

ELIAS JOSÉ PEDROSO

**EFEITO DO SOMBREAMENTO AUTOMATIZADO NO ENRAIZAMENTO DE
MINIESTACAS DE *Eucalyptus***

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

Orientador: Aristides Ribeiro

Coorientadores: Aloísio Xavier
Juraci Alves de Oliveira
Wagner Luiz Araújo

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

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

T

P372e
2021 Pedroso, Elias José, 1981-
Efeito do sombreamento automatizado no enraizamento de
miniastacas de *Eucalyptus* / Elias José Pedroso. – Minas Gerais,
MG, 2021.

105 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Ecofisiologia vegetal. 2. Modelos matemáticos.
3. Simulação (Computadores). 4. Propagação vegetativa. 5. Luz.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Aplicada. II. Título.

CDD 22. ed. 581.7

ELIAS JOSÉ PEDROSO

**EFEITO DO SOMBREAMENTO AUTOMATIZADO NO ENRAIZAMENTO DE
MINIESTACAS DE *Eucalyptus***

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

APROVADA: 19 de janeiro de 2021.

Assentimento:

Elias José Pedroso

Elias José Pedroso
Autor

Aristides Ribeiro

Aristides Ribeiro
Orientador

*Aos meus pais, Ovídio e Maria
(in memoriam), aos meus irmãos
e sobrinhos.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Ovídio José Pedroso (*in memoriam*) e minha mãe Maria da Silva Pedroso (*in memoriam*) pelo amor e pela educação concedida.

Aos meus irmãos Davi, Daniel, Vilma, Aurélio, Regina, Lucimara e Eliseu e aos meus sobrinhos.

Ao meu orientador Aristides Ribeiro pela oportunidade e confiança em meu trabalho nestes últimos oito anos.

As pessoas que me ajudaram muito na realização deste trabalho: Prof. Aloísio Xavier, Prof. Wagner L. Araújo, Prof. Edgard Augusto de Toledo Picoli, Prof. Juraci Oliveira, Prof. Sérgio Zolnier, Prof. Paulo José Hamakawa e Dr. Fernando P. Leite.

Ao grupo pesquisa Biomodel: Marciel, Darlon, Aylene e Yale.

Ao viveiro de Pesquisa Florestal do Departamento Engenharia Florestal pela disponibilização da estrutura física e funcionários (João, Mauricio, Ivo (*in memoriam*), Adilson, Lucas e Josimar).

Aos funcionários do laboratório de tecnologia da madeira, em especial a Leila Lopes.

Aos alunos de doutorado, João P. Cremasco, Alex F. de Freitas, Daniel G. Coelho e Vinicius M. da Silva e ao Eng. Robert L.P. Barbosa.

Aos colegas de trabalho e amigos que ajudaram na minha formação profissional, em especial a Mariana Reis, Ana Paula Vilela, Aline S. Oliveira, Luiz Felipe Fontes, Francisca Z. de Lima.

À secretária do Departamento de Meteorologia Agrícola Graça Freitas.

Aos meus amigos da República José, Junior, Nathan, Evandro.

Aos colegas e Professores do Programa de Meteorologia Aplicada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Sociedade de investigação Florestal (SIF) pela gestão do projeto.

À Universidade Federal de Viçosa nos Departamentos de Engenharia Florestal, Departamento de Biologia Geral e o Departamento de Biologia vegetal.

A Empresa Companhia Nipo brasileira CENIBRA S.A.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

“A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem”

(Guimarães Rosa)

RESUMO

PEDROSO, Elias José, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2021. **Efeito do sombreamento automatizado no enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus***. Orientador: Aristides Ribeiro. Coorientadores: Aloísio Xavier, Juraci Alves de Oliveira e Wagner Luiz Araújo.

Atualmente, um dos principais desafios para a produção de mudas clonais de *Eucalyptus*, é o maior controle dos elementos meteorológicos no interior das casas de vegetação, durante o enraizamento das miniestacas, em especial, a irradiância solar e a temperatura do ar. Diante disso, projetamos uma casa de vegetação com sistema automatizado de controle da irradiância solar com possibilidade de implementarmos quatro níveis diferentes de irradiância solar. Os níveis de irradiância solar foram programados visando maior atenuação da irradiância solar em relação ao cultivo em casa de vegetação convencional, sob hipótese que o controle adequado da irradiância solar levará ao aumento/favorecimento do enraizamento de miniestacas em clones de *Eucalyptus*. Os estudos de ambiência feitos por modelagem computacional de CFD (*Computational fluid dynamics*) permitiram simular a dinâmica da temperatura do ar no interior das casas de vegetação com erro absolute médio de 3,7 %. As condições de temperatura do ar no interior da casa de vegetação automatizada, com sombreamento médio de 77 %, foram 1,6 °C menores se comparada a casa de vegetação convencional, sob sombreamento médio de 56 %. A casa de vegetação automatizada apresentou, em média, ganhos de 11,7 % no enraizamento em relação a casa de vegetação convencional em condição de verão. No inverno o principal limitante para enraizamento adventícios de miniestacas *Eucalyptus* são as baixas temperaturas do ar. Os genótipos com maior plasticidade fenotípica, conseguiram ajustar-se aos maiores níveis de irradiância solar, a observar-se pelos clones A e B que apresentaram aumento do teor de antocianinas, um mecanismo de fotoproteção, ao passo que o clone D, teve redução das trocas gasosas. Por sua vez, o enraizamento adventício dos clones A e C se sobressaem ao clone B e D que possuem certa limitação ao enraizamento. No geral, clones com mecanismos de fotoproteção e com facilidade de enraizamento, tiveram melhor desempenho do que clones sem mecanismos de fotoproteção e com limitação ao enraizamento. As curvas de respostas da fotossíntese são parâmetros importantes para otimizar o manejo das mudas em viveiros.

Palavras-chave: Ecofisiologia vegetal. Modelos matemáticos. Simulação (Computadores). Propagação vegetativa. Luz

ABSTRACT

PEDROSO, Elias José, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2021. **Effect of automated shading on rooting of *Eucalyptus* minicuttings**. Advisor: Aristides Ribeiro. Co-advisors: Aloísio Xavier, Juraci Alves de Oliveira and Wagner Luiz Araújo.

Currently, one of the main challenges, with regard to the production of clonal rooting of superior of *Eucalyptus*, is the greater control of meteorological elements within the rooting greenhouses of the minicuttings, especially solar radiation and air temperature. Therefore, we designed a greenhouse with an automated solar radiation control system with the possibility of implementing four different levels of solar radiation. The levels of solar irradiance were programmed with a view to greater attenuation of solar irradiance in relation to cultivation in a conventional greenhouse, under the hypothesis that adequate control of solar irradiance will lead to increases / favoring the rooting of minicuttings in *Eucalyptus* clones. Ambient studies of computational modeling of CFD (*Computational fluid dynamics*) allowed to simulate the dynamics of air temperature inside greenhouses with an average absolute error of 3.7 %. The air temperature conditions inside the automated greenhouse, with an average shade of 77 %, were 1.6 ° C lower when compared to the conventional greenhouse, under 56 % average shade. The automated greenhouse showed, on average, gains of 11.7 % in the percentage of rooting in relation to the conventional greenhouse in summer condition. In winter, the main limiting factor for rooting adventitious *Eucalyptus* mini cuttings is low temperatures. The genotypes with greater phenotypic plasticity, managed to adjust to the levels of solar radiation, to be observed by clones A and B, which showed an increase in the content of anthocyanins, a photoprotection mechanism, whereas clone D, had a reduction in exchanges gaseous. In turn, the adventitious rooting of clones A and C stands out from clones B and D, which have some limitation to rooting. In general, clones with photoprotection mechanisms and easy rooting, performed better than clones without photoprotection mechanisms and with limited rooting. The response curves of photosynthesis are important parameters to optimize the management of seedlings in nurseries.

