

LUIZ FELIPE PEREIRA FONTES

**RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS EM ÁRVORES JOVENS DE
EUCALIPTO AO ENRIQUECIMENTO ATMOSFÉRICO DE CO₂ E
AQUECIMENTO EM MINIFACE E MINI T-FACE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

F682r
2017

Fontes, Luiz Felipe Pereira, 1986-
Respostas ecofisiológicas em árvores jovens de eucalipto ao
enriquecimento atmosférico de CO₂ e aquecimento em
MINIFACE e MINI T-FACE / Luiz Felipe Pereira Fontes. –
Viçosa, MG, 2017.
xii, 62 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 51-62.

1. Eucalipto. 2. Ecofisiologia vegetal. 3. Dióxido de
carbono. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 634.973766

LUIZ FELIPE PEREIRA FONTES

**RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS EM ÁRVORES JOVENS DE EUCALIPTO
AO ENRIQUECIMENTO ATMOSFÉRICO DE CO₂ E AQUECIMENTO EM
MINIFACE E MINI T-FACE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 31 de julho de 2017.


Francisca Zenaide de Lima


Milton Edgar Pereira Flores


Gabrielle Ferreira Pires


Wagner Luiz Araújo


Aristides Ribeiro
(Orientador)

DEDICO

Aos meus amores, Maria Alice e Luiz Henrique.

Aos meus Pais, Flávio e Maria das Graças.

Ao meu irmão, Fábio.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.”

Marthin Luther King

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminhos nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

A minha esposa, Maria Alice, pelo amor, por me fazer sentir e viver todos os momentos, por me socorrer no desespero e me fazer companhia nessa caminhada.

Ao meu filho, Luiz Henrique, por ser quem alegra e motiva minha vida.

Aos meus pais, Flávio e Maria das Graças, meu porto seguro, meu espelho de humildade, ética e caridade. Exemplo de amor a Deus, à igreja e a família. Minhas mais sinceras e profunda gratidão.

Ao meu irmão Fábio, pela amizade e companheirismo.

Aos meus avós, pelos exemplos de superação, fraternidade e humildade durante suas vidas.

À minha família, pelo carinho paciência e incentivo.

À família da minha esposa, pelo incentivo e amizade.

Ao professor Aristides Ribeiro, pela orientação, ensinamento, compreensão, confiança e exemplo de profissional que é.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização do Curso.

Aos meus amigos de Coimbra e de Viçosa, pela amizade e momentos de alegrias.

Aos meus amigos do Grupo de Pesquisas Biomodel, principalmente ao Robert, Marciel e Elias, pela ajuda e conselhos ao longo desse tempo.

Ao Professor Wagner Luiz Araújo e ao Samuel, pela parceria e ensinamentos.

À FAPEMIG, pela concessão das bolsas de estudo.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução dessa tese de Doutorado: abraços fraternos a todos.

BIOGRAFIA

LUIZ FELIPE PEREIRA FONTES, filho de Flávio Alberto Fontes e Maria das Graças Pereira Fontes, nasceu em Viçosa/ MG em 17 de dezembro de 1986.

Em julho de 2010, concluiu o curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa - UFV.

Em agosto de 2010, iniciou os estudos no programa de Meteorologia Agrícola como aluno não vinculado sob orientação do professor Flávio Barbosa Justino.

Em agosto de 2011 iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em julho de 2013.

Em agosto de 2013 iniciou o curso de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada na Universidade Federal de Viçosa, tendo defendido a tese em julho de 2017.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. O Eucalipto.....	4
2.2. Sistema FACE.....	5
2.3. Mudanças climáticas e relação temperatura e dióxido de Carbono nas plantas	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1. Localização e clima da área experimental	8
3.2. Caracterização do solo e transplântio das mudas.....	9
3.3. Aplicação dos tratamentos e delineamento estatístico.....	10
3.4. Sistema MINIFACE e MINI T-FACE.....	11
3.5. Dados meteorológicos.....	14
3.6. Medidas fisiológicas.....	15
3.6. Medidas biométricas.....	17
4. RESULTADOS	18
4.1. Caracterização climática do ambiente durante o período experimental.....	18
4.2. Efeitos ecofisiológicos do aumento da concentração de CO ₂ e temperatura no ambiente.....	22
4.2.1. Efeito do aumento da concentração de CO ₂ na atmosfera.....	23
4.2.1.1. Trocas gasosas	23
4.2.1.2. Respiração.....	26
4.2.1.3. Curva de resposta à luz.....	27
4.2.1.4. Análises biométricas.....	28
4.2.2. Efeito Adicional do aquecimento em ambiente enriquecido com CO ₂	35
4.2.2.1. Trocas gasosas	35
4.2.2.2. Análises biométricas.....	38
5. DISCUSSÃO.....	45
5.1. Eficiência do sistema FACE e MINI T-FACE.....	45
5.2. Efeito do enriquecimento do CO ₂	46
5.3. Efeito do enriquecimento do enriquecimento do CO ₂ em ambiente aquecido	48
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

- A – Fotossíntese Líquida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
- Al – Alumínio
- A_{max} – Fotossíntese Líquida Máxima ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
- Ca – Cálcio
- cm – Centímetros
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- Cu – Cobre
- Cwa – Clima Temperado Quente-mesotérmico
- DAT – Dias após o transplante
- E – Transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
- EMA – Estação meteorológica automática
- FACE – Free Air Carbon Dioxide Enrichment
- Fe – Ferro
- g – gramas
- GEE – Gases de efeito estufa
- gs – Condutância Estomática ($\text{mol/m}^2 \text{s}^{-1}$)
- H – Hidrogênio
- h – Hora
- Kg – Quilogramas
- K – Potássio
- L – Litros
- P – Fósforo
- pH – Potencial Hidrogeniônico
- P-Rem – Fósforo Remanescente
- mbar – milibar
- Mg – Magnésio
- MG – Minas Gerais
- m – Metros
- mm – Milímetros
- Mn – Manganês
- M.O – Matéria Orgânica
- PPFD – Densidade de Fluxo de Fótons da Fotossíntese

PVC – Policloreto de polivinila
SB – Soma de Bases trocáveis
s – Segundos
S – Sul
T – Capacidade de Troca Catiônica
t – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva
T1 – Tratamento 1
T2 – Tratamento 2
T3 – Tratamento 3
T4 – Tratamento 4
UFV – Universidade Federal de Viçosa
V – Índice de Saturação por bases
W – Oeste
Zn – Zinco
 α – Eficiência Quântica
°C – Graus Celsius

RESUMO

FONTES, Luiz Felipe Pereira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2017. **Respostas ecofisiológicas em árvores jovens de eucalipto ao enriquecimento atmosférico de CO₂ e aquecimento em MINIFACE E MINI T-FACE.** Orientador: Aristides Ribeiro.

A concentração de CO₂ atmosférico tem aumentando gradativamente nos últimos séculos, sendo observado para o planeta Terra atualmente o nível mais elevado de CO₂ dos últimos 800.000 anos. Espera-se que esta concentração aumente ainda mais devido à dependência dos combustíveis fósseis e à taxa de crescimento da população mundial, podendo chegar até o ano de 2100, a concentração médias de 985 ppm (794 - 1142 ppm), juntamente com o aumento na temperatura entre 1,8 e 5,0 °C em algumas regiões do globo. O aumento na concentração do CO₂ atmosférico promove, em geral, um acréscimo na taxa fotossintética, síntese de biomassa e na eficiência do uso da água, além da diminuição da condutância estomática e transpiração dos vegetais. Por outro lado, observa-se um aumento na temperatura e alteração na disponibilidade hídrica, podendo aumentar a fotorrespiração e reduzir o ganho líquido de carbono em plantas C3. Nas culturas florestais, responsáveis por grande parte da assimilação de carbono, o aumento na concentração de CO₂ é de grande importância. Diante disso, objetivou-se obter respostas ecofisiológicas em árvores jovens de eucaliptos submetidas a ambiente enriquecido de CO₂ e aquecimento em sistemas MINIFACE e MINI T-FACE. O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Viçosa com a utilização de dois clones pertencentes a empresa Celulose Nipo-Brasileira CENIBRA no período de maio e junho de 2017. Os resultados foram apresentados analisando-se o efeito isolado do aumento da concentração de CO₂ no ambiente e o efeito do aumento da concentração de CO₂ em ambiente aquecido. Quando analisado o efeito do enriquecimento com CO₂, nota-se que em condições de temperatura normais de ambiente, a taxa fotossintética para o tratamento com enriquecimento de CO₂ chega a superar 30,0 % os valores obtidos pelo tratamento testemunha. A condutância estomática não apresentou uma tendência definida, em que se verifica uma redução nos valores de abertura

estomática em ambiente enriquecido com CO₂. Dessa forma, a maior concentração de CO₂ induziu uma maior taxa de transpiração, implicando em redução na eficiência do uso da água. O efeito do CO₂ na resposta das plantas à luz promoveu aumentos na eficiência quântica (17,0 %) e nos níveis de saturação lumínica (24,0 %). A variação de altura e diâmetro do caule foi observada para o tratamento submetido ao enriquecimento de CO₂, chegando a 14,1 % e 14,5 % superiores, respectivamente, quando comparado a testemunha. As plantas sob condições de enriquecimento de CO₂ apresentaram valores superiores de biomassa seca para caule, raiz e peso seco total, apresentando médias finais de 9,9 %, 22,9 % e 18,1 % superiores respectivamente a testemunha. Quando o ambiente foi aquecido (+2 °C) e sob alta concentração de CO₂, verifica-se que a condutância estomática, as taxas fotossintética e de transpiração apresentaram resultados condizentes com o consenso científico. Para a condutância estomática, foi observado que as testemunhas apresentaram valores 21,1 % superiores ao tratamento enriquecido com CO₂ sob temperatura elevada. Em relação as variáveis morfológicas, o comportamento foi semelhante ao estudo sem aumento na temperatura, em que o enriquecimento de CO₂ alterou a altura, diâmetro do caule, peso seco do caule e o peso seco total das plantas. Ao se analisar o efeito da temperatura em ambientes enriquecidos de CO₂ verificou-se, ao final do experimento uma tendência ao tratamento em temperatura ambiente em apresentar maiores taxas fotossintéticas. No entanto, ocorreram diferenças significativas em relação aos tratamentos enriquecidos com CO₂ sem e com elevação de temperatura para condutância estomática e transpiração, tendo o tratamento com temperatura adicional apresentado valores inferiores para condutância estomática e superiores para a transpiração. Com isso, o aumento da concentração de CO₂ ocasiona maior ganho de biomassa, levando a um melhor desenvolvimento inicial da cultura.

ABSTRACT

FONTES, Luiz Felipe Pereira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2017. **Ecophysiological responses in young eucalyptus trees to the atmospheric enrichment of CO₂ and heating in MINIFACE AND MINI T-FACE.** Adviser: Aristides Ribeiro.

The concentration of atmospheric CO₂ has been increasing gradually in the last centuries, being observed for the planet Earth at the moment the highest level of CO₂ of the last 800,000 years. This concentration is expected to increase further due to the dependence of fossil fuels and the world population growth rate, which could reach the year 2100, the average concentration of 985 ppm (794 - 1142 ppm), together with the increase in temperatures between 1.8 and 5.0 °C in some regions of the globe. The increase in the concentration of atmospheric CO₂ generally promotes an increase in the photosynthetic rate, the synthesis of biomass and the efficiency of water use, as well as the reduction of the stomatal conductance and transpiration of the plants. On the other hand, there is an increase in temperature and change in water availability, which can increase photorespiration and reduce net carbon gain in C₃ plants. In forest crops, responsible for much of carbon assimilation, the increase in CO₂ concentration is of great importance. The objective was to obtain ecophysiological responses in young trees of eucalyptus trees submitted to CO₂ enriched environment and heating in MINIFACE and MINI T-FACE systems. The experiment was conducted at the Federal University of Viçosa with the use of two clones belonging to the company Celulose Nipo-Brasileira CENIBRA in the period of May and June of 2017. The results were presented by analyzing the isolated effect of the increase of CO₂ concentration in the environment and the effect of increasing CO₂ concentration in a heated environment. When the CO₂ enrichment effect was analyzed, it can be observed that under normal ambient temperature conditions, the photosynthetic rate for treatment with CO₂ enrichment exceeds 30.0 % of the values obtained by the control treatment. The stomatal conductance did not present a definite trend, in which there is a reduction in the values of stomatal opening in environment enriched with CO₂. Thus, the higher concentration of

CO₂ induced a higher rate of transpiration, implying a reduction in the efficiency of water use. The effect of CO₂ on plant response to light promoted increases in quantum efficiency (17.0 %) and light saturation (24.0 %). The height and diameter variation of the stem were observed for the treatment submitted to CO₂ enrichment, reaching 14.1 % and 14.5 % higher, respectively, when compared to the control. The plants under conditions of CO₂ enrichment presented higher values of dry biomass for stem, root and total dry weight, presenting final averages of 9.9 %, 22.9 % and 18.1%, respectively, higher than the control. When the environment was heated (+ 2 °C) and under high CO₂ concentration, it was verified that the stomatal conductance, photosynthetic and transpiration rates presented results consistent with the scientific consensus. For stomatal conductance, it was observed that the controls presented values 21.1 % higher than the treatment enriched with CO₂ under elevated temperature. Regarding the morphological variables, the behavior was similar to the study without increase in temperature, in which CO₂ enrichment altered the height, stem diameter, stem dry weight and total dry weight of the plants. When analyzing the effect of the temperature in enriched environments of CO₂, at the end of the experiment a tendency to the treatment in ambient temperature in presenting higher photosynthetic rates was verified. However, significant differences were observed in relation to CO₂ enriched treatments with and without temperature elevation for stomatal conductance and transpiration. The treatment with additional temperature presented lower values for stomatal conductance and higher for transpiration. Thus, the increase in CO₂ concentration leads to a higher biomass gain, leading to a better initial development of the crop.

1. INTRODUÇÃO GERAL

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC 2014) a concentração de CO₂ atmosférico tem aumentando gradativamente nos últimos séculos e é amplamente aceito que as principais causas deste aumento estão associadas às atividades antrópicas. em especial, o consumo excessivo de combustíveis fósseis, industrialização, práticas agrícolas inadequadas e mudanças no uso e ocupação da terra tem facilitado esse aumento (SOUZA et al., 2008; IPCC, 2014; JURAS, 2013).

Como consequência do aumento na concentração atmosférica dos gases de efeito estufa (GEE) verifica-se também alteração nos padrões climáticos. Existe um consenso científico de que as mudanças no clima dada aos níveis atuais e a continuação dessas emissões vem com o tempo, promovendo alterações nos padrões climáticos, sendo observado uma maior frequência de extremos climáticos. Dentre estes efeitos destacam-se a concentração das chuvas em menores números de eventos, secas mais intensas e a ocorrência de maior frequência de veranicos e seu prolongamento durante as estações chuvosas. Numa retroalimentação de causa e efeito observa-se ainda o aumento na amplitude térmica e eventos de maior e mais intensas ondas de calor, dentre outros fenômenos adversos. Estes efeitos impactam diretamente não somente a produção primária de ecossistemas naturais, mas também o desenvolvimento de culturas agrícolas e florestais, por promoverem mudanças no metabolismo das plantas (BROSI et al. 2011; CORNELISSEN, 2011; JURAS, 2013).

O aumento contínuo de GEE a partir da revolução industrial, com destaque para o CO₂, resultou em numa alteração na concentração deste gás na atmosfera de cerca de 278 ppm no ano de 1750, período pré-industrial, para cerca de 392 ppm em 2012. O planeta Terra apresenta atualmente o nível mais elevado de CO₂ dos últimos 800.000 anos e espera-se que esta concentração aumente ainda mais devido à dependência dos combustíveis fósseis e à taxa de crescimento da população mundial. Mantido o ritmo das emissões, estima-se que em 2100, a concentração média de CO₂ atingirá 985 ppm (794 - 1142 ppm), com aumento na

temperatura entre 1,8 e 5,0 °C em algumas regiões do globo para cenário intermediário de mitigação das emissões (IPCC 2013).

Uma das maneiras de mitigar as emissões de gás carbônico na atmosfera é por meio do sequestro do carbono pela vegetação pela fotossíntese. Nesse sentido, o enriquecimento de CO₂ no ambiente tem efeitos significativos sobre o metabolismo e desenvolvimento das plantas, justificando assim inúmeros estudos recentes relacionados à avaliação do comportamento vegetal sob elevada concentração de CO₂ (WERTIN et al., 2010; AMEYE et al., 2012; PALMROTH et al., 2013).

A estocagem de carbono pelas plantas está, todavia relacionada a diversos fatores que precisam ser mapeados, entre eles: condições abióticas (temperatura, água e nutrientes do solo), diversidade de espécies, manejo da produção, dimensão da área, idade das plantas e povoamentos. A complexidade da dinâmica dos ecossistemas exerce uma pressão sobre o sequestro de carbono como medida mitigadora, o que dificulta a tão almejada eficácia nessas medições (GRAAFF et al., 2006).

A intensidade destas mudanças ambientais poderá causar diversos impactos para as plantas, como: alterações no crescimento e na composição nutricional; bem como nas relações mutualísticas e antagonísticas com diversos organismos (CHAPIN III et al., 2000).

O aumento da concentração do CO₂ atmosférico promove, em geral, um acréscimo na taxa fotossintética, síntese de biomassa e na eficiência do uso da água, além da diminuição da condutância estomática e transpiração dos vegetais. Por outro lado, as consequências geradas pelo aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, tal como aumento de temperatura e alteração da disponibilidade hídrica, podem aumentar a fotorrespiração e reduzir o ganho líquido de carbono em plantas C3 (DAMATTA et al., 2010).

Na fase inicial do crescimento de plantas, a análise da alteração da concentração de CO₂ e de suas possíveis consequências é relevante uma vez que nesse período as plantas apresentam uma maior taxa de crescimento, sendo altamente dependentes das características genéticas, condições ambientais e da interação entre ambos os fatores. Além disso, o conhecimento da relação entre o desenvolvimento da planta na fase de

muda e o ambiente de crescimento aumenta a chance de sucesso na implantação da cultura (MANTOVANI et al., 2003).

As respostas das plantas à elevada concentração de CO₂ atmosférico variam entre as espécies (NORBY et al., 1999), podendo ser alterada por fatores como: nutrientes, luminosidade, disponibilidade de água e elevada temperatura (BRASSIRIRAD et al., 2001). Ainda, a interação destes fatores, tem demonstrado efeitos significativos e variáveis em plantas com diferentes padrões fotossintéticos (WANG et al., 2012).

Em culturas florestais, a avaliação das consequências do aumento da concentração de CO₂ é de grande importância, uma vez que as mesmas são responsáveis por cerca de 40 % da capacidade de assimilação de carbono no ambiente terrestre (SBSP, 2005).

O setor de florestas plantadas tem significativa importância para o agronegócio florestal brasileiro, com participação de cerca de 6,0 % do PIB nacional, quando somadas todas as cadeias produtivas em que participa (IBÁ, 2016).

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), o Brasil possui 7,8 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo o eucalipto responsável por 5,6 milhões de hectares, o que representa 71,8 % do total da área de árvores plantadas no país, sendo os plantios localizados principalmente em Minas Gerais (24 %), São Paulo (17 %), Mato Grosso do Sul (15 %) (IBÁ, 2016).

O Eucalipto possui diversas vantagens do seu uso como a adequação de sua madeira para fins industriais, o rápido crescimento vegetal e a facilidade na produção de mudas por estaquia, sendo utilizado tanto em plantios comerciais quanto em pequenas áreas por agricultores familiares (BIZI et al., 2008).

Diante da importância econômica da cultura de eucalipto para o Brasil e os possíveis impactos das mudanças climáticas na produtividade, o presente trabalho teve como objetivo o estudo do desenvolvimento e comportamento de árvores jovens de eucalipto em ambientes enriquecido com CO₂ e aquecido utilizando sistemas MINIFACE e T-FACE.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O Eucalipto

O eucalipto é natural da Austrália, pertencente à família Myrtaceae. A distribuição das espécies pode variar em função das condições ambientais e climáticas, sendo encontrada em regiões tropicais equatoriais até condições subtropicais e semi-áridas (LIMA, 1996). Apresenta cerca de 600 espécies e subespécies, com ampla adaptação e dispersão mundial, desenvolvendo de forma satisfatória em diferentes situações edafoclimáticas, extrapolando àquelas das regiões de origem (WILLIAMS & WOINARSKI, 1997; RIBEIRO et al., 2009).

O gênero *Eucalyptus* foi introduzido Brasil em 1868 como planta ornamental. Em 1904 teve início seu plantio para fins econômicos, sendo utilizado na produção de dormentes ferroviários e como fonte de energia para as locomotivas (MORA & GARCIA, 2000). A partir de então, vários fatores tornaram o eucalipto uma das espécies florestais mais cultivadas. Com a implantação de leis de incentivos fiscais relacionadas ao reflorestamento a partir de 1965, o plantio multiplicou-se e o crescimento continua até os dias atuais.

Com o melhoramento genético, torna se possível a adaptação de espécies de eucalipto para diferentes fins de produção, como a produção de carvão e na fabricação de celulose. Dentre as espécies, as mais utilizadas comercialmente no Brasil são o *E. grandis* e o *E. urophylla* que além de apresentarem características genéticas favoráveis ao seu plantio, possibilitam seu uso em programa de melhoramento em hibridação.

