

ISABELA MIRIAN DOS SANTOS BARROS

**CRESCIMENTO E ASPECTOS FISIOLÓGICOS DO EUCALIPTO EM RESPOSTA
ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM SISTEMA MINI-FACE**

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

Orientador: Wagner Luiz Araújo

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

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

T

B277c
2022
Barros, Isabela Mirian dos Santos, 1989-
Crescimento e aspectos fisiológicos do eucalipto em
resposta às mudanças climáticas em sistema mini-FACE /
Isabela Mirian dos Santos Barros. – Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (43 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Wagner Luiz Araújo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2022.
Referências bibliográficas: f. 38-43.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.395>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Crescimento (Plantas). 2. Fisiologia vegetal. 3. Mudanças
climáticas. 4. Eucalipto. 5. Dióxido de carbono atmosférico.
6. Temperatura atmosférica. 7. Déficit hídrico. I. Araújo, Wagner
Luiz, 1980-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Meteorologia Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 571.467

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB6/2552

ISABELA MIRIAN DOS SANTOS BARROS

**CRESCIMENTO E ASPECTOS FISIOLÓGICOS DO EUCALIPTO EM RESPOSTA
ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM SISTEMA MINI-FACE**

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

APROVADA: 07 de abril de 2022.

Assentimento:


Isabela Mirian dos Santos Barros
Autora


Wagner Luiz Araújo
Orientador

À minha filha Helena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e a oportunidade de realizar esse sonho. Graças ao seu amor, até mesmo os obstáculos se tornaram dádivas, pois me ensinaram as maiores lições.

À minha filha Helena. Você é a resposta de todas as minhas orações. De todas as coisas que as minhas mãos já tocaram, você é de longe a mais especial. Você me faz querer procurar todos os dias a minha melhor versão. Te amo incondicionalmente.

À minha mãe Solange e meu padrasto Janduir, por me fortalecer dia-a-dia com inúmeras palavras de afeto.

Ao meu companheiro Rafael, por todo amor e resiliência. Por me encorajar. Suas palavras me fizeram acreditar que tudo seria possível.

Ao meu orientador Wagner L. Araújo por toda paciência, carinho e otimismo. Agradeço os ensinamentos, a confiança e a contribuição com meu crescimento profissional.

À professora Hewlley Maria Acioli pela disponibilidade em participar da banca de defesa.

Aos professores do programa de pós-graduação em Meteorologia Aplicada.

À amiga Franciele Oliveira, por toda ajuda, conversas e todo conhecimento compartilhado durante as inúmeras horas de trabalho em campo. Você é um exemplo de profissional!

Ao meu Tio Edmilson e meu sogro Lino.

Ao engenheiro elétrico Robert, por toda contribuição e comprometimento com o trabalho.

À secretária do Programa de Pós-graduação em Meteorologia Agrícola Graça Freitas.

Aos meus amigos de pós-graduação Pedro Thiago, Youlia e Mathias que me deram o suporte emocional necessário para este processo.

Aos colegas da UCP que ajudaram nas coletas, em especial Gabriel, Debora e Wesley.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de

Financiamento 001 e das agências de fomento CNPq e FAPEMIG bem como da empresa CELULOSE Nipo Brasileira CENIBRA S.A.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização do mestrado e estruturação disponibilizada

Por fim, todos que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos

“É o meu desejo mais sério que alguns de vocês continuem a fazer o trabalho científico e mantenham a ambição e a determinação de fazer uma contribuição permanente para a ciência.”

(Marie Curie)

RESUMO

BARROS, Isabela Mirian dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2022. **Crescimento e aspectos fisiológicos do eucalipto em resposta às mudanças climáticas em sistema mini-FACE.** Orientador: Wagner Luiz Araújo.

A área plantada com espécies arbóreas vem crescendo significativamente nos últimos anos e, no Brasil, o principal gênero utilizado é o *Eucalyptus*. Com efeito, o desenvolvimento satisfatório da cultura é dependente de diversos fatores incluindo a concentração de dióxido de carbono [CO₂], a disponibilidade hídrica e a temperatura. Cumpre mencionar que o [CO₂], um dos principais gases de efeito estufa que permanecem na atmosfera, alcançou níveis recordes em 2021. Registre-se que, para o final deste século, é esperada uma [CO₂] de aproximadamente 985 ppm, valor que representa mais que o dobro da concentração atual, devido, em larga escala, à dependência dos combustíveis fósseis e à taxa de crescimento da população mundial. O aumento na [CO₂] promove, em geral, um aumento na taxa fotossintética que culmina em ganhos de biomassa e, ao mesmo tempo, está associado à redução na condutância estomática, que leva a uma menor demanda hídrica e a aumentos na eficiência no uso da água. Cumpre mencionar também que incrementos na [CO₂] atmosférica estão intimamente associados ao aquecimento global levando, como consequência, a aumentos na temperatura, aumentando a fotorrespiração e reduzindo o ganho líquido de carbono em plantas C3. Neste contexto, são necessários estudos acoplando as respostas vegetais e previsão agrícola frente às mudanças climáticas e variações na [CO₂], na disponibilidade hídrica e na temperatura. Portanto, este trabalho teve por objetivo, avaliar o crescimento de árvores jovens de eucalipto submetidas a um ambiente com enriquecimento de [CO₂] e de elevação da temperatura por sessenta dias em dois períodos distintos durante o ano de 2021 especificadamente (i) junho a agosto (período com temperaturas mais amenas e menor ocorrência de precipitações) e (ii) outubro a dezembro (período com temperaturas mais quentes e maior disponibilidade hídrica). O experimento foi conduzido utilizando-se dois clones de eucalipto. Os resultados foram apresentados analisando-se o efeito isolado do aumento da [CO₂], o efeito do aumento da [CO₂] com deficiência hídrica e o efeito do aumento da [CO₂] em ambiente aquecido. Ao longo do período de exposição aos tratamentos foram realizadas análises fisiológicas e

biológicas. Foi possível observar um menor crescimento em resposta ao aquecimento, ao passo que o aumento na [CO₂] contribuiu positivamente para o crescimento e acúmulo de biomassa. Com efeito, foi observado uma mitigação dos impactos negativos causados pela alta temperatura e pela deficiência hídrica em resposta à elevada [CO₂]. Em síntese, é plausível sugerir que em condições de mudanças climáticas globais, nas quais aumentos na [CO₂] associados com aumentos na temperatura atmosférica e em condições de limitada disponibilidade hídrica serão recorrentes, respostas aclimatativas irão ocorrer de modo a contribuir para a manutenção do crescimento e das taxas fotossintética em plantas jovens de eucalipto.

Palavras-chave: Crescimento vegetal. Mudanças climáticas globais. *Eucalyptus*. Alto [CO₂]. Temperatura. Deficiência hídrica.

ABSTRACT

BARROS, Isabela Mirian dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April 2022. **Growth and physiological aspects of eucalyptus in response to climate changes in a mini-FACE system.** Adviser: Wagner Luiz Araújo.

The area planted with tree species has been growing significantly in recent years and, in Brazil, the main genus used is Eucalyptus. Indeed, the satisfactory development of the culture is dependent on several factors including the concentration of carbon dioxide [CO₂], water availability and temperature. It should be mentioned that [CO₂], one of the main greenhouse gases remaining in the atmosphere, reached record levels in 2021. It should be noted that, by the end of this century, an [CO₂] of approximately 985 ppm is expected, a value that represents more than double the current concentration, due, on large scale, to the dependence on fossil fuels and the growth rate of the world population. The increase in [CO₂] promotes, in general, an increase in the photosynthetic rate that culminates in biomass gains and, at the same time, is associated with a reduction in stomatal conductance, which leads to lower water demand and increases in water use efficiency. It should also be mentioned that increases in atmospheric [CO₂] are closely associated with global warming, leading as a consequence, to increases in temperature, increasing photorespiration and reducing net carbon gain in C3 plants. In this context, studies linking plant responses and agricultural forecasting to climate change and variations in [CO₂], water availability and temperature are needed. Therefore, this work aimed to evaluate the growth of young eucalyptus trees subjected to an environment with [CO₂] enrichment and temperature elevation for sixty days in two different periods during the year 2021, specifically (i) June to August (period with milder temperatures and less rainfall) and (ii) October to December (period with warmer temperatures and greater water availability). The experiment was conducted using two eucalyptus clones. The results were presented by analyzing the isolated effect of increasing [CO₂], the effect of increasing [CO₂] with water deficit and the effect of increasing [CO₂] in a heated environment. During the period of exposure to the treatments, physiological and biological analyzes were performed. It was possible to observe a lower growth in response to warming, while the increase in [CO₂] contributed positively to the growth and accumulation of biomass. Indeed, a mitigation of the negative impacts caused by high temperature and water

deficiency was observed in response to high [CO₂]. In summary, it is plausible to suggest that under conditions of global climate changes, in which increases in [CO₂] associated with increases in atmospheric temperature and under conditions of limited water availability will be recurrent, acclimatization responses will occur in order to contribute to the maintenance of growth and photosynthetic

