, apoio e orgulho que sempre demonstraram.

Aos meus gatinhos, JJ, ET e Pé sujo, por estarem sempre por perto, trazendo leveza aos dias e me confortando de formas que nem imaginam.

Ao meu orientador, Professor Juraci, pela paciência, pelo conhecimento compartilhado e pela confiança no meu trabalho, ajudando a tornar esse projeto possível. À UFV e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal que contribuíram para a minha formação. À minha banca, pelo tempo e disponibilidade, agradeço por terem aceitado o convite.

Aos colegas do Laboratório de Biofísica Ambiental, Esneider, Guilherme Jordan, Victor, Hycaro e Taline, pelo aprendizado compartilhado, por todo apoio e ajuda nas análises e, também, nas risadas (e piadas de hominho) que tornaram a rotina de laboratório mais leve. Ao meu Coorientador, Dr. Vinícius Melo, meu agradecimento por sempre estar disponível, seu apoio na condução do trabalho, estatística e escrita foi fundamental para o desenvolvimento deste projeto.

Aos amigos da UCP, pelas conversas científicas, pelos rolês e momentos de descontração. Em especial ao David Medeiros e Alana Cavalcante, por todo auxílio nas análises de perfil metabólico.

À equipe do Instituto Inhotim, Lais Diniz e Dra. Nayara Mota, pelo suporte na condução e desmontagem dos experimentos, e ao Instituto Ekos pela parceria valiosa.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## RESUMO

DEFEO, Ana Júlia Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento inicial de *Cedrela fissilis* Vell.: efeitos do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e da temperatura.** Orientador: Juraci Alves de Oliveira. Coorientador: Vinícius Melo da Silva.

As mudanças climáticas globais, particularmente o aumento das concentrações de CO<sub>2</sub> e da temperatura, podem impactar significativamente o desenvolvimento e a fisiologia das espécies arbóreas tropicais. Este estudo avaliou os efeitos do Alto CO<sub>2</sub> e da temperatura elevada na morfologia, fisiologia e metabolismo de *Cedrela fissilis*, uma espécie de importância ecológica e econômica. Para isso, plântulas foram cultivadas em câmaras de crescimento sob três condições experimentais: Controle (CO<sub>2</sub> ambiente e temperatura ambiente), Alto CO<sub>2</sub> e Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura. Os resultados demonstraram que o Alto CO<sub>2</sub> promoveu alterações no crescimento, incluindo variações na massa fresca e seca, assim como na taxa fotossintética líquida. No entanto, a combinação com alta temperatura reduziu esses benefícios, indicando maior demanda metabólica para regulação térmica. Em nível anatômico, foram observadas modificações estruturais, como expansão dos espaços intercelulares no parênquima lacunoso e alterações na densidade estomática, que podem refletir ajustes fisiológicos à maior concentração de CO<sub>2</sub>. Os pigmentos fotossintéticos, especialmente a clorofila a e os carotenoides, apresentaram redução sob Alto CO<sub>2</sub>, mas essa alteração não persistiu quando combinada à temperatura elevada. No metabolismo primário, glicose e frutose foram reduzidas no cenário de Alto CO<sub>2</sub>, enquanto sacarose e amido permaneceram estáveis. Além disso, a prolina aumentou nos cenários de estresse, sugerindo um mecanismo de proteção celular. As análises nutricionais revelaram variações na absorção e alocação de minerais, com reduções de Mn e Mg nas folhas e de Ca e Fe nas raízes sob Alto CO<sub>2</sub>, enquanto a combinação com alta temperatura resultou em aumentos na concentração de Ca em folhas e Mn em raízes. Os resultados indicaram que *C. fissilis* exibe plasticidade fisiológica e estrutural diante do Alto CO<sub>2</sub>, mas os efeitos positivos são parcialmente neutralizados pela alta temperatura, evidenciando limites adaptativos da espécie em cenários futuros de mudança climática. Esses resultados fornecem subsídios para estratégias de manejo e conservação voltadas à manutenção da espécie em ambientes sujeitos ao aumento de CO<sub>2</sub> e temperatura.

Palavras-chave: *Cedrela fissilis*; fotossíntese; mudanças climáticas; metabolismo vegetal; crescimento vegetal

## ABSTRACT

DEFEO, Ana Júlia Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Impacts of climate change on the initial development of *Cedrela fissilis* Vell.: effects of increased CO<sub>2</sub> concentration and temperature.** Adviser: Juraci Alves de Oliveira. Co-adviser: Vinícius Melo da Silva.

Global climate change, particularly the rise in atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations and temperature, can significantly impact the development and physiology of tropical tree species. This study evaluated the effects of High CO<sub>2</sub> and elevated temperature on the morphology, physiology, and metabolism of *Cedrela fissilis*, a species of ecological and economic importance. For this purpose, seedlings were cultivated in growth chambers under three experimental conditions: Control (ambient CO<sub>2</sub> and temperature), High CO<sub>2</sub>, and High CO<sub>2</sub> + High Temperature. The results showed that High CO<sub>2</sub> induced growth alterations, including changes in fresh and dry biomass, as well as net photosynthetic rate. However, the combination with high temperature mitigated these benefits, suggesting a greater metabolic demand for thermal regulation. At the anatomical level, structural modifications were observed, such as expansion of intercellular spaces in the spongy parenchyma and changes in stomatal density, which may reflect physiological adjustments to increased CO<sub>2</sub> availability. Photosynthetic pigments, particularly chlorophyll a and carotenoids, decreased under High CO<sub>2</sub>, but this alteration was not maintained when combined with elevated temperature. In primary metabolism, glucose and fructose levels decreased under High CO<sub>2</sub>, whereas sucrose and starch remained stable. Additionally, proline levels increased under stress conditions, suggesting a protective mechanism at the cellular level. Nutritional analyses revealed variations in mineral absorption and allocation, with reductions in Mn and Mg in leaves and Ca and Fe in roots under High CO<sub>2</sub>, whereas the combination with high temperature resulted in increased Ca in leaves and Mn in roots. The findings indicate that *C. fissilis* exhibits physiological and structural plasticity under High CO<sub>2</sub>, but the positive effects are partially neutralized by high temperature, revealing adaptive limitations under future climate change scenarios. These results provide insights for conservation and management strategies aimed at maintaining this species in environments subject to rising CO<sub>2</sub> and temperature.

Keywords: *Cedrela fissilis*; photosynthesis; climate change; plant metabolism; plant growth

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

**Figura 1.** Parâmetros biométricos de plantas de *Cedrela fissilis* cultivadas, por 90 dias, em três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: **(Controle)** 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); **(Alto CO<sub>2</sub>)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e **(Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). **(A)** Massa fresca de parte aérea; **(B)** Massa fresca de raiz; **(C)** Massa seca de parte aérea; **(D)** Massa seca de raiz; **(E)** Comprimento de parte aérea; **(F)** Comprimento de raiz; **(G)** Diâmetro da base do caule. Os valores representam médias ± erro padrão (n=5). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P≤0,05)..... 16

**Figura 2.** Parâmetros de trocas gasosas de plantas de *Cedrela fissilis* cultivadas, por 90 dias, em três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura. **(Controle)** 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); **(Alto CO<sub>2</sub>)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e **(Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). **(A)** Fotossíntese líquida (A); **(B)** Condutância estomática (g<sub>s</sub>); **(C)** Concentração intercelular de carbono (C<sub>i</sub>); **(D)** Taxa transpiracional (E). Os valores dos gráficos de barra representam médias ± erro padrão (n=5); O diagrama de caixa (Boxplot) representa o grau de dispersão das variáveis dentro de cada tratamento. Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P≤0,05)..... 18

**Figura 3.** Densidade estomática em indivíduos de *Cedrela fissilis* após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: **(Controle)** 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); **(Alto CO<sub>2</sub>)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e **(Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). Os valores representam médias ± erro padrão (n=5). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P≤0,05)..... 19

**Figura 4.** Corte transversal da lâmina foliar de *Cedrela fissilis*, evidenciando a nervura central e a organização dos tecidos, após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: **(Controle)** 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); **(Alto CO<sub>2</sub>)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e **(Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). **(A)** Nervura central foliar (Controle); **(B)** Detalhe da organização dos tecidos foliares (Controle); **(C)** Nervura Central Foliar (Alto CO<sub>2</sub>); **(D)** Detalhe da organização dos tecidos foliares (Alto CO<sub>2</sub>); **(E)** Nervura central foliar (Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura); **(F)** Detalhe da organização dos tecidos foliares (Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura). A ponta de seta indica a presença de drusas. Ead = epiderme adaxial; Eab = epiderme abaxial; Pp = parênquima paliçádico; Pl = parênquima lacunoso; Es = estômatos..... 21

**Figura 5.** Corte transversal do caule de *Cedrela fissilis*, evidenciando a organização dos tecidos, após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: **(Controle)** 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); **(Alto CO<sub>2</sub>)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e **(Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). **(A)** Estrutura caulinar (Controle); **(B)** Detalhe da organização dos tecidos caulinares (Controle); **(C)** Estrutura caulinar (Alto CO<sub>2</sub>); **(D)** Detalhe da organização dos tecidos caulinares (Alto CO<sub>2</sub>); **(E)** Estrutura caulinar (Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura); **(F)** Detalhe da organização dos tecidos caulinares (Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura). A ponta de seta indica a presença de fibras. A linha reta indica a localização do câmbio. Pe = periderme; C = câmbio; Fl = floema..... 23

**Figura 6.** Concentração de metabólitos em folhas de *Cedrela fissilis* após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: **(Controle)** 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); **(Alto CO<sub>2</sub>)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e **(Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). **(A)** Glicose; **(B)** Frutose; **(C)** Sacarose; **(D)** Amido; **(E)** Aminoácidos; **(F)** Prolina. Os valores representam médias ± erro padrão (n=5). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P≤0,05)..... 25

**Figura 7.** Concentração de pigmentos fotossintéticos em plantas de *Cedrela fissilis* após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: **(Controle)** 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); **(Alto CO<sub>2</sub>)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e **(Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). **(A)** Clorofila a; **(B)** Clorofila b; **(C)** Carotenoides. Os valores representam médias ± erro padrão (n=5). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P≤0,05)..... 26

**Figura 8.** Concentração de nutrientes em folhas e raízes de *Cedrela fissilis* após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: **(Controle)** 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); **(Alto CO<sub>2</sub>)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e **(Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). **(A)** Ca folha; **(B)** Ca raiz; **(C)** Fe folha; **(D)** Fe raiz; **(E)** K folha; **(F)** K raiz; **(G)** Mn folha; **(H)** Mn raiz; **(I)** Mg folha; **(J)** Mg raiz; **(K)** Zn folha; **(L)** Zn raiz. Os valores dos gráficos de barra representam médias ± erro padrão (n=5); . O diagrama de caixa (Boxplot) representa o grau de dispersão das variáveis dentro de cada tratamento. Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P≤0,05)..... 28 e 29

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	10
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	12
2.1	Material vegetal e condições de cultivo .....	12
2.2	Parâmetros biométricos .....	12
2.3	Taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> e trocas gasosas.....	12
2.4	Densidade estomática e caracterização visual e estrutural em microscópio de luz .....	13
2.5	Análises metabólicas.....	13
2.6	Conteúdo de Pigmentos Foliareos .....	14
2.7	Análises nutricionais.....	14
2.8	Análises estatísticas.....	14
3.	RESULTADOS .....	15
3.1	Parâmetros biométricos .....	15
3.2	Taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> e trocas gasosas .....	17
3.3	Densidade estomática e caracterização visual e estrutural em microscópio de luz .....	18
3.4	Análises metabólicas.....	24
3.5	Conteúdo de Pigmentos Foliareos .....	26
3.6	Análises nutricionais.....	27
4.	DISCUSSÃO .....	30
5.	CONCLUSÕES .....	33
6.	REFERÊNCIAS.....	34

## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm se intensificado nos últimos anos, e as previsões indicam um aumento alarmante na concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, principalmente devido às atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento (Nunes et al., 2015). O impacto direto desse fenômeno é o aumento da temperatura média global, resultando em eventos climáticos extremos, alterações nos padrões de precipitação e o acelerado derretimento das calotas polares (“Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks”, 2023)).