Keywords: Plant ecophysiology. Mathematical models. Simulation (Computers). Vegetative propagation. Light

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1. Projeto 3D da casa de vegetação automatizada com sistemas de malhas sobrepostas (A e B). Sistema de tracionamento das malhas compostos por motorreductor, eixo e polias (C, D e E). Localização do sensor de irradiância solar global e malhas sobrepostas.23
- Figura 1.2. Componentes elétricos/eletrônicos principais do sistema automatizado.....24
- Figura 1.3. Fluxograma que exemplifica o algoritmo de acionamento dos motores que movimentam as malhas.....25
- Figura 1.4. Projeto 3D de uma casa de vegetação automatizada (A) e o volume útil extraído em interface computacional (domínio computacional) com a construção das malhas (Sub - domínio) onde as equações diferenciais de transporte são solucionadas pelo computador através do balanço de entradas e saídas em um volumes de controle (B).....27
- Figura 1.5. Condições de contorno para casa de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional.....28
- Figura 1.6. Sensores de temperatura do ar instalados no interior das casas de vegetação automatizada e casas de vegetação convencional para coleta dos dados de temperatura do ar observados. Imagem com ilustração da rede de sensores de temperatura do ar no interior da casa de vegetação automatizada (A). Encapsulamento dos sensores de temperatura do ar com protetor de PVC (B), distribuição longitudinal dos sensores de temperatura do ar (C) e distribuição transversal dos sensores de temperatura do ar na interface computacional (D)....30
- Figura 1.7. Efeito da atenuação da irradiância solar no interior de casa de vegetação com sistema convencional (CC) e sistema automatizado (CA).....32
- Figura 1.8. Temperatura do ar no interior de casa de vegetação convencional (CC) e casa de vegetação automatizada (CA).....33
- Figura 1.9. Teste de independência das malhas, afim de garantir que os cálculos numéricos fossem independentes da densidade de malhas. O teste realizado para determinar em qual densidade de malhas ocorre estabilização da temperatura do ar.....34
- Figura 1.10. Distribuição de temperatura do ar para casas de vegetação automatizada (A) e para casa de vegetação convencional (B). Iso-superfície dividindo o volume útil do ar no interior da casa de vegetação automatizada com temperatura do ar acima de 31,1 °C (Acima da iso-superfície) e volume de ar útil com temperatura do ar variando de 30,6 a 31,1°C (abaixo da iso-superfície) (C). Iso-superfície dividindo volume de ar útil no interior da casa de vegetação convencional acima de 35,0 °C (Acima da iso-superfície) e volume de ar com temperatura do ar variando de 33,6 a 35 (abaixo da iso-superfície) (D).....36

Figura 1.11. Distribuição de temperatura do ar no interior das casas de vegetação automatizada (A, C e E) e no interior da casa de vegetação convencional (B, D e F).....	37
Figura 2.1. Irradiância solar durante o ciclo de inverno (A) e verão (B), razão entre irradiância solar global (R_g) e irradiância solar no topo da atmosfera (R_o) (nebulosidade) para inverno (C) e verão (D) e temperatura do ar durante o ciclo de inverno (E) e verão (F).....	55
Figura 2.2. Irradiância solar para ciclo de inverno no interior da casa de vegetação convencional = CC, (A) e casa de vegetação automatizada = CA, (B).....	57
Figura 2.3. Irradiância solar para ciclo de inverno no interior da casa de vegetação convencional = CC, (A) e casa de vegetação automatizada = CA, (B).....	58
Figura 2.4. Irradiância solar para dias típicos de inverno (A) e para dias típicos de verão (B). Irradiância solar com média horária no inverno (C) e verão (D). Irradiância solar integrada para período de enraizamento em casa de vegetação convencional (CC) e automatizada (CA) e aclimação em casa de sombra para inverno (E) e verão (F)	59
Figura 2.5. Temperatura do ar durante o ciclo de inverno (A) e ciclo de verão (B) no interior das casas de vegetação automatizado para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).....	60
Figura 2.6. Umidade relativa (A e B) e déficit de pressão de vapor (DPV) (C e D) no ciclo de inverno (A) e verão (B) no interior de casa de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).....	61
Figura 2.7. Distribuição de matéria seca para ciclo de inverno e verão no interior da Casa de vegetação automatizada (CA) e casa de vegetação convencional (CC), para os clones A, B, C e D.....	64
Figura 3.1. Cronologia de medidas ecofisiológicas ao longo do experimento: Até os 30 dias foi o período que miniestacas ficaram no interior de casa de vegetação automatizada (CA) e convencional (CC) para enraizamento adventício. A partir desta etapa todas as plantas ficaram por um período de aclimação de quinze dias na casa de sombra.....	78
Figura 3.2. Irradiância solar durante (A) e temperatura do ar (B) na parte externa da casa de vegetação durante o período experimental.....	83
Figura 3.3. Irradiância solar no inverno (A) e verão (B), no interior da casa de vegetação convencional (CC) e casa de vegetação automatizada (CA).....	84
Figura 3.4. Médias horárias da irradiância solar global no interior da casa de vegetação convencional (CC) e no interior da casa de vegetação automatizada (CA (A). Radiação solar global integrada durante o ciclo de enraizamento e aclimação em casa de sombra (B).....	85
Figura 3.5. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (B), no interior da casa de vegetação convencional (CC) e no interior da casa de vegetação automatizada (CA) durante enraizamento das miniestacas.....	86

Figura 3.6. Temperatura do ar média (A) e déficit de pressão de vapor (DPV) no interior da casa de vegetação automatizado (CA) e convencional (CC).....87

Figura 3. 7. Mudanças de clones A, B, C e D enraizadas em casa de vegetação automatizado (CA) e convencional (CC) e aclimatadas em casas de sombra. Detalhes das raízes saindo para fora do tubete na casa de vegetação automatizada (A) e convencional (B).....89