Keywords: Plant Growth. Global Climate Change. Eucalyptus. High [CO₂]. Temperature.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – Fotossíntese Líquida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Al – Alumínio
Ca – Cálcio
cm – Centímetros
 cm^2 – Centímetros Quadrado
 CO_2 – Dióxido de Carbono
Cu – Cobre
Cwa – Clima Temperado Quente-mesotérmico
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
 g_s – Condutância Estomática ($\text{mol/m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
H – Hidrogênio
h – Hora
IPCC – Intergovernmental Panel Climate Change
K – Potássio
Kg – Quilogramas
L – Litros
m – Metros
M.O – Matéria Orgânica
Mg – Magnésio
MG – Minas Gerais
mm – Milímetro
Mn – Manganês
N – Nitrogênio
NOAA – National Oceanic Atmospheric Administration
P – Fósforo
pH – Potencial Hidrogeniônico
ppm – Partes por Milhão

P-Rem – Fósforo Remanescente

PVC – Policloreto de polivinila

s – Segundos

S – Sul

SB – Soma de Bases trocáveis

T – Capacidade de Troca Catiônica

t – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva

UFV – Universidade Federal de Viçosa

V – Índice de Saturação por bases

W – Oeste

Zn – Zinco

% – Porcentagem

° C – Graus Celsius

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química do solo no período de 18 de junho de 2021 a 18 de agosto de 2021.	23
Tabela 2. Caracterização química do solo, no período de 11 de outubro de 2021 a 11 de dezembro de 2021.	24
Tabela 3. Relação de sensores instalados na estação meteorológica.	27
Tabela 4. Variação dos parâmetros de trocas gasosas investigados que incluem (A) Taxa fotossintética. (C) Concentração interna de CO ₂ . (g _s) Condutância estomática. (E) transpiração foliar.	33
Tabela 5. Análise dos parâmetros das plantas sob os tratamentos ao longo do período experimental 1. Os parâmetros investigados incluem (A) Altura. (B) Biomassa das Folhas. (C) Biomassa dos Ramos. (D) Número da folha. (E) Diâmetro do caule. (F) Área foliar. As médias (n=5 ±SE) seguidas de letras diferentes foram determinadas pelo teste de Tukey para serem estatisticamente diferentes (<i>P</i> < 0,05). As letras maiúsculas comparam os clones dentro de cada tratamento. Letras minúsculas comparam tratamentos dentro de cada clone.	35
Tabela 6. Análise dos parâmetros das plantas sob os tratamentos ao longo do período experimental 2. Os parâmetros investigados incluem (A) Altura. (B) Biomassa das Folhas. (C) Biomassa dos Ramos. (D) Número da folha. (E) Diâmetro do caule. (F) Área foliar. As médias (n=5 ±SE) seguidas de letras diferentes foram determinadas pelo teste de Tukey para serem estatisticamente diferentes (<i>P</i> < 0,05). As letras maiúsculas comparam os clones dentro de cada tratamento. Letras minúsculas comparam tratamentos dentro de cada clone.	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 O Eucalipto.....	18
2.2 Sistema FACE.....	18
2.3 Mudanças climáticas e relação temperatura e dióxido de carbono.....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 Localização e clima da área experimental.....	21
3.2 Características dos solos e transplântio das mudas.....	22
3.3 Aplicações dos tratamentos e delineamento estatístico.....	25
3.4 Sistema MINIFACE e MINI T-FACE.....	26
3.5 Dados Meteorológicos.....	27
3.6 Medidas Fisiológicas.....	28
3.7 Medidas Biométricas.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1 Análises Meteorológicas.....	30
4.2 Análises Fisiológicas.....	32
4.3 Análises Morfológicas e de Biomassa.....	34
5. CONCLUSÕES.....	37
6. REFERÊNCIAS.....	38

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas induzidas pelo ser humano estão causando perturbações perigosas e generalizadas na natureza e afetando a vida de bilhões de pessoas em todo o mundo. Ao mesmo tempo para as próximas décadas são esperados o aquecimento de 1,5°C e 2,0°C, se não houver forte e profunda redução nas emissões de [CO₂] e outros gases de efeito estufa (IPCC, 2022).

Globalmente, as emissões de GEE aumentaram ao longo da última década, atingindo 59 gigatoneladas de [CO₂] em 2019 – cerca de 12% a mais do que em 2010 e 54% a mais que em 1990. Porém, nas trajetórias modeladas no estudo, compatíveis com a meta de 1,5°C do Acordo de Paris (com ou sem excedente), as emissões de GEE precisam parar de crescer em 2025 e depois cair 43% até 2030 (em relação aos níveis de 2019).

Durante os últimos 20 milhões de anos de sua história evolutiva, os vegetais nunca experimentaram tamanha intensificação na concentração de dióxido de carbono ([CO₂]) (PEARSON & PALMER, 2000). Registre-se que, para o final deste século a [CO₂] pode alcançar valores próximos a 985 ppm, o que representa mais que o dobro da concentração atual.

Em adição, segundo a Administração Oceânica e Atmosférica Nacional - NOAA, em 2021, o observatório Mauna Loa no Havaí, considerado um dos principais pontos de amostragem de referência devido a sua localização isolada e longe de fontes poluente, registrou o nível recorde de 419 ppm, mesmo com o declínio temporário de novas emissões ocasionado pela pandemia de Covid-19. Cabe ressaltar que este número representa a maior [CO₂] na Terra desde os primeiros registros da existência humana e as principais causas deste aumento estão associadas às atividades antrópicas como queima de combustíveis fósseis e desmatamento. Registre-se, ainda, que o [CO₂] permanece mais tempo na atmosfera e, portanto, seus efeitos são mais difíceis de neutralizar.

Como consequência do aumento na concentração atmosférica dos gases de efeito estufa, verifica-se alterações significativas nos padrões climáticos. As mudanças no clima em função dos níveis atuais de [CO₂] e a continuação dessas emissões, que vem se intensificando com o tempo, indica que as gerações futuras sofrerão impactos severos nos padrões climáticos com temperaturas crescentes, climas extremos, estresse hídrico por excesso e falta de água, aumentos nos níveis

dos mares e perturbações nos ecossistemas marinhos e terrestres (JURAS, 2013). Como exemplo destes efeitos destacam-se a concentração das chuvas em menores números de eventos, secas mais intensas e a ocorrência com maior frequência de veranicos e seu prolongamento durante as estações chuvosas.

Incrementos na $[CO_2]$ atmosférica estão intimamente associados ao aquecimento global (KÖRNER, 2006; KIMBALL et al., 1993) levando, como consequência, a aumentos na temperatura. Numa retroalimentação de causa e efeito observa-se, também, aumentos na amplitude térmica e eventos de maior e mais intensas ondas de calor. Tais efeitos impactam diretamente não somente a produção primária de ecossistemas naturais, mas também o desenvolvimento de culturas agrícolas e florestais por promoverem mudanças significativas em vários processos vegetais incluindo o metabolismo das plantas (BROSI et al. 2011; CORNELISSEN, 2011).

Cumprе mencionar, portanto, que, em função das alterações no desenvolvimento vegetal ocasionadas pela elevação na $[CO_2]$ e na temperatura, tais fatores são alvo de intensos estudos cujo objetivo maior inclui prever o comportamento vegetal em um cenário de mudanças climáticas. Neste sentido, o enriquecimento de $[CO_2]$ é capaz de promover efeitos significativos sobre o metabolismo e desenvolvimento vegetal, justificando assim inúmeros estudos relacionados à avaliação do comportamento vegetal sob elevada concentração de $[CO_2]$ (WERTIN et al., 2010; AMEYE et al., 2012; PALMROTH et al., 2013).