Diante dessa realidade, o Brasil assumiu compromissos significativos para combater a degradação ambiental e promover a conservação da biodiversidade como formas de mitigar os efeitos das mudanças climáticas sobre seus ecossistemas, especialmente aqueles decorrentes do aumento na concentração de gases do efeito estufa, como o CO<sub>2</sub>, assim como do aumento de temperatura. Em 2021 foram estabelecidas metas significativas, como a recuperação de 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030, no âmbito do novo Acordo de Florestas (*Forest Deal*) (Bourscheit, 2021). No entanto, a implementação de políticas eficazes tem se mostrado um grande desafio, especialmente frente a dados que indicaram o aumento do desmatamento na Amazônia, que resultou na perda de 39,8 mil km<sup>2</sup> (3,9 milhões de hectares) de floresta, contrariando os objetivos estabelecidos (Bourscheit, 2021).

As mudanças climáticas representam uma ameaça crescente à sobrevivência das espécies arbóreas, com impactos diretos na germinação e no crescimento das plantas (Vicente & Benito Garzón, 2024). O aumento das temperaturas globais, a elevação dos níveis de CO<sub>2</sub> e as mudanças nos padrões de precipitação alteram significativamente as condições ideais para o desenvolvimento das espécies vegetais (Becklin et al., 2016). Para germinarem de forma eficaz, muitas plantas precisam de condições específicas, como temperaturas adequadas, exposição à luz e tratamentos especiais, como escarificação ou o uso de hormônios vegetais. Esses fatores podem ser profundamente afetados pelas mudanças climáticas, tornando essencial compreender como essas alterações influenciam as variáveis críticas para o sucesso da germinação e do desenvolvimento das plantas em um cenário de aquecimento global (Reed et al., 2022).

Além dos impactos globais, a Bacia do Rio Doce também tem enfrentado sérios desafios ambientais. Localizada no bioma da Mata Atlântica, que compreende 98% de sua área, essa região tem sofrido com a fragmentação de seus ambientes naturais devido à ação antrópica (Ramos et al., 2024). A conversão de áreas para atividades agrícolas e outros usos, somada ao rompimento da barragem de Fundão, em Mariana-MG, ocorrido em 2015, tem exacerbado a degradação ambiental. O desastre resultou na liberação de rejeitos poluentes no rio Doce e áreas adjacentes, alterando o meio ambiente e impactando diretamente as espécies vegetais, reduzindo suas taxas de germinação e comprometendo seu desenvolvimento (Ramos et al., 2024).

Espécies arbóreas-alvo desempenham papéis econômicos e sociais essenciais para as comunidades humanas, sendo frequentemente exploradas de maneira extrativista ou cultivadas para diversos fins, como construção civil, produção de móveis e celulose. Com a crescente pressão sobre essas espécies, o desenvolvimento de técnicas de propagação torna-se crucial para aumentar suas populações e garantir sua conservação a longo prazo (Bonfá, 2019).

A espécie *Cedrela fissilis* Vellozo, também conhecida como cedro-rosa, é uma dessas espécies de grande importância econômica, sendo considerada alvo, principalmente, devido à qualidade de sua madeira, altamente valorizada na indústria moveleira e na construção civil (Bonfá, 2019). Originária da América Latina, especialmente da Mata Atlântica e do Cerrado, essa espécie enfrenta desafios significativos para sua propagação (Bonfá, 2019). A produção irregular de frutos e sementes dificulta sua expansão populacional, tornando a produção de mudas um obstáculo para programas de conservação e reflorestamento (Silva et al., 2020). Além disso, *C. fissilis* desempenha um papel ecológico crucial, sendo uma excelente candidata para programas de restauração de áreas degradadas, como as da Bacia do Rio Doce, que demandam estratégias eficazes de recuperação de vegetação nativa (Cusatis et al., 2016).

Diante desses desafios, é essencial entender como espécies como *Cedrela fissilis* responderão a essas transformações. Estudos anteriores exploraram o impacto das mudanças climáticas na disponibilidade de água, especialmente no déficit hídrico (Ortega Rodriguez et al., 2023), mas há uma lacuna significativa no conhecimento sobre como essas espécies responderão ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e às mudanças na temperatura. Assim, este estudo visa fornecer subsídios para projetos de recuperação ambiental e conservação da biodiversidade na Bacia do Rio Doce, contribuindo para o conhecimento sobre o crescimento e produção de mudas de *Cedrela fissilis* sob cenários de mudanças climáticas.

Espera-se que o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico e da temperatura tenha impactos significativos nos processos fisiológicos da *Cedrela fissilis*, afetando a germinação e o crescimento inicial das plantas. A variação nesses fatores climáticos poderá alterar a eficiência das enzimas antioxidantes, comprometendo a capacidade da espécie de mitigar os efeitos do estresse oxidativo e, conseqüentemente, sua sobrevivência e desempenho em cenários de mudanças climáticas.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material vegetal e condições de cultivo

Sementes de Cedro-rosa (*Cedrela fissilis* Vell.), fornecidas pelo banco de sementes do Instituto Inhotim, foram germinadas em câmara climática (Fitotron® SGC Plant Growth Chamber), dispostas em bandejas plásticas contendo papel germitest, sendo umedecidas, diariamente, com água destilada, sob três cenários: (Controle)  $400 \pm 70$  ppm de  $\text{CO}_2$ , umidade 70%, temperatura  $25^\circ\text{C}$  (dia); temperatura  $22^\circ\text{C}$  (noite); (Alto  $\text{CO}_2$ )  $800 \pm 70$  ppm de  $\text{CO}_2$ , umidade 70%, temperatura  $25^\circ\text{C}$  (dia); temperatura  $22^\circ\text{C}$  (noite) e (Alto  $\text{CO}_2$  e Alta Temperatura)  $800 \pm 70$  ppm de  $\text{CO}_2$ , umidade 70%, temperatura  $30^\circ\text{C}$  (dia); temperatura  $28^\circ\text{C}$  (noite), em fotoperíodo de 12 horas.

Após a germinação, aproximadamente 10 dias, as plântulas foram transferidas para tubetes de 290 mL utilizando o solo nativo, coletado na região de ocorrência dessa espécie., e estabelecidos os três cenários, conforme descrito anteriormente. A simulação de cada cenário foi feita por meio da utilização de câmara climática (Fitotron® SGC Plant Growth Chamber), que controla a umidade (70%), temperatura e  $\text{CO}_2$  (determinados para cada cenário) e fotoperíodo de 12 horas. Cada experimento contou com 54 tubetes, conduzidos por 90 dias, sendo irrigado, diariamente, com 10 mL de água destilada.

### 2.2 Parâmetros biométricos

A altura da parte aérea, o comprimento do sistema radicular e o diâmetro da base do caule foram obtidos após finalização de cada um dos cenários. Para isso, o material foi transferido para uma folha de Etileno Acetato de Vinila (EVA) e mensurado com régua e paquímetro. Após essa etapa, as plantas foram lavadas com água deionizada e separadas em parte aérea (folhas e caule) e sistema radicular, permitindo a obtenção da massa fresca. Em seguida, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel e submetido à secagem em estufa com circulação de ar forçado, a  $65^\circ\text{C}$ , até alcançar massa seca constante, possibilitando a determinação da massa seca.

### 2.3 Taxa de assimilação de $\text{CO}_2$ e trocas gasosas

Os parâmetros de trocas gasosas: taxa de assimilação líquida de carbono (A) ( $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), condutância estomática (gs) ( $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), transpiração (E) ( $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e a concentração interna de carbono ( $C_i$ ) ( $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$  de ar) foram determinados em folhas completamente expandidas, ao final de cada cenário, utilizando-se um analisador de gás no infravermelho (IRGA) modelo LC Pro da ADC (UK), sob irradiância saturante de 600 PAR,  $\text{CO}_2 \text{ mol}^{-1}$  de ar ambiente, entre 08 e 11 h, à temperatura ambiente.

## 2.4 Densidade estomática e caracterização visual e estrutural em microscópio de luz

Para estimar a densidade estomática, foram feitas impressões da epiderme abaxial da segunda folha totalmente expandida do segundo nó. Fragmentos de folhas foram colocadas em solução de NaOH 10% a 65 °C durante 2 horas e, posteriormente, colocados em solução de hipoclorito de sódio 30%, em temperatura ambiente, até atingirem a diafanização, seguida de coloração, em pernoite, com fucsina ácida 1%. As lâminas, montadas com gelatina glicerinada, tiveram as imagens capturadas utilizando uma câmera digital AxioCam (Carl Zeiss, Jena, Alemanha), acoplada a um fotomicroscópio (modelo AX70 TRF, Olympus Optical, Tóquio, Japão). A densidade estomática foi determinada em pelo menos 5 campos diferentes, cada um com área de 0,239 mm<sup>2</sup> por folha, a partir das imagens obtidas utilizando o *software* ImageJ®.

Para a caracterização visual e estrutural em microscópio de luz, foram coletados fragmentos do centro e das margens foliares da segunda folha totalmente expandida do segundo e fragmentos do caule do segundo entrenó, em seguida fixados em glutaraldeído (2,5 %), lavados com tampão fosfato 0.1 M (Karnovsky, 1965), desidratados em série etílica e incluídos em metacrilato de hidróxi-metil (Historesin Leica). Secções transversais de 5 µm foram confeccionadas utilizando um micrótomo rotativo de avanço automático (Modelo RM2155, Leica Microsystems Inc., Deerfield, EUA). Os fragmentos foram submetidos à coloração com Azul de Toluidina (pH 4,0) (Schmid et al., 1982) e montados em com água glicerinada na proporção 2:1, visando a caracterização anatômica e a identificação de possíveis modificações em resposta aos diferentes cenários.

## 2.5 Análises metabólicas

Para determinar os metabólitos, fragmentos foliares coletados da terceira folha totalmente expandida, durante o período com luz, foram congelados imediatamente em nitrogênio líquido e, posteriormente, armazenados a -80 °C, e liofilizados. Para avaliação do perfil metabólico, aproximadamente 10 mg de material liofilizado foi submetido ao processo de extração com o uso de metanol 100% (P. A.). A concentração de glicose, frutose e sacarose foi determinada a partir da fase aquosa, seguindo o método descrito por Fernie et al., (2001), os teores de aminoácidos livres totais determinados conforme protocolos estabelecidos (Cross et al., 2006), e, a partir da fração insolúvel em metanol, a concentração de amido foi determinada de acordo com o método descrito por Fernie et al., (2001).