Figura 3.8. Curvas de resposta da fotossíntese em função da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), 30 dias após o estaqueamento em mudas de *Eucalyptus* para os clones A, B, C e D enraizadas em casa de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).....92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Características principais das casas de vegetação com sistema de sombreamento automatizada (CA) e casa de vegetação convencional (CC), com sistema de sombreamento fixo sobre o dossel das miniestacas.....	22
Tabela 1.2. Relação dos sensores instaladas nas estações meteorológicas.....	26
Tabela 1.3. Valores de temperatura do ar observados (OBS) e estimado (EST) pelo modelo de CFD dentro das casas de vegetação automatizada (CA) e convencional (CC).....	35
Tabela 1.4. Índices estatísticos calculados para avaliar o modelo.....	35
Tabela 2.1. Tratamentos formados pelos efeito do ambiente na fase de enraizamento adventício, proporcionados pela casa de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional, com sombreamento de 50 % fixo (CC) e efeito dos clones A, B, C e D. As unidades experimentais foram formadas por 16 miniestacas e foram distribuídas aleatoriamente.....	47
Tabela 2.2. Sais utilizados para preparo das soluções nutritivas aplicadas no minijardim clonal.	48
Tabela 2.3. Relação dos sensores instalados nas estações meteorológicas utilizados no experimento.....	51
Tabela 2.4. Enraizamento, sobrevivências, índice de Qualidade de Dickson (IQD) e eficiência do uso da irradiância solar (EUR) nos ciclos de inverno e verão. Avaliação feita em mudas de <i>Eucalyptus</i> para os clones A, B, C e D enraizadas em casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC) e aclimatadas em casa de sombra.....	63
Tabela 3.1. Tratamentos formados pelos efeitos do ambiente na etapa de enraizamento adventício, proporcionados pela casa de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional, com sombreamento de 50 % fixo (CC) e efeito dos clones A, B, C e D.....	73
Tabela 3.2. Sais utilizados nas soluções nutritivas aplicadas no minijardim clonal.....	74
Tabela 3.3. Relação dos sensores instalados na estação meteorológicas utilizadas no experimento.....	77
Tabela 3.4. Biometria da altura da parte área, diâmetro do caule, matéria seca folhas, caules e raízes 45 dias após estaqueamento. Mudas de híbridos superiores de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i> para os clones A, B, C e D enraizadas em casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC) e aclimatadas em casa de sombra.....	90

Tabela 3.5. Modelos de curvas de resposta da fotossíntese em função da radiação fotossinteticamente ativa medidas no interior das casas de vegetação automatizada (CA) e casa de vegetação convencional (CC) para os clones A, B, C e D.....91

Tabela 3.6. Parâmetros de curva de luz, fotossíntese máxima (A_{max}), ponto de compensação de RFA (PCR), eficiência quântica (α) para híbridos superiores de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* para os clones A, B, C e D enraizadas em casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).....93

Tabela 3.7. Fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s) e relação C_i/C e densidade estomática (n° estômatos. mm^{-2}) em mudas de híbridos superiores de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* para os clones A, B, C e D enraizadas em ambiente formado pelas casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC) e aclimatadas a casa de sombra.....95

Tabela 3.8. Teor de clorofila a ($mg. g MF^{-1}$), Clorofila b ($mg. g MF^{-1}$), carotenóide ($mg.g MF^{-1}$), e antocianina ($ug.g MF$) em massa fresca (MF) de folhas de mudas de híbridos superiores de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* para os clones A, B, C e D enraizadas em ambiente formado pelas casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).....97

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFD	Computational fluid dynamics
CA	Casa de vegetação automatizada
CC	Casa de vegetação convencional
BIAS	Índice de Bias
d	Índice de Wilmott
EPAM	Erro predição absoluto médio
EUR	Eficiência do uso da Irradiância solar
S (%)	Porcentagem de enraizamento das miniestacas
E (%)	Porcentagem de sobrevivência das miniestacas
IQD	Índice de qualidade de Dickson
PCR	Ponto de compensação à radiação ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
DPV	Déficit de pressão de vapor (KPa)

LISTA DE SÍMBOLOS

R_g	Irradiância solar global ($\text{W m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
T	Temperatura do ar (K)
C	Calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
p	Pressão (N m^{-2})
ρ	Densidade (Kg m^{-3})
v	Velocidade (m s^{-2})
q_0	Fluxo de calor
ε	Emissividade
α	Alfa
ω	Constante 5.67 E^{-8} ($\text{w m}^{-2} \text{ k}^{-4}$)
T_0	Temperatura – 298 (K)
h	4,5 ($\text{w m}^{-2} \text{ k}^{-1}$)
%	Porcentagem
BSM_{tot}	Biomassa seca total (g)
H	Altura da parte aérea (cm)
D	Diâmetro do colo (mm)
$\text{BSM}_{\text{p. aérea}}$	Biomassa seca da parte aérea (g)
BSM_{raiz}	Biomassa seca da raiz (g)
A	Fotossíntese líquida momentânea, ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
A_{max}	Fotossíntese líquida máxima, ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
E	Transpiração ($\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
g_s	Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
e	Base do logaritmo natural ($e = 2,718$)
k	Constante de proporcionalidade associada à concavidade da curva
A_{max}	Fotossíntese máxima ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
α	Eficiência quântica ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \mu\text{mol RFA m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
C_i	Concentração de CO_2 interno a câmara subestomática
C_a	Concentração de CO_2 externo a câmara subestomática

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	17
REFERÊNCIAS.....	18
1. CAPÍTULO 1 : VARIABILIDADE ESPACIAL DA TEMPERATURA NO INTERIOR DE UMA CASA DE VEGETAÇÃO CONVENCIONAL E UMA CASA DE VEGETAÇÃO AUTOMATIZADA PARA CONTROLE DOS NÍVEIS DE IRRADIÂNCIA SOLAR NO ENRAIZAMENTO DE MINIESTACAS DE <i>Eucalyptus</i>	20
1.1. INTRODUÇÃO.....	20
1.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
1.2.1. Tratamentos e local de estudo	22
1.2.2. Sistema automatizado de controle da irradiância solar	23
1.2.3. Medidas dos elementos meteorológicas.....	25
1.2.4. Estudo térmico com CFD.....	26
1.2.4.1 Pré - processamento.....	26
1.2.4.2. Processamento.....	29
1.2.4.3. Pós-processamento.....	29
1.3. RESULTADOS.....	31
1.3.1. Irradiância solar no interior das casas de vegetação.....	31
1.3.2. Temperatura do ar no interior das casas de vegetação.....	32
1.3.3. Simulação de CFD.....	33
1.3.3.1. Teste de independência de malhas.....	33
1.3.3.2. Validação dos resultados.....	34
1.3.3.3. Distribuição espacial da temperatura do ar no interior das casas de vegetação	35
1.4. DISCUSSÃO.....	38
1.4.1 Irradiância solar e temperatura no interior da casa de vegetação convencional e automatizada.....	38
1.4.2. Modelo de interface computacional de CFD.....	39
1.4.3. Distribuição espacial da temperatura do ar no interior das casas de vegetação automatizada e convencional.....	40
1.5. CONCLUSÕES.....	41
1.6. REFERÊNCIAS.....	41
2. CAPÍTULO 2. ENRAIZAMENTO DE MINIESTACAS EM CASA DE VEGETAÇÃO COM CONTROLE AUTOMÁTICO DA IRRADIÂNCIA SOLAR.....	45
2.1. INTRODUÇÃO.....	45
2.2. MATERIAS E MÉTODOS.....	46
2.2.1. Área experimental.....	46