Os plantios comerciais de espécies florestais aumentaram nas últimas décadas e, dentre essas espécies, o eucalipto se destaca devido a rapidez na produção de madeira, agregando valor econômico, nestas que são as madeiras mais plantadas em todo o mundo para papel e celulose, madeira e bioenergia (ALMEIDA; RIBEIRO; LEITE, 2013; PLASENCIA et al., 2016). O plantio de florestas no Brasil tem grande importância ambiental e econômica apresentando papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas, pela fixação de carbono pelas florestas e pela geração de 3,75 milhões de empregos (IBÁ, 2020). Com efeito, o Brasil destaca-se na produção de florestas de eucalipto, com plantio de 6,97 milhões de hectares e produtividade média de $35,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (IBÁ, 2020). A alta produtividade alcançada nos plantios de eucalipto é resultado de pesquisas em diversas áreas tais como solos e nutrição, melhoramento genético, climatologia, somada a alta tecnologia empregada

nos tratos silviculturais e ao clima favorável no Brasil como um todo (Freitas et al. 2020).

Elementos meteorológicos tais como, temperatura do ar, umidade relativa e radiação solar influenciam diretamente diferentes aspectos da fisiologia vegetal, incluindo as taxas fotossintéticas, condutância estomática e transpiração das culturas, razão entre concentração interna e externa de $[CO_2]$ e eficiência do uso da água. Assim, uma maior compreensão acerca do comportamento desses elementos meteorológicos contribui significativamente para elucidar as respostas da produtividade sob as sazonalidades climáticas.

A resposta das plantas à elevação na $[CO_2]$ é, ainda, uma incógnita, sobretudo em nível de planta inteira. A maioria dos estudos buscando a compreensão das interações da planta em ambiente com alta $[CO_2]$ utiliza o enriquecimento de $[CO_2]$ ao ar livre (FACE). Não obstante, os resultados obtidos nem sempre são condizentes com a realidade (FODOR et al., 2017) e, portanto, estudos acoplando as respostas vegetais e previsão agrícola, particularmente na cultura do eucalipto frente às mudanças climáticas, são ainda necessários.

Diante da importância econômica da cultura de eucalipto para o Brasil e os possíveis impactos da mudanças climáticas na sua produtividade, o presente trabalho teve como objetivo investigar o desenvolvimento e comportamento de árvores jovens de eucalipto em ambientes enriquecido com $[CO_2]$ e aquecimento, utilizando sistemas MINIFACE e T-FACE em dois períodos distintos ao longo do ano de 2021.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Eucalipto

Originário da Austrália e da Indonésia, o Eucalipto pertence à família Myrtaceae com mais de 800 espécies, sendo amplamente distribuído não apenas em regiões tropicais e equatoriais mas até mesmo em condições subtropicais e semi-áridas (LIMA, 1996). Uma vez no território brasileiro, o Eucalipto encontrou ótimas condições edafoclimáticas para se desenvolver, com crescimento mais rápido que nos demais países e alto índice de produtividade. Com efeito, esta espécie apresenta metabolismo C3 e, assim, incrementos na [CO₂] irão potencialmente aumentar a fotossíntese, uma vez que a atual [CO₂] não ainda é suficiente para saturar a enzima Rubisco, responsável pela fixação do [CO₂] (AIDAR et al., 2002).

2.2 Sistema FACE

As repostas a incrementos na [CO₂] tem sido amplamente investigada atualmente em plantas e uma das metodologias utilizadas baseia-se no uso de sistemas de enriquecimento de [CO₂] ao ar livre (FACE, do inglês Free Air CO₂ enrichment). Por meio do uso desse sistema, a [CO₂] é elevada em um ambiente natural e aberto, possibilitando-se a realização de estudos diretamente no campo e reduzindo-se possíveis impactos indesejados às plantas. Cabe mencionar também que esse sistema é utilizado, com sucesso, desde a década de 80 nos Estados Unidos e Europa (HENDREY, KIMBALL, 1994). A tecnologia FACE não usa estruturas de confinamento e, ao invés disso, uma série de tubos de ventilação verticais ou horizontais são utilizados para liberar jatos de ar enriquecido com [CO₂] puro na periferia dos lotes de vegetação.

Embora resultados interessantes são normalmente obtidos com o sistema FACE, algumas desvantagens incluindo o alto custo para a realização dos experimentos são também evidentes. Com efeito, uma alternativa amplamente adotada, buscando-se minimizar os gastos, são os sistemas mini-FACE. Essa tecnologia permite a realização de experimentos envolvendo mudanças climáticas em áreas relativamente menores, reduzindo sobretudo a necessidade de investimentos

(MIGLIETTA et al., 2001). Pesquisas recentes têm se beneficiado deste sistema 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 como o controle de variáveis ambientais e os altos custos com o consumo de gás carbônico. Em adição, a técnica que promove o aumento de temperatura do ar livre é denominada T-FACE - Temperature Free Air Controlled Enhancement (KIMBALL, 2005).

2.3 Mudanças climáticas e relação temperatura e dióxido de carbono

O efeito estufa é um fenômeno natural ocasionado pela concentração de gases na atmosfera (e.g., CO₂, óxido nitroso, metano e vapor de água), que culminam no aquecimento do planeta e atua, ainda, dificultando a perda de energia para o espaço na forma de ondas longas. A princípio, o efeito estufa é um fenômeno benéfico e primordial para o surgimento e manutenção da vida na terra; não obstante, o aumento desse efeito pelas emissões antrópicas parece alterar tanto o equilíbrio termodinâmico quanto o balanço de energia regionais e globais (FONTES, 2017). A maior parte dos vegetais realizam fotossíntese do tipo C₃, que recebe este nome devido ao primeiro produto da carboxilação ser um ácido com três carbonos, o ácido 3-fosfoglicérico (PGA) (BENSON, 2002; BASSHAM, 2003). Com efeito, a enzima ribulose 1-5 bifosfato carboxilase-oxigenase (Rubisco) não apresenta ponto de saturação com os níveis de concentração de [CO₂] ambiente atuais (TAIZ; ZIEGER, 2013). No entanto, o aumento da [CO₂] para plantas de metabolismo C₃ culmina com a redução na fotorrespiração devido à maior carboxilação e a menor oxigenação da enzima Rubisco (SAGE, 1994). Tomados em conjunto, tais impactos culminam em aumentos na taxa fotossintética e, em última instância, em maior produtividade; em adição, observa-se redução na condutância estomática, que leva a uma menor demanda hídrica (SAXE et al., 1998). É importante mencionar também que incrementos na [CO₂] estão intimamente associados ao aquecimento global (KÖRNER, 2006; KIMBALL et al., 1993) levando, como consequência, a aumentos na temperatura.

As plantas lenhosas possuem respostas positivas de crescimento quando estas permaneceram em [CO₂] elevadas, particularmente quando os demais recursos encontram-se disponíveis em condições ideais (WITTIG et al., 2005; LIBERLOO et al.,

2006; CROUS et al., 2008; KOSOBRYUKHOV, 2008; ATWELL et al., 2009). As plantas C3 respondem a alta [CO₂] pois o fluxo de carbono através do ciclo fotorredutivo é aumentado e a fotorrespiração é suprimida. Tal mudança no metabolismo parece alterar a concentração foliar de nutrientes necessária para promover a produtividade máxima (concentração crítica). Nesse contexto, plantas do gênero *Eucalyptus*, dentre as espécies lenhosas, apresentam respostas mais relevantes e positivas ao incremento nas [CO₂]; é importante mencionar, no entanto, que nas fases iniciais observa-se maior resposta à mudança na [CO₂], principalmente nos dois primeiros anos de crescimento da planta (AINSWORTH & LONG, 2005). Diante do exposto acima, nesse trabalho pretende-se acompanhar as respostas morfofisiológicas de plantas jovens de eucalipto crescidas em sistema para o enriquecimento da atmosfera com [CO₂] (mini-FACE) e aquecimento do ambiente (mini-TFACE). Espera que os resultados obtidos possibilitem prever ajustes morfológicos e fisiológicos associados à capacidade de sobrevivência e crescimento de eucalipto em um cenário de mudanças climáticas globais. A proposta em apreço se baseia nas seguintes hipóteses: (i) o enriquecimento da atmosfera com [CO₂] resulta em alterações no crescimento de plantas jovens de eucalipto, levando a maior acúmulo de biomassa, e mudanças na abertura estomática; (ii) o aquecimento do ambiente implica em maior fechamento estomático e, como consequência, compromete o crescimento e desenvolvimento de plantas jovens de eucalipto; e (iii) a exposição simultânea de plantas jovens de eucalipto ao ambiente enriquecido com [CO₂] e aquecimento, ocasiona uma redução dos efeitos negativos da temperatura em função da maior disponibilidade de [CO₂].