## 2.6 Conteúdo de Pigmentos Foliare

As concentrações de clorofilas (*a* e *b*) e carotenoides serão avaliados utilizando três discos foliares de 0,5 cm de diâmetro, coletados da segunda folha totalmente expandida do segundo nó, incubados em 2 mL de dimetilsulfóxido (DMSO) saturado com carbonato de cálcio, por 48 horas. Seguiu-se aquecimento em banho-maria a 65 °C, durante 45 minutos, e leitura da absorbância nos comprimentos de onda de 665, 649 e 480 nm, para determinar as concentrações de clorofila *a*, *b* e carotenoides, respectivamente (Wellburn, 1994)., sendo as concentrações calculadas com base nas equações propostas por Arnon (1949), e os resultados expressos em  $\mu\text{g g}^{-1}$  de massa fresca (MF).

## 2.7 Análises nutricionais

Para determinar as concentrações de macro e micronutrientes, amostras de folhas e raízes, secas em estufa a 65 °C, até atingirem massa constante, foram digeridas em solução nitroperclórica (2:1), em intervalos de 50 °C a cada 20 minutos, até atingir 180 °C. Os teores de cálcio, magnésio, potássio, manganês, zinco e ferro, determinados por espectrofotometria de absorção atômica (modelo AA-6701F, Shimadzu Corporation), tiveram os resultados expressos em  $\mu\text{g g}^{-1}$  MS..

## 2.8 Análises estatísticas

O experimento foi conduzido através de um sistema de delineamento inteiramente casualizado (DIC) com 5 repetições por cenário. Os dados experimentais de cada variável foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk ( $p > 0,05$ ) e de Bartlett ( $p > 0,05$ ) para verificação básica da normalidade e homocedasticidade residuais, seguido de transformações pelo modelo da família Box-Cox caso fossem necessárias. Dados não paramétricos foram analisados por Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ). Dados paramétricos foram analisadas estatisticamente por meio da ANOVA - análise de variância ( $p < 0,05$ ) com teste de comparação de média de Tukey ( $p < 0,05$ ). Para as análises de dados, foi utilizada a linguagem e ambiente R (R Core Team, 2024), com extensões na utilização dos pacotes MASS (Venables & Ripley, 2002), AGRICOLAE (De Mendiburu Delgado, 2009) e EXPDES (Ferreira et al., 2011).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Parâmetros biométricos

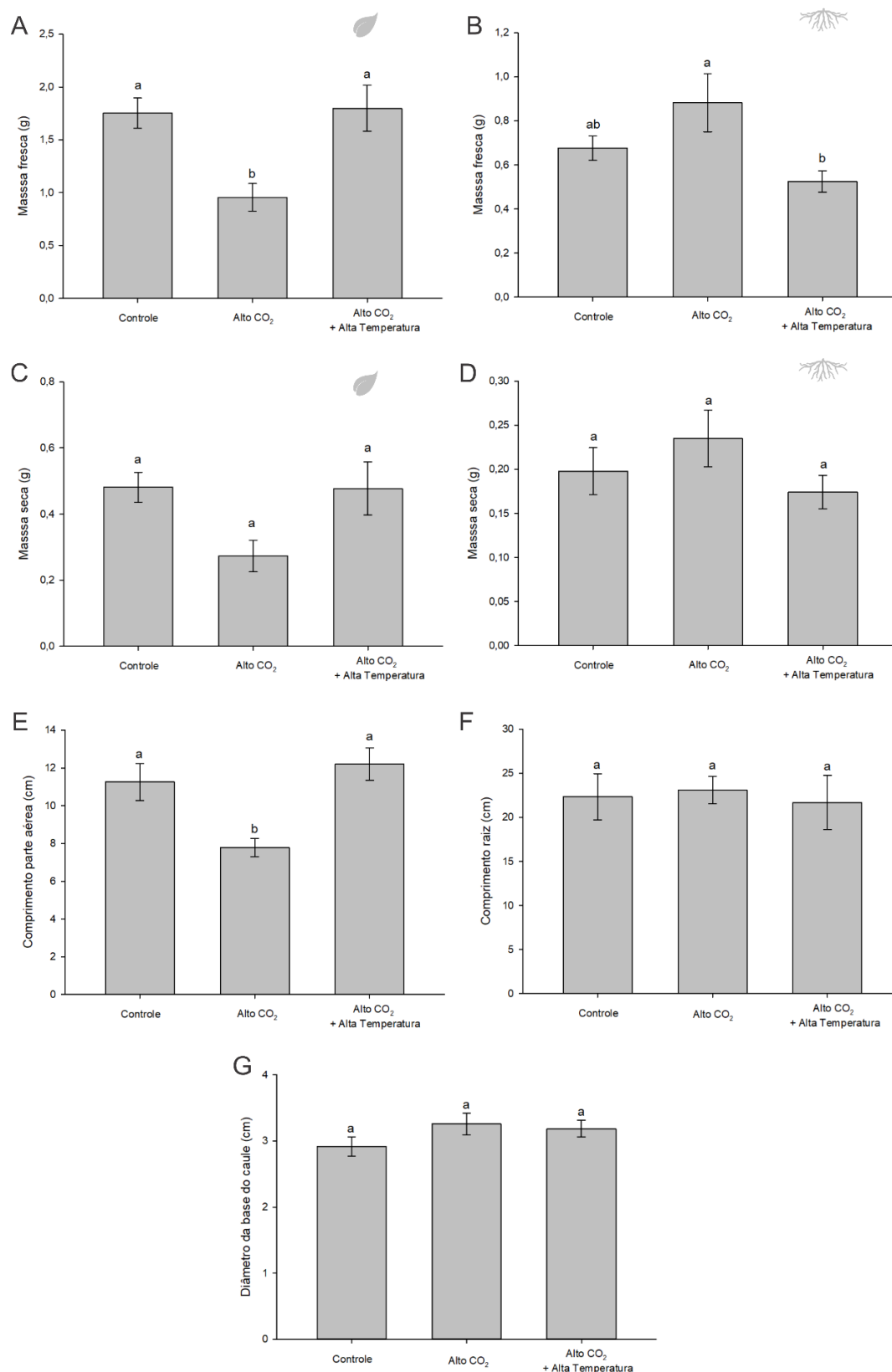
A análise dos parâmetros biométricos revelou variações significativas entre os cenários Controle, Alto CO<sub>2</sub> e Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura. A massa fresca da parte aérea (Figura 1A) foi reduzida no cenário de Alto CO<sub>2</sub> em comparação ao Controle, indicando um possível impacto do enriquecimento atmosférico de CO<sub>2</sub> sobre o crescimento vegetativo. No entanto, a elevação simultânea da temperatura (Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura) compensou esse efeito, resultando em valores equivalentes aos do Controle.

No caso da massa fresca das raízes (Figura 1B), observou-se um padrão distinto, com o cenário de Alto CO<sub>2</sub> promovendo maior acúmulo de biomassa radicular em relação aos demais cenários. Esse efeito foi atenuado na condição de Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura, na qual os valores foram menores em relação ao Alto CO<sub>2</sub> isolado, mas ainda próximos aos do Controle. Esse comportamento sugere um possível redirecionamento da alocação de biomassa em resposta às condições ambientais, com maior investimento na estrutura radicular sob elevada concentração de CO<sub>2</sub>.

Em relação à biomassa seca, tanto da parte aérea (Figura 1C) quanto das raízes (Figura 1D), não foram observadas diferenças significativas entre os cenários, indicando que a partição de biomassa seca não foi alterada pelas condições experimentais.

A altura da parte aérea (Figura 1E) foi reduzida cenário de Alto CO<sub>2</sub> em relação ao Controle e ao Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura. Esse efeito foi revertido pela elevação da temperatura, sugerindo que a interação entre esses fatores pode modular o crescimento vegetativo. O comprimento das raízes (Figura 1F) não apresentou variações significativas entre os cenários, sugerindo que o desenvolvimento radicular não foi diretamente impactado pelas condições experimentais aplicadas. Por fim, o diâmetro do caule (Figura 1G) também não diferiu entre os cenários, indicando que a espessura do caule foi preservada independentemente das variações ambientais testadas.

Ainda que não tenham sido verificadas diferenças estatísticas na partição de biomassa entre os cenários, os dados sugerem um possível redirecionamento do investimento energético das plantas submetidas a altos níveis de CO<sub>2</sub>, com maior acúmulo de biomassa na raiz. No entanto, esse efeito parece ser atenuado pela elevação da temperatura, evidenciando a interação dinâmica entre esses fatores no desenvolvimento das plantas.



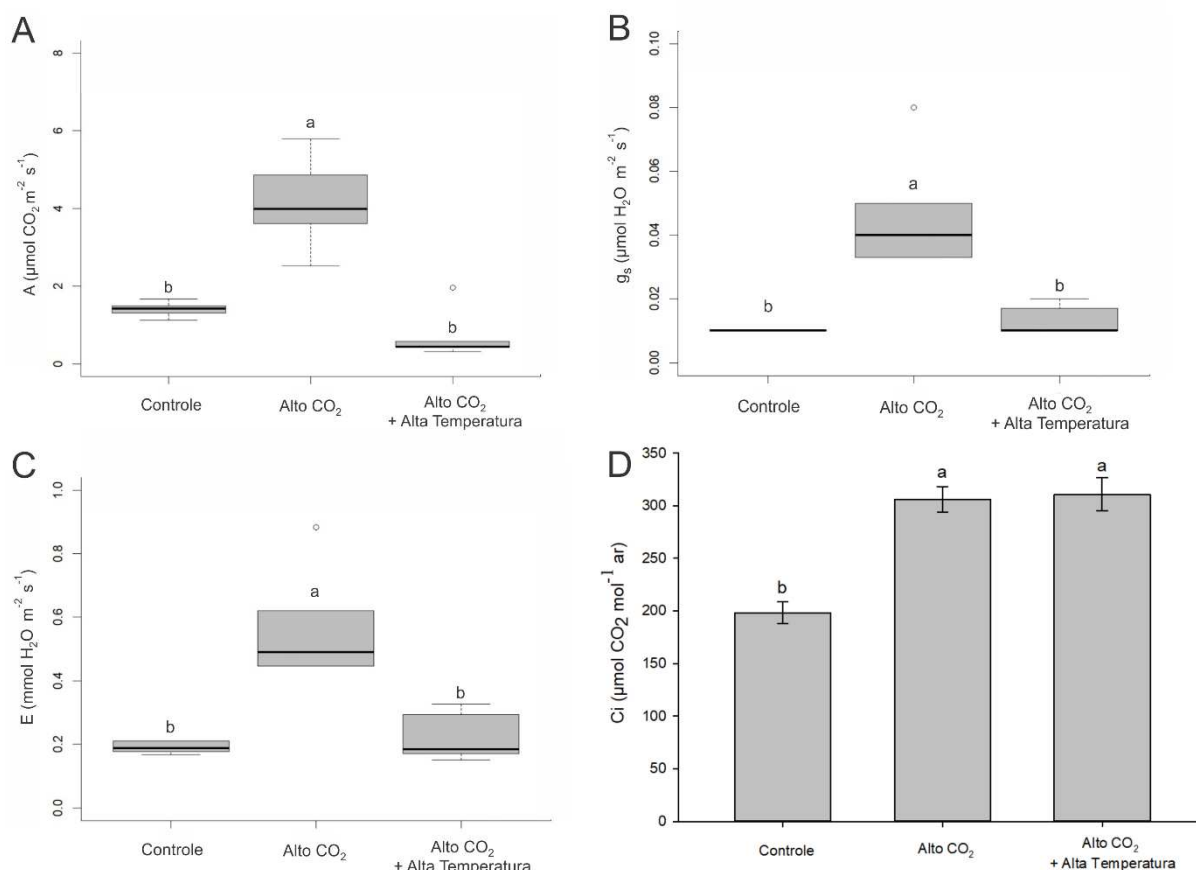
**Figura 1.** Parâmetros biométricos de plantas de *Cedrela fissilis* cultivadas, por 90 dias, em três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: **(Controle)** 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); **(Alto CO<sub>2</sub>)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e **(Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura)** 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). **(A)** Massa fresca de parte aérea; **(B)** Massa fresca de raiz; **(C)** Massa seca de parte aérea; **(D)** Massa seca de raiz; **(E)** Comprimento de parte aérea; **(F)** Comprimento de raiz; **(G)** Diâmetro da base do caule. Os valores representam médias ± erro padrão (n=5). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P<0,05).