É uma espécie com metabolismo do tipo C3 e, em plantas dessa natureza, a maior concentração de CO₂ tem o potencial de aumentar a fotossíntese, uma vez que a concentração atual de CO₂ ainda não é suficiente para saturar a enzima Rubisco responsável pela absorção do CO₂ (AIDAR et al., 2002). Entretanto, em estudo realizado por Baesso et al. (2010) foi observado diminuição da produtividade do eucalipto em cenários de mudanças climáticas, o que poderia comprometer o suprimento de

matéria-prima para indústrias do ramo florestal em se mantendo as áreas de cultivo.

2.2. Sistema FACE

Dentre os sistemas de enriquecimento de CO₂ pode ser citado o FACE (Free Air Carbon Dioxide Enrichment), que consiste na exposição de espécies vegetais à elevados níveis de dióxido de carbono em ambiente aberto, sendo evitados as limitações na representação na condução de estudos desse tipo em ambientes fechados, como o aumento da temperatura e a alterações na incidência de radiação e fluxos do ar atmosférico (KIMBALL et al., 1997).

Experimentos de enriquecimento com CO₂ utilizando o sistema FACE fornecem, atualmente, a medida mais realista do futuro impacto da elevada concentração de CO₂ no rendimento das culturas (AINSWORTH et al, 2008). Por outro lado, esse sistema geralmente utiliza grandes parcelas experimentais com diâmetro variando de 15 a 30 m dentro do campo de cultivo (LEWIN et al., 1994; INESON et al., 1998; ROGERS et al., 2004; MANDERSCHEID et al.; 2009; WEIGEL & MANDERSCHEID, 2012), o que dificulta o controle de variáveis ambientais como temperatura e luminosidade, a manutenção de altas concentrações do CO₂, além de gerar altos custos com o consumo de gás carbônico.

Como alternativa, pesquisas recentes têm utilizado um sistema denominado MINIFACE (HÖGY et al.; 2009; VURRO et al., 2009; LAM et al., 2012; LI et al., 2013), que apresenta parcelas com diâmetros de até 4 m, diminuindo as desvantagens apresentada pelo FACE. Já a técnica que promove o aumento de temperatura ao ar livre é denominada T-FACE - Temperature Free Air Controlled Enhancement (KIMBALL, 2005). No Brasil, raros são os estudos publicados que avaliam as respostas das plantas ao aumento da concentração de CO₂ e temperatura utilizando esses sistemas (GHINI et al., 2013; CURTARELLI, 2013; MANCHON, 2013; MARTINEZ et al., 2014).

2.3. Mudanças climáticas e relação temperatura e dióxido de carbono nas plantas

O efeito estufa é um fenômeno natural provocado por gases presentes na atmosfera como o dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso, metano e vapor de água, que resulta no aquecimento do planeta, que atua dificultando a perda de energia para o espaço em forma de ondas longas. A princípio o efeito estufa é um fenômeno benéfico e primordial para o surgimento e manutenção da vida na terra, contudo o aumento de seu efeito pelas emissões antrópicas pode alterar o equilíbrio termodinâmico e no balanço de energia regionais e globais. O maior reservatório de carbono no planeta é formado pelos oceanos que fixa o CO_2 na água na forma de carbonato. A maior ou menor liberação ou fixação do CO_2 dos oceanos para a atmosfera têm forte dependência da temperatura da água que, por sua vez, depende da combinação das fases desses diferentes ciclos. As glaciações terrestres, observadas em tempo passado, se deram pela coincidência desses três ciclos em suas fases decrescentes, ampliando, portanto, o resfriamento da biosfera. Neste caso verifica-se maior parte do carbono presente nos oceanos tende a permanecer retido num nível de "steady state". Caso verifique aumento na temperatura das águas e do CO_2 em um compartimento resulta em perturbação no nível de trocas de carbono com a atmosfera, estabilizando em outro nível o equilíbrio dinâmico.

As plantas de metabolismo fotossintético C3, C4 e CAM, sustentam taxas fotossintéticas elevadas, quando essas permanecerem em ambientes com amplitude térmica e concentrações de CO_2 ideais, levando em consideração que esses fatores são essenciais para este processo físico-químico (TAIZ; ZIEGER, 2013).

A maior parte dos organismos vegetais pertence ao grupo de plantas com fotossíntese do tipo C3, na qual recebe este nome devido ao primeiro produto da carboxilação ser um ácido com três carbonos, o ácido 3-fosfoglicérico (PGA) (BENSON, 2002; BASSHAM, 2003). A enzima ribulose 1-5 bifosfato carboxilase-oxigenase (Rubisco) não apresenta ponto de saturação com os níveis de concentração de CO_2 ambiente atuais, na qual essa enzima é responsável pela carboxilação primária, que é o processo

metabólico da fotossíntese em plantas C3 (TAIZ; ZIEGER, 2013). No entanto, o aumento da concentração de CO₂ atmosférico, fará com que ocorra uma redução na fotorrespiração das espécies C3, devido a carboxilação e a redução da oxigenação da enzima Rubisco (SAGE, 1994).

Em condições normais, plantas C3 são conhecidas por possuir uma taxa fotossintética normal sob condições de CO₂ abaixo do ótimo, podendo apresentar um aumento significativo dependendo da disponibilidade desse gás na atmosfera. Diversos autores tem demonstrado que plantas lenhosas possuem respostas positivas de crescimento quando estas permaneceram em condições atmosférica elevadas de CO₂, quando os demais recursos encontram-se disponíveis para as plantas em condições ideais (WITTIG et al., 2005; LIBERLOO et al., 2006; CROUS et al., 2008; KOSOBRYUKHOV, 2008; ATWELL et al., 2009).

O gênero *Eucalyptus*, dentre as espécies lenhosas, é um dos que apresentam respostas mais relevantes quanto ao aumento de CO₂, no entanto, nas fases iniciais, observa-se maior resposta quanto a mudança de concentração do gás atmosférico, principalmente nos primeiros dois anos de crescimento da planta (ATWELL et al., 2003; AINSWORTH & LONG, 2005).

Os principais efeitos do aumento de CO₂ atmosférico em plantas de metabolismo fotossintético C3, C4 e CAM cultivadas em campo, segundo Leakey et al. (2009) e Pimentel (2011), são:

- incremento na assimilação de CO₂ e na produção de biomassa;
- aumento da eficiência do nitrogênio, porque menos Rubisco será necessária, conseqüentemente haverá menor produção dessa enzima;
- menor condutância estomática com maior eficiência de uso da água por planta e por área cultivada;
- estímulo da taxa de respiração mitocondrial por aumento da transcrição e atividade de enzimas envolvidas no mecanismo;
- ausência de estímulo direto para incremento da assimilação de CO₂ em plantas C4, mas com estímulo indireto, causado por secas previstas, pela redução da condutância estomática nos horários de maior demanda evaporativa atmosférica.

O genótipo e a interação fenotípica da planta pode ser o fator principal para as diferentes respostas fisiológicas á diferentes condições ambientais (PIMENTEL et al., 2004). O acréscimo da concentração de CO₂, pode acarretar a diminuição da altura da planta, do número de folhas (HACOUR et al., 2002) e o conteúdo de clorofila, acelerando a senescência (BINDI et al., 2002).

Segundo Braga et al. (2006) e Souza et al. (2008), em condições de elevada concentração de CO₂, as plantas podem apresentar alterações na morfologia, anatomia, composição química e perfil de expressão gênica.

As plantas com via fotossintéticas C3 e C4 podem apresentar efeito maléfico quando combinado o enriquecimento de CO₂ juntamente ao acréscimo de temperatura. Em cultivo de arroz, segundo Walter et al. (2010), o efeito benéfico do aumento da concentração de CO₂ foi anulado com o efeito negativo do aumento da temperatura.

Streck et al. (2006), observou-se que com o aumento da temperatura do ar em 2; 3 e 6 °C, plantas de milho, trigo e soja respectivamente perderam seus efeitos benéficos do enriquecimento de CO₂.

Em espécies arbóreas tropicais, quando submetidas a temperatura superiores a 30 °C, observaram a perda da taxa fotossintética, causando o aumento da respiração e da transpiração e redução da condutância estomática, devido ao alto déficit de pressão de vapor das folhas (LLOYD & FARQUHAR, 2008).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e clima da área experimental

A área experimental está localizada na latitude 20°45'45" S, longitude 42°52'04" W, à altitude de 690 m. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo temperado quente-mesotérmico (Cwa), com verões chuvosos e invernos secos (VIANELLO & ALVES, 1991). Apresenta ainda precipitação média anual de 1.220 mm, temperatura máxima média de 26 °C e mínima média de 14 °C.

O experimento foi conduzido na área da fábrica de ração do Departamento de Engenharia Agrícola, pertencente à Universidade Federal de Viçosa (UFV), situada na cidade de Viçosa (MG) no período de Abril 2017 a Julho de 2017.

3.2. Caracterização do solo e transplântio das mudas

Foram utilizadas mudas de dois clones comerciais de eucalipto fornecidas pela empresa Celulose Nipo-Brasileira CENIBRA, com idade de 90 dias, plantadas em vaso com capacidade de 8 L. Os clones utilizados foram: 1213 (clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) na qual consiste em um clone sensível a seca e 2719 (clones de *Eucalyptus grandis* x desconhecido) considerado um clone com boa resistência a seca.

Para realização do estudo foi utilizado solo do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo, conforme a classificação Embrapa (2006). O solo foi primeiramente peneirado e levado ao Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante pertencente ao Departamento de Solos (UFV) onde foram determinadas as características químicas (Tabela 1) e físicas conforme a seguir: (393 g kg⁻¹ de argila, 183 g kg⁻¹, de silte 221 g kg⁻¹ de areia grossa e 202 g kg⁻¹ de areia fina).

Após o preenchimento dos vasos com o solo e posteriormente o transplântio, foi realizada a adubação com adubo NPK (6-30-6) na quantidade de 0,065 Kg/vaso. Foram realizadas, posteriormente, duas adubações de cobertura ao longo da condução do experimento além da adubação com micronutrientes.

Tabela 1 - Análise química do solo utilizado para o plantio das mudas.

CARACTERÍSTICA	VALOR
pH	5,58
P, mg/dm ³	4,2
K, mg/dm ³	20,00
Cu, mg/dm ³	0,77
Mn, mg/dm ³	4,1
Fe, mg/dm ³	36,6
Zn, mg/dm ³	0,59
Ca ²⁺ , cmol _c /dm ³	0,17
Mg ²⁺ , cmol _c /dm ³	0,21
H+Al, cmol _c /dm ³	1,0
Al ³⁺ , cmol _c /dm ³	0,00
SB, cmol _c /dm ³	0,43
t, cmol _c /dm ³	0,43
P-Rem	16,7
V, %	30,1
M.O, dag/Kg	0,13

pH em água - Relação 1:2,5; P, K, Cu, Mn e Zn – Extrator Mehlich 1; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ - Extrator KCl 1 mol/L ; H+ Al – Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0; SB – Soma de bases trocáveis; CTC (t) – Capacidade de Toca Catiônica Efetiva; CTC (T) – Capacidade de troca catiônica (pH 7,0); P-Rem – Fósforo Remanente; V – Índice de Saturação por bases; m – Saturação por alumínio; MO – C. Org x 1,724 – Método Walkley-Black.

3.3. Aplicação dos tratamentos e delineamento estatístico

Os tratamentos foram arranjados em parcelas subdivididas. Os tratamentos foram:

- T1 – concentração CO₂ atual e temperatura ambiente (Testemunha);
- T2 – concentração CO₂ atual e aumento de aproximadamente 2 °C na temperatura do ar;
- T3 – concentração de CO₂ em aproximadamente 700 ppm e temperatura ambiente;
- T4 - concentração de CO₂ em aproximadamente 700 ppm e aquecimento de aproximadamente 2 °C na temperatura do ar;

Em cada MINIFACE e MINI T-FACE foram colocados 24 vasos para avaliação dos efeitos impostos pelos tratamentos, sendo 12 vasos referente

a cada clone (Resistente e Sensível) e mais 35 vasos a serem utilizados como efeito de borda.

O controle térmico foi mantido permanentemente por 24 horas nos tratamentos T2 e T4, enquanto que os tratamentos com elevado nível de CO₂ foram mantidos diariamente entre 6:00 e 18:00 h, ou seja, no período de disponibilidade de radiação solar.

Os dados foram interpretados e analisados estatisticamente num esquema de parcela subdividida no tempo 4 x 2, combinando duas condições diferentes (concentração de CO₂ e temperatura) e dois clones de eucalipto (1213 e 2719), num delineamento inteiramente casualizado, ao nível de 5 % de significância, sendo realizado o teste de Tukey quando o resultado da análise de variância foi significativo para o fator ou interação estudada, sendo este também ao nível de 5 % de probabilidade.

3.4. Sistema MINIFACE e MINI T-FACE

O experimento foi instalado em um conjunto de quatro MINIFACE e MINI T-FACE distanciados entre si em 5 m e dispostos em formato circular. Ao centro do conjunto de MINIFACES foi instalado um anemômetro sônico (wind sonic, option 4, Gill Instruments), para medir a velocidade e a direção do vento.

Cada sistema MINIFACE e MINI T-FACE utilizado para o enriquecimento do CO₂ atmosférico e aumento da temperatura do ar foi composto por uma estrutura triangular fixa e quatro hastes metálicas de 1,5 m de altura fixadas ao chão para ajuste do sistema de injeção de CO₂ e controle do acréscimo da temperatura à altura do dossel das plantas (Figura 1). Essas hastes foram ajustadas em altura de acordo com o desenvolvimento das plantas permanecendo sempre o sistema de injeção de CO₂ na altura superior do dossel das plantas.



Figura 1 – Estrutura triangular fixa a três hastes metálicas de 1,5 m de altura fixadas ao chão para ajuste do sistema de injeção de CO₂ nos sistemas MINI FACES.

Nas hastes metálicas fixadas ao chão, foi fixado um anel de PVC (0,5 polegada), com 2 m de diâmetro, perfurado à laser a cada 5 cm e com diâmetro de furo igual a 3 mm, que associado à alta pressão do gás (7 bar) garante uma homogeneidade do CO₂ na atmosfera (Figura 1). Esses anéis foram subdividido em três semi-arcos, a fim de otimizar a aplicação do gás em função da velocidade e direção do vento. Cada semi-arco foi controlado por uma válvula que é acionada em função da direção do vento. O sistema de injeção de CO₂ permaneceu ligado durante o período diurno (6:00 às 18:00 horas).

O sistema MINIIFACE de enriquecimento de CO₂ ao ar livre foi baseado no sistema POPFACE desenvolvido por Miglietta et al. (2001). O sistema para injeção de gás carbônico em cada MINIFACE foi formado por um cilindro de CO₂ com capacidade de 25 L, dois reguladores de pressão (modelo SM37, SM Indústria, Brasil), conexões em geral e cinco válvulas solenóides. Ao centro de cada sistema foram instalados dois sensores de

CO₂ (modelo GC-43459, Cozir, USA). Foram instalados sensores de temperatura e umidade relativa do ar (modelo HC2S3-L34, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA) em cada sistema acoplados a um datalogger (modelo CR1000, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA).

O controle da taxa de liberação de CO₂ foi realizado por um controlador lógico programável, ocorrendo em função da variação da velocidade e direção do vento. A concentração de CO₂ no centro da parcela, bem como os dados de velocidade e direção do vento foram armazenados em um computador e controlados automaticamente por um algoritmo desenvolvido, proporcionando um microambiente com a concentração de CO₂ desejada. As Figura 2A e 2B, apresentam o circuito elétrico desenvolvido para a montagem do sistema, bem como a disposição das mangueiras (divididas em três seções) responsáveis pela emissão do gás pressurizado para o enriquecimento do ar próximo as plantas.

No sistema MINI T-FACE, o aumento da temperatura do ar foi realizado por meio de seis aquecedores de cerâmica infravermelho (modelo FTE-750-240, Salamander Ceramic Infrared Heating Element, Mor Electric, USA), instalados a 80 cm do dossel das plantas, na qual permaneciam ligados 24 horas por dia, conforme recomendações de Kimball et al. (2008). A temperatura foi monitorada por termopares instalados em cada sistema.

A regulação de tensão dos aquecedores infravermelhos de cerâmica também foram realizadas automaticamente por meio de um controlador lógico programável para controle de cada parcela experimental com tratamento térmico. Foram instalados sensores térmicos a infravermelhos (modelo OS137-2, OMEGA Engineering Brasil) acoplado ao datalogger (modelo CR1000, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA) para registrar a variação da temperatura das plantas nas diferentes parcelas experimentais.



Figura 2 – Circuito elétrico do MINIFACE (A) e demonstração do anel de injeção de CO_2 dividido em três seções (B).

3.5. Dados meteorológicos

Uma estação meteorológica automática (EMA) foi instalada na área experimental para medir as variáveis ambientais durante o experimento. Dentro de cada MINIFACE foi medido a temperatura e concentração de CO_2

para o acompanhamento dessas variáveis. Na tabela 2 é apresentado uma descrição dos instrumentos que compõe a EMA.

Tabela 2. Especificações dos sensores utilizados para medição das variáveis ambientais.

Variável Meteorológica	Especificações dos Instrumentos Meteorológicos
Temperatura e Umidade	Termohigrômetro (modelo HC2S3-L34, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA);
Radiação Solar	Piranômetro (modelo CMP3-L100, Kipp & Zonen, Röntgenweg, Netherlands);
Precipitação	Pluviômetro (Texas Electronics, Inc. Dallas, Texas, USA, TR-525M);
Velocidade e Direção do Vento	Anemômetro Sônico Bidimensional (wind sonic, option 2, Gill Instruments);
Coletor de Dados	Datalogger (modelo CR1000, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA).

3.6. Medidas fisiológicas

As medidas das trocas gasosas foram realizadas em um analisador de gases infravermelho portátil, modelo LI-6400XT (Licor, Nebraska, USA), utilizando a câmara de folha com 2 cm². A fonte de luz foi fixada com um valor para cada folha, de acordo com a radiação fotossinteticamente ativa disponível no momento da medição, medida com um sensor quantum da câmara do equipamento. A concentração de CO₂ utilizada foi a concentração atmosférica ambiente, estabilizada por meio de um sistema buffer.

As plantas foram medidas semanalmente, em folhas jovens completamente expandidas, na qual as variáveis de trocas gasosas medidas foram a assimilação de CO₂ ou fotossíntese líquida (A, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), a condutância estomática (gs, $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), e a transpiração (E, $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Os horários de medição compreenderam o período de 8:00 às 16:00 h para curvas diurnas.

Também foi utilizadas para comparação dos tratamentos 1 e 3 (elevado CO₂ e testemunha) curva de fotossíntese (A) versus a densidade de fluxo de fótons da fotossíntese (PPFD), sendo esta obtida no período de

8:00 às 16:00 horas. Além disso foi analisado a respiração no período noturno em diferentes dias ao longo do experimento.

As curvas de resposta à luz foram construídas em concentrações de CO₂ ambiente (380 μmol mol⁻¹) e em elevado CO₂ (700 μmol mol⁻¹). Os valores de A foram registrados em valores de fluxo de fótons (PPFD) de 2000, 1700, 1400, 1000, 800, 600, 400, 300, 200, 100, 50 e 0 μmol m⁻² s⁻¹. A partir da curva A/PPFD (Equação 1) foram determinados a fotossíntese saturada por luz (A_{max}) e ponto de compensação por luz (PCR). Os dados foram ajustados utilizando a equação de Prado e Moraes (1997):

$$A = A_{\max}[1 - e^{-k(\text{PPFD} - \text{PCR})}] \quad (\text{Eq. 1})$$

em que: A = fotossíntese líquida momentânea, μmol CO₂ m⁻² s⁻¹; A_{max} = fotossíntese líquida máxima, μmol m⁻² s⁻¹; e = base do logaritmo natural (e = 2,718); k = constante de proporcionalidade associada à concavidade da curva (0,001 - 0,009); PCR = ponto de compensação à radiação, μmol m⁻² s⁻¹; e PPFD = densidade de fluxo de fótons da fotossíntese, μmol m⁻² s⁻¹.

A declividade da região linear da curva de resposta fotossintética à luz representa o rendimento quântico máximo da fotossíntese, ou seja, expressa a relação entre moles de carbono assimilados e moles de fótons absorvidos. Por meio da equação 2, é possível encontrar a inclinação da curva na fase linear conhecida como eficiência quântica (α).

$$\alpha = k A_{\max} (e^{k \text{PCR}}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: α é a eficiência quântica, μmol C μmol⁻¹ PPFD⁻¹.

Os ajustes das curvas A/PPFD foram realizados utilizando o software Origin 6.1.