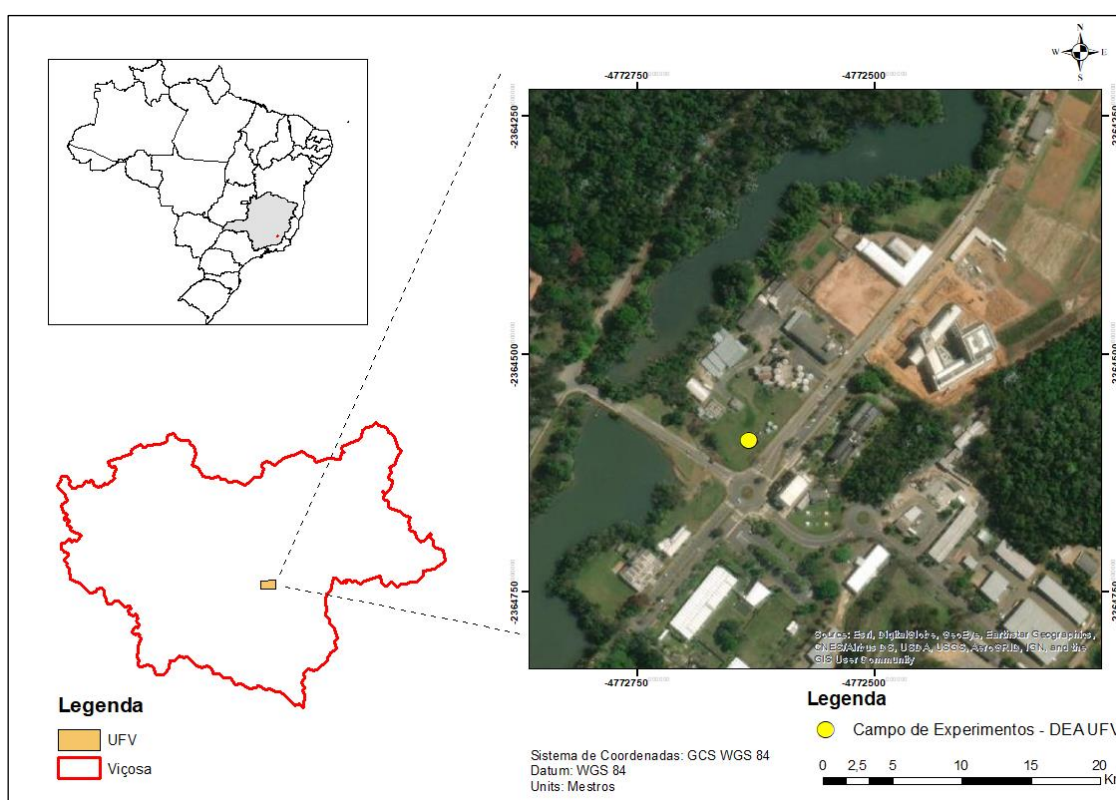
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e clima da área experimental

A área de estudo está localizada na cidade de Viçosa, no estado de Minas Gerais, Brasil. O clima local é caracterizado pela sazonalidade com verões chuvosos e invernos secos, com precipitação anual de 1220 mm. Durante a chuva, meses da estação, a precipitação é geralmente superior a 150 mm, atingindo um pico em dezembro com 250 mm. Nos meses mais secos a precipitação diminui, mas apenas em maio a agosto a precipitação é inferior a 50 mm.

A temperatura média anual do ar é de 26 °C, nos meses mais quentes e mínima média anual de 14 °C. A umidade relativa é alta em todo ano, geralmente acima de 70%.

Figura 1. Localização do experimento. Município de Viçosa, zona da mata do estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil.



3.2 Características dos solos e transplântio das mudas

Foram utilizadas mudas de dois clones comerciais de eucalipto fornecidas pela empresa Celulose Nipo-Brasileira CENIBRA, um de *E. grandis* x pai desconhecido (CNB-019), e o outro de *E. grandis* x *E. urophylla* (CNB-010), respectivamente considerado um clone com boa resistência a seca e um clone sensível a seca. Estes materiais, com aproximadamente 90 dias de idade, foram plantados em vaso com capacidade de 8 L. Para realização do estudo foram utilizadas duas amostragens de solos de mesma classe textural, do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo, conforme a classificação Embrapa (2006). Os solos foram destorroados e passado em peneiras de malha de 4mm e posteriormente levados ao laboratório para análises químicas e físicas.

Para o preenchimento dos vasos e transplântio das mudas, foram realizadas as correções nutricionais necessárias. A adubação ocorreu no intervalo de 15-30-45 dias após o plantio na quantidade de 0,003 Kg/vaso do adubo NPK (19-05-20), além da adubação com micronutrientes. Após o plantio as mudas permaneceram nos vasos durante 30 dias para aclimação e logo após foram submetidas aos tratamentos.

A irrigação foi mantida diariamente conforme a necessidade até atingir a capacidade de campo. O tratamento de [eco₂/seca] tiveram a borda dos vasos cobertas com folhas de EVA marrom de 4mm, cuja finalidade era limitar a disponibilidade hídricas no solo.

Tabela 1. Caracterização química do solo no período de 18 de junho de 2021 a 18 de agosto de 2021.

CARACTERÍSTICA	VALOR
pH	4,5
P, mg/dm ³	1,4
K, mg/dm ³	9
Ca ²⁺ , cmol _c /dm ³	0,19
Mg ²⁺ , cmol _c /dm ³	0,05
Al ³⁺ , cmol _c /dm ³	0,6
H+Al, cmol _c /dm ³	1,98
SB, cmol _c /dm ³	0,26
t, cmol _c /dm ³	0,86
T, cmol _c /dm ³	2,24
V, %	11,6
M, %	69,8
M.O, dag/Kg	0,67
P-rem, mg/L	5,7
Zn, mg/dm ³	0,6
Fe, mg/dm ³	32
Mn, mg/dm ³	3,6
Cu, mg/dm ³	0,5
B,mg/dm ³	0,06

pH em água - Relação 1:2,5; **P-K-Fe-Zn-Mn-Cu**– 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; **B** – Extrator água quente; **SB** – Soma de bases trocáveis; **CTC (t)** – Capacidade de Toca Catiônica Efetiva; **CTC (T)** – Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; **V** – Índice de Saturação de bases; **m** – Saturação por alumínio; **MO** – C.Org x 1,724 – Método Walkley-Black; **P-Rem** – Fósforo Remanecente.

Tabela 2. Caracterização química do solo, no período de 11 de outubro de 2021 a 11 de dezembro de 2021.

CARACTERÍSTICA	VALOR
pH	4,9
P, mg/dm ³	0,8
K, mg/dm ³	9
Ca ²⁺ , cmol _c /dm ³	0,78
Mg ²⁺ , cmol _c /dm ³	0,29
Al ³⁺ , cmol _c /dm ³	0,1
H+Al, cmol _c /dm ³	3,3
SB, cmol _c /dm ³	1,09
t, cmol _c /dm ³	1,19
T, cmol _c /dm ³	4,39
V, %	24,8
M, %	8,4
M.O, dag/Kg	1,34
P-rem, mg/L	7,1
Zn, mg/dm ³	0,1
Fe, mg/dm ³	50,3
Mn, mg/dm ³	1,5
Cu, mg/dm ³	0,3
B,mg/dm ³	0

pH em água - Relação 1:2,5; **P-K-Fe-Zn-Mn-Cu**– 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; **B** – Extrator água quente; **SB** – Soma de bases trocáveis; **CTC (t)** – Capacidade de Toca Catiônica Efetiva; **CTC (T)** – Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; **V** – Índice de Saturação de bases; **m** – Saturação por alumínio; **MO** – C.Org x 1,724 – Método Walkley-Black; **P-Rem** – Fósforo Remanente.