### 3.2 Taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> e trocas gasosas

A taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (A) (Figura 2A), a condutância estomática (gs) (Figura 2B) e taxa de transpiração (E) (Figura 2C) foram maiores no cenário de Alto CO<sub>2</sub> em relação ao Controle e ao Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura, demonstrando que o aumento na disponibilidade de CO<sub>2</sub> atmosférico promoveu incremento nesses parâmetros. No entanto, esse efeito não foi sustentado na condição de Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura, na qual os valores retornaram a níveis semelhantes aos do Controle, sugerindo que a elevação da temperatura pode atenuar os efeitos da maior concentração de CO<sub>2</sub> na assimilação líquida de carbono, na condutância estomática e perda de água por transpiração.

Esses resultados indicam que, embora o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> tenha promovido uma elevação na taxa de assimilação líquida de carbono e na abertura estomática, a elevação da temperatura exerceu um efeito modulador sobre esses processos, reduzindo a magnitude das respostas fisiológicas observadas.

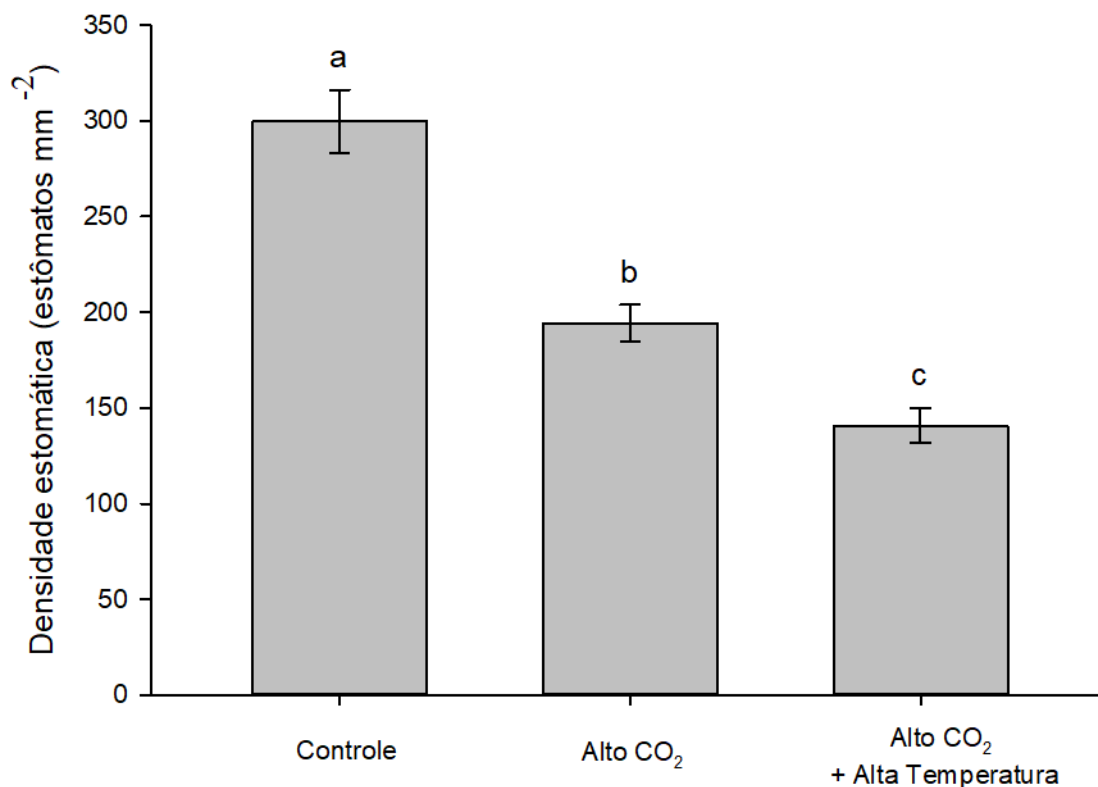
A concentração interna de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>) (Figura 2D) foi maior nos cenários de Alto CO<sub>2</sub> e Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura em relação ao Controle, indicando que o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico influenciou diretamente esse parâmetro. Esse resultado sugere que a maior disponibilidade de CO<sub>2</sub> permitiu uma maior difusão do gás para o mesofilo foliar, potencialmente elevando a assimilação fotossintética nas condições experimentais avaliadas.



**Figura 2.** Parâmetros de trocas gasosas de plantas de *Cedrela fissilis* cultivadas, por 90 dias, em três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura. (**Controle**) 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); (**Alto CO<sub>2</sub>**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e (**Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). (**A**) Fotossíntese líquida (A); (**B**) Condutância estomática (g<sub>s</sub>); (**C**) Concentração intercelular de carbono (C<sub>i</sub>); (**D**) Taxa transpiracional (E). Os valores dos gráficos de barra representam médias ± erro padrão (n=5); O diagrama de caixa (Boxplot) representa o grau de dispersão das variáveis dentro de cada tratamento. Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P<0,05)

### 3.3 Densidade estomática e caracterização visual e estrutural em microscópio de luz

A densidade estomática (Figura 3) variou entre os diferentes cenários, evidenciando um efeito significativo das condições experimentais sobre a morfologia foliar. O cenário de Controle apresentou a maior densidade estomática, com valores médios superiores a 300 estômatos mm<sup>-2</sup>. A exposição a condições de Alto CO<sub>2</sub> resultou em uma redução na densidade estomática para, aproximadamente, 200 estômatos mm<sup>-2</sup>, o que foi acentuada com a alteração conjunta da temperatura, com valores médios de 150 estômatos mm<sup>-2</sup>. Esses resultados indicam que o aumento na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> promoveu a redução da densidade estomática e que esse efeito foi potencializado pela elevação da temperatura, sugerindo um mecanismo compensatório para minimizar a perda de água em condições ambientais modificadas.

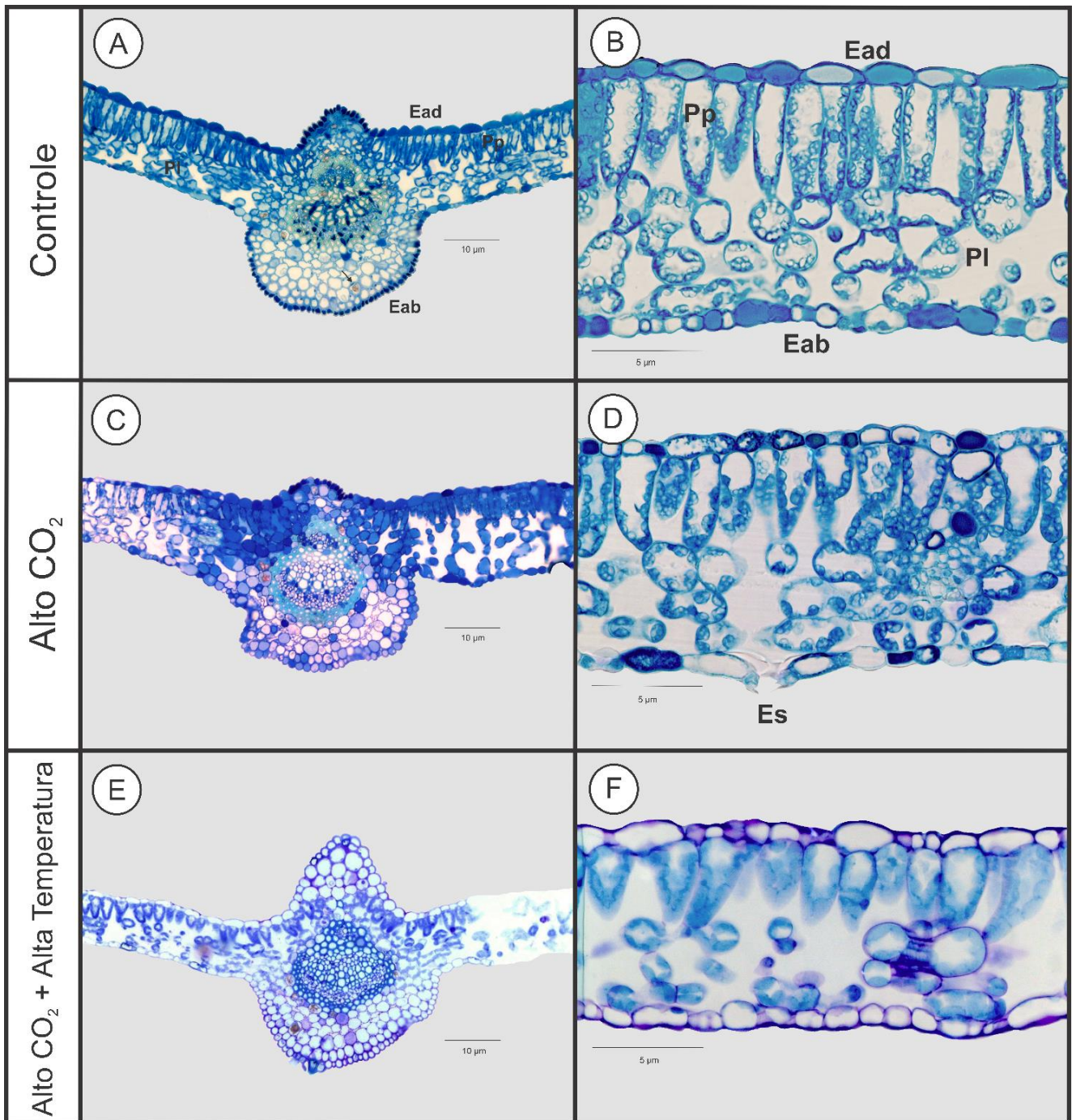


**Figura 3.** Densidade estomática em indivíduos de *Cedrela fissilis* após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: (**Controle**) 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); (**Alto CO<sub>2</sub>**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e (**Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). Os valores representam médias ± erro padrão (n=5). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P≤0,05).

A análise anatômica das folhas revelou modificações estruturais na nervura central, no parênquima e na epiderme, sob diferentes condições ambientais. No cenário Controle (Figuras 4A e 4B), a nervura central e a lâmina foliar apresentaram organização bem definida, com epiderme adaxial (Ead) e abaxial (Eab) contínuas. O parênquima paliçádico (Pp) exibiu células alongadas e organizadas, enquanto o parênquima lacunoso (Pl) mostrou espaços intercelulares distribuídos de maneira uniforme, com a presença de drusas, indicadas pelas setas. A coloração azul intensa observada na epiderme, principalmente na face abaxial, indica a presença de compostos fenólicos.