2.2.2. Tratamentos e delineamento experimental.....	47
2.2.3. Estrutura experimental e montagem do experimento.....	47
2.2.4. Variáveis meteorológicas.....	50
2.2.5. Porcentagem de enraizamento, medidas biométricas e índice de qualidades	52
2.2.6. Eficiência do uso da irradiância solar (EUR).....	53
2.2.7. Análises dos dados.....	53
2.3. RESULTADOS.....	54
2.3.1. Condições meteorológicas.....	54
2.3.1.1. Irradiância solar, temperatura do ar e nebulosidade na parte externa.....	54
2.3.1.2. Radiação solar global no interior das casas de vegetação.....	56
2.3.1.3. Temperatura do ar no interior das casas de vegetação	60
2.3.1.4. Umidade relativa e déficit de pressão de vapor (DPV).....	61
2.3.2. Porcentagem de enraizamento e sobrevivência, IQD e EUR	62
2.3.3. Distribuição de matéria seca.....	64
2.4. DISCUSSÃO.....	65
2.5. CONCLUSÕES.....	68
2.6. REFERÊNCIAS.....	68
3. CAPÍTULO 3. ECOFISIOLOGIA DE MINIESTACAS DE <i>Eucalyptus</i> EM CASA DE VEGETAÇÃO AUTOMATIZADA PARA CONTROLE DA IRRADIÂNCIA SOLAR.....	71
3.1. INTRODUÇÃO.....	71
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	73
3.2.1. Área experimental.....	73
3.2.2. Tratamentos e delineamento experimental	73
3.2.3. Estrutura experimental e montagem do experimento.....	74
3.2.4. Variáveis Meteorológicas.....	76
3.2.5. Medidas ecofisiológicas.....	78
3.2.5.1. Densidade estomática.....	78
3.2.5.2. Medidas de Trocas gasosas.....	79
3.2.5.3. Medidas de Curvas de luz.....	79
3.2.5.4. Teor de pigmentos fotossintéticos e de antocianinas	80
3.2.5.5. Medidas biométricas	81
3.2.6. Análise de dados	81
3.3. RESULTADOS.....	82
3.3.1. Condições meteorológicas	82
3.3.1.1. Radiação solar global e temperatura externa.....	82
3.3.1.2. Radiação solar global diária, horária e integrada.....	82
3.3.1.3. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA).....	82
3.3.1.4. Temperatura do ar e déficit de pressão de vapor.....	87
3.3.2. Medidas biométricas, matéria secas e área foliar.....	88
3.3.3. Curvas de respostas da fotossíntese.....	91
3.3.4. Medidas de trocas gasosas e densidade estomática.....	94
3.3.5. Teor de pigmentos fotossintéticos e antocianinas.....	96
3.4. DISCUSSÃO.....	98
3.5. CONCLUSÕES.....	101
3.6. REFERÊNCIAS.....	101
3.7. CONCLUSÃO GERAL.....	101

INTRODUÇÃO GERAL

O plantio de florestas no Brasil tem grande importância ambiental e econômica, tendo papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas, pela fixação de carbono pelas florestas e sendo responsável pela geração de 3,75 milhões de empregos (IBÁ, 2020). O Brasil destaca-se na produção de florestas de *Eucalyptus*, com plantio de 6,97 milhões de hectares e produtividade média de 35,3 m³ ano⁻¹ (IBÁ, 2020). Neste cenário, a produção de mudas clonais de híbridos superiores de *Eucalyptus*, através da propagação por miniestaquia, foi uma das principais inovações que contribuíram para ganhos de produtividade das florestas nas últimas décadas (ASSIS et al., 2004, XAVIER et al., 2013).

Atualmente, um dos principais desafios na produção de mudas clonais de *Eucalyptus*, são inerentes ao controle adequado dos elementos meteorológicos, dentre eles, a irradiância solar e a temperatura do ar no interior das casas de vegetação. Sabe-se que a irradiância solar e a temperatura do ar tem um papel fundamental no processo de enraizamento adventício em miniestacas de *Eucalyptus* pois são associados a mecanismos fisiológicos e bioquímicos, como a dinâmica de hormônios e carboidratos (ALMEIDA et al., 2017).

Sob excesso de irradiância solar, as plantas desenvolveram mecanismos de adaptação e aclimatação para atenuar os efeitos nocivos do excessos de fótons como, por exemplo, o aumento da produção de pigmentos (clorofilas, carotenóides) e flavonóides (e.g. antocianinas) (TATTINI et al., 2014), mudanças na regulação e disposição de folhas e estômatos (MOTT et al., 1982; MOTT & MICHAELSON 1991), abertura e fechamento estomáticos (WALTKINS et al., 2017) e adaptação de processos fisiológicos como a fotoinibição e a fotorrespiração (TAIZ & ZEIGER, 2013). Estas respostas variam de acordo com os genótipos sendo alguns com maior plasticidade fenotípica (maior capacidade de mudar sua fisiologia para se ajustar ao ambiente estressante) e outros menos (BORÉM & FRITSCHÉ-NETO, 2011).

Em regiões tropicais, a irradiância solar em excesso promovem o aumento da temperatura do ar, que pode resultar em perdas para produção vegetal realizada no interior de casas de vegetação. As faixas de temperaturas ótimas para enraizamento adventício de miniestacas de *Eucalyptus* são em torno de 20 a 30 °C (CORREA et al., 2001). Entretanto, estes valores variam bastante e faltam estudos para determinar a temperatura ótima para o enraizamento. Sabe-se que o excesso térmico acelera o metabolismo aumentando a respiração e a transpiração foliar, promovendo o fechamento de estômatos e desnaturação de proteínas afetando a fotossíntese líquida (TAIZ & ZEIGER, 2013).

Neste cenário, a automação dos sistemas de controle dos elementos meteorológicos, em especial, a irradiância solar, podem ajudar a aumentar a eficiência de produção vegetal. Atualmente, a automação dos viveiros de produção de mudas de plantios comerciais de *Eucalyptus* comumente se restringe a irrigação e o controle da temperatura do ar por sistemas de abertura de janelas zenitais e resfriamento evaporativo por nebulização intermitente. O sombreamento nas fases de enraizamento das miniestacas é normamento feito usando malhas de atenuação de 50 % fixo sobre o dossel. Pedroso (2016) estudou o efeito de níveis de irradiância solar no enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus*, demonstrando que a abordagem de atenuação fixa pode não ser mais adequada, visto que houve ganhos no enraizamento com malhas de atenuação de 65 e 80 %.

Propôs se desta forma, uma casa de vegetação automatizada com um sistema de controle automático da irradiância solar, para otimizar o enraizamento das miniestacas de *Eucalyptus*. Este sistema, por meio de um algoritmo, permite ativar motores que movem as malhas de atenuação e implementam até quatro níveis de irradiância solar no interior da casa de vegetação. Neste trabalho, no interior da casa de vegetação automatizada proposta, os níveis de irradiância solar foram programados de acordo com estudo de Pedroso (2016), visando maior atenuação da irradiância solar em relação ao cultivo em casa de vegetação convencional, sob hipótese que o controle adequado da irradiância solar levará a aumento / favorecimento no enraizamento de miniestacas em clones de *Eucalyptus*.