3.3 Aplicações dos tratamentos e delineamento estatístico

O experimento foi realizado em dois períodos ao longo do ano de 2021 que foram estabelecidos como sendo: Período Experimental 1 – PE 01, junho a agosto (período com temperaturas mais amenas e menor ocorrência de precipitações) e Período Experimental 2 – PE 02, outubro a dezembro (período com temperaturas mais quentes e maior disponibilidade hídrica). Os tratamentos foram arranjados em parcelas subdivididas, contendo cinco parcelas organizados da seguinte forma:

[eCO₂] – concentração de CO₂ em aproximadamente 700 ppm e temperatura ambiente;

[eCO₂/AT] – concentração CO₂ atual e aumento de aproximadamente 2 °C na temperatura do ar;

[eCO₂/Seca] – concentração de CO₂ em aproximadamente 700 ppm e déficit hídrico;

[AT] - concentração de CO₂ em aproximadamente 700 ppm e aquecimento de aproximadamente 2 °C na temperatura do ar;

[NA] - concentração CO₂ atual e temperatura ambiente (Ambiente Natural);

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 e mais 35 vasos que foram utilizados como efeito de borda. O controle térmico foi mantido permanentemente por 24 horas nos tratamentos [eCO₂/AT] e [AT], 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 analisados por meio de estatística descritiva (média, desvio padrão e coeficiente de variação). Posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA), as comparações médias foram realizadas pelo teste de Tukey (P_y0,05). Os testes estatísticos foram conduzidos usando o software SISVAR.

Os resultados referentes aos efeitos do [CO₂], déficit hídrico, temperatura e clone, bem como a interação entre os fatores, são apresentados e discutidos de acordo com estatísticas diferentes encontradas.

3.4 Sistema MINIFACE e MINI T-FACE

O experimento foi instalado em um conjunto de cinco MINIFACE e MINI T-FACE, sendo cada uma adaptado para exercer sua função conforme o tipo de tratamento nela realizado. Cada sistema MINIFACE e MINI T-FACE utilizado para o enriquecimento do $[CO_2]$ atmosférico e aumento da temperatura do ar foi composto por uma estrutura triangular fixa a três hastes metálicas de 2 m de altura (Figura 2). Ao centro, foi disposta uma estrutura com três arcos metálicos concêntricos - 0,35m, 0,70m e 1,0m de raio, usados para fixar a mangueiras de injeção de gás e de leitura da $[CO_2]$. Registre-se que as mangueiras de PVC fixadas ao longo das circunferências eram de meia polegada e continham furos de 1/8" a cada 20cm, direcionados para o centro e para fora em um plano circular. Nos arcos de 0,35m e de 1m o $[CO_2]$ era injetado ao passo que pelo arco de 0,75m o ar era sugado para a leitura da $[CO_2]$. Para permitir o ajuste de altura em função do crescimento das plantas a movimentação dos arcos foi controlada por cordões e polias.

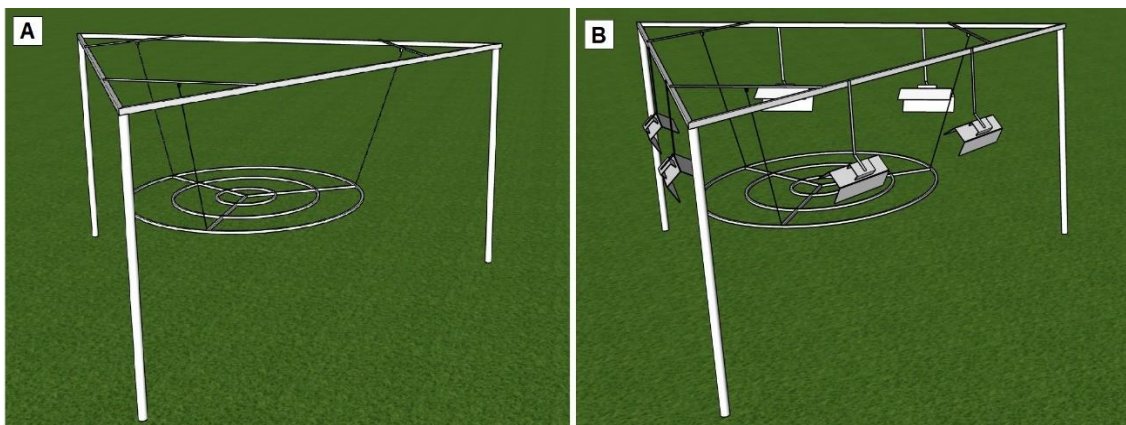
A aplicação de gás foi projetada para funcionamento em sistema de controle de malha fechada, de forma que o gás fosse liberado pelas mangueiras injetoras baseado na leitura constante da $[CO_2]$ do ar amostrado de dentro do dossel, com a finalidade de manter a concentração próxima a 700ppm. Cada um dos três tratamentos com $[CO_2]$ teve seu próprio sistema de controle e uma rede de tubos e reguladores de pressão foi montada para o provimento de gás em pressão adequada a cada um dos dispositivos. O sistema para injeção de gás carbônico do MINIFACE foi formado por cilindros de $[CO_2]$ com capacidade de 25 kg, que eram trocados diariamente ou conforme a necessidade. Ao centro de cada sistema foi instalado um sensor de $[CO_2]$ (modelo SprintIR 0-2000ppm, CO2metter).

No sistema T-FACE, o aquecimento dos tratamentos foi realizado através de lâmpadas de infravermelho instaladas 50cm acima das plantas, posicionadas de forma a distribuir uniformemente a radiação na área do círculo maior e plantas de bordadura mais próximas. O controle de temperatura também utilizou sistema de malha fechada, com sensor de temperatura instalado no centro do tratamento e em meio ao dossel.

A cada 5 minutos, as médias da $[CO_2]$, temperatura e umidade dos sensores distribuídos nos tratamentos foram gravadas em cartão de memória no datalogger. Todos os tratamentos possuíram a mesma estrutura com círculos e peças, inclusive

a testemunha, para que distúrbios (e.g. sombras e dificuldades de manejo), fossem comuns a todos os tratamentos.

Figura 2. Vista frontal da estrutura do sistema FACE (A) e T-FACE (B).



3.5 Dados Meteorológicos

A principal fonte de dados climáticos utilizada para este estudo foi de uma estação meteorológica automática (EMA), instalada na área experimental. As ferramentas que integram a EMA encontram-se na Tabela 03.

Tabela 3. Relação de sensores instalados na estação meteorológica.

Sensores	Variável medida	Fabricante e modelo
Termohigrômetro	Temperatura do ar e umidade relativa	HC2S3 L34 Campbell Scientific Instruments, Utah, USA.
Piranômetro	Irradiância solar global	CMP3 L100, Kipp & Zonen, Röntgenweg, Netherlands.
Pluviômetro	Precipitação	Texas Electronics, Inc. Dallas, Texas USA, TR 525M.
Anemômetro	Velocidade e direção do vento	Wind Sonic, Option 2, Gill Instruments.
Datalogger	Coletor de dados	CR1000, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA.

A estação forneceu um conjunto de dados a cada 10 minutos (leituras diárias). O conjunto de dados extraídos da estação meteorológica apresentaram um baixo número de dados ausentes.

Foi considerado de baixa qualidade todos os valores impossíveis ou muito improváveis (por exemplo, umidade relativa negativa ou temperatura do ar acima de 60°C). Todos os dados de baixa qualidade foi removido do conjunto de dados, que posteriormente foram integrados a uma hora.

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 quinzenalmente, na qual as variáveis de trocas gasosas medidas foram a fotossíntese líquida (A , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), e a concentração interna de CO₂ (C_i , $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). As análises foram realizadas no período da manhã, em horário compreendido entre 08:30 as 11:30 horas.

As medições com o IRGA foram realizadas com fluxo de 300 m/s, radiação saturante de 1400 $\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ e umidade entre 40 e 70%. Para as medições utilizou-se a primeira folha completamente expandida localizada entre o quinto e sexto ramo da planta, tomando-se cinco repetições por tratamento.

3.7 Medidas Biométricas

A mensuração da altura da parte aérea das plantas e diâmetro do caule foi realizada a cada sete dias por meio de uma régua milimetrada e um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm (Digimess, Brasil).

Ao final do experimento foi realizada a mensuração da área foliar de maneira destrutiva e com a utilização de um medidor de área foliar (Li-3100C, Licor Biosciences).

Em seguida para estimação das biomassas seca das folhas e dos ramos, as plantas foram acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa com

circulação forçada de ar a uma temperatura de 70°C até peso constante. Posteriormente foi determinada a massa da matéria seca das plantas por meio de uma balança de precisão (modelo SA 210, Scientech, EUA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises Meteorológicas

A caracterização meteorológica do ambiente durante todo o experimento no PE 01 e PE 02 é apresentada nas Figuras 3 e 4, respectivamente. De modo geral, a variação dos elementos meteorológicos é apresentada incluindo a temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), a radiação solar (Kj/m²), precipitação (mm) e a velocidade do vento (m/s).