No cenário de alto CO<sub>2</sub> (Figuras 4C e 4D), a nervura central apresentou maior expansão dos tecidos internos, com células visualmente menos compactas e aumento dos espaços intercelulares no parênquima lacunoso, com a epiderme abaxial mantendo a presença prevacente de estômatos (Es). A coloração azul, associada aos compostos fenólicos, mostrou leve redução em comparação ao controle, indicando um possível ajuste na síntese ou acúmulo desses metabólitos secundários sob esse cenário.

No cenário de Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura (Figuras 4E e 4F), a desorganização dos tecidos internos da nervura central torna-se mais evidente, com parênquima lacunoso visualmente menos compacto e disposição celular diferenciada, com maiores espaços intercelulares. A epiderme abaxial apresentou aparente variação na espessura, bem como diminuição aparente da espessura foliar. Foi observada diminuição da coloração azul intensa da epiderme, indicando menor deposição de compostos fenólicos. Essa redução pode estar associada a alterações no metabolismo secundário da planta em resposta ao estresse térmico combinado ao enriquecimento de CO<sub>2</sub>. A presença de drusas ainda é observada.

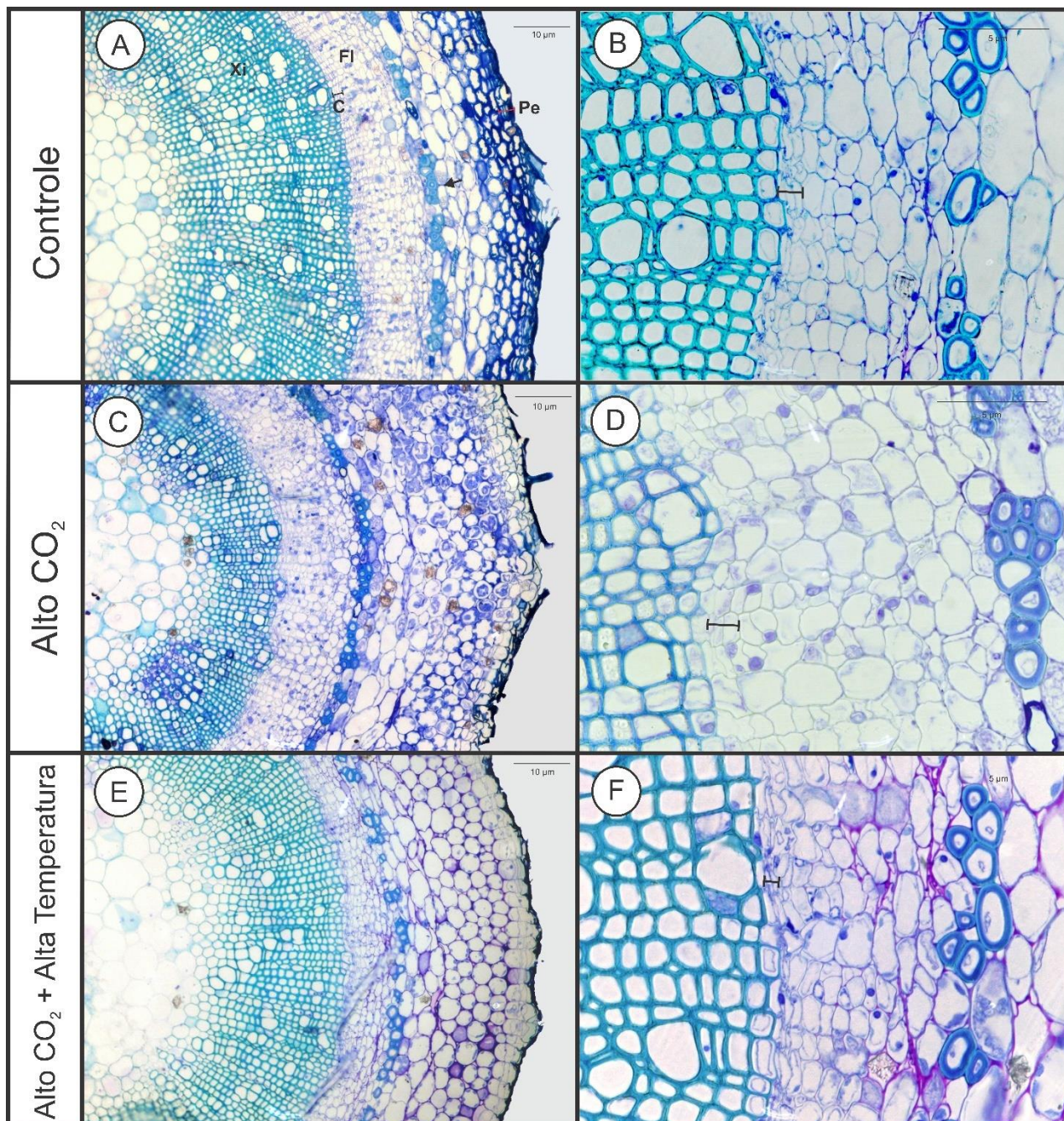


**Figura 4.** Corte transversal da lâmina foliar de *Cedrela fissilis*, evidenciando a nervura central e a organização dos tecidos, após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: (**Controle**) 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); (**Alto CO<sub>2</sub>**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e (**Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). (**A**) Nervura central foliar (Controle); (**B**) Detalhe da organização dos tecidos foliares (Controle); (**C**) Nervura Central Foliar (Alto CO<sub>2</sub>); (**D**) Detalhe da organização dos tecidos foliares (Alto CO<sub>2</sub>); (**E**) Nervura central foliar (Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura); (**F**) Detalhe da organização dos tecidos foliares (Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura). A ponta de seta indica a presença de drusas. Ead = epiderme adaxial; Eab = epiderme abaxial; Pp = parênquima paliçádico; PI = parênquima lacunoso; Es = estômatos

A análise anatômica do caule revelou diferenças estruturais na periderme, câmbio vascular e fibras, sob diferentes condições ambientais. No cenário controle (Figuras 5A e 5B), a periderme (Pe) apresentou-se bem desenvolvida visualmente, com células organizadas e compactas, com câmbio vascular (C) contínuo, delimitado claramente pela disposição celular, e com presença de fibras (Fi), dispostas ao longo do tecido condutor, conferindo suporte estrutural. O floema (Fl) e o xilema exibiram organização típica, sem alterações visíveis na estrutura celular.

No cenário de alto CO<sub>2</sub> (Figuras 5C e 5D), a periderme manteve sua integridade estrutural, mas com aparente aumento na desorganização dos tecidos subjacentes. O câmbio vascular permaneceu contínuo, porém, com células menos alinhadas, sugerindo possíveis alterações no processo de diferenciação celular, em resposta ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub>.

No cenário de Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura (Figuras 5E e 5F) as alterações tornaram-se mais evidentes na organização dos tecidos vasculares. O câmbio vascular apresentou organização aparente menos definida, com uma disposição celular irregular. A periderme apresentou visualmente variações na espessura, sugerindo possível efeito do estresse térmico na diferenciação dos tecidos de revestimento. As fibras mostraram variação na distribuição, indicando possíveis impactos no desenvolvimento do tecido de sustentação. Essas alterações estruturais refletem respostas adaptativas do caule às mudanças ambientais, possivelmente influenciando a condução de seiva e a resistência mecânica do órgão.



**Figura 5.** Corte transversal do caule de *Cedrela fissilis*, evidenciando a organização dos tecidos, após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: (**Controle**) 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); (**Alto CO<sub>2</sub>**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e (**Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). (**A**) Estrutura caulinar (Controle); (**B**) Detalhe da organização dos tecidos caulinares (Controle); (**C**) Estrutura caulinar (Alto CO<sub>2</sub>); (**D**) Detalhe da organização dos tecidos caulinares (Alto CO<sub>2</sub>); (**E**) Estrutura caulinar (Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura); (**F**) Detalhe da organização dos tecidos caulinares (Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura). A ponta de seta indica a presença de fibras. A linha reta indica a localização do câmbio. Pe = periderme; C = câmbio; Fl = floema.

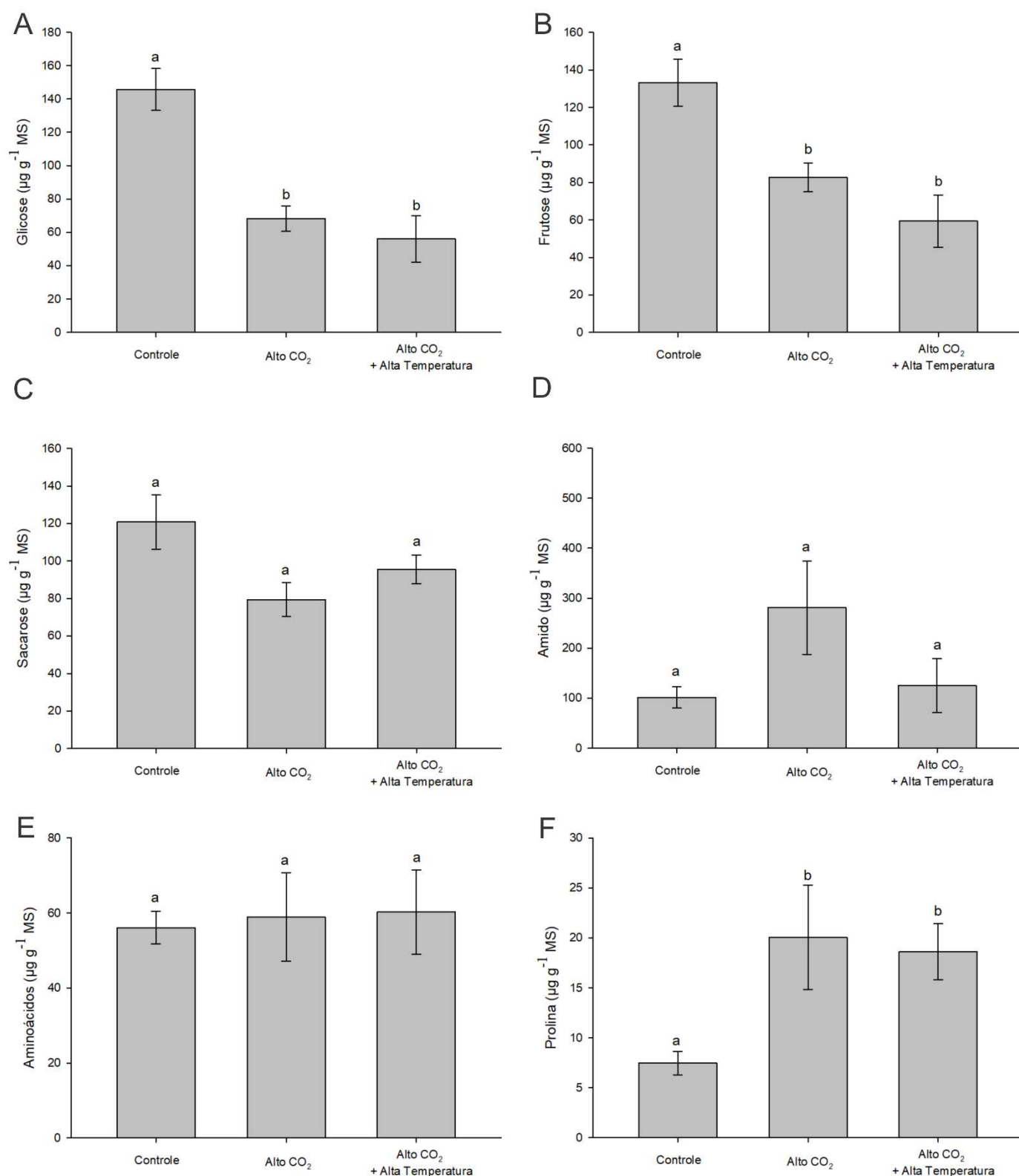
### 3.4 Análises metabólicas

Os teores de metabólitos primários foram significativamente afetados pelos cenários, refletindo ajustes fisiológicos e bioquímicos das plantas às condições experimentais. A concentração de glicose (Figura 6A) reduziu de forma expressiva nos cenários de Alto CO<sub>2</sub> e Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura em relação ao Controle, diminuindo de, aproximadamente, 150 µg g<sup>-1</sup> MS para valores inferiores a 50 µg g<sup>-1</sup> MS. A frutose (Figura 6B) seguiu um padrão semelhante, com redução nos cenários com elevação de CO<sub>2</sub>, atingindo valores médios de 80 µg g<sup>-1</sup> MS e 60 µg g<sup>-1</sup> MS, nos cenários Alto CO<sub>2</sub> e Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura, respectivamente. Esse declínio na disponibilidade de açúcares solúveis pode indicar um redirecionamento do fluxo de carbono na planta, possivelmente influenciado pela alteração na demanda energética e na homeostase do metabolismo de carboidratos em resposta às condições experimentais.