Desta forma, este estudo foi dividido em três capítulos sendo o primeiro um estudo da dinâmica de temperatura do ar no interior da casa de vegetação automatizada e convencional utilizando modelagem de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). No segundo capítulo, avaliamos o efeito do sistema automatizado de controle da irradiância solar no enraizamento e qualidade das mudas em comparação com sistema convencional de produção. No terceiro capítulo, o objetivo foi estudar as respostas ecofisiológicas de minestacas de *Eucalyptus*, enraizados em casa de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional, sendo posteriormente aclimatadas em casa de sombra.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. R.; AUMOND, M. J.; COSTA, C. T.; SCHWAMBACH, J.; RUEDEL C. M.; CORREA, L. R.; FETT-NETO A. G. Environmental control of adventitious rooting in *Eucalyptus* and *Populus* cuttings. *Trees*, v. 31, p. 1377-1390, 2017.

ASSIS, T. F.; FETT-NETO, A. G.; ALFENAS, A. C. Current techniques and prospects for the clonal propagation of hardwoods with emphasis on *Eucalyptus*. Plantation Forest Biotechnology for the 21 century, Kerala, India, 2004.

BORÉM & FRITSCHÉ-NETO Melhoria de plantas para condição de estresse abiótico. Editora: edição Independente, p. 250, 2011.

CORREA, L. R.; FETT-NETO, A. G. Effects of temperature on adventitious root development in microcutting of *Eucalyptus Saligna Smith* and *Eucalyptus globulus Labil*. Journal of Thermal Biology, v. 29, p. 315 - 324, 2004.

IBÁ. Relatório 2020, Indústria brasileira de árvores. disponível em: <https://iba.org/>, Acesso:21/11/2020.

MOTT, K. A.; GIBSON, A. C.; O'LEARY, J. W. The adaptative significance of amphistomatous leaves. Plant, Cell and Environment, v. 5, p. 455 - 460, 1982.

MOTT, K.A.; MICHAELSON, O; Amphistomy as an adaptation to high light-intensity in *Ambrosia cordifolia* (Compositae). American Journal of Botany, v.78, p. 76-79, 1991.

PEDROSO, E. J. Enraizamento de miniestacas e ecofisiologia de mudas de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* submetidas a diferentes intensidade de irradiância solar. Disponível em: <http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/tese-elias-josé-pedroso.pdf>.

TATTINE, M.; LANDI, M.; BRUNETTI, C.; GIORDANO, C.; REMORINI; GOULD, K.S.; GUIDI, L. Epidermal coumaroyl anthocyanins protect sweet basil against excess light stress: multiple consequences of light attenuation. Physiologia Plantarum, v.152, p. 585-598, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal, Editora ARTMED, v.5, p. 354, 2013.

WATKINS, J.M; CHAPMAN, J.M.; MUDAY, G.K. Abscisic Acid-Induced Reactive Oxygen Species Are Modulated by Flavonols to Control Stomata Aperture. Plant Physiology, v. 175, p.1807–1825, 2017.

XAVIER, A.; WENDLING, I.; SILVA, R.J. Silvicultura clonal: princípios e técnicas. Editora UFV. Viçosa - MG, 2013.

CAPÍTULO 1

VARIABILIDADE ESPACIAL DA TEMPERATURA NO INTERIOR DE UMA CASA DE VEGETAÇÃO CONVENCIONAL E UMA CASA DE VEGETAÇÃO AUTOMATIZADA PARA CONTROLE DOS NÍVEIS DE IRRADIÂNCIA NO ENRAIZAMENTO DE MINIESTACAS DE CLONES DE *Eucalyptus*

1.1. INTRODUÇÃO

O controle dos elementos meteorológicos na propagação clonal de *Eucalyptus* por miniestaquia, em especial, a irradiância solar, a temperatura do ar e a umidade relativa são fundamentais para o sucesso do enraizamento adventício de miniestacas em casa de vegetação (HARTMANN et al., 2011). Nestas condições, a irradiância solar e a temperatura do ar são diretamente relacionadas com as atividades metabólicas de enzimas, produção e distribuição de hormônios e carboidratos que regulam a formação das raízes (ALMEIDA et al., 2017). Assim, em clima tropical, o excesso de irradiância solar é um fator limitante para o enraizamento adventícios de miniestacas de *Eucalyptus* (PEDROSO, 2016).

O enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus* em casa de vegetação é uma das etapas mais críticas do processo de produção de mudas, pela fragilidade dos propágulos vegetativos (ALFENAS et al., 2004), complexidade nas respostas fisiológicas e genéticas (RUEDELL et al., 2015) e controle adequado dos fatores meteorológicos (HARTMANN et al., 2011). O manejo dos níveis de irradiância solar e temperatura do ar, podem contribuir para reduzir as perdas recorrentes deste processos e otimizar o enraizamento de miniestacas dentro de casas de vegetação (XAVIER et al., 2013; HARTMANN et al., 2011; ALMEIDA et al., 2017).

Neste contexto, a automação podem aumentar a eficiência dos fatores de produção, entre eles, a temperatura do ar e a irradiância solar (TERUEL, 2010). A automação dos viveiros de produção de mudas de plantios comerciais de *Eucalyptus* comumente se restringe a irrigação e o controle da temperatura do ar por sistemas de abertura de janelas zenitais, exaustores e resfriamento evaporativo por nebulização intermitente. O sombreamento na etapa de enraizamento é normamente feito usando malhas de atenuação de 50 % fixo sobre o dossel das plantas. Pedroso (2016) demonstrou que a abordagem de atenuação fixa da irradiância solar pode não ser mais adequada, visto que, as miniestacas tiveram melhor enraizamento adventícios utilizando malhas de atenuação de 65 e 80 % de atenuação para condições de Viçosa, Minas Gerais no período de verão.

Por sua vez, a automação de casa de vegetação demanda uma mão de obra mais especializada, uso de sensores e controladores específicos, além de investimento econômico inicial maior, sendo assim, necessário um estudo criterioso para sua implementação. Neste sentido, as ferramentas de simulação computacional da dinâmicas dos fluídos (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) podem ser utilizadas para uma investigação mais acurada e detalhada da dinâmica do ar no interior das casas de vegetação.

O CFD é uma ferramenta de interface computacional de simulação dos fenômenos da mecânica dos fluídos, que consiste em um *software* que resolve equações diferenciais que representam as leis da física que explicam o comportamento dos fluídos e geram estimativas da velocidade, temperatura e pressão do ar (TU JIYUAN et al., 2013). Esta ferramenta permite a elaboração detalhadas de mapas de distribuição de temperatura do ar, pressão e velocidade do vento, além da elaboração de vários cenários de simulação na interface computacional com excelente precisão, desde que a metodologia de simulação tenha sido antes validada com dados de experimentos reais (TU JIYUAN et al., 2013).

O CFD tem sido amplamente utilizada, aplicado em estudos de sensores (ROCHA et al., 2014), componentes de resfriamento (OZÓRIO et al., 2012) e conforto térmico em ambientes de produção animal (BJERG et al., 2013, OSÓRIO et al., 2016). Entender os efeitos dos ventos, da temperatura do ar e da irradiância solar ajuda a otimizar o design das construções e os processos de resfriamento dentro de casas de vegetação (KIM et al., 2017, BOULARD et al., 2017).