Ao longo do PE 01, a temperatura média observada foi de 19,7 °C, com umidade relativa do ar em média 78,1%. A irradiância solar global, aqui mencionada simplesmente como radiação solar, teve média 15.609,1 KJ/m². Em relação à velocidade do vento, ao longo do PE 01 as médias observadas foram de 0,8 m/s, e dois eventos de precipitação com volumes totais de 12,7mm e 2,1mm.

Figura 3. Variação de precipitação (mm) durante o PE 01 e PE 02; Dias após o transplante (DAT).

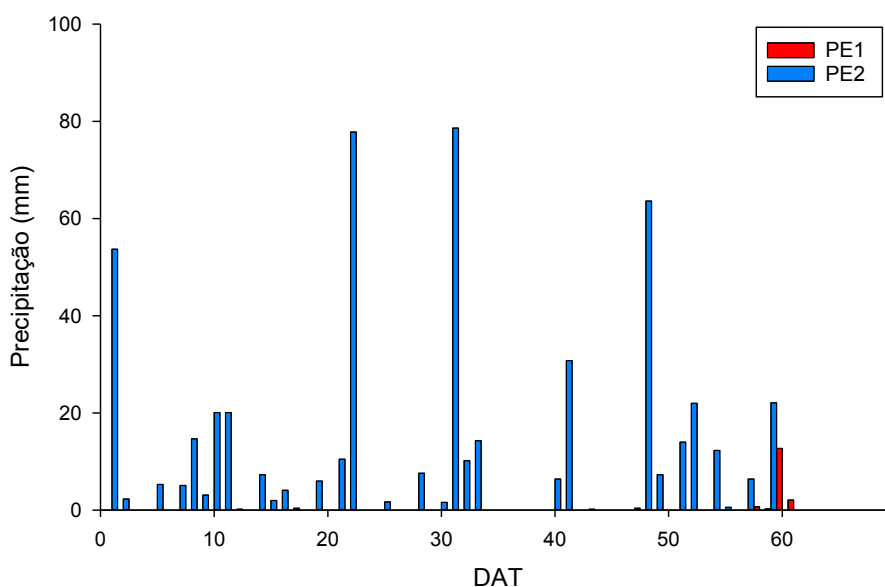
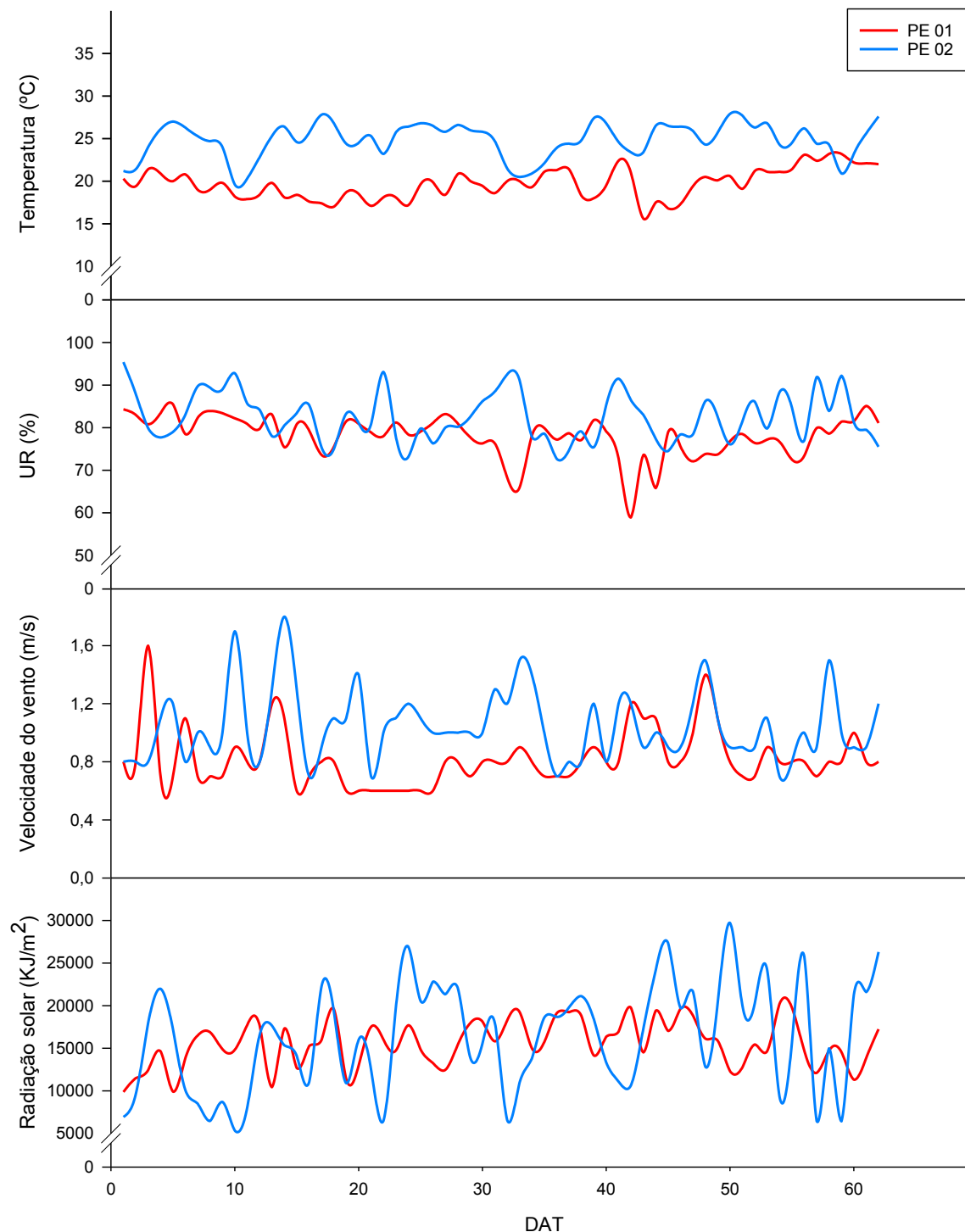


Figura 4. Variação dos elementos meteorológicos durante o PE 01 e PE 02: Temperatura (°C); umidade relativa do ar (%); Velocidade do vento (m/s); Radiação Solar (KJ/m²); Dias após o transplante (DAT).



Para o PE 02 a temperatura média observada foi de 24,8 °C, com máxima de 27,9 °C e mínimas de 19,6 °C. A umidade relativa do ar registrou uma média de 82,5% ao longo dos sessentas dias em que foi realizado o experimento, chegando à umidade máxima de 95,4% observada na primeira semana do PE 02 (Figura 4). A velocidade do vento foi caracterizada com médias de 1,1m/s, atingindo o valor máximo de 1,8 m/s no início da terceira semana do período experimental (Figura 4). A radiação solar teve média diurna de 16.325,9 KJ/m². Como esperado, durante o PE 02 observou-se maior ocorrência de chuvas, chegando a registrar o volume máximo de 78,6 mm entre a segunda e terceira semana após o início dos tratamentos (Figura 3).

4.2 Análises Fisiológicas

No geral, a taxa de fotossíntese (A) foi significativamente maior em plantas sob elevada [eCO₂] do que em ambiente durante todo o experimento ao passo que a seca e a alta temperatura culminaram em menores A em ambos os clones (Tabela 4). Registre-se, também, que a [eCO₂] mitigou o efeito da alta temperatura em ambos os clones sem, contudo, ser capaz de mitigar os impactos da seca, em que os menores valores de A foram observados (Tabela 4). Como esperado, tratamentos com elevada [eCO₂] foram caracterizadas por maiores concentrações interna de CO₂ (C_i) ao passo que menores C_i foram observadas em resposta a alta temperatura e no tratamento controle em ambos os clones. Menor condutância estomática (g_s) e transpiração (E) só foram observadas em plantas sob seca (Tabela 4). Em adição, o clone CNB-019 apresentou maior g_s e E que o clone CNB-010 no PE1. Por outro lado, durante o PE 02 não foram observadas diferenças entre tratamentos e clones para as variáveis relacionadas as trocas gasosas em plantas jovens de eucalipto (Tabela 4). Tomados em conjunto, estes resultados indicam que durante o PE 01 (período com temperaturas mais amenas e menor ocorrência de precipitações) os impactos do estresse térmico e da seca foram exacerbados e a [eCO₂] foi um importante mitigador de tais impactos. Com efeito, durante o PE 02 (período com temperaturas mais quentes e maior disponibilidade hídrica) os efeitos positivos da [eCO₂] foram significativamente menores, sugerindo que em condições de mudanças climáticas, com menores precipitações, a importância da [eCO₂] seja potencialmente maior. Trabalhos futuros devem, eventualmente, investigar as respostas da [eCO₂] em combinação com maiores temperaturas e menores disponibilidades hídricas.