A concentração de sacarose (Figura 6C) apresentou tendência de redução sob Alto CO<sub>2</sub>, mas sem diferenças expressivas entre os 3 cenários. O armazenamento de amido (Figura 6D) não apresentou variações relevantes, sugerindo que a redistribuição de carboidratos entre órgãos não foi significativamente alterada. No entanto, a redução nos níveis de glicose e frutose, sem um acúmulo concomitante de amido, pode indicar um ajuste metabólico que evita o acúmulo excessivo de açúcares livres, mantendo a homeostase celular.

Os teores de aminoácidos livres (Figura 6E) permaneceram constantes entre os cenários, sugerindo que a disponibilidade de compostos nitrogenados não foi afetada pelas condições experimentais. No entanto, a prolina (Figura 6F), um aminoácido chave na osmoproteção e no ajuste metabólico em condições de estresse, teve aumento significativo nos cenários de Alto CO<sub>2</sub> e Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura, em relação ao Controle. Esse aumento pode indicar um mecanismo de adaptação das plantas às condições ambientais impostas, auxiliando na regulação osmótica e na proteção contra danos oxidativos.

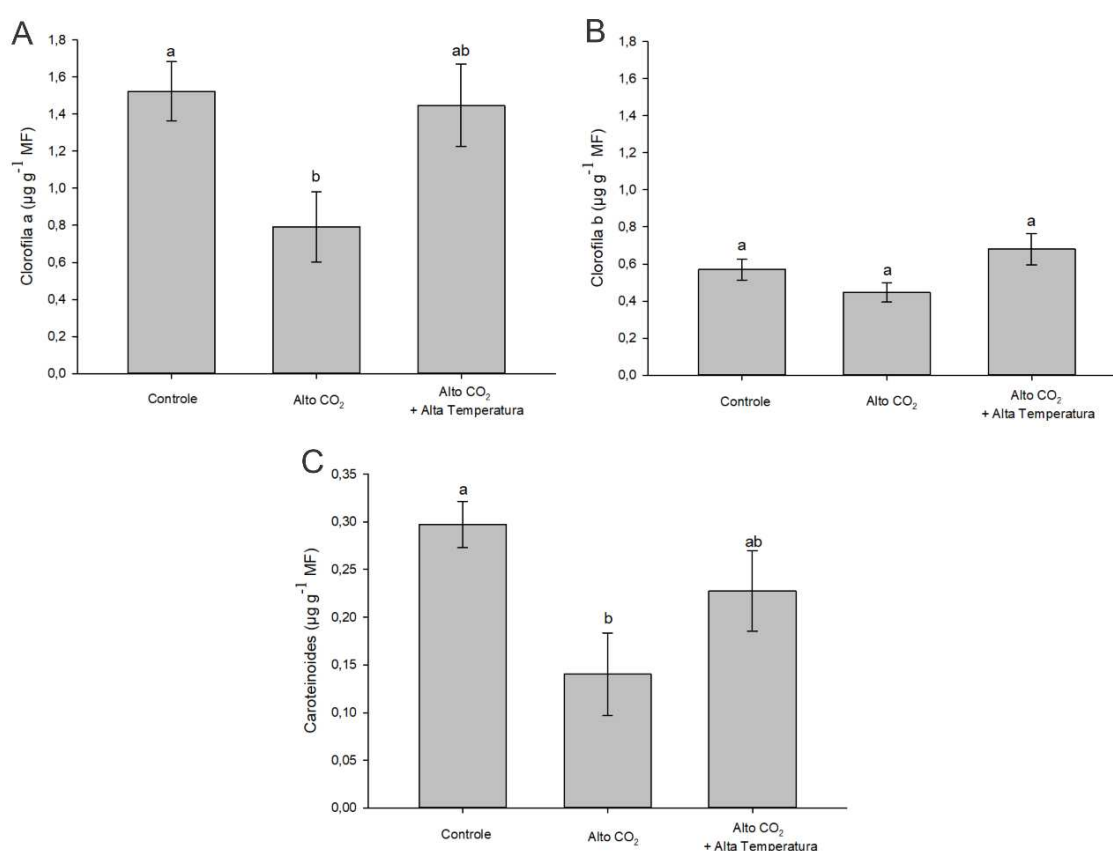
Em conjunto, os resultados sugerem que a exposição ao Alto CO<sub>2</sub> e à Alta Temperatura levou a uma reconfiguração metabólica, possivelmente direcionando os recursos energéticos para vias alternativas e mecanismos de ajuste fisiológico que garantam a manutenção da funcionalidade celular sob as condições experimentais.



**Figura 6.** Concentração de metabólitos em folhas de *Cedrela fissilis* após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: (**Controle**) 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); (**Alto CO<sub>2</sub>**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e (**Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). (**A**) Glicose; (**B**) Frutose; (**C**) Sacarose; (**D**) Amido; (**E**) Aminoácidos; (**F**) Prolina. Os valores representam médias  $\pm$  erro padrão (n=5). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P $\leq$ 0,05).

### 3.5 Conteúdo de Pigmentos Foliare

As concentrações de clorofila *a* (Figura 7A), assim como de carotenoides (Figura 7C) foram significativamente reduzidas no cenário de Alto CO<sub>2</sub> em comparação ao Controle. No entanto, essa alteração não se manteve no cenário de combinação de Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura, resultando em valores estatisticamente semelhantes aos do Controle. A concentração de clorofila *b* (Figura 7B) não apresentou variações estatisticamente significativas entre os cenários, sugerindo que a biossíntese desse pigmento não foi sensivelmente afetada pelas condições ambientais testadas.



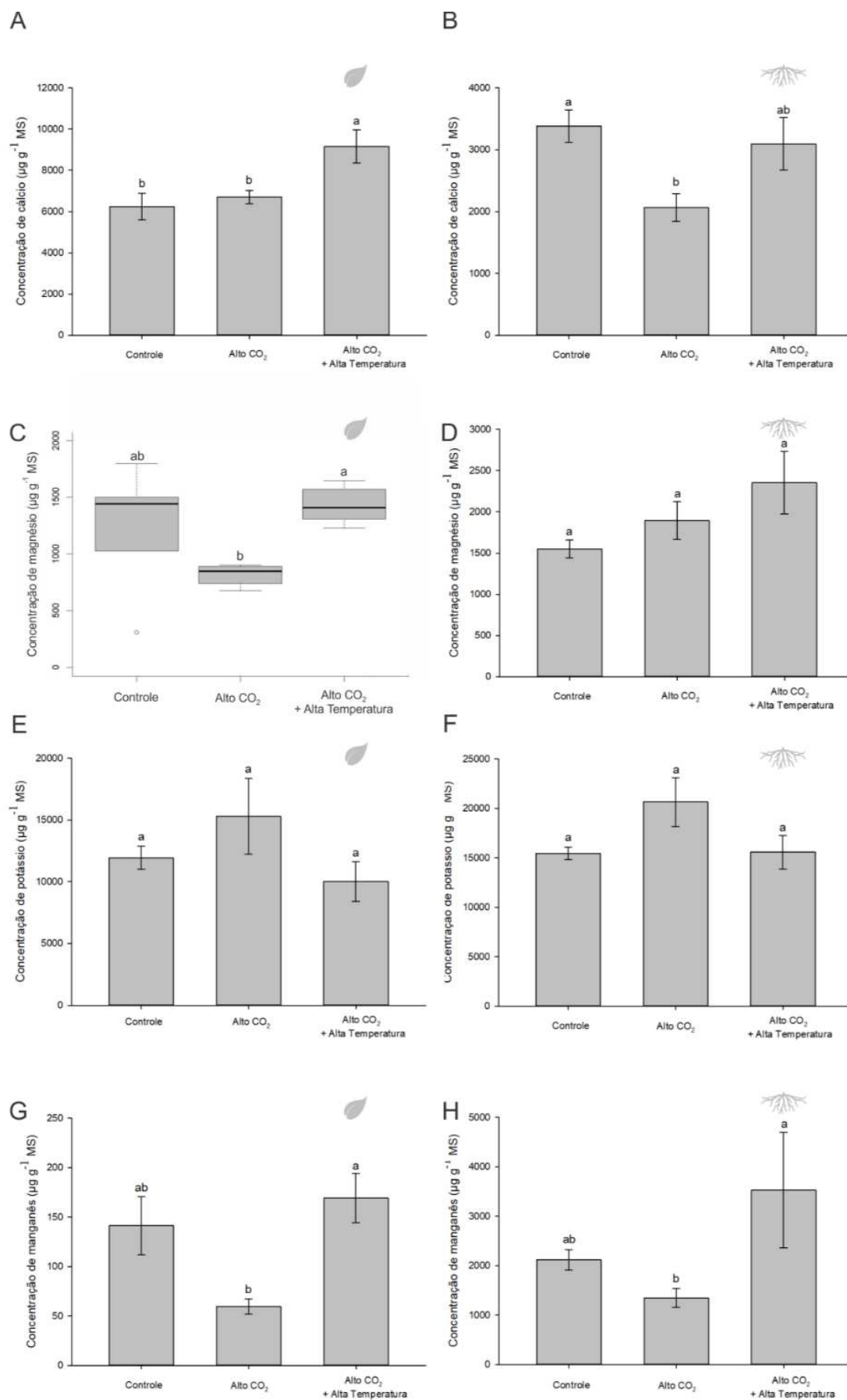
**Figura 7.** Concentração de pigmentos fotossintéticos em plantas de *Cedrela fissilis* após 90 dias de exposição a três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: (**Controle**) 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); (**Alto CO<sub>2</sub>**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e (**Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). (**A**) Clorofila *a*; (**B**) Clorofila *b*; (**C**) Carotenoides. Os valores representam médias ± erro padrão (n=5). Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P≤0,05)