Após a medição das trocas gasosas, foram determinadas o índice de eficiência instantânea da transpiração (EIT) e a eficiência intrínseca do uso da água (EiUA). O cálculo dos parâmetros citados anteriormente foi realizado pelas seguintes equações:

Eficiência Instantânea da Transpiração:

$$EIT = A / E \quad (\text{Eq.3})$$

em que:

A = taxa de fotossíntese líquida, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; e

E = taxa de transpiração, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Eficiência Intrínseca do Uso da Água:

$$EiUA = A/gs \quad (\text{Eq.4})$$

em que:

A = taxa de fotossíntese líquida, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; e

gs = condutância estomática, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

3.7. Medidas biométricas

A mensuração da área foliar, altura da parte aérea, número de folhas totais e diâmetro do caule foram realizadas ao longo do período do experimento. A área foliar foi medida com a utilização de um medidor de área foliar (Li-3100C, Licor Biosciences). A altura da parte aérea foi medida por meio de uma régua milimetrada e o diâmetro do caule com um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm (Digimess, Brasil).

A medição das biomassas seca da raiz, caule e folhas, de três plantas de cada clone de cada tratamento, foi realizada na parte final do experimento. Para isso, foi utilizada uma balança de precisão (modelo SA 210, Scientech, EUA) e estufa de circulação forçada, na qual o material vegetal ficou mantido a uma temperatura de 65°C até atingir massa constante.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização climática do ambiente durante o período experimental

A figura 3 apresenta a caracterização meteorológica do ambiente durante o período experimental. Uma análise gráfica da variação dos elementos meteorológicos é apresentada que incluem a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), o déficit de pressão de vapor de água (DPV) (mbar), a radiação solar (W/m^2), e a velocidade do vento (m/s).

A temperatura média observada no período foi de $19,1^{\circ}\text{C}$, com máxima de $31,5^{\circ}\text{C}$, ocorrida no DAT 19, e mínimas de $9,5^{\circ}\text{C}$, ocorrida no DAT 52.

O déficit de pressão de vapor (DPV) ao longo do tempo, foi em média de 0,6 mbar ao longo do período experimental, com máxima de 3,24 mbar referente ao DAT 52. A irradiância solar global, aqui mencionada simplesmente como radiação solar, teve média durante o experimento no período diurno de $257,2 \text{ W}/\text{m}^2$, com máxima de $941 \text{ W}/\text{m}^2$, observada no DAT 19. Em relação a velocidade do vento, ao longo do experimento obteve-se médias de 0,4 m/s, atingindo o valor máximo de 3,4 m/s no DAT 13.

Foi observado ao longo do período experimental três eventos de chuva com reduzidos volume, com totais de 3,4, 3,7 e 8,0 mm aos 14, 44 e 65 DAT (Dias após o transplântio) respectivamente.

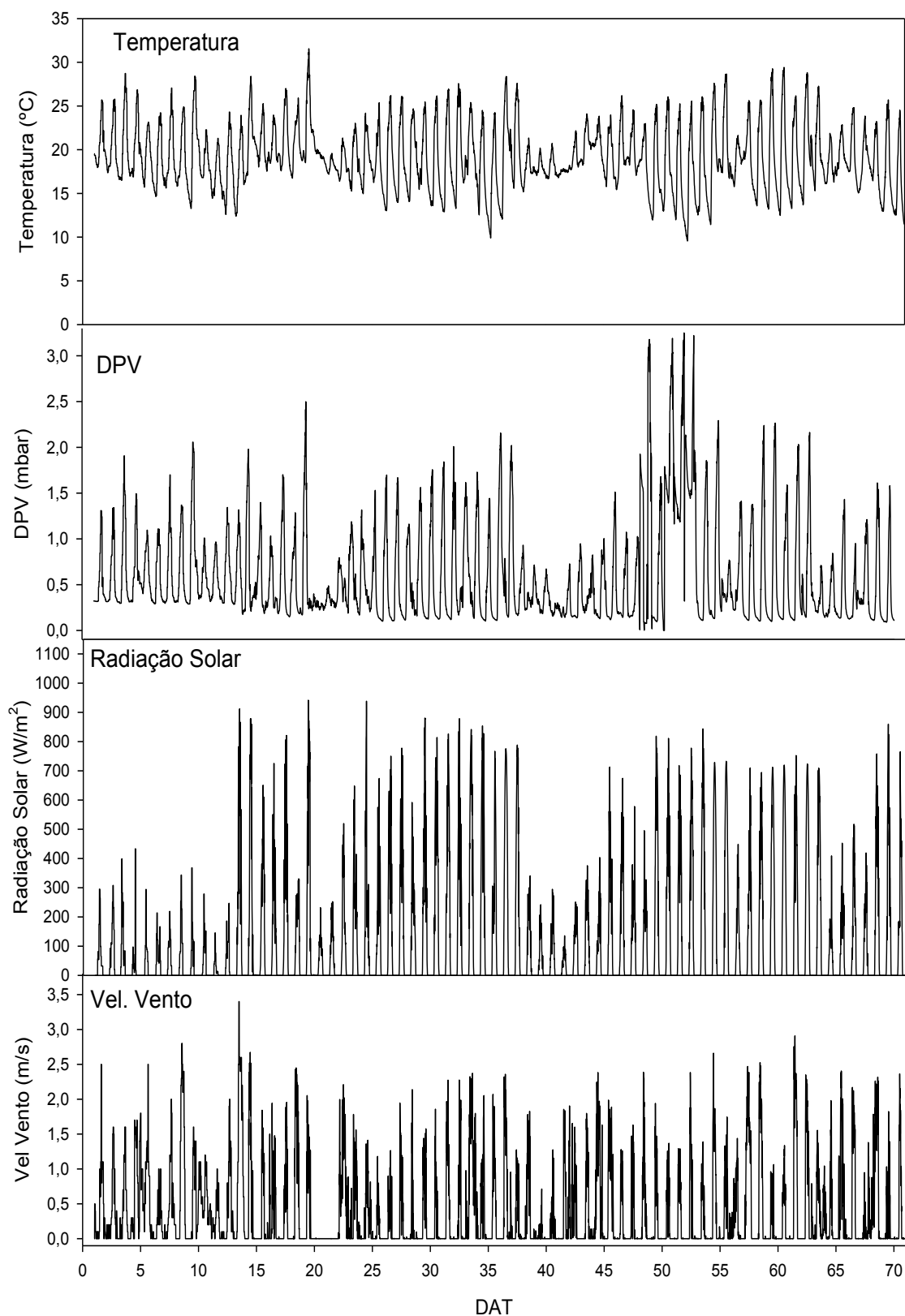


Figura 3 – Variação dos elementos meteorológicos durante o experimento: Temperatura (°C); Déficit de pressão de vapor (DPV) (mbar); Radiação Solar (W/m²) e Velocidade do vento (m/s).

Para caracterizar os tratamentos com ambiente modificados em cenários de mudanças climáticas foram medidas a temperatura do ar e a concentração de CO₂ e as variações desses elementos ao longo do experimento são apresentadas nas figuras 4 a 6. A figura 4 apresenta o comportamento da temperatura nos MINIFACEs ao longo do tempo para os tratamentos com enriquecimento de CO₂ (Tratamento 3) e tratamento com enriquecimento de CO₂ e aquecimento ambientes (Tratamento 4).

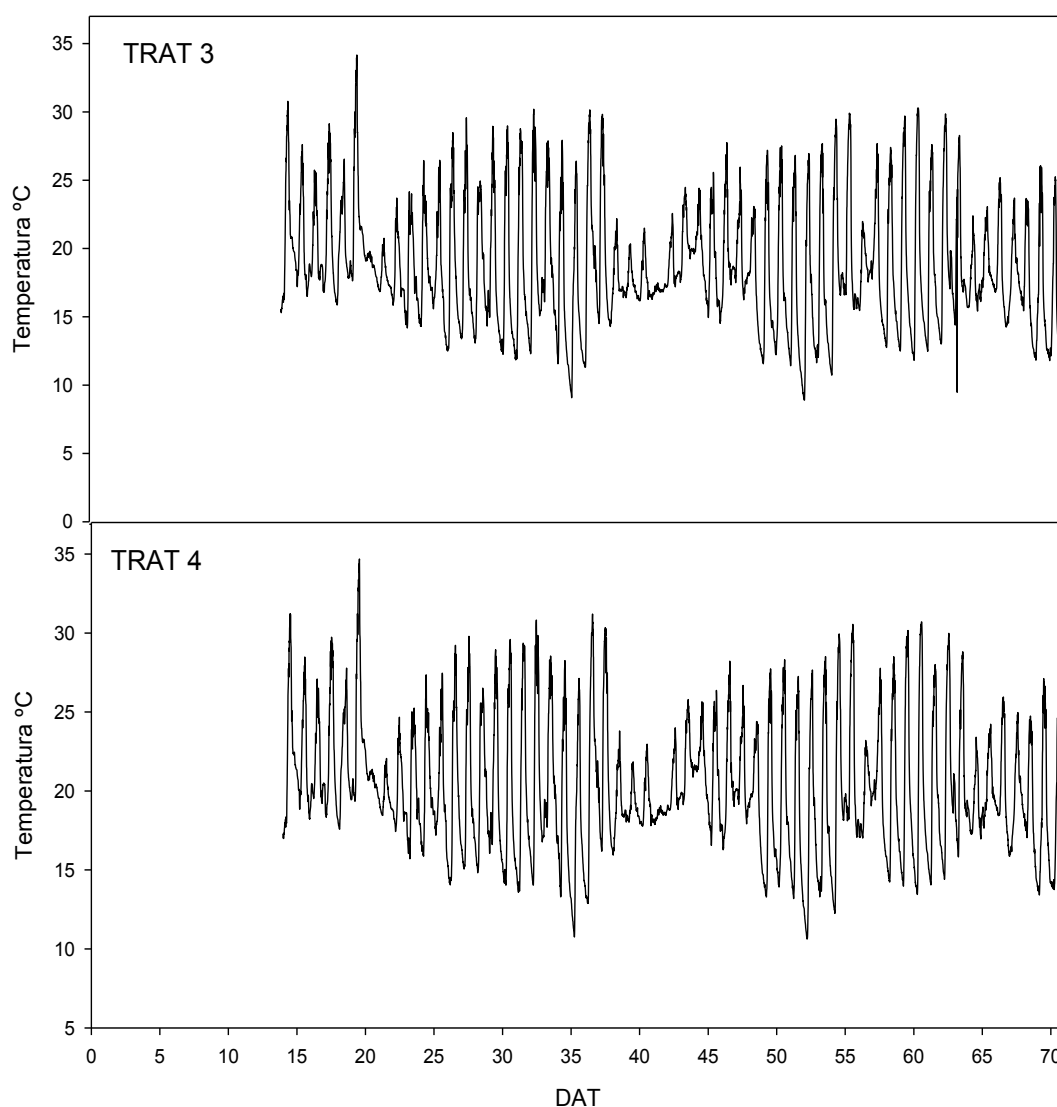


Figura 4 – Variação da temperatura nos tratamentos com enriquecimento de CO₂ e temperatura ambiente (TRAT3) e com enriquecimento de CO₂ e aquecimento do ambiente (TRAT 4) ao longo do período experimental.

A temperatura média observada no interior dos MINIFACEs foram de 18,7 °C ($\pm 4,35$) e 20,2 °C ($\pm 4,13$) para os tratamentos enriquecido de CO₂ e tratamento enriquecido de CO₂ mais adicional de temperatura respectivamente. Para concentração de CO₂ observada nos MINIFACEs, observou-se que os valores permaneceram em média durante o período diurno de 718 ppm e 710 ppm para os tratamentos de enriquecimento de CO₂ e tratamento com enriquecimento de CO₂ mais adicional de temperatura respectivamente (Figura 5).

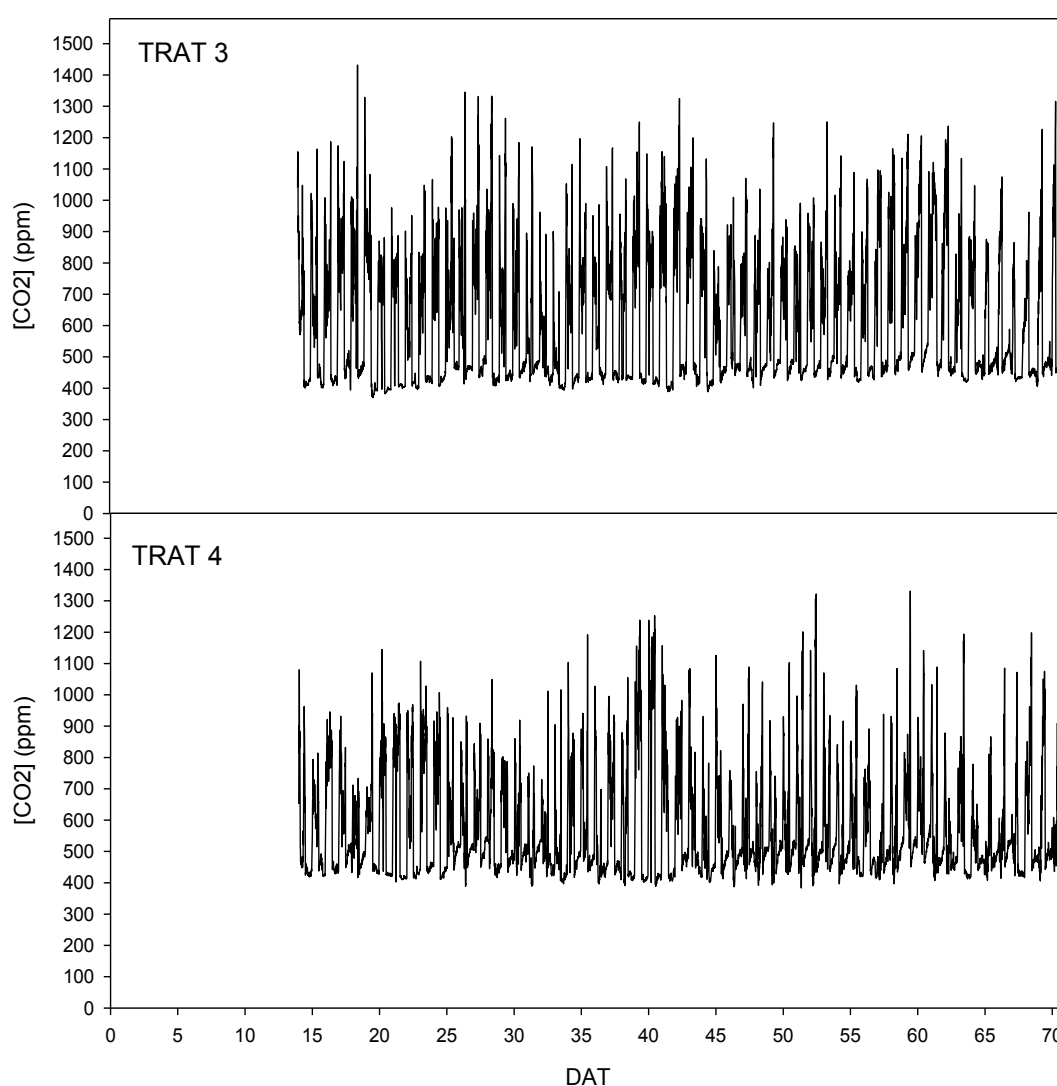


Figura 5 – Caracterização da concentração de CO₂ dentro de cada FACE para o tratamento com enriquecimento de CO₂ (TRAT3) e tratamento com enriquecimento de CO₂ e adicional de temperatura (TRAT 4) ao longo do tempo de experimento.

O déficit de pressão de vapor (DPV) médio observada no interior dos MINIFACEs foi de 0,31 mbar ($\pm 0,28$) e 0,42 mbar ($\pm 0,47$) para os tratamentos enriquecido de CO₂ e tratamento enriquecido de CO₂ mais adicional de temperatura respectivamente.

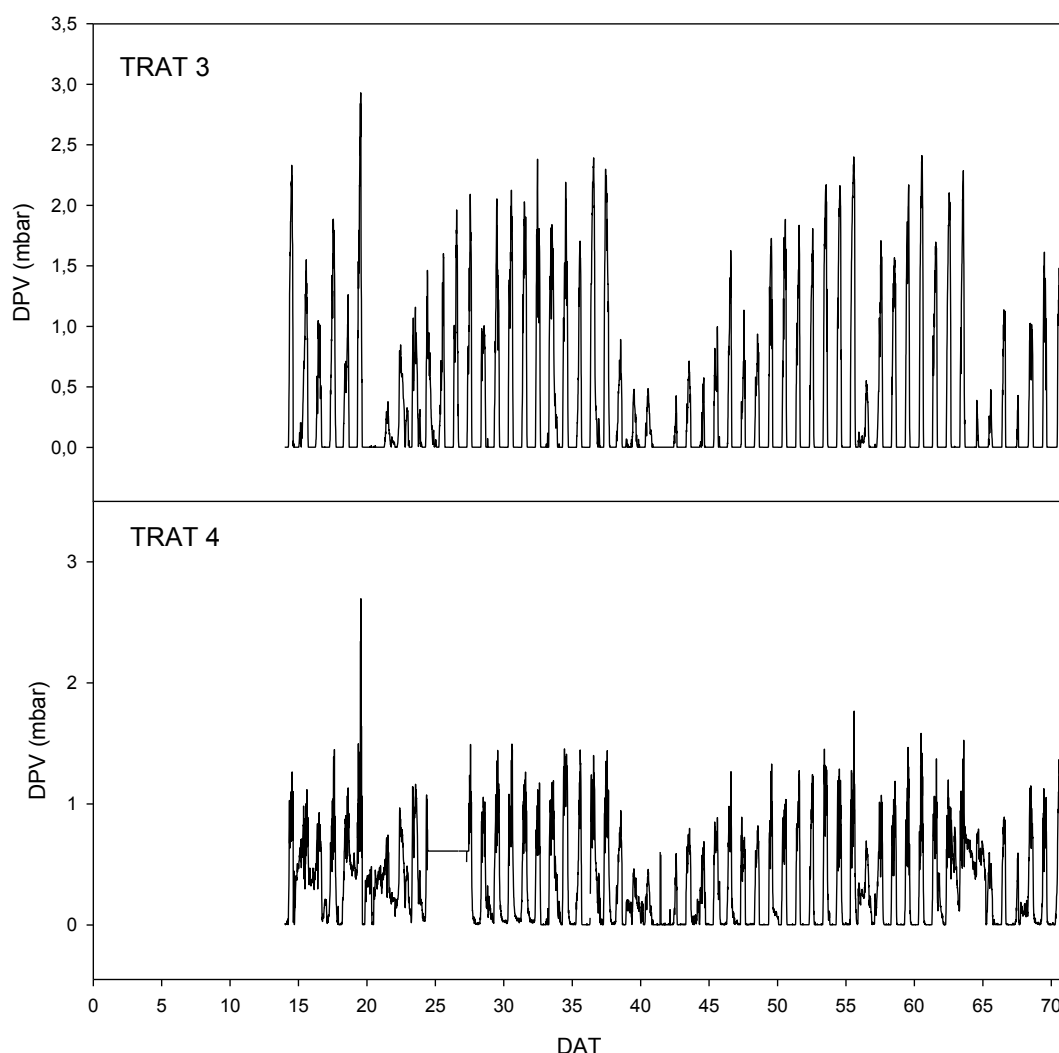


Figura 6 – Caracterização do déficit de pressão de vapor (DPV) dentro de cada FACE para o tratamento com enriquecimento de CO₂ (TRAT3) e tratamento com enriquecimento de CO₂ e adicional de temperatura (TRAT 4) ao longo do tempo de experimento.

4.2. Efeitos ecofisiológicos do aumento da concentração de CO₂ e temperatura no ambiente

Na apresentação dos resultados analisou-se o efeito isolado do aumento da concentração de CO₂ no ambiente (Tratamentos 1 e 3) e o

efeito do aumento da concentração de CO₂ em ambiente aquecido, cenário mais fiel ao que se espera das mudanças climáticas, nesse caso, pela comparação entre os tratamentos 2 e 4.

Embora tenha sido analisado estatisticamente o efeito dos clones, diferenciação dos materiais genéticos utilizados, não se verificou diferença significativa entre eles ao final do ciclo, motivo pelo qual não se discutiu este aspecto no trabalho.

4.2.1. Efeito do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera

4.2.1.1. Trocas gasosas

A figura 7 apresenta a taxa de condutância estomática para o tratamento sob condição ambiente em comparação ao tratamento sob enriquecimento de CO₂.