De modo semelhante a todas as plantas, que são organismos sésseis, durante sua evolução as árvores desenvolveram também uma série de mecanismos que lhes permitem lidar com condições ambientais variáveis (Chinnusami et al., 2009). É plausível sugerir, no entanto, que a longa vida útil das árvores provavelmente comprometa a adaptação genética às mudanças ambientais, tornando plantações de eucalipto particularmente suscetíveis às mudanças climáticas. Cumpre mencionar, no entanto, que o aumento esperado na $[CO_2]$ provavelmente não ocorrerá sozinho, mas também associado à limitação de água, temperatura mais alta e condições de alta luminosidade (Yu et al., 2017; Florian et al., 2014; Dusenge et al., 2018).

Tabela 4. Variação dos parâmetros de trocas gasosas investigados que incluem (*A*) Taxa fotossintética. (*C_i*) Concentração interna de CO_2 . (*g_s*) Condutância estomática. (*E*) transpiração foliar.

Tratamento	PE1				PE2			
	<i>A</i> ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		<i>C_i</i> ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		<i>A</i> ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		<i>C_i</i> ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	
[eCO ₂]	26,6	a	415,0	a	**		**	
[eCO ₂ /AT]	25,3	a	417,0	a	**		**	
[eCO ₂ /Seca]	14,6	b	354,0	a	**		**	
[AT]	18,1	a b	229,0	b	**		**	
[NA]	19,1	a b	235,8	b	**		**	
Clone								
CNB-010	**		**		**		**	
CNB-019	**		**		**		**	
Tratamento	<i>g_s</i>				<i>E</i>			
	<i>g_s</i> ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		<i>E</i> ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		<i>g_s</i> ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		<i>E</i> ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	
[eCO ₂]	0,24	a	2,52	a	**		**	
[eCO ₂ /AT]	0,24	a	2,35	a	**		**	
[eCO ₂ /Seca]	0,10	b	1,13	b	**		**	
[AT]	0,22	a	2,26	a	**		**	
[NA]	0,25	a	2,52	a	**		**	
Clone								
CNB-010	0,17	B	1,8	B	**		**	
CNB-019	0,25	A	2,5	A	**		**	

** Não houve interação

4.3 Análises Morfológicas e de Biomassa

Durante o PE 01, ambos os clones que se desenvolveram sob [eCO₂] eram mais altas do que aquelas cultivadas sob [NA] (Tabela 5). Eles também apresentaram menor número de folhas quando expostos a [eCO₂/Seca] (tab.5D). No entanto ao crescer sob condição de [AT], o clone CNB-010 recuperou o número de folhas quando comparado ao tratamento [NA].

A área foliar foi maior apenas para o clone CNB-010 em elevada [eCO₂] (tab.5E), interessante o número de folhas deste clone foi maior em plantas cultivadas em [NA] (tab.5D).

Além disso, a biomassa seca total dos ramos e das folhas das plantas foi menor em ambos os clones quando cultivadas em [eCO₂/Seca].

O Clone CNB-010 obteve o maior diâmetro de caule entre os clones e as plantas sob [eCO₂/AT] culminou em maior diâmetro entre os tratamentos, enquanto que para o tratamento sob [e CO₂/Seca] resultou em valores mais baixos (tabela. 5E).

Para o PE2 os clones CNB-010 e CNB-019 que se desenvolveram sob tratamento de elevada [eCO₂/Seca] eram menores quando comparadas as plantas cultivadas sob ambiente natural – Tabela 6.

A área foliar do CNB-010 sob ambiente natural foi maior em relação aos outros tratamentos.

A biomassa seca dos ramos e das folhas foi menor nas plantas cultivadas sob [eCO₂/Seca], entretanto para o clone CNB-019 a biomassa das folhas foi maior sob condição de [eCO₂], e para o CNB-010 foi maior na condição de elevada temperatura [AT]. A biomassa dos ramos foi maior em todos os tratamentos do clone CNB-010.

O desenvolvimento do número de folhas em ambos os clones no PE 02 não diferiu significativamente sob os tratamentos imposto neste trabalho. Quando comparado o efeito do clone dentro dos tratamentos o clone CNB-10 apresentou ao final das análises o maior número de folhas, assim como o maior diâmetro de caule. Todavia o clone CNB-010 obteve o maior desenvolvimento para todas as condições de tratamentos nesse período experimental.

Tabela 5. Análise dos parâmetros das plantas sob os tratamentos ao longo do período experimental 1. Os parâmetros investigados incluem (A) Altura. (B) Biomassa das Folhas. (C) Biomassa dos Ramos. (D) Número da folha. (E) Diâmetro do caule. (F) Área foliar. As médias ($n=5 \pm SE$) seguidas de letras diferentes foram determinadas pelo teste de Tukey para serem estatisticamente diferentes ($P < 0,05$). As letras maiúsculas comparam os clones dentro de cada tratamento. Letras minúsculas comparam tratamentos dentro de cada clone.

Tratamento	Altura (A)								
	cm								
	Inícial				Final				
	CNB-010		CNB-019		CNB-010		CNB-019		
[eCO2]	51,0	A a b	45,2	B a b	97,0	A a	81	B a b	
[eCO2/AT]	49,8	A a b	48,5	A a	92,7	A a b	81,5	B a	
[eCO2/Seca]	51,6	A a b	42,6	B b c	60,0	A d	56,1	A c	
[AT]	52,6	A a	42,6	B b c	84,6	A b c	73	B b	
[NA]	48,8	A b	41,8	B c	83,6	A b c	64,9	B b	
Tratamento	Folha (B)				Ramo (C)				
	g								
		CNB-010		CNB-019		CNB-010		CNB-019	
[eCO2]	41,9	A a	31,1	B a	15,5	A a	7,3	B a	
[eCO2/AT]	38,9	A a	31,2	B a	14,0	A a b	7,5	B a	
[eCO2/Seca]	20,9	A b	18,8	A b	5,7	A c	3,9	A b	
[AT]	40,5	A a	27,5	B a	13,7	A a b	6,7	B a	
[NA]	38,6	A a	28,0	B a	12,7	A b	6,5	B a b	
Tratamento	Número de Folhas (D)				Diâmetro de Caule (E)				
	un				cm				
		CNB-010		CNB-019		Inícial		Final	
[eCO2]	287	A a	203	B a	**		14,4	a b	
[eCO2/AT]	299	A a	220	B a	**		14,5	a	
[eCO2/Seca]	124	A b	122	A b	**		10,8	c	
[AT]	324	A a	187	B a b	**		13,2	b	
[NA]	335	A a	180	B a b	**		13,6	a b	
Clone									
CNB-010						**		14,0	A
CNB-019						**		12,6	B
Tratamento	Área Foliar (F)								
	cm ²								
		CNB-010		CNB-019					
[eCO2]	7.126	A a	5.336	B a					
[eCO2/AT]	6.878	A a	5.458	B a					
[eCO2/Seca]	2.783	A b	2.256	A					
[AT]	6.936	A a	5.003	B a					
[NA]	6.544	A a	5.063	B a					

** Não houve interação

Tabela 6. Análise dos parâmetros das plantas sob os tratamentos ao longo do período experimental 2. Os parâmetros investigados incluem (A) Altura. (B) Biomassa das Folhas. (C) Biomassa dos Ramos. (D) Número da folha. (E) Diâmetro do caule. (F) Área foliar. As médias ($n=5 \pm SE$) seguidas de letras diferentes foram determinadas pelo teste de Tukey para serem estatisticamente diferentes ($P < 0,05$). As letras maiúsculas comparam os clones dentro de cada tratamento. Letras minúsculas comparam tratamentos dentro de cada clone.