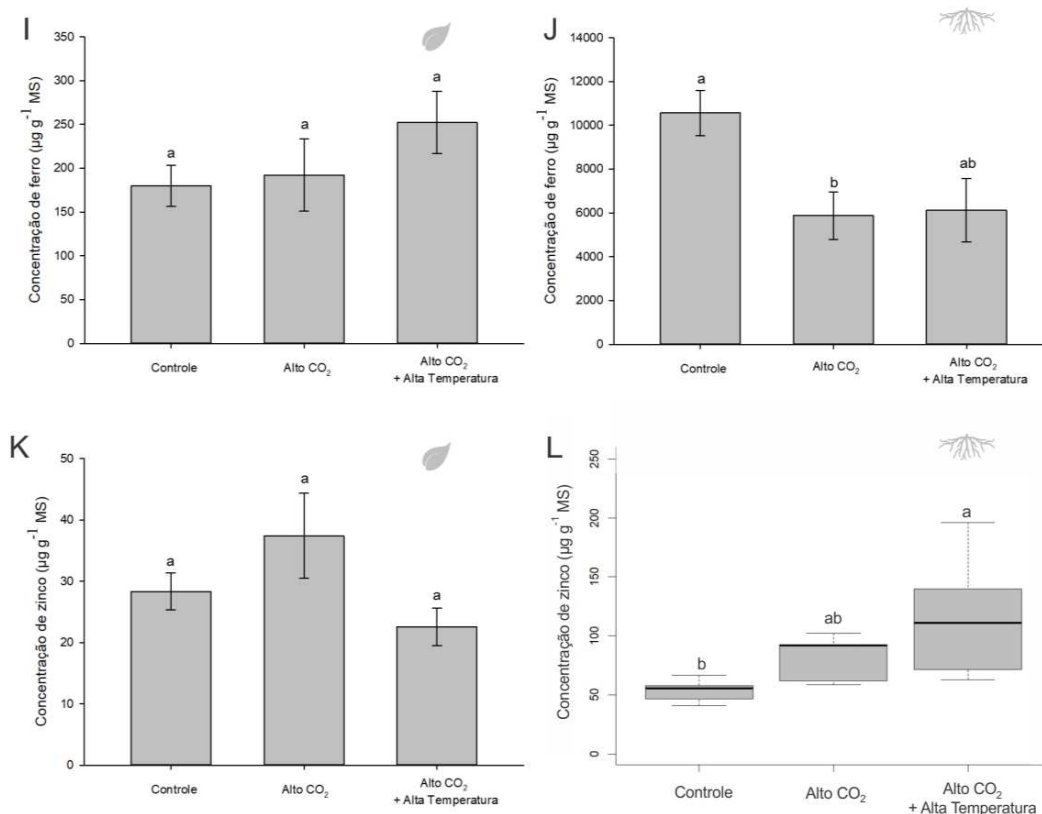
### 3.6 Análises nutricionais

As concentrações de nutrientes essenciais variaram entre os cenários, com efeitos distintos de acúmulo para folhas e raízes (Figura 8A-L). Nas folhas, o cenário com Alto CO<sub>2</sub> promoveu redução nas concentrações de Mn e Mg e, nas raízes, além do Mn, ocorreu diminuição das concentrações de Ca e Fe.

Em combinação, Alto CO<sub>2</sub> e Alta Temperatura, os efeitos mais expressivos foram o aumento da concentração de Ca nas folhas e Mn nas raízes. De modo geral, os efeitos dos cenários na composição mineral das plantas não tiveram impacto de grande relevância

Esses resultados indicam que o aumento dos níveis de CO<sub>2</sub> atmosférico afetou a absorção e distribuição de alguns nutrientes essenciais, com efeitos que foram modulados pela presença de alta temperatura.





**Figura 8.** Concentração de nutrientes em folhas e raízes de *Cedrela fissilis* após 90 dias de exposição três cenários de alteração da concentração de CO<sub>2</sub> e de temperatura: (**Controle**) 400 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite); (**Alto CO<sub>2</sub>**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 25°C (dia); temperatura 22°C (noite) e (**Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura**) 800 ppm de CO<sub>2</sub>, temperatura 30°C (dia); temperatura 28°C (noite). (**A**) Ca folha; (**B**) Ca raiz; (**C**) Fe folha; (**D**) Fe raiz; (**E**) K folha; (**F**) K raiz; (**G**) Mn folha; (**H**) Mn raiz; (**I**) Mg folha; (**J**) Mg raiz; (**K**) Zn folha; (**L**) Zn raiz. Os valores dos gráficos de barra representam médias  $\pm$  erro padrão (n=5); . O diagrama de caixa (Boxplot) representa o grau de dispersão das variáveis dentro de cada tratamento. Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey (P $\leq$ 0,05).

#### 4. DISCUSSÃO

As projeções de aquecimento global e aumento de CO<sub>2</sub> apontam para alterações complexas na fisiologia e anatomia das plantas. De um lado, o CO<sub>2</sub> atmosférico elevado tende a beneficiar o processo fotossintético, pois atenua a fotorrespiração e potencializa a atividade carboxilase da enzima RuBisCO (Kimball et al., 1993; Long et al., 2004; Ainsworth & Rogers, 2007). Por outro, a elevação da temperatura, intensificada pelos gases de efeito estufa, demanda maior energia para regulação térmica, além de desestabilizar enzimas-chave e elevar a respiração (Fontes, 2017; Zhao et al., 2017; Ruiz-Vera et al., 2018).

As plantas, de modo geral, sob condições de alta concentração de CO<sub>2</sub> podem apresentar ganhos de biomassa, refletidos tanto na massa fresca quanto na massa seca. Estudos em espécies como arroz, soja e trigo indicam que o acúmulo de massa fresca pode estar associado a maior retenção hídrica nos tecidos, graças à menor abertura estomática e menor transpiração, sob altas concentrações de CO<sub>2</sub> (Kimball, 2016). No entanto, quando há estresse térmico, parte da energia fotossintética pode ser redirecionada para rotas de defesa, diminuindo o ganho em massa seca (Wang et al., 2011). Em geral, observam-se incrementos mais expressivos em altura e diâmetro do caule nos tratamentos de CO<sub>2</sub> elevado, mas esses efeitos podem ser mitigados pela elevação da temperatura, que intensifica a respiração e reduz a disponibilidade de fotoassimilados para o crescimento estrutural (Fontes, 2017). Em *Cedrela Fissilis*, entretanto, os resultados se contrapuseram, as indicações de respostas para plantas cultivadas, ou seja, em alta concentração de CO<sub>2</sub>, ocorreu redução na massa fresca em folhas, o que não foi refletido na massa seca de folhas. As raízes por sua vez, tiveram redução na massa fresca quando o alto CO<sub>2</sub> foi associado à alta temperatura, sem contudo, não ocorrer qualquer diferença entre os cenários na massa seca.

As análises de trocas gasosas (assimilação de CO<sub>2</sub>, transpiração e condutância estomática) mostram que, sob alto CO<sub>2</sub>, a taxa fotossintética costuma aumentar inicialmente, já que a enzima RuBisCO atua mais efetivamente na carboxilação (Long et al., 2004); (Leakey et al., 2009). Contudo, quando há elevação de temperatura, esse ganho pode ser reduzido por conta do aumento na respiração e, em alguns casos, pelo fechamento estomático que busca economizar água. A condutância estomática (gs) tipicamente declina sob alto CO<sub>2</sub>, mas o calor excessivo pode exigir maior transpiração para resfriamento, criando um balanço delicado de abertura estomática. Em *C. fissilis* essa redução ocorreu quando combinados o elevado CO<sub>2</sub> e temperatura, indicando que tal ajuste estomático ocorreu para garantir certa eficiência hídrica, o que poderia causar prejuízo na regulação térmica se a temperatura ultrapassar o limite de tolerância da planta (Pimentel, 2011); (Kimball, 2016).

Do ponto de vista anatômico, há indícios de que ambientes enriquecidos em CO<sub>2</sub> induzem modificações na estrutura foliar, como o aumento de espaços intercelulares no parênquima lacunoso, favorecendo a difusão de CO<sub>2</sub> (Zheng et al., 2019). Em contrapartida, a densidade estomática pode diminuir sob alto CO<sub>2</sub> (Woodward & Kelly, 1995; Ainsworth & Rogers, 2007), ajustando-se para minimizar a perda de água em condições de maior disponibilidade de CO<sub>2</sub>. Porém, se a temperatura estiver elevada, o menor número de estômatos pode comprometer a capacidade de resfriamento evaporativo e aumentar o risco de danos térmicos (Zhao et al., 2017). Além disso, o estímulo fotossintético decorrente da maior concentração de CO<sub>2</sub> tende a intensificar a atividade cambial, aumentando a produção de xilema e floema. Esse acréscimo estrutural, contudo, pode ser comprometido se a planta deslocar recursos para mecanismos de proteção ao calor (Wang et al., 2011).

Ao contrário do que se esperaria em muitos cenários de enriquecimento de CO<sub>2</sub>, observou-se que as concentrações de clorofila *a* e de carotenoides foram significativamente reduzidas no cenário de Alto CO<sub>2</sub>, em comparação ao Controle. Estudos prévios indicam que, em algumas espécies, a alocação de recursos para maior crescimento inicial pode, temporariamente, resultar em menor investimento na manutenção de pigmentos fotossintéticos (Kimball et al., 1993; Long et al., 2004). No entanto, essa alteração não se manteve no cenário de Alto CO<sub>2</sub> aliado à Alta Temperatura, cujos valores retornaram a níveis estatisticamente semelhantes ao Controle. Esse comportamento sugere que a presença simultânea da elevada temperatura pode induzir rotas compensatórias que restabelecem a estabilidade ou a síntese desses pigmentos, provavelmente, em resposta aos danos oxidativos mais intensos (Kimball, 2016; Ruiz-Vera et al., 2018).

A concentração de clorofila *b*, por sua vez, não apresentou variações significativas entre os cenários, sugerindo que a regulação desse pigmento pode envolver mecanismos menos sensíveis ao desequilíbrio entre CO<sub>2</sub> elevado e aquecimento moderado. Em conjunto, os dados apontam para uma reorganização pontual do aparato fotossintético diante de mudanças atmosféricas e térmicas, de forma que a maior concentração de CO<sub>2</sub>, isoladamente, promoveu ajustes que levaram à redução das concentrações de clorofila *a* e carotenoides, ao passo que a combinação com alta temperatura pareceu “anular” esse efeito, restituindo-os aos níveis do controle.

Nos cenários avaliados, constatou-se que as concentrações de glicose e frutose apresentaram redução em relação ao controle, quando expostas a altas concentrações de CO<sub>2</sub>, enquanto que as concentrações de sacarose e amido não exibiram diferenças significativas. Essa dinâmica pode refletir um desvio no fluxo de carbono, já que as plantas podem estar redirecionando parte dos açúcares para rotas de síntese de outros compostos ou para a respiração, sobretudo sob temperatura elevada. Em contrapartida, o fato de sacarose e amido se manterem em níveis similares sugere que a planta conserva um estoque mínimo de reservas, evitando quedas drásticas na disponibilidade de energia (Thompson et al., 2017).

A prolina apresentou um aumento significativo nos cenários combinados de elevação de CO<sub>2</sub> e temperatura, indicando que a planta direciona parte de seus recursos energéticos e metabólicos para mecanismos de proteção celular em resposta ao estresse térmico, em detrimento do crescimento. Esse iminoácido, reconhecido como um componente-chave na osmoproteção e estabilização de proteínas sob estresse, pode atuar na estabilização de proteínas e membranas, além de colaborar na homeostase redox (Ashraf & Foolad, 2007). Assim, sua elevação sob condições combinadas de elevada concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura elevada sugere que, mesmo com alguma disponibilidade de carbono, a planta prioriza respostas ao estresse oxidativo e hídrico, garantindo a manutenção da integridade celular.