Assim, foi projetada uma casa de vegetação automatizada para o controle da irradiância solar com o intuito de otimizar o enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus*, com possibilidade de até quatro níveis de irradiância solar. Neste trabalho, os níveis de irradiância solar no interior da casa de vegetação automatizada foram ajustados de acordo com Pedroso (2016).

O Objetivo do trabalho foi avaliar comparativamente as condições ambientais no interior de uma casa de vegetação convencional, com sistema de malhas de atenuação de 50 % da irradiância solar fixo, com outra dotada de um sistema automático de controle dos níveis de irradiância solar em tempo real.

Para alcançar nossas propostas determina-se os objetivos específicos a seguir: i) Caracterizar a irradiância solar global e a temperatura do ar internamente a casa de vegetação convencional e casa de vegetação automatizada para o controle da irradiância solar. ii) Construir um modelo de interface computacional de CFD para simular a distribuição espacial da

temperatura do ar e valida-los com dados reais coletados internamente a casa de vegetação automatizada e a casa de vegetação convencional.

1.2. MATERIAIS E MÉTODOS

1.2.1. Tratamentos e local de estudo

O experimento foi realizado no município de Viçosa, Minas Gerais (20°45'45" S de latitude, 42°52'04" W de longitude e 690 m de altitude), no Viveiro de Pesquisa do Departamento de Engenharia Florestal, pertencente a Universidade Federal de Viçosa. A coleta de dados meteorológicos foi realizadas em janeiro/2020.

Os tratamentos foram formados por uma casa de vegetação automatizada (CA) para o controle da irradiância solar e uma casa de vegetação convencional (CC), similares às utilizadas para produção comercial com tamanho reduzido.

Na casa de vegetação convencional (CC), o controle da irradiância solar foi realizada conforme a produção convencional, onde utiliza-se uma malha tipo Aluminet fixo que bloqueia 50 % (Aluminet® modelos O50 Ginegar Polysack).

Já na casa de vegetação automatizada (CA) foi realizado o controle automatizado dos níveis de irradiância solar, com a instalação de duas malhas sobrepostas, (Aluminet® modelos O50 e O80, Ginegar Polysack). Com a movimentação automatizada das malhas sobreposta, foi possível implementar quatro níveis de irradiância solar (Tabela 1.1).

Tabela 1.1. Características principais das casa de vegetação com sistema de sombreamento automatizada (CA) e casa de vegetação convencional (CC), com sistema de sombreamento fixo sobre o dossel das miniestacas.

Casas de vegetação	Possibilidades para uso das malhas de atenuação	Sombreamento acumulado (%)	Plásticos (microns)	Alt. Pé direito	Dimensões (m)
CA	Aberto (atenuação do plástico)	27	150,0	2,70	6x6x3
	Aluminet (Mod.O50): móvel	65	-	-	-
	Aluminet (Mod. O80): móvel	85	-	-	-
	Malhas sobrepostas: móvel	92	-	-	-
CC	Aluminet (Mod. O50): fixo	65	150,0	2,70	6x6x3

1.2.2. Sistema automatizado de controle da irradiância solar

O sistema automatizado consiste de motoredutores que movimentam malhas de atenuação da irradiância solar, instaladas no interior das casa de vegetação, acima do dossel vegetativo a 2,70 m de pé direito. Foram instaladas duas malhas tipo Aluminet sobrepostas, sendo uma malha que bloqueia 80 % (acima) e outra malha que bloqueia 50 % da irradiância solar (abaixo).

Os dois motoredutores (Modelo motoredutor, 1/6 cv - MDR2 - motor/ 220 trifásico), acoplado a sistemas de tubo/eixo (diâmetro 63,3, parede 3mm; comp. 6m) e mancais realizam a abertura e fechamento das malhas quando acionados a partir de sinais elétricos enviados por sensores de irradiância solar, que mediam em tempo real (Figura 1.1).



Figura 1.1. Projeto 3D da casa de vegetação automatizada com sistemas de malhas sobrepostas (A e B). Sistema de tracionamento das malhas compostos por motoredutor, eixo e polias (C, D e E) e localização do sensor de irradiância solar global e malhas sobrepostas (F).

Os principais componentes elétricos que compõe o sistema são composto por um painel elétrico que comanda o circuito responsável por acionar os motores. Este painel contém os quatros contatores (relés), chave de seguranças e chaves de controle manual/automático. Um sensor piranômetro (Piranômetro CMP3, Campbell Scientific, Inc) mede a irradiância solar e envia um sinal para o datalogger (CR1000 ST-SW-NC, Campbell Scientific, Inc.), que transformar o sinal analógico em digital e aciona os motoredutores por meio dos contatores (Figura 1.2).

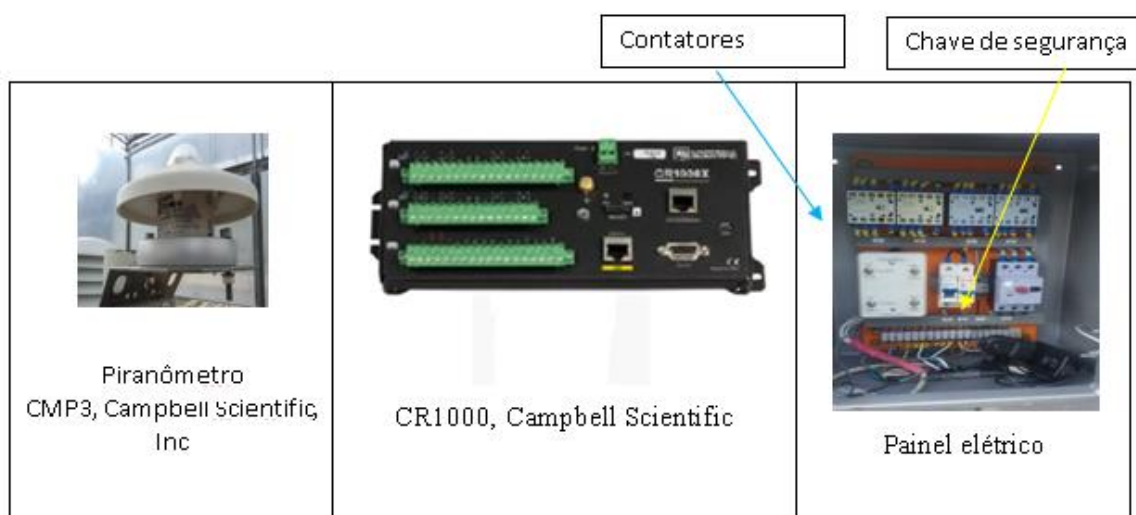


Figura 1.2. Componentes elétricos/eletrônicos principais do sistema automatizado.