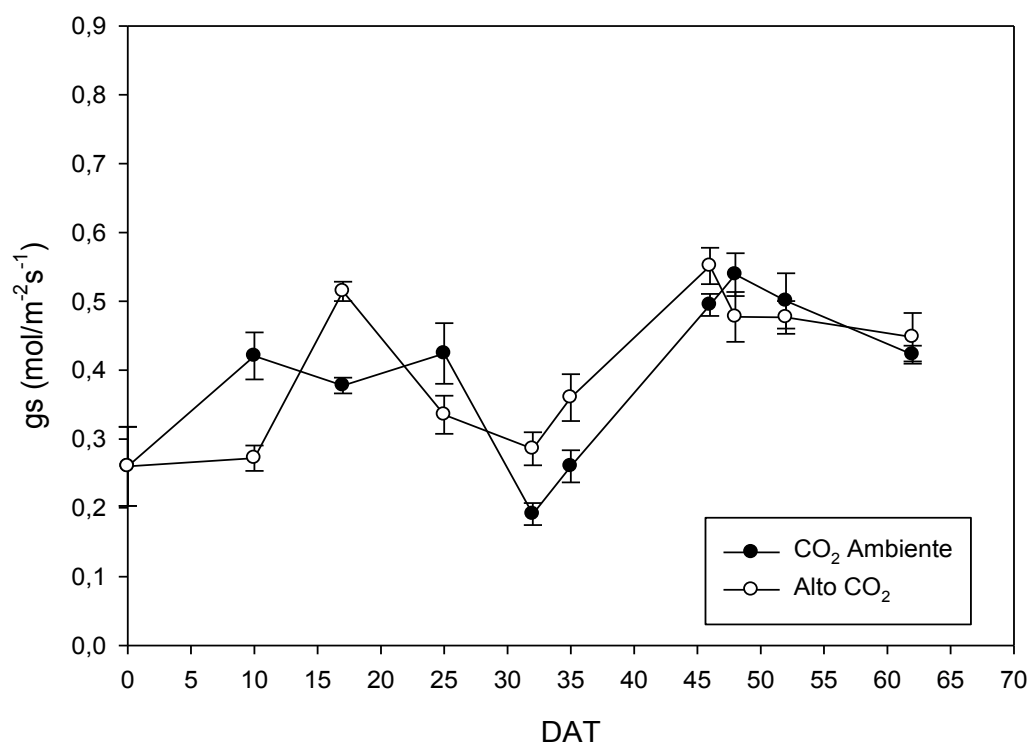


Figura 7 – Variação da condutância estomática (gs) sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Verificou-se que não existiu uma tendência para ambos os tratamentos sobre o a condutância estomática, na qual o tratamento enriquecido com CO₂ apresentou médias inferiores significativas a testemunha somente no DAT10 com valores 35,7 % inferior a testemunha, no entanto para os DAT 17, 32, 35 e 62 o tratamento enriquecido de CO₂ diferenciou estatisticamente da testemunha, apresentando valores superiores de 27,5 %, 32,1 %, 27,7 % e 23,5 % respectivamente.

A figura 8 apresenta a comparação entre a taxa fotossintética das plantas sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias após o transplântio (DAT) ao longo do experimento. Quando analisado os tratamentos, no DAT zero não verifica-se diferença significativa entre as plantas. Verifica-se que o ganho na fotossíntese variou entre 16,2 % a 30,0 % para os DAT 10 e 62 respectivamente, com médias gerais de 19,9% superior para o tratamento enriquecido de CO₂ quando comparado ao tratamento testemunha.

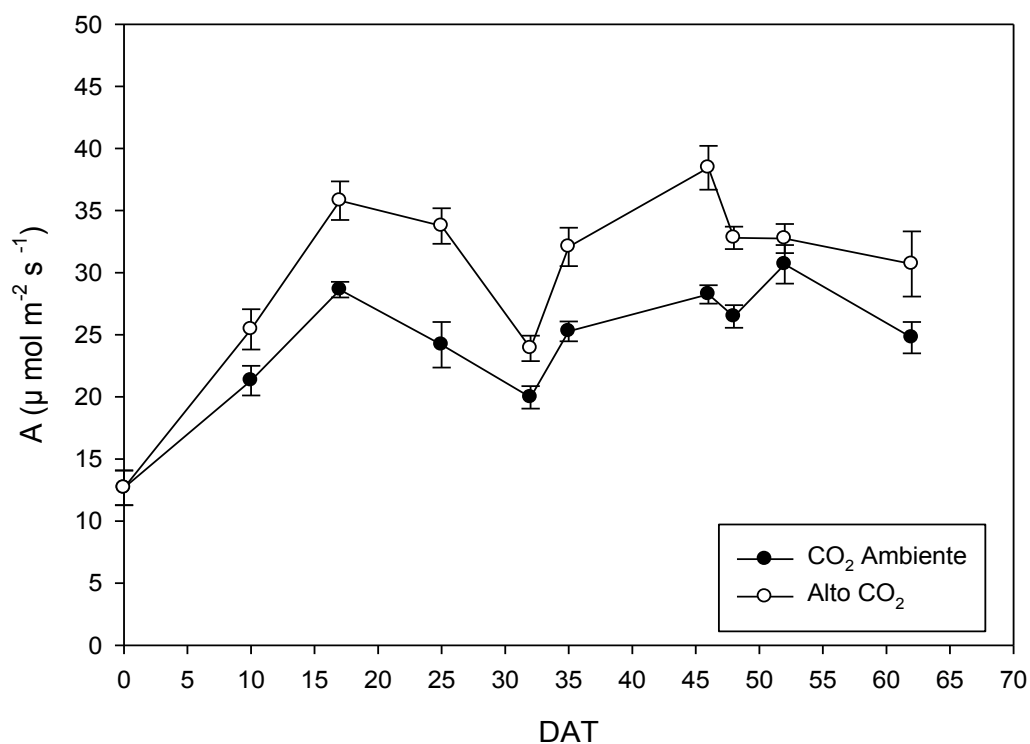


Figura 8 – Variação da fotossíntese (A) sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

A figura 9 apresenta a taxa de transpiração para o tratamento sob condição ambiente em comparação ao tratamento sob enriquecimento de CO₂.

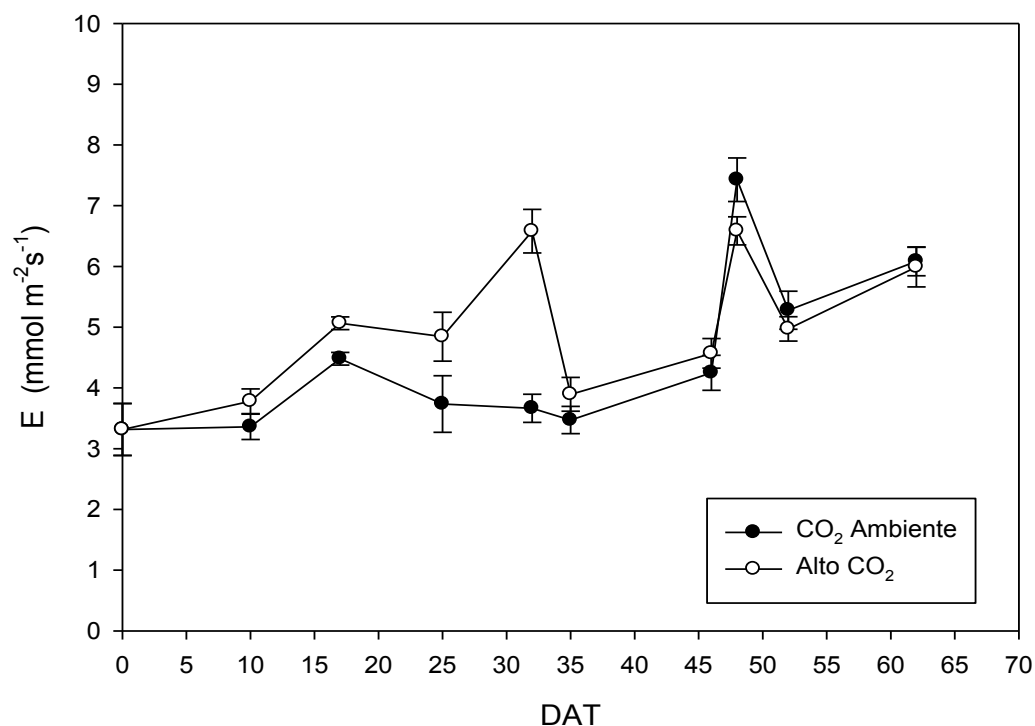


Figura 9 – Variação da transpiração (E) sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

De maneira geral, a taxa de transpiração para os tratamentos 1 e 3 foram semelhantes, exceto para os DAT 25 e 32, na qual o tratamento com alto CO₂ obteve valores médios superiores de 11,5 % e 44,3 % respectivamente quando comparado a testemunha.

A tabela 3 apresenta os valores de eficiência instantânea da transpiração e a eficiência intrínseca do uso da água nos diferentes DAT ao longo do tempo para os tratamentos enriquecido com CO₂ (Trat 3) e concentração de CO₂ ambiente (Trat 1). A eficiência intrínseca do uso da água (EiUA) que relaciona a taxa fotossintética com a condutância estomática (A/gs) foi maior na maioria das vezes nas árvores submetidas a altas concentrações de CO₂. Para a eficiência intrínseca do uso da água, observou-se uma oscilação entre os tratamentos analisados.

Tabela 3 – Eficiência instantânea da transpiração (EIT) e a eficiência intrínseca do uso da água (EiUA) nos diferentes dias (DAT) ao longo do tempo para os tratamentos 1 e 3.

TRAT 1	DAT0	DAT10	DAT17	DAT25	DAT32	DAT35	DAT46	DAT48	DAT52	DAT62
EIT	3,90	6,34	6,39	6,91	5,45	7,08	6,65	3,56	5,81	4,07
EiUA	48,01	50,67	75,82	60,88	104,58	97,13	57,11	49,13	61,28	58,63

TRAT 3	DAT0	DAT10	DAT17	DAT25	DAT32	DAT35	DAT46	DAT48	DAT52	DAT62
EIT	3,80	6,71	7,07	6,97	3,63	8,15	8,41	4,98	6,54	5,76
EiUA	46,74	93,50	69,59	100,69	83,68	89,11	69,74	68,72	68,61	76,55

EiUa, e ETI, valores em $\mu\text{mol mol}^{-1}$

4.2.1.2. Respiração

A figura 10 apresenta a comparação entre a taxa respiratória das plantas medidas durante o período noturno sob ambiente enriquecido de CO_2 e a testemunha em diferentes dias após o transplante (DAT) ao longo do experimento.

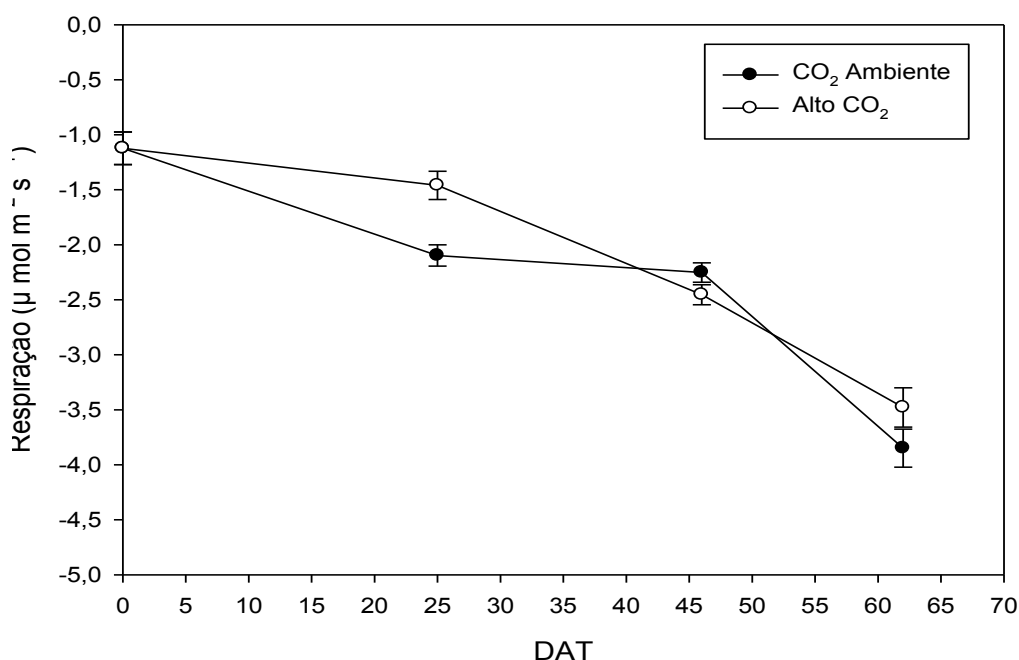


Figura 10 – Variação da respiração sob ambiente enriquecido de CO_2 e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Observou-se diferença estatística a 5 % de significância entre os tratamentos com alto CO₂ e testemunha somente no DAT 25, na qual o tratamento testemunha obteve valores 30,6 % superiores ao tratamento com alto CO₂.

4.2.1.3. Curva de resposta à luz

Na figura 11 estão expressas as curvas de resposta da fotossíntese (A) em função da densidade de fluxo de fótons da fotossíntese (PPFD) para os tratamentos com aumento de CO₂ e a testemunha, juntamente com os seus determinados parâmetros (Tabela 4). Os tratamentos diferenciaram estatisticamente para os valores de fotossíntese a 5 % significância para os diferentes PPFD a partir de 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, obtendo o tratamento com enriquecimento de CO₂, valores 18,8 %, 5,8 %, 22,3 %, 23,1 %, 23,8 %, 22,4 %, 24,2 % e 24,0 % superiores ao tratamento testemunha para os PPFD de 300, 400, 600, 800, 1000, 1400, 1700 e 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente. O PCR obtido para o tratamento enriquecido de CO₂ superou em 24,7 % o tratamento testemunha.

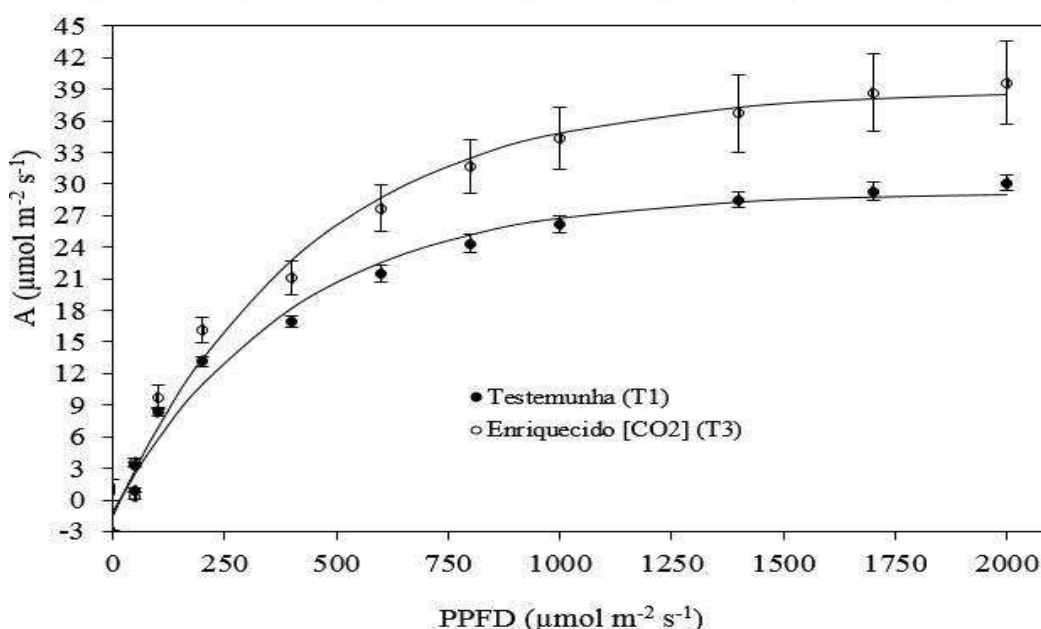


Figura 11 – Curvas de resposta da fotossíntese (A) em função da densidade de fluxo de fótons da fotossíntese (PPFD) e desvios padrão para os tratamentos com alta concentração de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Tabela 4 - Parâmetros da curva resposta da fotossíntese (A) em função da densidade de fluxo de fótons da fotossíntese (PPFD), sendo A_{max} , a fotossíntese máxima analisada ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); PCR ponto de saturação luminoso ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); e k constante de proporcionalidade associada a concavidade da curva..

TRAT	A_{max}	PCR	k	R^2	Efic.quant	$1/\alpha$
Testemunha (Trat 1)	30,10	29,27	0,0026	0,98	0,0827	12,11
Alto CO_2 (Trat 3)	39,62	38,88	0,0023	0,98	0,0994	10,06

4.2.1.4. Análises biométricas

Na figura 12 está expressa a altura das plantas das plantas sob ambiente enriquecido de CO_2 e a testemunha em diferentes dias após o transplante (DAT) ao longo do experimento. As plantas sob condições de alto CO_2 desenvolveram mais em altura diferenciando estatisticamente a 5% de significância em relação a testemunha ao longo do tempo, obtendo médias superiores de 11,3 %, 14,3 % e 14, 1 % para os DAT 36, 52 e 71, respectivamente.

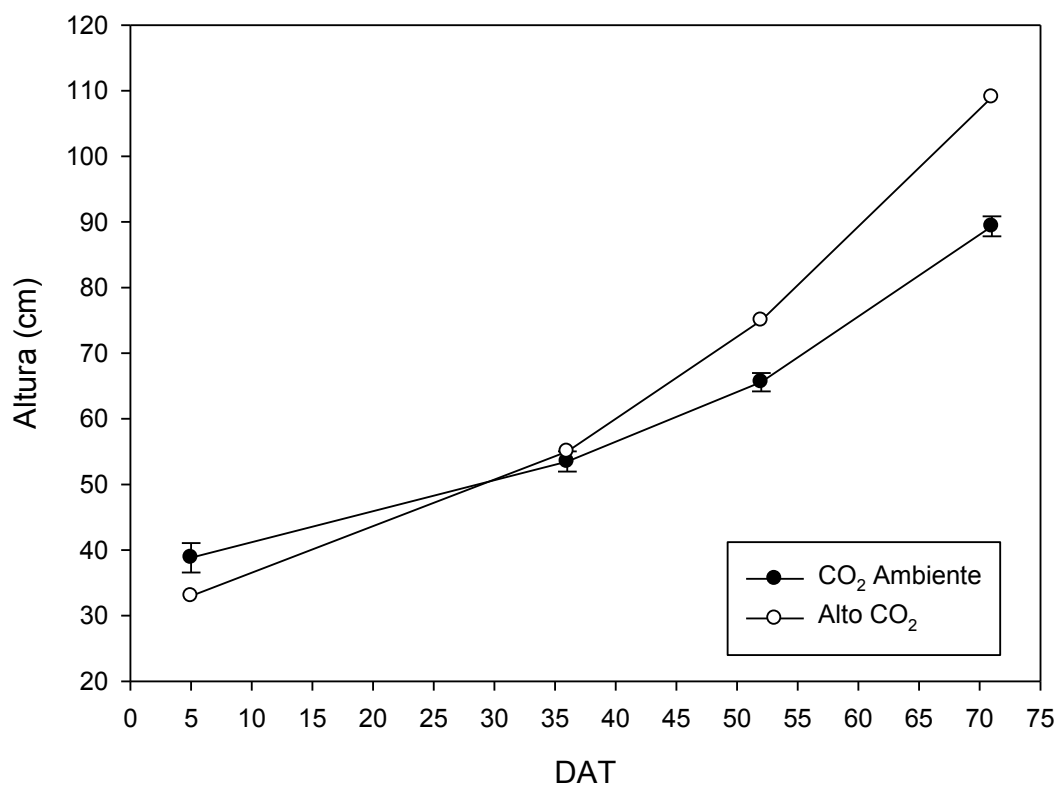


Figura 12 – Variação da altura em sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Para o diâmetro do caule, expresso na figura 13, as plantas sob condições de alto CO₂ diferenciaram da testemunha estatisticamente a 5 % de significância, obtendo médias superiores de 11,3 %, 10,9 % e 14,5 % para os DAT 36, 52 e 71 respectivamente.

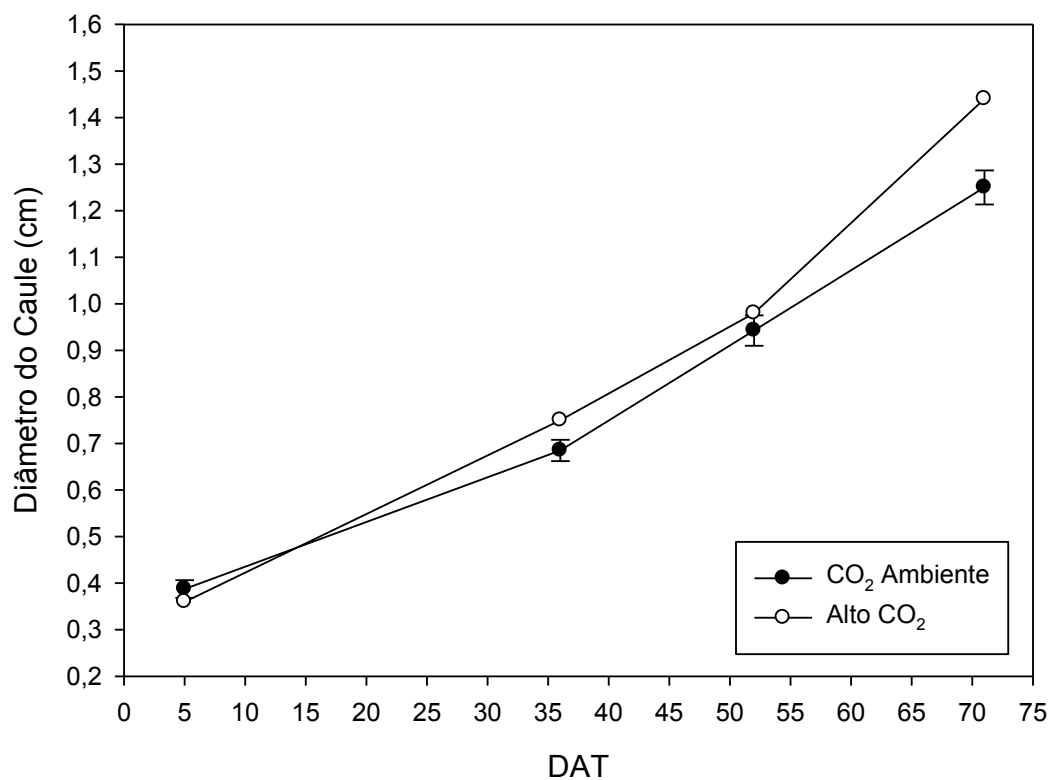


Figura 13 – Variação do diâmetro do caule sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Em relação ao número de folhas e números de ramos, figura 14 e 15 respectivamente, as plantas não diferenciaram estatisticamente ao longo do experimento quando comparado ambiente com alto CO₂ e a testemunha.