As análises de nutrientes indicaram que a elevada concentração de CO<sub>2</sub> reduziu as concentrações de Mn e Mg nas folhas e Ca e Fe nas raízes, sugerindo que o CO<sub>2</sub> elevado pode alterar a absorção e translocação de elementos essenciais, possivelmente por efeitos na fisiologia radicular ou no pH rizosférico. No entanto, no cenário combinado de Alto CO<sub>2</sub> + Alta Temperatura, houve aumento de Ca nas folhas e Mn nas raízes, indicando que a elevada temperatura pode modular a alocação de nutrientes e, em parte, compensar os efeitos da maior concentração de CO<sub>2</sub> (Mcgrath & Lobell, 2013). Apesar dessas variações, plantas de *Cedrela fissilis* mantiveram sua composição mineral relativamente estável, evidenciando a capacidade de ajuste às mudanças ambientais. Assim, enquanto a elevada concentração de CO<sub>2</sub> pode impactar a nutrição mineral, o aquecimento pode balancear essas alterações, reforçando a necessidade de estratégias de manejo que considerem a interação entre esses fatores abióticos.

## 5. CONCLUSÕES

A espécie *Cedrela fissilis* demonstrou capacidade de adaptar o seu metabolismo frente à maior disponibilidade de CO<sub>2</sub> para aumentar a produção de biomassa e ajustar os mecanismos de defesa, mas enfrenta limitações quando essa elevação de CO<sub>2</sub> ocorre juntamente com a elevação da temperatura. A análise de parâmetros biométricos revelou incrementos iniciais em altura e massa fresca sob elevação da concentração de CO<sub>2</sub>, cujos ganhos podem ser suplantados, em ação conjunta com elevada temperatura, pelo maior consumo energético de rotas de reparo celular. Em nível anatômico, houve ampliação de espaços intercelulares e variação da densidade estomática, mas o estresse térmico pode comprometer a funcionalidade desses ajustes. Os resultados de trocas gasosas mostram ganhos fotossintéticos sob alta concentração de CO<sub>2</sub>, os quais não se mantiveram sob a ação conjunta de elevada temperatura.

Os ajustes verificados tornaram evidentes com os resultados referentes ao metabolismo de carboidratos, a diminuição de glicose e sacarose, aliada à manutenção de frutose e amido, associadas ao incremento na concentração de prolina, sugerindo ativação de rotas protetoras, reforçando a ideia de que parte do metabolismo é reorientada para tolerar o estresse térmico. Por fim, a discrepância na concentração de nutrientes em folhas e raízes mostra a complexidade do transporte iônico e da alocação de recursos em condições de elevada temperatura e alta concentração de CO<sub>2</sub>.

Assim, estratégias de manejo e conservação devem considerar tais nuances, mirando a regulação metabólica, a preservação da capacidade fotossintética e o status nutricional, a fim de maximizar o potencial de crescimento e resiliência de *C. fissilis* em cenários de mudanças climáticas.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ainsworth, E. A., & Rogers, A. (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 258–270. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x>
- Arnon, D. I. (1949). COPPER ENZYMES IN ISOLATED CHLOROPLASTS. POLYPHENOLOXIDASE IN *BETA VULGARIS*. *Plant Physiology*, 24(1), 1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>
- Becklin, K. M., Anderson, J. T., Gerhart, L. M., Wadgymar, S. M., Wessinger, C. A., & Ward, J. K. (2016). Examining plant physiological responses to climate change through an evolutionary lens. *Plant Physiology*, pp.00793.2016. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00793>
- Bonfá, Y. S. (2019). *Propagação in vitro de Cedrela fissilis Vell. uma espécie arbórea brasileira ameaçada de extinção*. Universidade Federal do Espírito Santo.
- Bourscheit, A. (2021, November 2). *Brasil assina acordo florestal após desmatar 1/3 de meta firmada em Paris*. <https://infoamazonia.org/2021/11/02/acordo-florestal-1-3-metas-firmadas-acordo-paris-desmatamento-amazonia/>
- Cross, J. M., von Korff, M., Altmann, T., Bartzetko, L., Sulpice, R., Gibon, Y., Palacios, N., & Stitt, M. (2006). Variation of Enzyme Activities and Metabolite Levels in 24 Arabidopsis Accessions Growing in Carbon-Limited Conditions. *Plant Physiology*, 142(4), 1574–1588. <https://doi.org/10.1104/pp.106.086629>
- Cusatis, A. C., Martinez, D. T., Silva, L. D., & Higa, A. R. (2016). Genetic diversity of *Cedrela fissilis* (Vell.): insights on conservation and production. *Scientia Forestalis*, 44(112). <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n112.16>
- De Mendiburu Delgado, F. (2009). *Una Herramienta De Análisis Estadístico Para La Investigación Agrícola*.
- Fernie, A. R., Roscher, A., Ratcliffe, R. G., & Kruger, N. J. (2001). Fructose 2,6-bisphosphate activates pyrophosphate: fructose-6-phosphate 1-phosphotransferase and increases triose phosphate to hexose phosphate cycling in heterotrophic cells. *Planta*, 212(2), 250–263. <https://doi.org/10.1007/s004250000386>
- Ferreira, E. B., Cavalcanti, P. P., & Nogueira, D. A. (2011). Experimental designs: um pacote R para análise de experimentos. *Revista Da Estatística UFOP*, 1(1), 1–9.

- Fontes, L. F. P. (2017). *Respostas ecofisiológicas em árvores jovens de eucalipto ao enriquecimento atmosférico de CO<sub>2</sub> e aquecimento em MINIFACE E MINI T-FACE*. Universidade Federal de Viçosa.
- Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. (2023). In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 673–816). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>
- Karnovsky, M. (1965). A formaldehyde-glutaraldehyde fixative of high osmolality for use in electron-microscopy. *Journal of Cell Biology*, 27, 137–138.
- Kimball, B. A. (2016). Crop responses to elevated CO<sub>2</sub> and interactions with H<sub>2</sub>O, N, and temperature. *Current Opinion in Plant Biology*, 31, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.03.006>
- Kimball, B. A., Mauney, J. R., Nakayama, F. S., & Idso, S. B. (1993). Effects of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> on vegetation. *Vegetatio*, 104–105(1), 65–75. <https://doi.org/10.1007/BF00048145>
- Leakey, A. D. B., Xu, F., Gillespie, K. M., McGrath, J. M., Ainsworth, E. A., & Ort, D. R. (2009). Genomic basis for stimulated respiration by plants growing under elevated carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(9), 3597–3602. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810955106>
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Rogers, A., & Ort, D. R. (2004). RISING ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE: Plants FACE the Future. *Annual Review of Plant Biology*, 55(1), 591–628. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141610>
- McGrath, J. M., & Lobell, D. B. (2013). Reduction of transpiration and altered nutrient allocation contribute to nutrient decline of crops grown in elevated CO<sub>2</sub> concentrations. *Plant, Cell & Environment*, 36(3), 697–705. <https://doi.org/10.1111/pce.12007>
- Nunes, Y. R. F., Fagundes, N. C. A., Veloso, M. das D. M., Gonzaga, A. P. D., Domingues, E. B. S., Almeida, H. de S., Castro, G. C. de, & Santos, R. M. (2015). Sobrevivência e crescimento de sete espécies arbóreas nativas em uma área degradada de floresta estacional decidual, norte de minas gerais. *Revista Arvore*, 39(5), 801–810. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000500003>
- Ortega Rodriguez, D. R., Sánchez-Salguero, R., Hevia, A., Bovi, R. C., Ferreira, M. J., Speer, J. H., Roig, F. A., & Tomazello-Filho, M. (2023). Does climate change alter the nutrient trends of *Cedrela fissilis* Vell. trees in the southern Brazilian Amazon? *Ecological Processes*, 12(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00472-7>
- Pimentel, C. (2011). Metabolismo de carbono de plantas cultivadas e o aumento de CO<sub>2</sub> e de O<sub>3</sub> atmosférico: situação e previsões. *Bragantia*, 70(1), 1–12. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100002>

- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Ramos, L., Negreiros, D., Goulart, F. F., Figueiredo, J. C. G., Kenedy-Siqueira, W., Toma, T. S. P., Justino, W. de S., Maia, R. A., de Oliveira, J. T., Oki, Y., Barbosa, M., Aguilar, R., dos Santos, R. M., Dias, H. M., Nunes, Y. R. F., & Fernandes, G. W. (2024). Dissimilar forests along the Rio Doce watershed call for multiple restoration references to avoid biotic homogenization. *Science of The Total Environment*, 930, 172720. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172720>
- Reed, R. C., Bradford, K. J., & Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*, 128(6), 450–459. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>
- Ruiz-Vera, U. M., Siebers, M. H., Jaiswal, D., Ort, D. R., & Bernacchi, C. J. (2018). Canopy warming accelerates development in soybean and maize, offsetting the delay in soybean reproductive development by elevated CO<sub>2</sub> concentrations. *Plant, Cell & Environment*, 41(12), 2806–2820. <https://doi.org/10.1111/pce.13410>
- Schmid, R., O'Brien, T. P., & McCully, M. E. (1982). The Study of Plant Structure: Principles and Selected Methods. *Taxon*, 31(4), 789. <https://doi.org/10.2307/1219725>
- Silva, D. da, Stuepp, C. A., Wendling, I., Helm, C. V., & Angelo, A. C. (2020). Physiological and biochemical changes in *Cedrela fissilis* seeds during storage. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55. <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2020.v55.01309>
- Thompson, M., Gamage, D., Hirotsu, N., Martin, A., & Seneweera, S. (2017). Effects of Elevated Carbon Dioxide on Photosynthesis and Carbon Partitioning: A Perspective on Root Sugar Sensing and Hormonal Crosstalk. *Frontiers in Physiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00578>
- Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21706-2>
- Vicente, E., & Benito Garzón, M. (2024). Tree Germination Sensitivity to Increasing Temperatures: A Global Meta-Analysis Across Biomes, Species and Populations. *Global Ecology and Biogeography*, 33(12). <https://doi.org/10.1111/geb.13921>
- Wang, X., Cai, J., Jiang, D., Liu, F., Dai, T., & Cao, W. (2011). Pre-anthesis high-temperature acclimation alleviates damage to the flag leaf caused by post-anthesis heat stress in wheat. *Journal of Plant Physiology*, 168(6), 585–593. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.09.016>

- Wellburn, A. R. (1994). The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of Plant Physiology*, *144*(3), 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
- Woodward, F. I., & Kelly, C. K. (1995). The influence of CO<sub>2</sub> concentration on stomatal density. *New Phytologist*, *131*(3), 311–327. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb03067.x>
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J.-L., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I. A., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., ... Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(35), 9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>
- Zheng, Y., Li, F., Hao, L., Yu, J., Guo, L., Zhou, H., Ma, C., Zhang, X., & Xu, M. (2019). Elevated CO<sub>2</sub> concentration induces photosynthetic down-regulation with changes in leaf structure, non-structural carbohydrates and nitrogen content of soybean. *BMC Plant Biology*, *19*(1), 255. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1788-9>