Foi desenvolvido um algoritmo que é executado internamente no datalogger e tem como *input* os valores de irradiância solar global medidos pelo piranômetros (R_g) armazenados internamente. O fluxograma da tomada de decisão de sombreamento pelo algoritmo tem quatro *setups* **i**) não sombreados (atenuação de 27 % do plástico da casa de vegetação somente), **ii**) Motor estende Aluminet que bloqueia 50 % (Sombreamento total de 65 %), **iii**) Motor estende Aluminet que bloqueia 80 % (Sombreamento total de 85 %), **iv**) Motor estende Aluminet que bloqueia 50 e 80 % ao mesmo tempo (Sombreamento total de 92 %) (Figura 1.3).

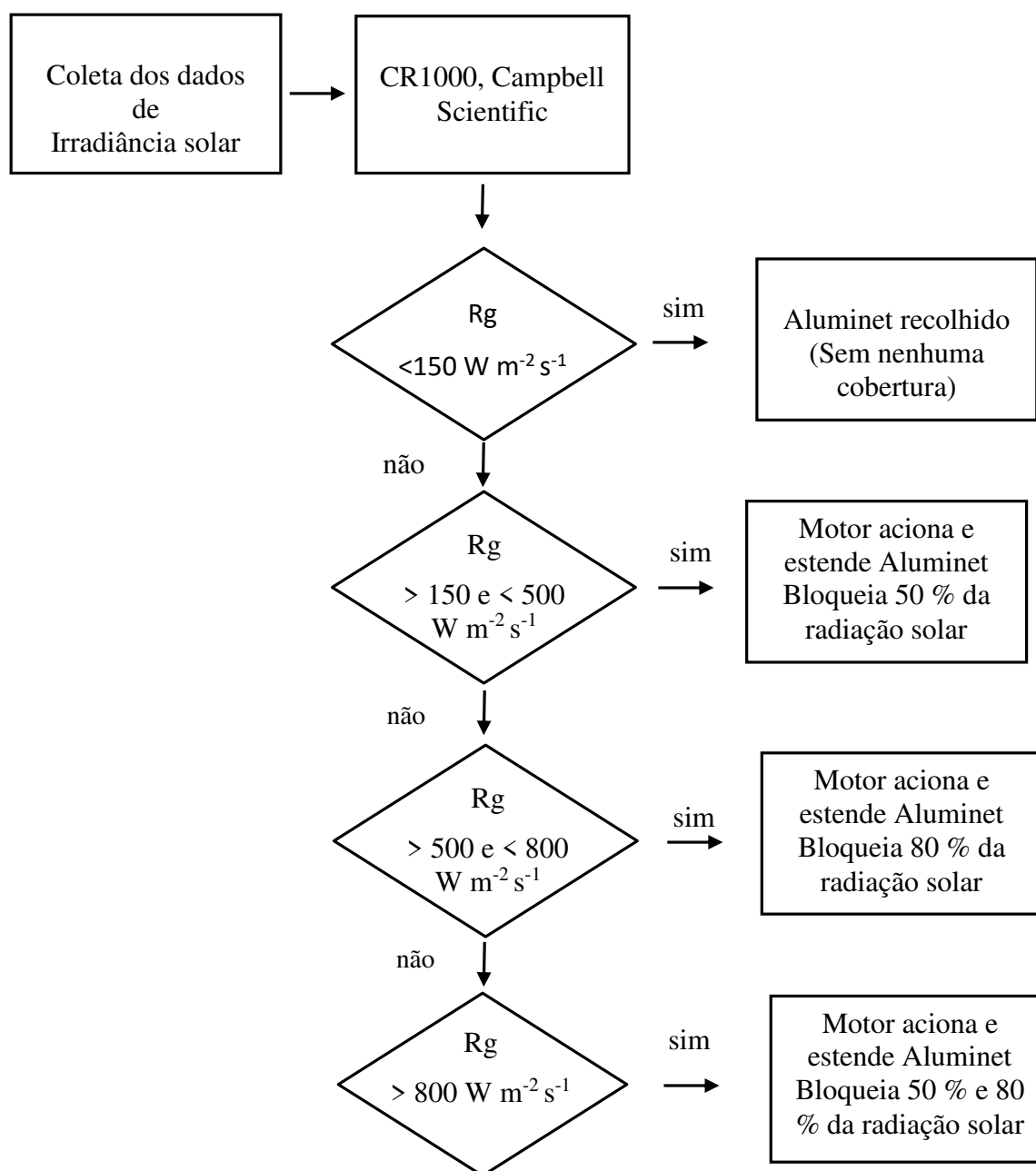


Figura 1.3. Fluxograma que exemplifica o algoritmo de acionamento dos motores que movimentam as malhas.

1.2.3. Medidas dos elementos meteorológicos

Três estações meteorológica foram instaladas, sendo uma interna em cada casa de vegetação, composta por um termohigrômetro, um piranômetro e outra externa compostos pelo mesmos sensores adicionada de um anemômetro e pluviômetro. As informações das estações foram armazenadas em um dataloger (CR1000 ST-SW-NC, Campbell Scientific, Inc.) e as condições atmosféricas foram medidas e registradas ao mesmo tempo (Tabela 1.2).

Tabela 1.2. Relação dos sensores instaladas nas estações meteorológicas.

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, The Netherlands)
Piranômetro	Irradiância solar global	- Black & Write 8- 48, Eppley
Piranômetro	Irradiância solar global	- Silicone Pyranometer 075239, Kipp & Zonen, Röntgenweg, The Netherlands
Anemômetro	Velocidade do vento	- Modelo TE 525, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA

1.2.4. Estudo térmico com CFD

O objetivo foi utilizar a análise de CFD para modelar o comportamento da temperatura do ar dentro das casas de vegetação, sob o efeito de diferentes intensidades de irradiância solar, proporcionada pela atenuação da irradiância solar nos sistemas convencional (CC) e automatizado (CA). Esta análise visa entender a variação espacial da temperatura do ar nas duas condições propostas, sob efeitos de condições de contorno, medidas as 12 horas em um dia típico de verão com sol intenso.

A modelagem CFD foi realizada em três etapas: Pré-processamento, processamento, pós-processamento (TU JIYUAN et al., 2013).

1.2.4.1 Pré - processamento

Na etapa de pré-processamento foram realizados os projetos da geometria das casas de vegetação em 3D. Deste projeto, extraiu-se um volume útil, correspondente ao “domínio físico” (região onde ocorre o fluxo do ar no interior da casa de vegetação), utilizada para obter o domínio computacional utilizando o *software* ANSYS CFX *design Modeler*. Em um segundo programa (*ANSYS CFX Meching*), foram realizados a construção das malhas (Sub-dominios) onde as equações diferenciais de transportes, foram solucionadas pela discretização do domínio

computacional em volumes de controle, resolvidas por cálculo numérico de volumes finitos, realizada pelo computador (Figura 1.4).