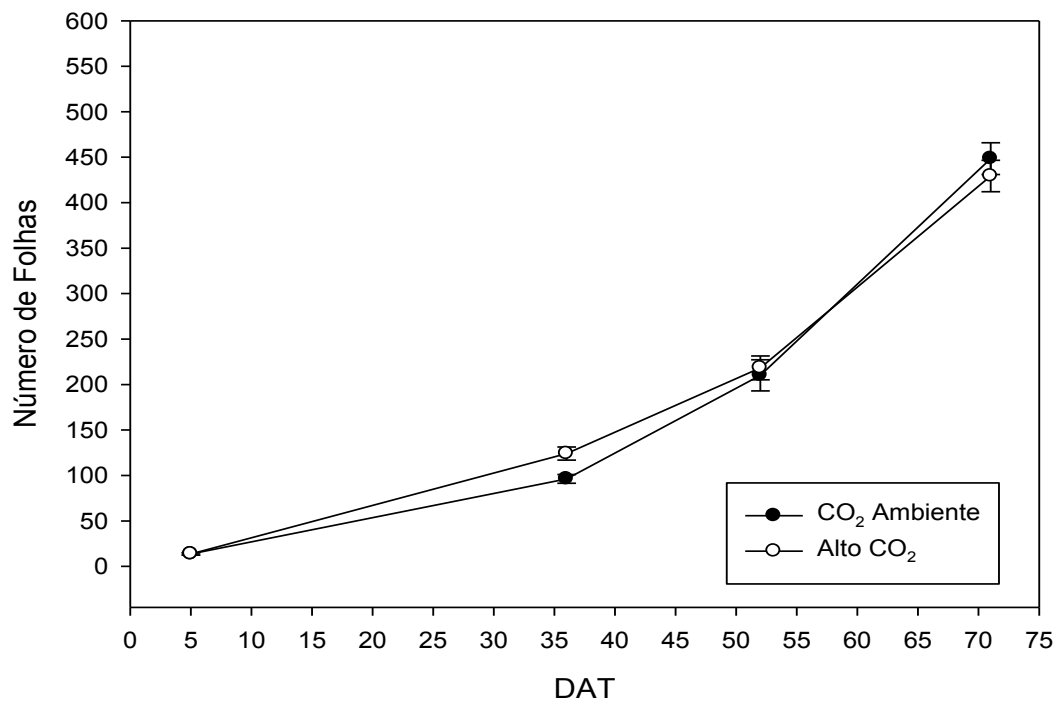


Figura 14 – Variação do número de folhas sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

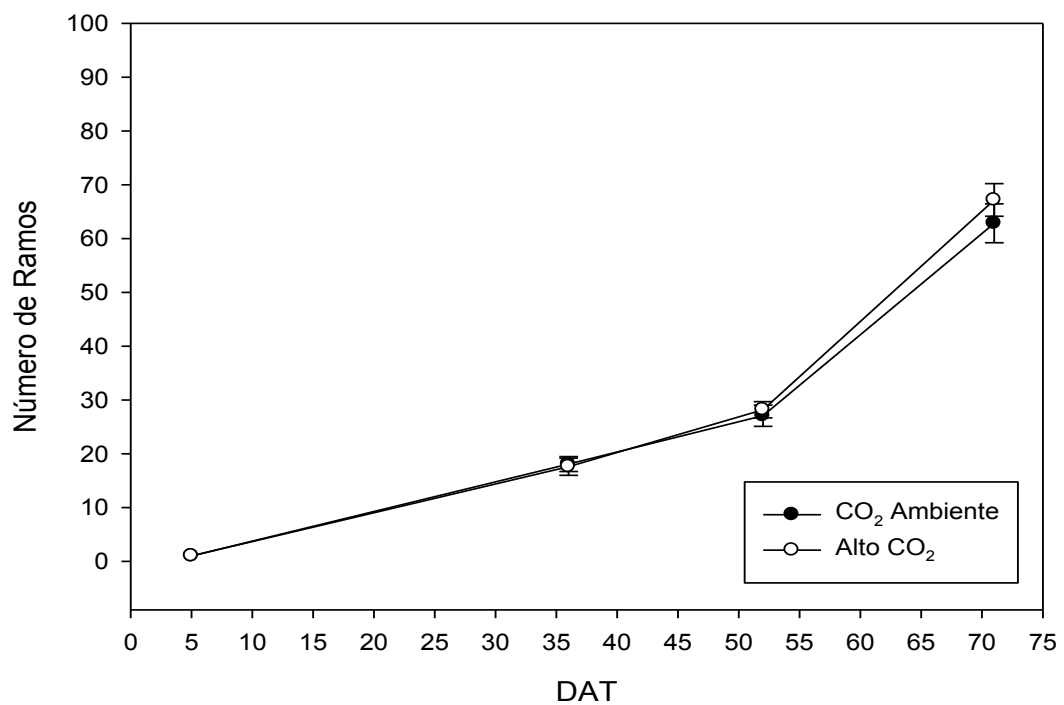


Figura 15 – Variação do número de ramos sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

A figura 16 apresenta a área foliar da planta médio dos tratamentos com enriquecimento de CO₂ e a testemunha ao longo dos dias de experimento. Para os DAT 36 e 52, as plantas referentes ao tratamento com alto CO₂ diferenciaram estatisticamente a 5 % de significância quando comparado com a testemunha, obtendo valores médios de 9,0 % e 20,7 % superiores respectivamente.

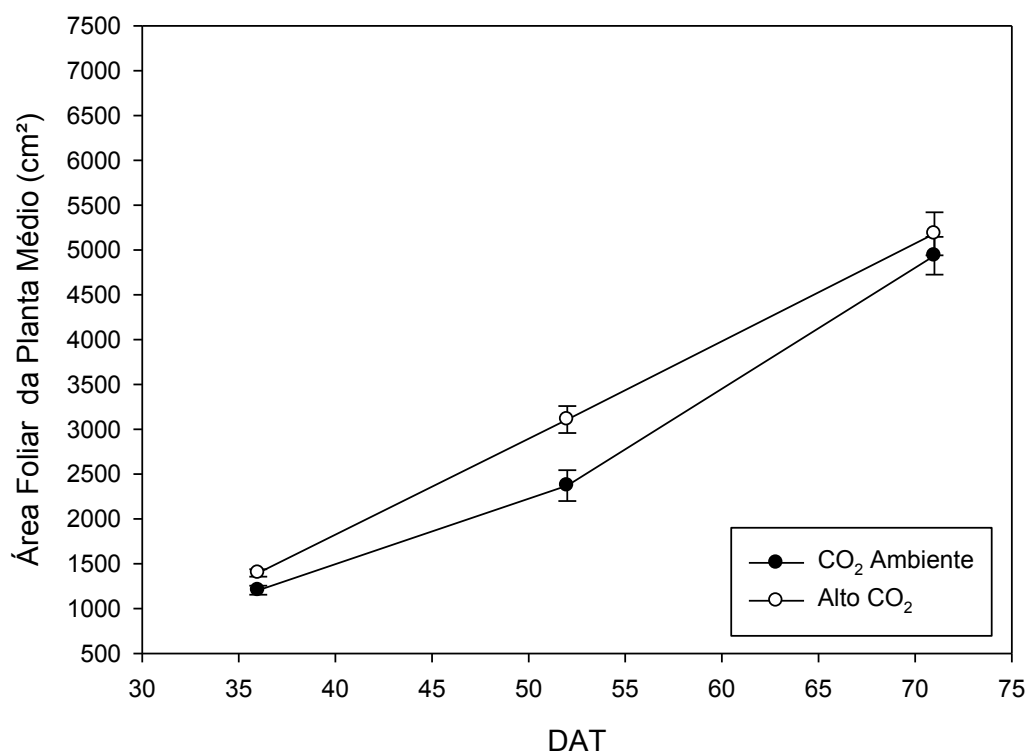


Figura 16 – Variação da área foliar da planta médio sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Sob as análises das medidas morfológicas de biomassa, observou-se que o peso seco total de folhas da planta médio ao longo do tempo para os tratamentos com enriquecimento de CO₂ não diferenciaram estatisticamente a 5 % de significância quando comparado com a testemunha (Figura 17), no entanto, para o peso seco do caule, foi verificada diferença significativa para os DAT 36, 52 e 71, obtendo valores médios superiores de 7,8 %, 20,9 % e 9,9 % respectivamente quando comparado com a testemunha (Figura 18).

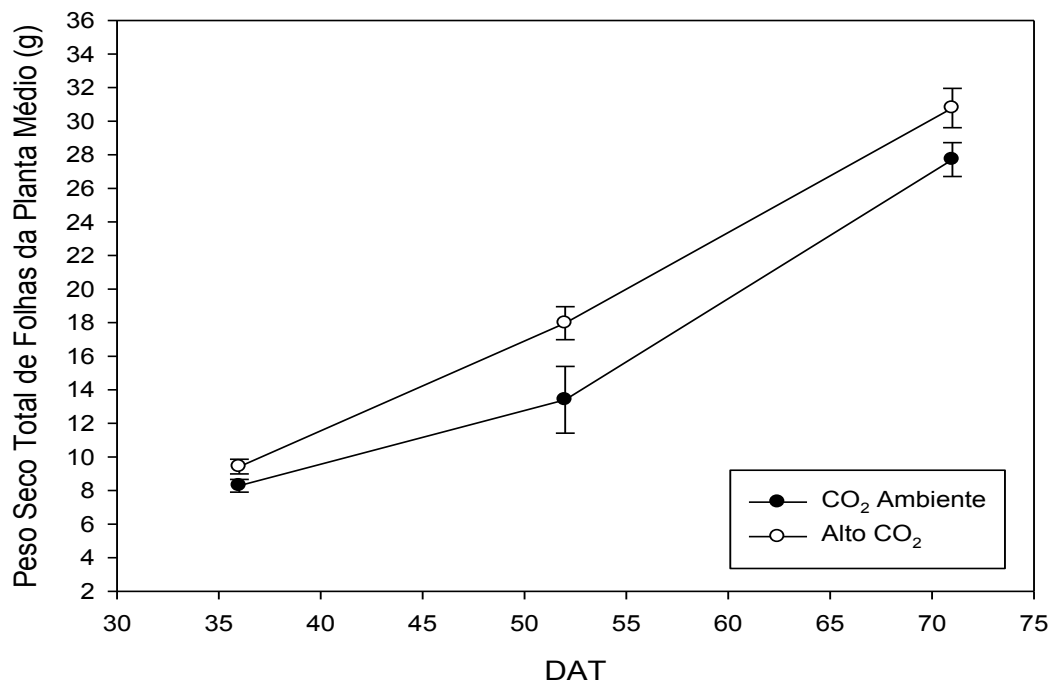


Figura 17 – Variação do peso seco total de folhas da planta médio em gramas sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

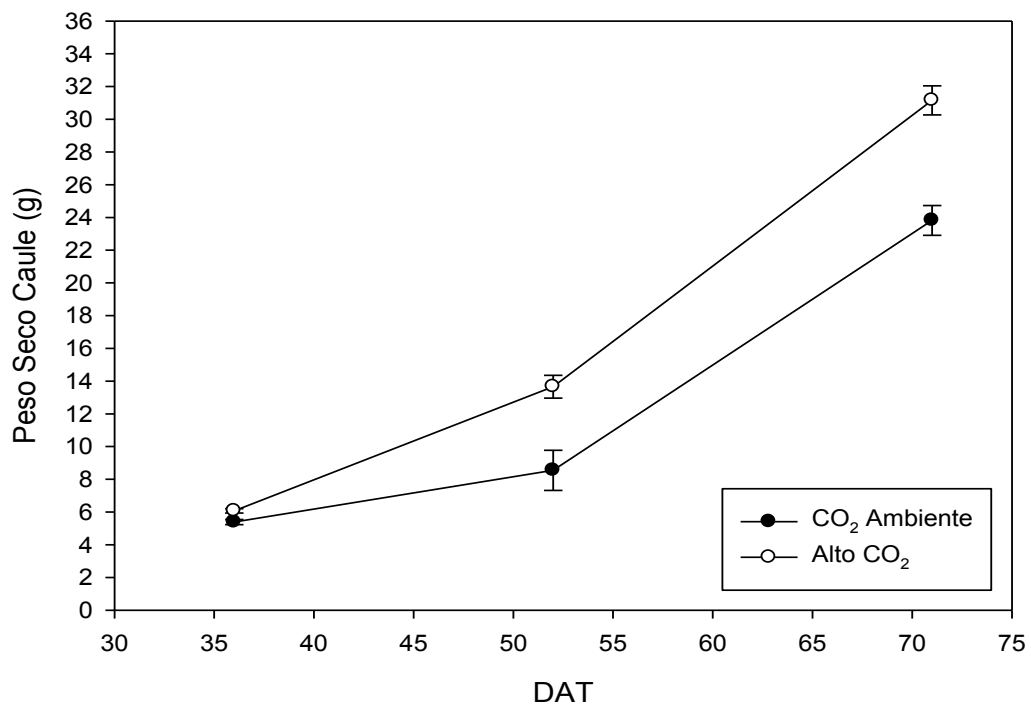


Figura 18 – Variação do peso seco do caule sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Já para o peso seco da raiz (Figura 19), foi observado diferença significativa entre os tratamentos enriquecido com CO₂ e a testemunha somente no final do experimento (DAT 71), obtendo o com alto CO₂ valores de 22,9% superior ao controle.

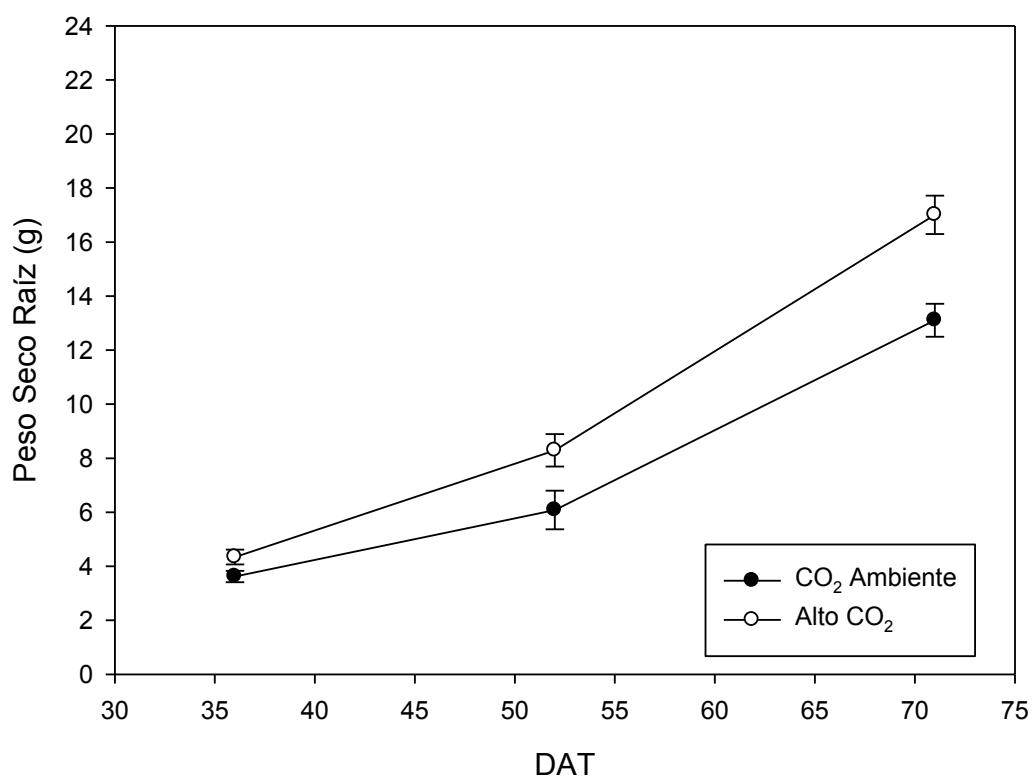


Figura 19 – Variação do peso seco das raízes sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Quando analisado o peso seco total (Figura 20), verifica-se que o tratamento enriquecido com CO₂ apresentou diferenças significativas ao longo de todo o tempo quando comparado com a testemunha. Obtendo valores médios de 8,1 %, 22,7 % e 18,1 % superiores a testemunha para os DAT 36, 52 e 71 respectivamente.

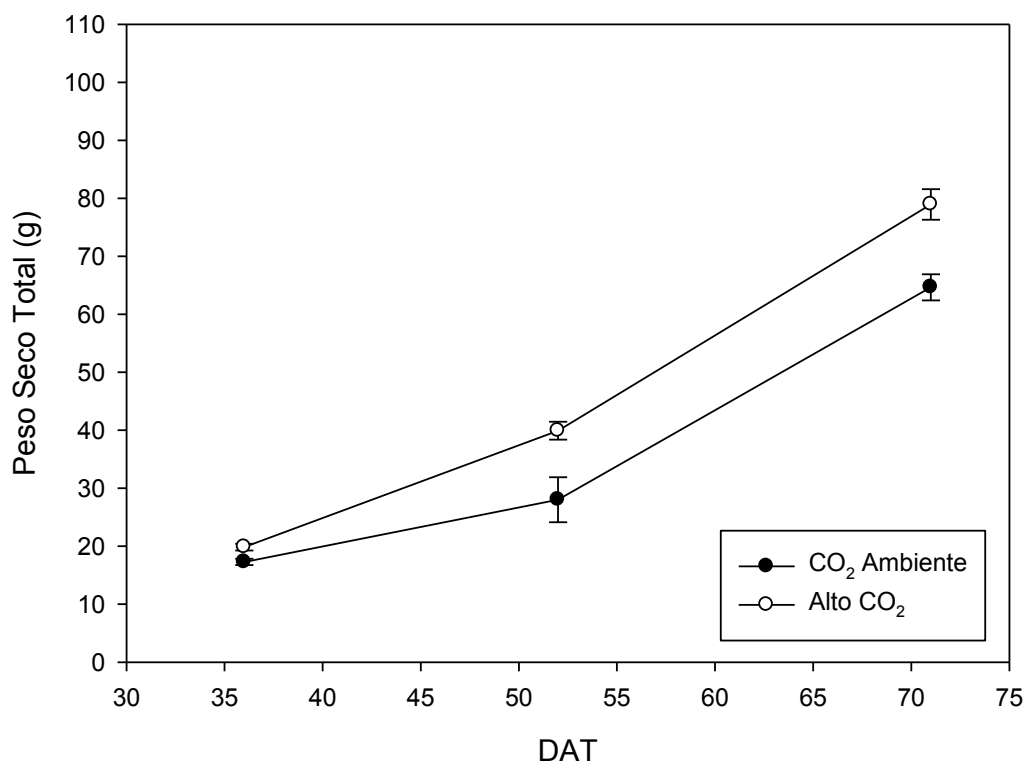


Figura 20 – Variação do peso seco total sob ambiente enriquecido de CO₂ e a testemunha em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

4.2.2. Efeito Adicional do aquecimento em ambiente enriquecido com CO₂

4.2.2.1. Trocas gasosas

A figura 21 apresenta a taxa de condutância estomática para os tratamentos submetidos a um ambiente aquecido verificando o efeito adicional do aumento da concentração de CO₂.