Tratamento	Altura (A)		Folhas (B)		Ramo (C)	
	cm		g		g	
	Inicial	Final	CNB-010	CNB-019	CNB-010	CNB-019
[eCO2]	60,9 _{ab}	123,0 _a	28,8 _{Aa}	22,7 _{Bad}	21,6 _{Aab}	12,2 _{Bad}
[eCO2/AT]	62,1 _a	141,3 _a	26,1 _{Aa}	25,7 _{Aab}	18,0 _{Abc}	13,6 _{Bad}
[eCO2/Seca]	63,0 _a	79,5 _b	17,6 _{Ab}	19,4 _{Ab}	13,6 _{Ac}	9,8 _{Bad}
[AT]	58,5 _b	138,3 _a	32,3 _{Aa}	26,7 _{Bad}	23,2 _{Ac}	11,9 _{Bad}
[NA]	61,7 _a	142,4 _a	28,1 _{Aa}	28,7 _{Aa}	20,9 _{Ac}	13,6 _{Bad}
Clone						
CNB-010	66,8 _A	134,2 _A	**	**	**	**
CNB-019	55,7 _B	115,5 _B	**	**	**	**
Tratamento	Número de Folhas (D)		Diâmetro de Caule (E)		Área Foliar (F)	
			cm		cm ²	
	Inicial	Final	Inicial	Final	CNB-010	CNB-019
[eCO2]	**	**	**	17,5 _{ab}	5.538 _{Aa}	4.638 _{Aa}
[eCO2/AT]	**	**	**	16,3 _{bc}	5.208 _{Aa}	5.150 _{Aa}
[eCO2/Seca]	**	**	**	15,2 _c	3.087 _{Bb}	5.364 _{Aa}
[AT]	**	**	**	16,4 _{abc}	5.645 _{Aa}	5.145 _{Aa}
[NA]	**	**	**	17,8 _a	5.808 _{Aa}	2.712 _{Bb}
Clone						
CNB-010	91 _A	238 _A	10,4 _A	18,0 _A	**	**
CNB-019	55 _B	175 _B	8,3 _B	15,4 _B	**	**

** Não houve interação

5. CONCLUSÕES

Ambos os clones aqui estudados apresentaram um conjunto de respostas comuns quando expostos a [eCO₂/AT], revelando que em um cenário de mudança climática pequenos ou nenhum dano ao crescimento e desenvolvimento das plantas de eucalipto será, provavelmente, observado. Com efeito, o cultivo de mudas de eucalipto em ambiente com [AT] culminou em mudanças significativas no metabolismo que, possivelmente, explicam as reduções em ambos os clones no que se refere ao crescimento e acúmulo de biomassa nesta condição. Registre-se, pois, que a elevada [CO₂] resultou em maior crescimento e acúmulo de biomassa em mudas eucalipto.

Respostas aclimatativas a elevada [CO₂] ocorreram após longo prazo de exposição dos clones aqui utilizados a esta condição ambiental. A elevada [CO₂] não apenas mitigou, mas também modificou os efeitos negativos causados pela elevação da temperatura em ambos os clones estudados devido à uma série de mudanças morfo-fisiológicas que são aparentemente importantes sob condições de estresse.

Para o ambiente com [eCO₂/Seca] pode-se verificar que mesmo com o enriquecimento do ambiente com elevada [CO₂] ambos os clones não conseguiram se desenvolver adequadamente. Tal comportamento mostra-se extremamente importante visto que eventos extremos, com maiores e mais frequentes ocorrências de deficiências hídricas, são esperados em cenários de mudanças climáticas globais.

Coletivamente, os resultados descritos acima destacam ainda mais que a elevada [CO₂] possa ser um fator chave para a sustentabilidade do cultivo de eucalipto em um cenário de mudanças climáticas com variações na disponibilidade de recursos como temperatura, água e [CO₂]. Investigações futuras são ainda necessárias para elucidar completamente os mecanismos por detrás desse intrigante comportamento de plantas de Eucalipto em um cenário de mudanças climáticas.

6. REFERÊNCIAS

AIDAR, M. P. M.; et al. 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.; 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

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. In: **Irrigation and Drainage Paper**, 56. Rome: FAO, 1998. p. 300. 1998.

ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; LEITE, F. P. Modelagem do balanço hídrico em microbacia cultivada com plantio comercial de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* no leste de Minas Gerais, Brasil. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 547–556, 2013.

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.

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 74, n. 1, p. 430–445, 1959.

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.

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.; et al. Chlorophyll concentration of potatoes grown under elevated carbon dioxide and/or ozone concentrations. **European Journal of Agronomy**, v. 17, p. 319 - 335, 2002.

BRAGA, M. R.; et al. 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.

BROSI, G. B.; et al. Effects of multiple climate change factors on the tall fescue-fungal endophyte symbiosis: infection frequency and tissue chemistry. **New Phytologist**, 189:797 – 805, 2011.

CHARLES-EDWARDS, D. A. **Physiological determinants of crop growth**. Sydney: Academic Press, 1982.

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.

CHINNUSAMY V, Zhu JK (2009) Epigenetic regulation of stress responses in plants. **Current opinion in Plant Biology** 12: 133-139.

DUSENGE ME, DUARTE AG, WAY DA (2018) Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. **New Phytologist** x: 1-18.

FODOR, N. et al. Integrating Plant Science and Crop Modeling: Assessment of the Impact of Climate Change on Soybean and Maize Production. **Plant and Cell Physiology**, v. 58, n. 11, p. 1833–1847, 2017.

FLORIAN A., et al. Analysis of short-term metabolic alterations in arabidopsis following changes in the prevailing environmental conditions. **Molecular Plant** 7: 893-911, 2014.

FONTES, L. F. R. **Respostas ecofisiológicas em árvores jovens de eucalipto ao enriquecimento atmosférico de CO₂ e aquecimento em miniface e mini t-face**. 2017. 98 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

HACOUR, A. et al CO₂ and ozone effects on canopy development of potato crops across Europe. **European Journal of Agronomy**, v. 17, p. 257 - 272, 2002.

HENDREY, G. R.; KIMBALL B. A. **The FACE program**. Agricultural and Forest Meteorology. V. 70. p. 3-4. 1994.

HÖGY, P et al. 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.

ISEE SYSTEMS. **Systems Thinking in Education**. Disponível em: <<https://www.iseesystems.com>>. Acesso em: 20 dezembro. 2020.

IBÁ [Indústria Brasileira de Árvores] **Histórico do Desempenho do Setor 2021**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicações/relatoriosiba2021>>. Acesso em mar/2022.

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.

JUVENAL, T.; MATTOS, R. **O setor Florestal no Brasil e a Importância do Reflorestamento**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro:2002.

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

KIMBALL, B. A. ; MAUNEY, J. R. ; NAKAYAMA, F. S. ; IDSO, S. W. **Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation**. *Vegetatio* 104/105. p. 65-75, 1993.

KÖRNER, C. **Respostas ao CO₂ da planta: uma questão de definição, tempo e suprimento de recursos**. *New Phytologist*, **172** (3), 393 – 411, 2006.

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. et al. 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.

LI, Y. et al. 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.

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.

LEARY, G. J. O. et al. Response of wheat growth , grain yield and water use to elevated CO₂ under a Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment. **Global Change Biology**, v. 21, p. 2670–2686, 2015.

MIGLIETTA, F. et al. Free-air CO₂ enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. **New Phytologist**, v. 150, p. 465–476, 2001.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. **Carbon dioxide peaks near 420 parts per million at Mauna Loa observatory.** Disponível em: ><https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2764/Coronavirusresponse-barely-slows-rising-carbon-dioxide><. Acesso em: mar/22.

OUYANG, Y. et al. A STELLA Model to Estimate Water and Nitrogen Dynamics in a Short-Rotation Woody Crop Plantation. **Journal of Environment Quality**, v. 44, n. 1, p. 200, 2014.

PALMROTH, S. et al. 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.

PARIZI, A. R. C. et al. Corn yield under various simulated irrigation depths. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 503–514, 2016.

PEARSON, P. N. & PALMER, M. R. **Atmospheric carbon dioxide over the past 60 million years.** *Nature* 406, 695-699, 2000.

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

PLASENCIA, A. et al. Eucalyptus hairy roots, a fast, efficient and versatile tool to explore function and expression of genes involved in wood formation. **Plant Biotechnology Journal**, v. 14, n. 6, p. 1381–1393, 2016.

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

SAXE, H. et al. **Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere.** *New Phytologist*, 139: 395–436, 1998.

SOUZA, A. et al. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant Cell Environment**, v. 31, p. 1116 - 1127, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.918p.

TAO, F. et al. Contribution of crop model structure, parameters and climate projections to uncertainty in climate change impact assessments. **Global Change Biology**, v. 24, n. 3, p. 1291–1307, 2018.

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.

WITTIG, V. E. et al. 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.

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.

Yu J, Li R, Fan N, Yang Z, Huang B (2017) Metabolic Pathways Involved in Carbon Dioxide Enhanced Heat Tolerance in Bermudagrass. **Front Plant Science** 8: 1-22.