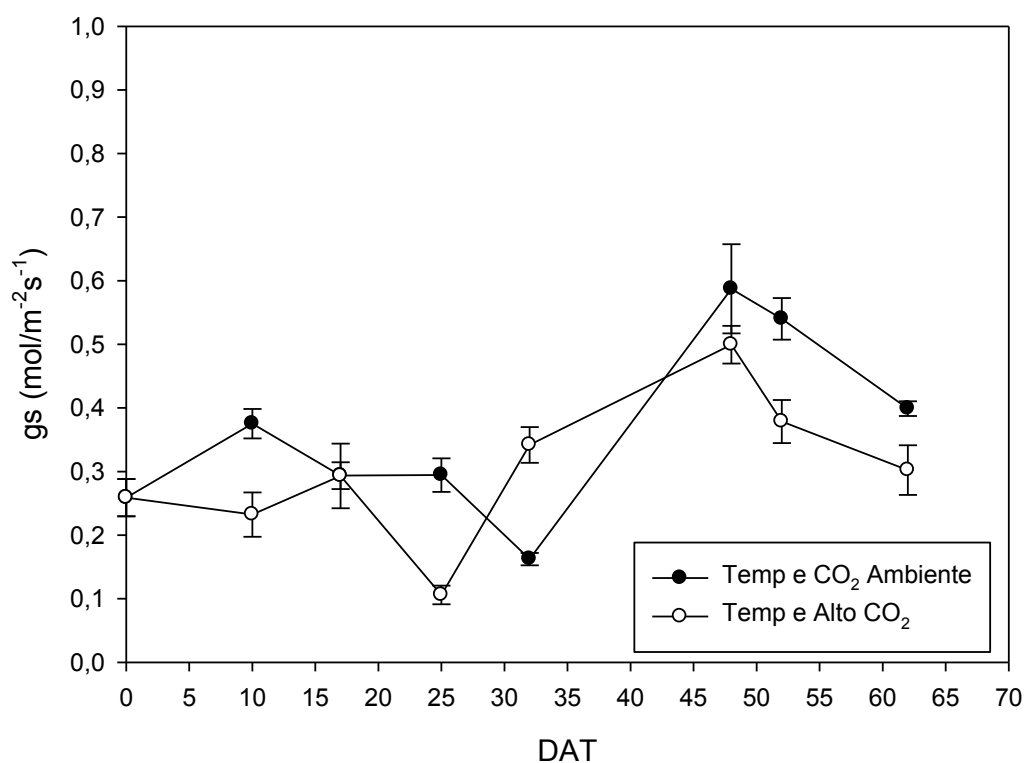


Figura 21 – Variação da condutância estomática (gs) sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Embora tenha se verificado existência de diferença entre os tratamentos testemunha e enriquecido de CO₂, ambos com adicional de temperatura, a tendência do tratamento testemunha apresentar valores superiores de condutância estomática ao longo do ciclo experimental, na qual para os DAT finais 48, 52 e 62 o tratamento testemunha obteve valores superiores ao tratamento com alto CO₂, com valores de 17,5 %, 42,6 % e 21,1 % superiores respectivamente.

A figura 22 apresenta taxas fotossintéticas das plantas submetidas a um ambiente aquecido verificando o efeito adicional do aumento da concentração de CO₂.

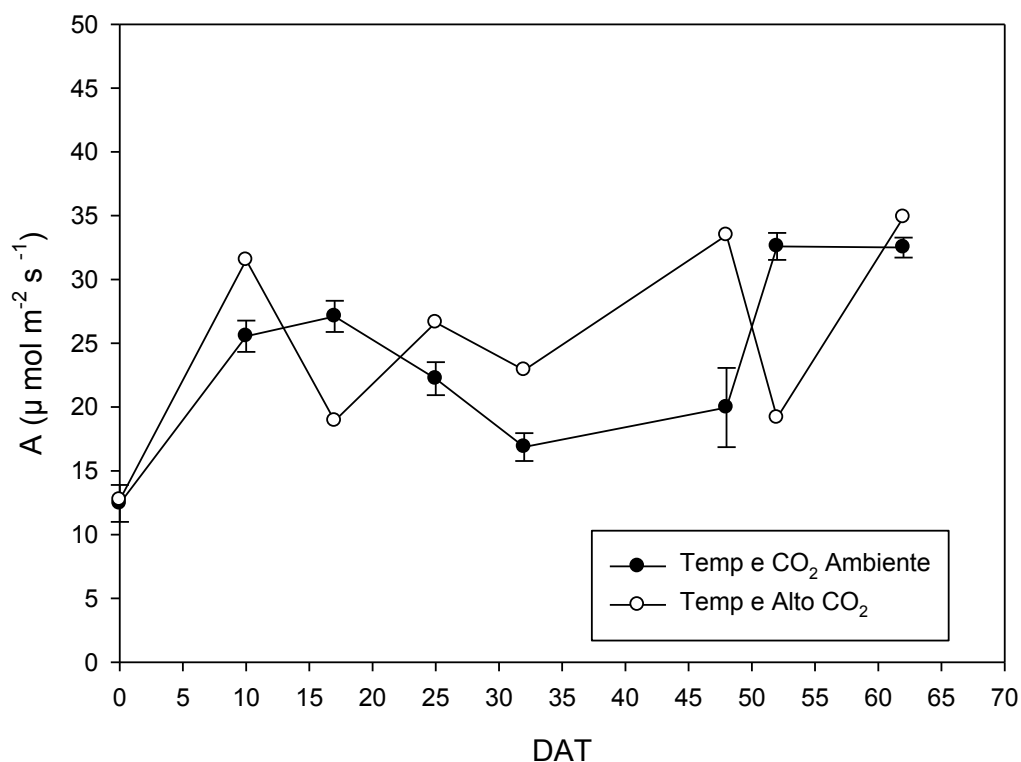


Figura 22 – Variação da fotossíntese (A) sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Embora tenha se verificado existência de diferenças significativas entre os tratamentos com adicional de temperatura e enriquecido de CO₂ e tratamento com adicional de temperatura ao longo do ciclo experimental os valores iniciais e finais não apresentaram diferenças significativas. Quando esses apresentaram valores significativos, alternaram a taxa fotossintéticas entre eles. Nos DAT 25 e 52, o tratamento com adicional de CO₂ obteve valores superiores ao tratamento enriquecido de CO₂ com adicional de temperatura, com 12,3 % e 33,5 % superiores respectivamente. Já para os DAT 32 e 48, o tratamento com alto CO₂ obteve valores superiores em relação ao tratamento testemunha, com valores de 32,9 % e 41,3 % superiores para cada DAT respectivamente.

A figura 23 apresenta a taxa de transpiração para os tratamentos submetidos a um ambiente aquecido verificando o efeito adicional do aumento da concentração de CO₂.

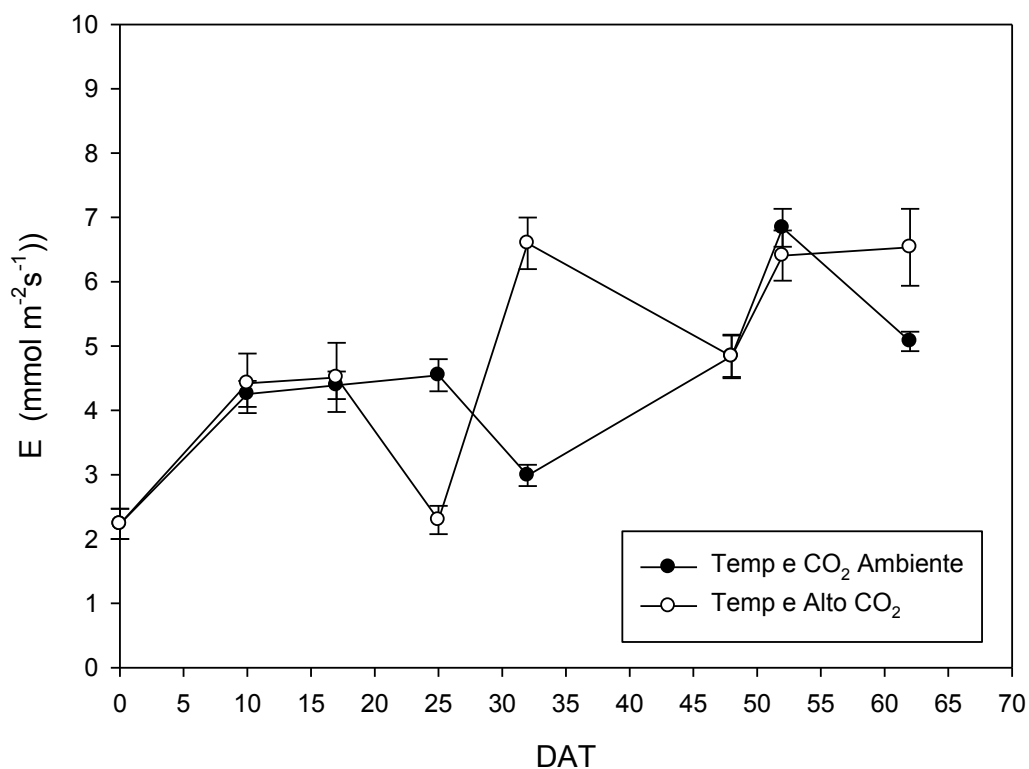


Figura 23 – Variação da transpiração (E) sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Parece não existir uma tendência definida dos valores de transpiração sendo que em mais da metade dos dias os valores de transpiração foram iguais, e quando diferem, os valores alternaram entre tratamentos. No DAT 25, o tratamento com temperatura adicional obteve valores superiores ao tratamento enriquecido de CO₂ e adicional de temperatura, com valor 98,0% superior. Já para os DAT 32 e 62, o tratamento com alto CO₂ obteve valores superiores em relação ao tratamento testemunha, com valores de 54,7 % e 27,4 % superiores para cada DAT respectivamente.

4.2.2.2. Análises biométricas

Na figura 24 está expressa a altura das plantas das plantas sob ambiente com temperatura adicional e enriquecido de CO₂ e a testemunha com adicional de temperatura em diferentes dias após o transplante (DAT)

ao longo do experimento. As plantas sob condições de alto CO_2 desenvolveram mais em altura diferenciando estatisticamente a 5 % de significância entre tratamentos ao longo do tempo, obtendo médias superiores de 6,7 %, 16,4 % e 15,9 % cm para os DAT 36, 52 e 71, respectivamente em relação a testemunha.

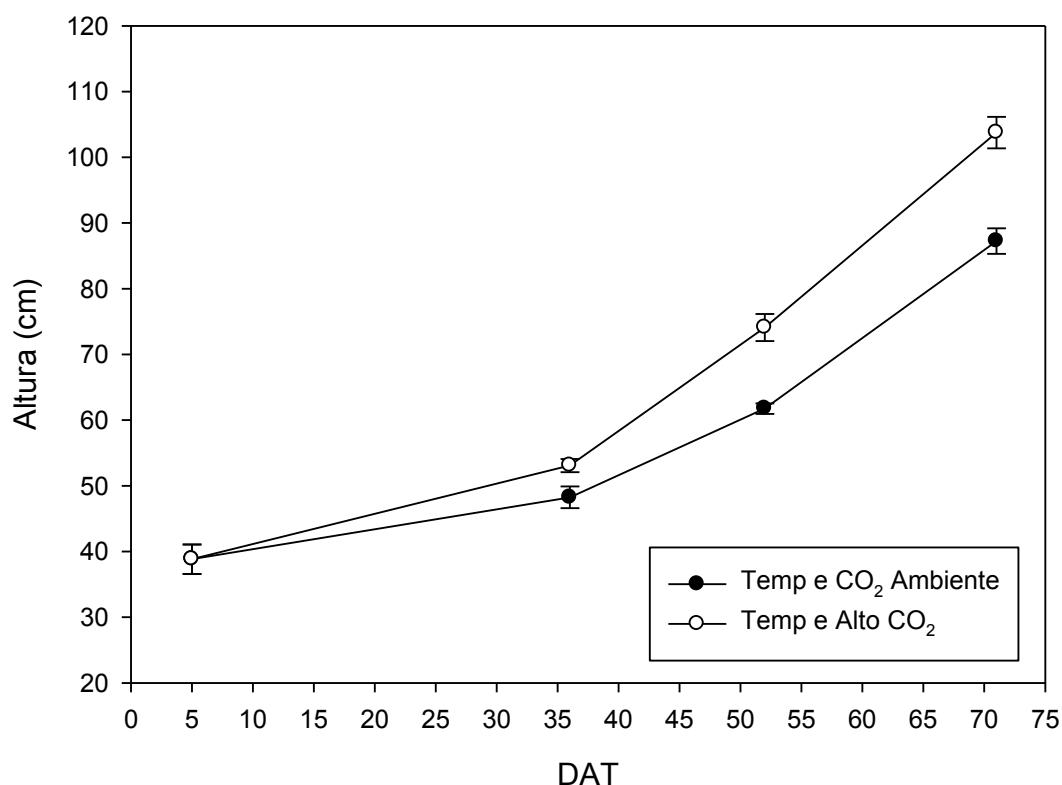


Figura 24 – Variação da altura das plantas sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO_2 e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Para o diâmetro do caule, expresso na figura 25, as plantas sob condições de alto CO_2 e adicional de temperatura diferenciaram da testemunha com adicional de temperatura estatisticamente a 5 % de significância, obtendo médias superiores de 16,8 %, 9,9 % e 11,8 % para os DAT 36, 52 e 71 respectivamente.

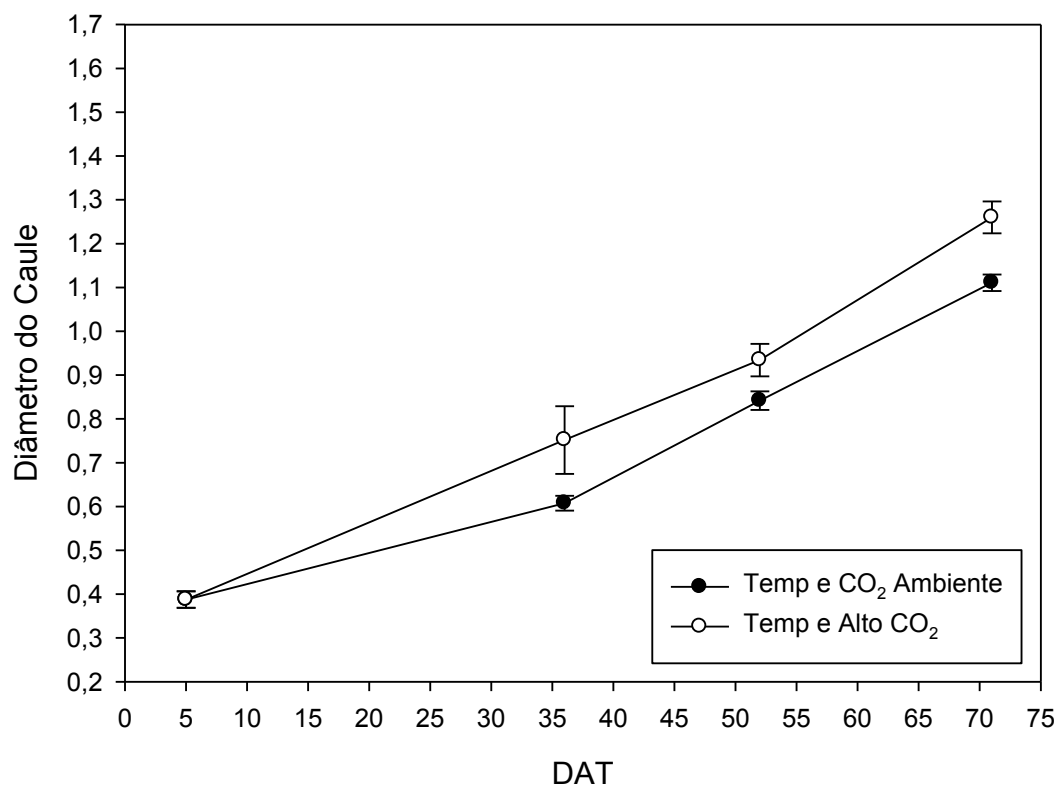


Figura 25 – Variação do diâmetro do caule sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Em relação ao número de folhas e números de ramos, figuras 26 e 27 respectivamente, as plantas não diferenciaram estatisticamente ao longo do experimento quando comparado ambiente com adicional de temperatura e com alto CO₂ e a testemunha com adicional de temperatura.

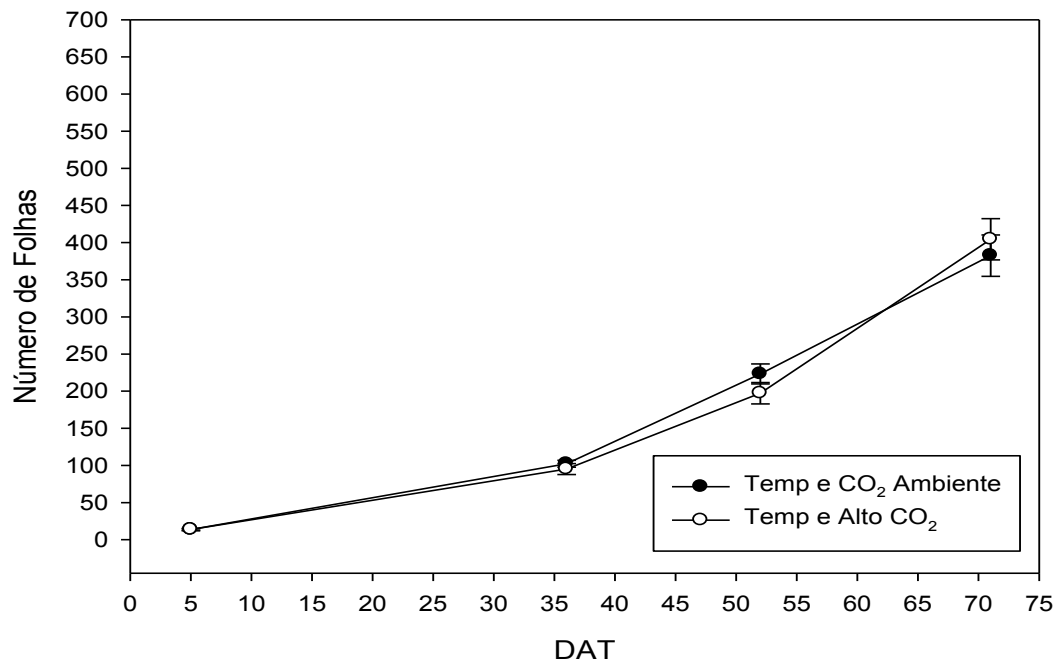


Figura 26 – Variação do número de folhas sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

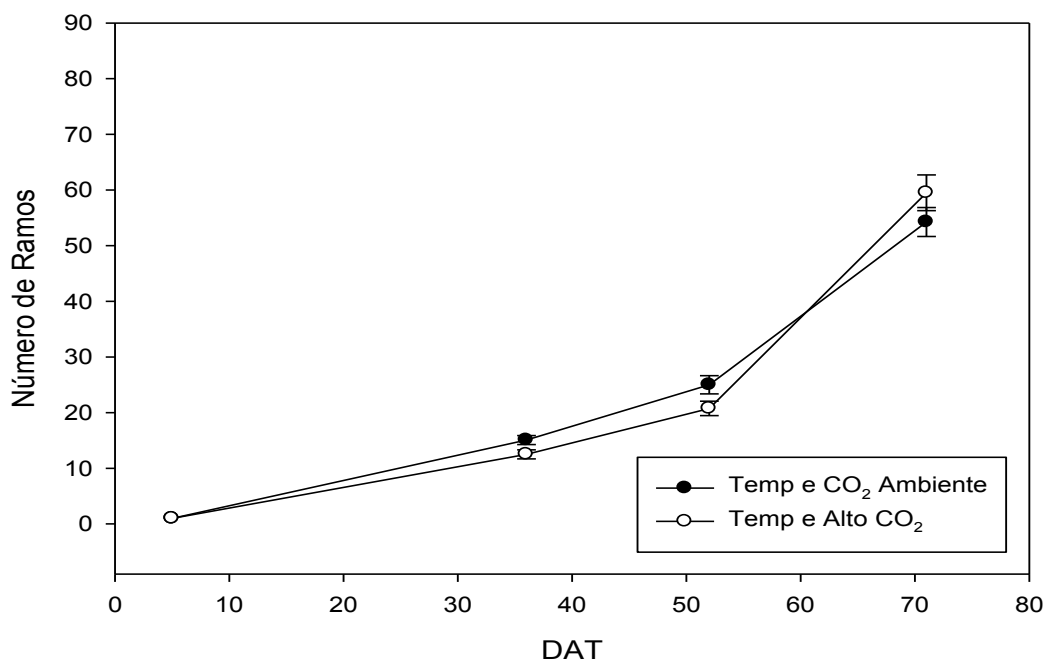


Figura 27 – Variação do número de ramos sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

A figura 28 apresenta a área foliar da planta médio dos tratamentos com enriquecimento de CO₂ com adicional de temperatura e a testemunha com adicional de temperatura ao longo dos dias de experimento, na qual, verificou-se que ao longo de todo o tempo não ocorreu diferença estatística a 5 % de significância para os tratamentos estudados.

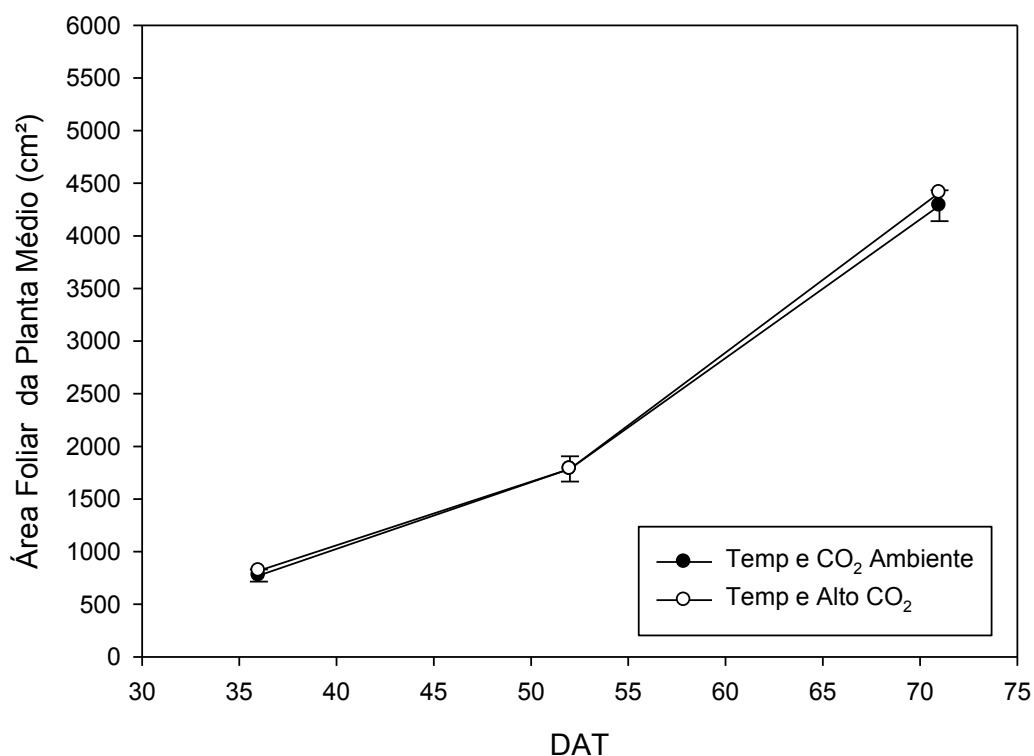


Figura 28 – Variação da área foliar da planta médio sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Sob as análises das medidas morfológicas de biomassa, observou-se tendências semelhantes aos tratamentos da primeira etapa (Alto CO₂ e testemunha). O peso seco total de folhas da planta médio para os tratamentos com enriquecimento de CO₂ e adicional de temperatura não diferenciaram estatisticamente a 5 % de significância quando comparado com a testemunha com adicional de temperatura (Figura 29), no entanto, para o peso seco do caule, foi verificado diferença significativa no final do experimento (DAT 71) obtendo valores médio de 9,8 % superior ao tratamento testemunha com adicional de temperatura (Figura 30).

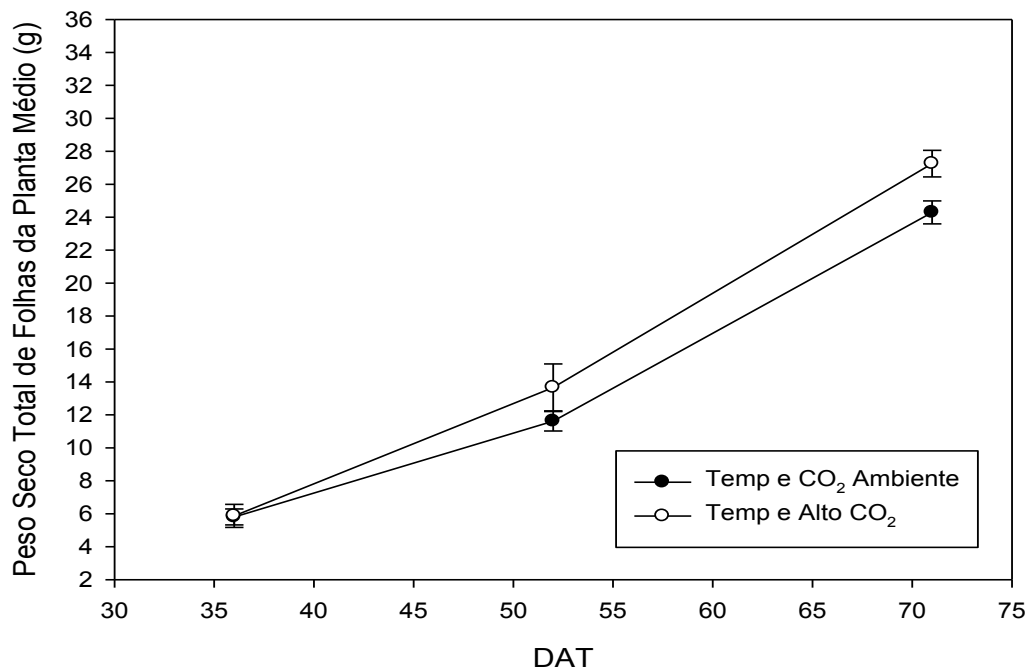


Figura 29 – Variação do peso seco total de folhas da planta médio sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

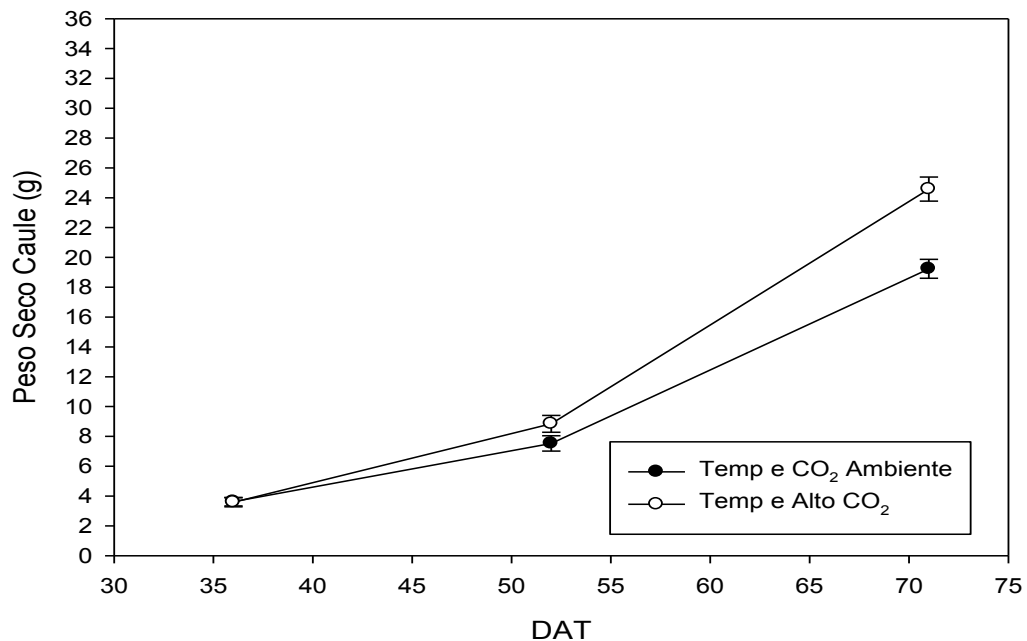


Figura 30 – Variação do peso seco do caule sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Já para o peso seco das raízes (Figura 31), não foi observado diferença significativa entre os tratamentos enriquecido com CO₂ com adicional de temperatura e a testemunha com adicional de temperatura ao longo do tempo.

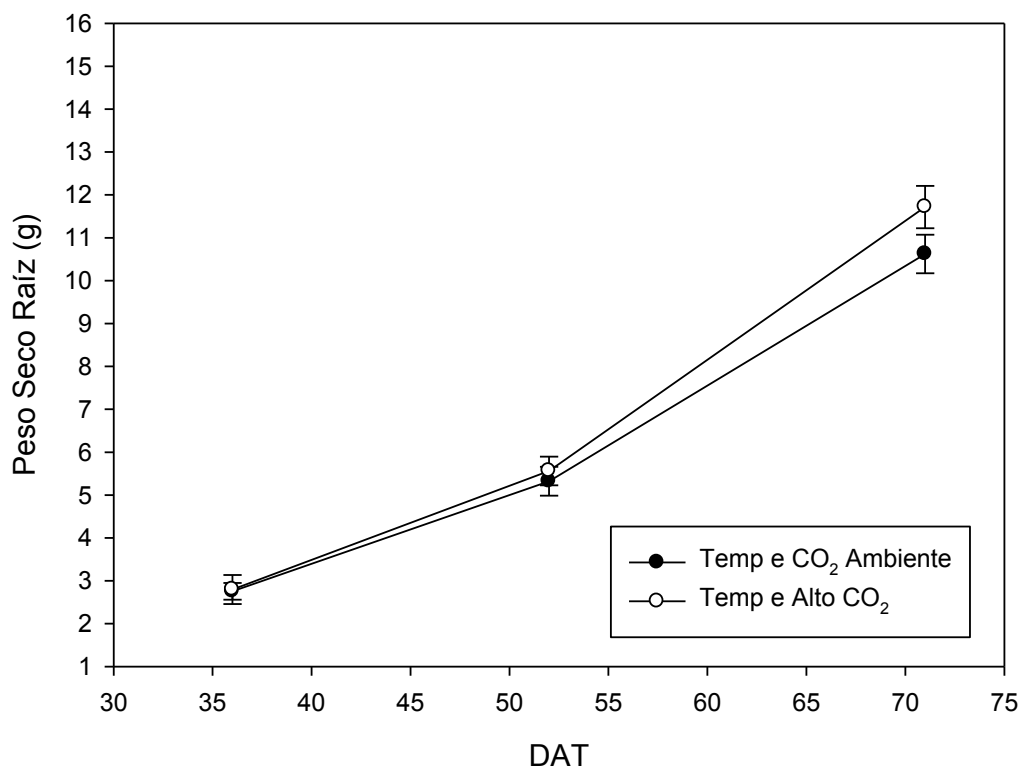


Figura 31 – Variação do peso seco das raízes sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

Quando analisado o peso seco total (Figura 32), verifica-se que o tratamento enriquecido com CO₂ com adicional de temperatura apresentou valores significantes somente no final do experimento (DAT 71), quando comparado com a testemunha com adicional de temperatura, obtendo valor médio de 14,7 % superior.

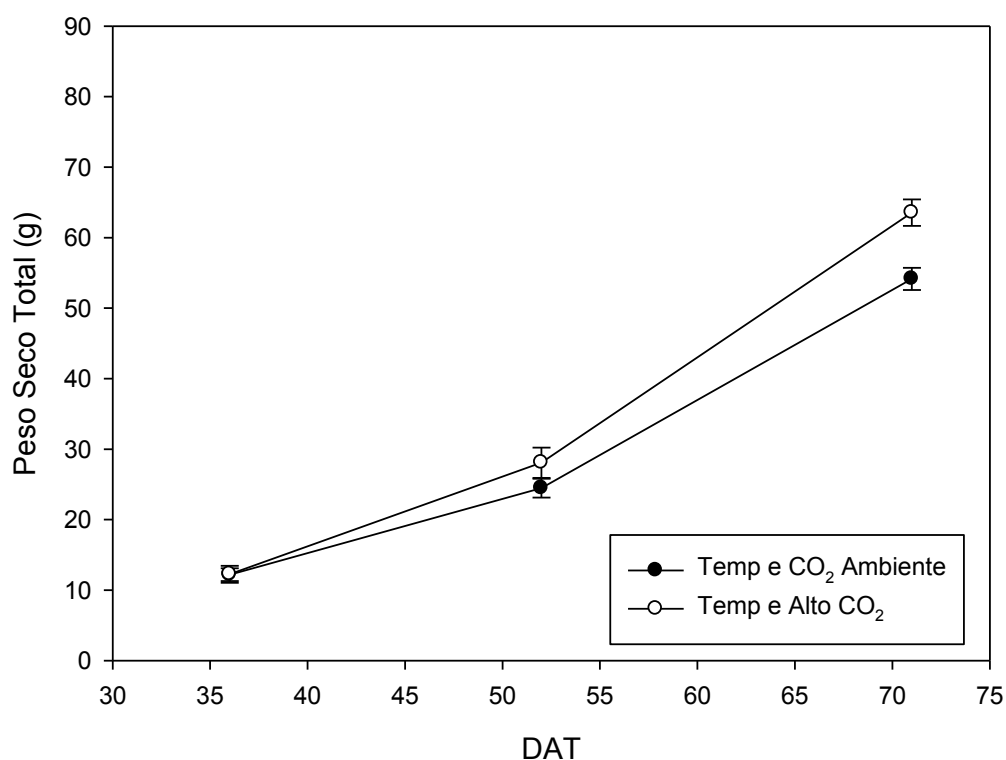


Figura 32 – Variação do peso seco total sob ambiente com temperatura adicional mais enriquecimento de CO₂ e a testemunha com temperatura adicional em diferentes dias (DAT) ao longo do experimento.

5. DISCUSSÃO

5.1. Eficiência do sistema FACE e MINI T-FACE

A concentração média de CO₂ observada ao longo de todo ciclo experimental permaneceu próxima a programada para o sistema MINIFACE (700 ppm) na qual manteve-se em média de 719 ppm (± 110) para o período diurno (das 6:00 às 18:00) na qual correspondia a ocorrência de injeção de CO₂. Para o sistema MINI T-FACE, foi observado a variação média ao longo de todo o período experimental em relação à temperatura ambiente um acréscimo de 1,5 °C, sendo a temperatura média ambiente ao longo do ciclo de 18,7 °C, comprovando a eficiência dos sistemas MINIFACE e MINI T-FACE.

5.2. Efeito do enriquecimento do CO₂

A condutância estomática (Figura 6) não apresentou uma tendência esperada, em que um aumento na concentração de CO₂ promove uma redução na abertura estomática, fato esse observado por diversos autores. Dickson et al. (2000), Hendrey et al. (1999) e Miglietta et al. (2001) estudando ecossistemas florestais com elevadas concentrações de CO₂ (concentração ambiente mais 200 ppm) encontraram redução média de 20 % de condutância estomáticas quando comparado a concentrações ambiente.

Na maioria dos dias analisados ao longo do ciclo experimental (5 de 9) a gs do tratamento enriquecido de CO₂ foi maior que a do tratamento testemunha. O comportamento antagônico na condutância estomática não é manifestado quando as condições climáticas diversas combinam altos valores de temperatura e DPV, com exceção das medidas feitas no início do ciclo experimental. O contrário foi observado para condições atmosféricas intermediárias, ou, quando se verificou os menores valores de temperatura do ar e DPV, uma vez que no experimento as condições hídricas do solo foram mantidas próxima a capacidade máxima de retenção de água, e sabendo do elevado controle estomático das espécies de eucalipto em comparação a outras espécies, é possível que na ausência de limitações de recursos naturais (H₂O, CO₂) e ausência de excesso térmico tenha sido mantido um menor controle estomático para a perda de H₂O (Transpiração) e ganho de CO₂ (Fotossíntese). A condutância estomática ao longo do período experimental permaneceu em torno de 0,4 mol/m²s⁻¹ (±0,1), valor esse semelhante encontrado por Baesso, (2011) em cultivo de eucalipto sob condições de altas concentrações de CO₂ (760 ppm).

Diferentes autores reportam que o eucalipto apresenta uma maior amplitude da abertura estomática em comparação a outras espécies, sendo muito efetivo na limitação da perda de água em condições hidricamente estressantes e mantendo a abertura estomática máxima quando não em ambiente com limitações (PAULA LIMA, 1993).

Verifica-se, contudo, que a taxa fotossintética no tratamento enriquecido com CO₂ foi sempre maior que a testemunha, indicando a maior

difusão de CO₂ para o mesófilo foliar compensando os momentos de maior fechamento estomático. A fotossíntese máxima observada durante o período experimental ocorreu no DAT 46, na qual atingiu-se valores de 38,44 $\mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($\pm 6,11$), obtendo médias superiores de 19,9 % em relação a testemunha. Valores semelhantes foram descritos por Ainsworth, et al. (2005) para estudo de leguminosas e arbustos. Curtis e Wang, (1998) e Medlyn et al., (1999) observaram aumento de 47 % e 51 % da taxa fotossintética respectivamente quando analisado florestas cultivadas sob condições de concentrações elevadas em relação a concentração ambiente.

Quanto a taxa de transpiração, verifica-se que o início do ciclo se mostrou sempre maior para o ambiente enriquecido de CO₂, contudo a partir do DAT 52, constata-se uma tendência oposta, fato não corroborado estatisticamente.

A eficiência intrínseca do uso da água (EiUA) obteve-se valores médios ao longo do período experimental de 76,69 $\mu\text{ mol mol}^{-1}$ ($\pm 15,59$) e 66,32 $\mu\text{ mol mol}^{-1}$ ($\pm 19,94$) para o tratamento com enriquecimento de CO₂ e testemunha respectivamente, na qual foi superior a 13,5 %. Baesso, (2011) em cultivo de eucalipto jovem sob condições de altas concentrações de CO₂ (760 ppm) encontrou valores de EiUA na faixa de 110 $\mu\text{ mol mol}^{-1}$, comprovando o acréscimo da EiUA em plantas sob ambientes enriquecidos com CO₂.

A resposta fotossintética a intensidade lumínica apresentada na figura 10 demonstra ganhos na eficiência quântica (α) e na taxa fotossintética máxima (A_{max}). A eficiência quântica encontrada para ambiente enriquecido de CO₂ foi de 0,0994 $\text{mol C mol}^{-1} \text{PPFD}^{-1}$, superando em 0,0167 $\text{mol C mol}^{-1} \text{PPFD}^{-1}$ em relação a testemunha, verificando-se um ganho importante quando as plantas são submetidas a maiores concentrações de CO₂ ambiente, sendo da ordem de 17 %. Baesso, (2011) trabalhando com eucalipto jovens e adulto e com surtos de alta concentrações de CO₂ não encontrou diferença na eficiência quântica entre as idades, no entanto encontrou-se uma α de 0,0642 $\text{mol C mol}^{-1} \text{PPFD}^{-1}$ e de 0,527 $\text{mol C mol}^{-1} \text{PPFD}^{-1}$ para ambiente enriquecido e testemunha respectivamente, atingindo ganhos na ordem de 18 % para plantas submetidas a alto CO₂.

O ganho na taxa fotossintética máxima pelo enriquecimento do ambiente com CO₂, é da ordem de 32 %, o que permite um aumento em aproximadamente um terço do aproveitamento da irradiância solar nos comprimentos de ondas fotossintéticos.

O efeito do aumento da concentração de CO₂ diurno sobre a respiração noturna foi verificado que o enriquecimento do ambiente com CO₂ tende a reduzir o processo, embora apenas no início do ciclo experimental seja corroborado estatisticamente. A única exceção foi para o DAT 46 onde a tendência é inversa, uma vez que as leituras da respiração foram realizadas no início da noite, ou seja, num intervalo de tempo reduzido da interrupção do fornecimento de CO₂, pode indicar que a difusão do CO₂ pela respiração seja inibida devido a maior concentração ambiente do gás (pressão atmosférica de CO₂). Comportamento inverso observado no DAT 46 pode ser explicado pelo horário da leitura ter sido mais tarde podendo contribuir para concentração de CO₂ nos tratamentos se tornarem semelhantes.

O aumento da concentração de CO₂ ocasionou uma resposta no desenvolvimento das plantas em altura e diâmetro do caule, fato esse demonstrado nas figuras 11 e 12. Para a biomassa seca, notou-se que o enriquecimento de CO₂ corroborou para o desenvolvimento da planta ao longo do tempo, uma vez que o enriquecimento com CO₂ ocasionou maiores taxas fotossintéticas, obtendo diferença no peso seco total ao final do ciclo, sendo 78,9 g (±9,1) e 64,6 g (±7,8) para os tratamentos com enriquecimento de CO₂ e testemunha respectivamente. Apesar do número de folhas e a área foliar não ter diferenciado ao final do experimento entre tratamentos, a biomassa seca de caule, raiz ocasionaram acréscimos significativos, tendo um aumento final de 7,3 g e 3,9 g respectivamente.

5.3. Efeito do enriquecimento do CO₂ em ambiente aquecido

De maneira geral, verifica-se que para o ambiente aquecido a condutância estomática das plantas de eucalipto apresentaram o comportamento esperado, com menores valores quando submetidos a

maiores concentrações de CO₂ atmosférico, sendo a única exceção, o DAT 35 (Figura 21).

A redução na condutância estomática, nesse caso, foi suficiente para impor as plantas em alguns momentos do ciclo experimental uma menor taxa fotossintética no tratamento enriquecido com CO₂ (DAT 25 e 52). Estes eventos correspondem a dias com DPV máximo e temperatura do ar máxima dentre as mais elevadas do experimento. Contudo na maior parte do ciclo experimental a redução imposta na condutância estomática as plantas do tratamento enriquecido com CO₂ não foi o suficiente para uma dedução na produção primária líquida. (Figura 22).

Da mesma forma, mesmo a maior concentração de CO₂ induzindo o menor fechamento dos estômatos na maior parte do experimento, observou-se taxa de transpiração igual ou maior que a testemunha. A exceção observada fora para o DAT 25.

Como observado para a outra campanha (Tratamentos 1 e 3), foi observado uma resposta no desenvolvimento das plantas em altura e diâmetro do caule, fato esse demonstrado nas figuras 24 e 25. Para a biomassa seca, apesar do acréscimo de temperatura notou-se que o enriquecimento de CO₂ corroborou para o desenvolvimento da planta ao longo do tempo, na qual observou diferença no peso seco total ao final do ciclo, sendo 63,5 g ($\pm 6,5$) e 54,1,6 g ($\pm 5,8$) para os tratamentos com enriquecimento de CO₂ mais adicional de temperatura e testemunha mais adicional de temperatura respectivamente. Quando analisado a biomassa, verificou-se que o acréscimo de temperatura prejudicou o crescimento de raízes em ambiente enriquecido com CO₂, não diferenciando da testemunha, no entanto, induziu o desenvolvimento do caule, ocasionando acréscimos finais significativos de 9,4 g para o tratamento em ambiente enriquecido de CO₂ em relação a testemunha.

Schapendonk et al. (2000) e Sicher & Bunce (1999) estudando plantios de batata, relataram um aumento de 27 a 49 % na produtividade de tubérculos quando foi dobrada a concentração de CO₂ (740 ppm). Porém, com a elevação da temperatura do ar, o aumento na produtividade pelo aumento de CO₂ pode não se confirmar, devido principalmente ao encurtamento do ciclo e aumento da respiração vegetal.

Walter et al. (2010) estudando a cultura do arroz, verificaram-se aumento na produtividade quando encontrava-se em condições de alta concentração de CO₂ atmosférico. No entanto, se este aumento na concentração de CO₂ vier acompanhado de aumento na temperatura do ar, o efeito benéfico do CO₂ é anulado pelo efeito negativo das altas temperaturas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A condutância estomática não apresentou uma tendência definida, se opondo ao esperado e amplamente divulgado no meio científico, em que se verifica uma redução nos valores de abertura estomática em ambiente enriquecido com CO₂. Portanto, já se esperaria um aumento da taxa fotossintética com a redução esperada da condutância estomática, neste caso o aumento na condutância implicou em ganhos fotossintéticos maiores. Dessa forma a maior concentração de CO₂ induziu uma maior taxa de transpiração, o que não condiz com o esperado, implicando em redução na eficiência do uso da água. O efeito do CO₂ na resposta das plantas à luz aumentou a eficiência quântica em 17,0 % e os níveis de saturação lumínica em 24,0 %. Pela relação A/gs, que determina a eficiência intrínseca do uso da água (EiUA), é possível analisar melhor o efeito estomático sobre a fotossíntese. No tratamento enriquecido com CO₂ foram encontrados aumento de EiUA, tendo a regulação estomática promovido melhor desempenho nessas condições. O aumento da concentração de CO₂ ambiente foi significativo para a diferenciação de biomassa seco para raiz e caule, favorecendo o melhor desenvolvimento da planta nessas condições.

Quando o ambiente foi aquecido (+2°C) e sob alta concentração de CO₂, verifica-se para as plantas de eucalipto que a condutância estomática, as taxas fotossintéticas e de transpiração apresentaram resultados condizentes com o consenso científico. A diferença do comportamento antagônico entre os efeitos do aumento da concentração do CO₂ e aumento da concentração de CO₂ mais aquecimento deve está relacionada as condições meteorológicas durante o experimento, que abrangeram

temperaturas baixas. Em relação a biomassa, o aumento da concentração de CO₂ favoreceu o seu desenvolvimento, tendo ganhos finais totais.

Quanto ao efeito da temperatura em ambientes enriquecidos de CO₂, verificou-se ao final do experimento uma diferença estatística em relação aos tratamentos enriquecidos com CO₂ ao se comparar os tratamentos sem e com adicional de temperatura (Tratamentos 3 e 4 respectivamente) para condutância estomática e transpiração. O tratamento com maior temperatura apresentou valores inferiores para condutância estomática e superiores para a transpiração quando comparado ao tratamento sem adicional de temperatura, obtendo médias 47,0 % inferiores e 28,1 % superiores respectivamente. Observou-se uma tendência ao tratamento sem adicional de temperatura em apresentar maiores valores de taxas fotossintéticas, no entanto não apresentou diferenças significativas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIDAR, M. P. M.; MARTINEZ, C. A.; COSTA, A. C.; COSTA, P. M. F.; DIETRICH, S. M. C.; BUCKERIDGE, M. S. Effect of atmospheric CO₂ enrichment on the establishment of seedlings of jatoba, *Hymenaea courbaril* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae). **Biota Neotropica**, v. 1, p. 1 - 10, 2002.

AINSWORTH, E. A.; LEAKEY, A. D. B.; ORT, D. R.; LONG, S. P. FACE-ing the facts: Inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply. **New Phytologist**, v. 179, p. 5 – 9, 2008.

AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, v. 165, p. 351 – 371, 2005.

AMEYE, M.; WERTIN, T. M.; BAUWERAERTS, I.; MCGUIRE, M. A.; TESKEY, R. O.; STEPPE, K. The effect of induced heat waves on *Pinus taeda* and *Quercus rubra* seedlings in ambient and elevated CO₂ atmospheres. **New Phytologist**, v. 196, p. 448 – 461, 2012.

ATWELL, B. J.; HENERY, M. L.; BALL, M. C. Does soil nitrogen influence growth, water transport and survival of snow gum (*Eucalyptus pauciflora* Sieber ex Sprengel.) under CO₂ enrichment? **Plant Cell Environment**, v. 32, p. 553 – 566, 2009.

ATWELL, B. J.; HENERY, M. L.; WHITEHEAD, D. Sapwood development in *Pinus radiata* trees grown for three years at ambient and elevated carbon dioxide partial pressures. **Tree Physiology**, v. 23, p. 13 – 21, 2003.

BAESSO, R. C. E. **Efeito Do CO₂ Na Eficiência Quântica Do Eucalipto E Sua Utilização Na Modelagem De Seu Crescimento Pelo 3-Pg**. 2011. 65 f. Tese Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BAESSO, R. C. E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M. P. Impacto das mudanças climática na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, v.20, n.2, p. 335-344, 2010.

BASSHAM, J. A. Mapping the carbon reduction cycle: a personal retrospective. **Photosynthesis Research**, v. 76, p. 35 – 52, 2003.

BENSON, A. A. Following the path of carbon in photosynthesis: A personal story. **Photosynthesis Research**, v. 73, p. 29 – 49, 2002.

BINDI, M.; HACOUR, A.; VANDERMEIREN, K.; CRAIGON, J.; OJANPERÄ, K.; SELLDÉN, G.; HOGY, P.; FINNAN, J.; FIBBI, L. Chlorophyll concentration of potatoes grown under elevated carbon dioxide and/or ozone concentrations. **European Journal of Agronomy**, v. 17, p. 319 - 335, 2002.

BIZI, R. M.; GRIGOLETTI JUNIOR, A.; AUER, C. G.; MAY-DE MIO, L. L. Produtos alternativos no controle do oídio em mudas de eucalipto. **Summa phytopathol.** [online], v.34, n.2, p.144 - 148, 2008.

BRAGA, M. R; AIDAR, M. P. M.; MARABESI, M. A.; GODOY, J. R. L. Effects of elevated CO₂ on the phytoalexin production of two soybean cultivars differing in the resistance to stem canker disease. **Environmental and Experimental Botany**, v. 58, p. 85 - 92, 2006.

BRASSIRIRAD, H., GUSTSCHICK, V.P., LUSSENHOP, J. Root system adjustments: regulation of plant nutrient uptake and growth responses to elevated CO₂. **Oecologia** 126, 305 – 320, 2001.

BROSI, G. B.; MCCULLEY, R. L.; BUSH, L. P.; NELSON, J. A.; CLASSEN, A. T. & NORBY, R. J. Effects of multiple climate change factors on the tall fescue-fungal endophyte symbiosis: infection frequency and tissue chemistry. **New Phytologist**, 189:797 – 805, 2011.

CHAPIN III, F. S.; ZAVALA, E. S.; EVINER, V. T.; TAYLOR, R. L.; VITOUSEK, P. M.; REYNOLDS, H. L.; HOOPER, D. U.; LAVOREL, S.; SALA, O.; HOBBI, S. E.; MACK, M. & DIAZ, S. **Consequences of changing biodiversity.** *Nature*, 405: 234 – 242, 2000.

CO₂NOW. 2014. <http://co2now.org/> (acessado em julho de 2017).

CORNELISSEN, T. Climate change and its effects on terrestrial insects and herbivory patterns. **Neotropical Entomology**, 40:155 - 163, 2011.

CROUS, K. Y.; WALTERS, M. B.; ELLSWORTH, D. S. Elevated CO₂ concentration affects leaf photosynthesis–nitrogen relationships in *Pinus taeda* over nine years in FACE. **Tree Physiology**, v. 28, p.607 – 614, 2008.

CURTARELLI, L. M. N. **Efeitos da interação entre elevada temperatura (+2°C) e elevada concentração (600 ppm) de CO₂ sobre a fisiologia de uma gramínea C₄ (Poaceae) em sistema FACE/T-FACE.** 2013. 49 f. Monografia (Fisiologia Vegetal) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, SP.

CURTIS PS, WANG X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant mass, form, and physiology. **Oecologia** 113: 299 – 313, 1998.

DAMATTA, F. M.; GRANDIS, A.; ARENQUE, B. C.; BUCKERIDGE, M. S. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. **Food Research International**, v. 43, p. 1814 – 1823, 2010.

DICKSON RE, LEWIN KF, ISEBRANDS JG, COLEMAN MD, HEILMAN WE, RIEMENSCHNEIDER DE, SOBER J, HOST GE, HENDREY GR, PREGITZER KS, KARNOSKY DF. Forest Atmosphere Carbon Transfer Storage (FACTS II) – The Aspen Free-air CO₂ and O₃ Enrichment (FACE) project: an overview. **General Technical Report**, NC - 214. St. Paul, MN, USA: USDA Forest Service, North Central Experiment Station, 2000.

GHINI, R.; TORRE-NETO, A., DENTZIEN, A.; BETTIOL, W., PATRÍCIO, F.; GUERREIRO-FILHO, O.; FAZUOLI, L. **Brazilian Coffee Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) Facility: Predicting the Impact of Climate Change.** In: Embrapa Meio Ambiente-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COFFEE SCIENCE, 24., 2012, Costa Rica.[Programme & abstracts...] Costa Rica: Association for Science and Information on Coffee-ASIC, 2012. p. 918 - 92, 2013.

GRAAFF, M.A., VAN GROENIGEN, K.J., SIX, J., HUNGATE, B., VAN KESSEL, C. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO₂: a meta-analysis. **Global Change Biology** 12, 2077-2091, 2006.

HACOUR, A.; CRAIGON, J.; VANDERMEIREN, K.; OJANPERÄ, K.; PLEIJEL, H.; DANIELSSON, H.; HOGY, P.; FINNAN, J.; BINDI, M. CO₂ and ozone effects on canopy development of potato crops across Europe. **European Journal of Agronomy**, v. 17, p. 257 - 272, 2002.

HENDREY GR, ELLSWORTH DS, LEWIN KF, NAGY J. A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO₂. **Global Change Biology** 5: 293 – 309, 1999.

HÖGY, P.; WIESER, H.; KÖHLER, P.; SCHWADORF, K.; BREUER, J.; FRANZARING, J.; MUNTIFERING, R.; FANGMEIER, A. Effects of elevated CO₂ on grain yield and quality of wheat: results from a 3-year free-air CO₂ enrichment experiment, **Plant Biology**, v.11, p. 60 - 69, 2009.

IBÁ. (2016) Indústria Brasileira de Árvores. **Indicadores do setor brasileiro de árvores plantadas**, Ano base 2015. Brasília, 85 p. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>. Acesso em 10 jul. 2017.

INESON, P.; COWARD, P. A.; HARTWIG, H. A. Soil gas fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ beneath *Lolium perenne* under elevated CO₂: The Swiss free air carbon dioxide enrichment experiment. **Plant and Soil**, v. 189, p. 89 - 95, 1998.

IPCC 2013. Summary for policymakers. In: **Climate change 2013: The physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1 – 30.

IPCC 2014. Climate Change 2014: **Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

IPCC - Intergovernmental Panel Climate Change. 2013. **Summary for policymakers**. Disponível em http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf >. Acesso em junho de 2017.

JURAS, I. A. G. M. Mudança do clima: **Principais conclusões do 5º Relatório do IPCC**. Nota técnica. Consultora Legislativa da Área XI Meio Ambiente e Direito Ambiental, Organização Territorial, Desenvolvimento Urbano e Regional. 2013.

KIMBALL, B. A.; PINTER, P. J. JR.; WALL, G. W.; GARCIA, R. L.; LAMORTE, R. L.; JAK, P. M. C.; FRUMAU, K. F. A.; VUGTS, H. F. **Advances in Carbon Dioxide Effects Research, ASA Special Publication**, n. 61, p. 113 – 130, 1997.

KIMBALL, B.A. Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming. **Global Change Biology**, v. 11, p. 2041 - 2056, 2005.

KOSOBRYUKHOV, A. A. Activity of the photosynthetic apparatus at periodic elevation of CO₂ concentration. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 56, p. 8 – 16, 2008.

LAM, S. K.; HAN, X.; LIN, E.; NORTON, R.; CHEN, D. Does elevated atmospheric carbon dioxide concentration increase wheat nitrogen demand and recovery of nitrogen applied at stem elongation? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 155, p. 142 – 146, 2012.

LEAKEY, A. D. B.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J.; ALISTAIR, R.; LONG, S. P.; ORT, D. R. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, apr. 2009.

LEWIN, K. F.; HENDREY, G. R.; NAGY, J.; LAMORTE, R. L. Design and application of a free-air carbon dioxide enrichment facility. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 70, p. 15 - 29, 1994.

LIBERLOO, M.; CALFAPIETRA, C.; LUKAC, M.; GODBOLD, D.; LUO, Z. B. Woody biomass production during the second rotation of a bio-energy Populus plantation increases in a future high CO₂ world. **Global Change Biology**, v. 12. p. 1094 – 1106, 2006.

LIMA, W. P. **Impacto Ambiental do Eucalipto**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1996.

LI, Y.; LIN, E.; HAN, X.; PENG, Z.; WANG, W.; HAO, X.; JU, H. Effects of elevated carbon dioxide concentration on nitrous oxide emissions and nitrogen dynamics in a winter-wheat cropping system in northern China. **Mitig Adapt Strateg Glob Change**, p. 1 - 14, 2013.

MIGLIETTA, F.; PERESSOTTI, A.; VACCARI F.P.; ZALDEI, A.; DEANGELIS, P.; SCARASCIAMUGNOZZA, G. Free-air CO₂ enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. **New Phytologist**, v. 150, p. 465 – 476, 2001.

MANCHON, F. T. **Efeitos do elevado nível de CO₂ e de elevada temperatura na taxa respiratória do solo cultivado com plantas de *Panicum Maximum* Jacq. cv Mombaça e *Stylosanthes capitata* Vogel cv. Campo Grande em sistema MiniFACE**. 2013. 37 f. Monografia (Fisiologia Vegetal) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, SP.

MANDERSCHIED R.; PACHOLSKI, A.; FRÜHAUF, C.; WEIGEL, H.J. Effects of free air carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth and yield of winter barley cultivated in a crop rotation. **Field Crops Research**, v. 110, p. 185 – 196, 2009.

MANTOVANI, M.; RUSCHEL, A. R.; REIS, M. S.; PUCHALSKI, A.; NODARI, R. O. Fenologias reprodutivas de espécies arbóreas em uma formação secundária da Floresta Atlântica. **Revista Árvore**, v.27, p.451 - 458, 2003.

MARTINEZ, C. A.; BIANCONI, M.; SILVA, L., APPROBATO, A.; LEMOS, M.; SANTOS, L.; CURTARELLI, RODRIGUES, A.; MELLO, T.; MANCHON, F. Moderate warming increases PSII performance, antioxidant scavenging systems and biomass production in *Stylosanthes capitata* Vogel. **Environmental and Experimental Botany**, v. 102, p. 58 - 67, 2014.

MEDLYN BE, BADECK FW, DEPURY DGG, BARTON CVM, BROADMEADOW M, CEULEMANS R, DEANGELIS P, FORSTREUTER M, JACH ME, KELLOMÄKI S, LAITAT E, MAREK M, PHILIPPOT S, REY A, STRASSEMAYER J, LAITINEN K, LIOZON R, PORTIER B, ROBERTNTZ R, WANG K, JARVIS P.G. Effects of elevated [CO₂] on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. **Plant, Cell & Environment** 22: 1475 – 1495, 1999.

MIGLIETTA F, PERESSOTTI A, VACCARI FP, ZALDEI A, DEANGELIS P, SCARASCIA-MUGNOZZA G. Free-air CO₂ enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. **New Phytologist** 150: 465 – 476, 2001.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A Cultura do Eucalipto no Brasil** – Eucalypt Cultivation in Brazil. Sociedade Brasileira de Silvicultura. São Paulo. 2000. 112p.

NORBY, R.J., WULLSCHLEGER, S.D., GUNDERSON, C.A., JOHNSON, D.W., CEULEMANS, R. Tree responses to rising CO₂ in field experiments: implications for the future forest. **Plant, Cell and Environment** 22, 683 - 714, 1999.

PAULA LIMA, W. **Impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2ª edição, 1993.

PALMROTH, S.; KATUL, G. G.; MAIER, C. A.; WARD, E.; MANZONI, S.; VICO, G. On the complementary relationship between marginal nitrogen and water-use efficiencies among *Pinus taeda* leaves grown under ambient and CO₂-enriched environments. **Annals of Botany**, v. 111, p. 467 – 477, 2013.

PIMENTEL, C. A. **Relação da planta com a água**. Seropédica, Rio de Janeiro: EDUR, 2004. 192p.

PIMENTEL, C. Metabolismo de carbono de plantas cultivadas e o aumento de CO₂ e de O₃ atmosférico: situação e previsões. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p. 1 - 12, 2011.

RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; EVANGELISTA, R. C.; ALMEIDA, A. Q.; OLIVEIRA, A. S.; OLIVEIRA, R. A.; HAMAKAWA, P. J.; SILVA, M. P. **Eucalipto**. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Org.). *Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. 1. ed. Brasília, DF: INMET, 2009. p.407 - 424.

ROGERS, A.; ALLEN, D. J.; DAVEY, P. A.; MORGAN, P. B.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J.; CORNIC, G.; DERMODY, O.; DOHLEMAN, F. G.; HEATON, E. A.; MAHONEY, J.; ZHU, X-G.; DELUCIA, E. H.; ORT, D. R.; LONG, S. P. Leaf photosynthesis and carbohydrate dynamics of soybeans grown throughout their life-cycle under Free-Air Carbon dioxide Enrichment. **Plant, Cell and Environment**, v. 27, p. 449 - 458, 2004.

SAGE, R. F. Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO₂. The gas exchange perspective. **Photosynthesis Research**, v. 39, p. 351–368, 1994.

SCHAPENDONK, H.C.M. VAN OIJEN, M., DIJKSTRA, M., POT, S.C., JORDI, W.J.R.M., STOOPEN, G.M. Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthetic acclimation and productivity of two potato cultivars grown in open-top chambers. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.27, p.1119 - 1130, 2000.

SICHER, R.C.; BUNCE, J.A. Photosynthetic enhancement and conductance to water vapor of field-grown *Solanum tuberosum* (L.) in response to CO₂ enrichment. **Photosynthesis Research**, v.62, p.155 - 163, 1999.

Sociedade Botânica de São Paulo - SBSP. **As Florestas tropicais e as mudanças climáticas**. Disponível em: <www.botanicasp.org.br>. Acesso em: 10 jun. 2017.

SOUZA, A. P.; GASPAR, M.; SILVA, E. A.; ULIAN, E. C.; WACLAWOSKY, A. J.; NISHIYAMA JR., M. Y.; SANTOS, R. V.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant Cell Environment**, v. 31, p. 1116 - 1127, 2008.

SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBERO, A.; LOUREIRO, R. S. & BISPO, C. J. C. Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 16: 87 – 95, 2008.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 9, p. 1351 - 1359, set. 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG: Universidade Federa de Viçosa, 1991. 448 p.

VURRO, E.; BRUNI, R.; BIANCHI, A.; TOPPI, L. S. Elevated atmospheric CO₂ decreases oxidative stress and increases essential oil yield in leaves of *Thymus vulgaris* grown in a mini-FACE system. **Environmental and Experimental Botany**, v. 65, n.1, p. 99 - 106, 2009.

WALTER, L. C.; STRECK, N. A.; ROSA, H. T.; KRUGER, C. A. M. B. Mudança climática e seus efeitos na cultura do arroz. **Ciência Rural**, v. 40, n. 11, nov. 2010.

WANG, D., HECKATHORN, S., WANG, X., PHILPOTT, S. 2012. A meta-analysis of plant physiological and growth responses to temperature and elevated CO₂. **Oecologia**, 169, 1 - 13.

WEIGEL, H.J.; MANDERSCHIED, R. Crop growth responses to free air CO₂ enrichment and nitrogen fertilization: Rotating barley, ryegrass, sugar beet and wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 43, p. 97 - 107, 2012.

WERTIN, T, M.; MCGUIRE, M. A.; TESKEY, R. O. The influence of elevated temperature, elevated atmospheric CO₂ concentration and water stress on net photosynthesis of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) at northern, central and southern sites in its native range. **Global Change Biology**, v. 16, p. 2089 – 2103, 2010.

WILLIAMS, J.; WOINARSKI, J. **Eucalypt Ecology**: Individuals to Ecosystems. Cambridge University Press.1997. 430p.

WITTIG, V. E.; BERNACCHI, C. J.; ZHU, X.; CALFAPIETRA, C.; CEULEMANS, R.; DEANGELIS, P.; GIELEN, B.; MIGLIETTA, F.; MORGAN, P. B.; LONG, S. P. Gross primary production is stimulated for three *Populus* species grown under free-air CO₂ enrichment from planting through canopy closure. **Global Change Biology**, v. 11, p. 644 – 656, 2005.