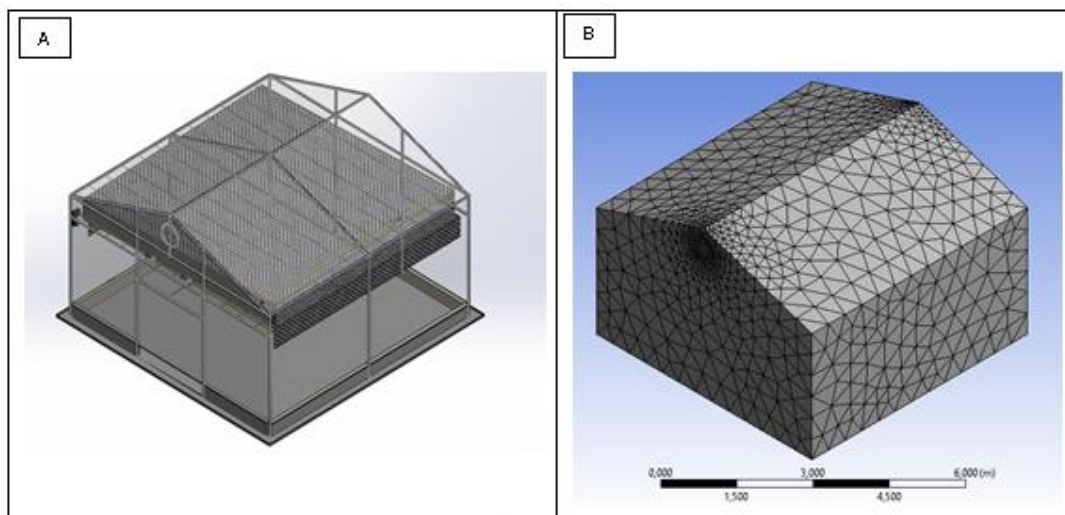


Figura 1.4. Projeto 3D de uma casa de vegetação automatizada (A). Volume útil extraído em interface computacional (domínio computacional) com a construção das malhas (Sub - domínio), onde as equações diferenciais de transporte são solucionadas pelo computador através do balanço de entradas e saídas em um volumes de controle (B).

Assumi-se propriedades físicas do ar com regime permanente, de fluxo laminar com escoamento incompressível e não-isotérmico. As equações governamentais de transportes de conservação de massa (1), equações de momento de Navier-Stokes (2, 3 e 4) e a equação de energia (5) foram resolvidas por cálculo numérico de volumes finitos (TU JIYUAN et al., 2013).

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda \partial^2 T}{\rho C \partial x^2} + \frac{\lambda \partial^2 T}{\rho C \partial y^2} + \frac{\lambda \partial^2 T}{\rho C \partial z^2} \quad (5)$$

T = Temperatura (K)

C = calor específico (J kg⁻¹ K⁻¹).

p = pressão (N m⁻²).

ρ = densidade (Kg m⁻³)

v - velocidade (m s⁻²)

As condições de contorno assumidas para solução das equações governamentais foram de velocidade do vento (v) = 0,5 m s⁻¹ na entrada (medida com anemômetro portátil, Instrutherm AD-250); $v = 0$ m s⁻¹, emissividade (ϵ) = 1 e difusão (f) = 1 nas paredes (telhado, laterais da casa de vegetação), $v = 0$ m s⁻¹, $\epsilon = 0,8$ e $f = 1$ para solo e pressão (p) = 0 na saída para ambas as casas de vegetação (Figura 1.5).

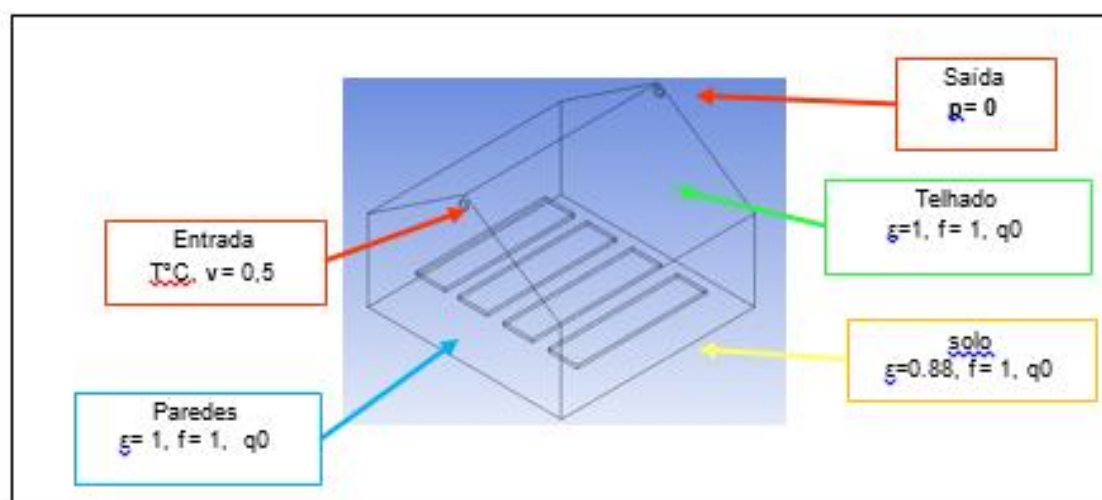


Figura 1.5. Condições de contorno para casa de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional.

Para os cálculos de fluxo de calor nas paredes das casas de vegetação automatizadas e convencional, implementou-se no programa de simulação computacional a equação (6), onde irradiância solar incidente (R_g) nas paredes externas e internas das casas de vegetação foram medidas com um sensor quântico de energia portátil (Quantum, Modelo LI-190SA, Li-Cor, Lincoln-NE, USA), ao mesmo tempo que os dados de temperatura do ar foram obtido no interior das casas de vegetação automatizada e convencional.

$$R_g \cdot \alpha \cdot h \cdot (T - T_0) - \varepsilon \cdot \omega \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

Emissividade (ε) - 0,2

(ω) - $5.67 \text{ E}^{-8} \text{ (w m}^{-2} \text{ k}^{-4})$

T_0 - 298 (K)

alfa (α) - 0,2

h- 4,5 (w m⁻² k⁻¹)

T- temperatura (K)

R_g- irradiância solar global incidente nas paredes (w m⁻²s⁻¹)

1.2.4.2. Processamento

Na etapa de processamento da simulação computacional de CFD, os valores dos resíduos adotados, para o critério de convergência, foram de 10^{-4} , além da estabilização dos parâmetros físico e balanço de massa menor que 1 %.

Após cada simulação são realizados análises dos resultados para implementar ajustes dos parâmetros (parametrização), ajuste da qualidade das malhas, das condições de contorno e termos da equação visando reduzir os erros da simulação.

1.2.4.3. Pós - processamento

Por último, na etapa de pós-processamento os resultados simulados de temperatura do ar foram validados com os dados de temperatura do ar observados no interior das casas de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional (observados x simulados).

Para isso, no interior das duas casas de vegetação os sensores de temperatura do ar foram instalados em 11 pontos distribuídos em dois planos (plano longitudinal e transversal) formando uma matriz espacial que permitiram o mapeamento espacial desta variável, conforme figura 1.6C e 1.6D (COELHO, 2014).

Foi instalado um sistema de transmissão e aquisição de dados que permitiram o acompanhamento da temperatura do ar em tempo real baseado na tecnologia 1- WIRE™ (STEIDLE, 2005). Os sensores de temperatura do ar foram encapsulados com protetor de PVC

(Policloreto de Vinila) para evitar sua exposição direta à irradiância solar e com *cooler* para homogeneizar o ar próximo ao sensor (Figura 1.6)

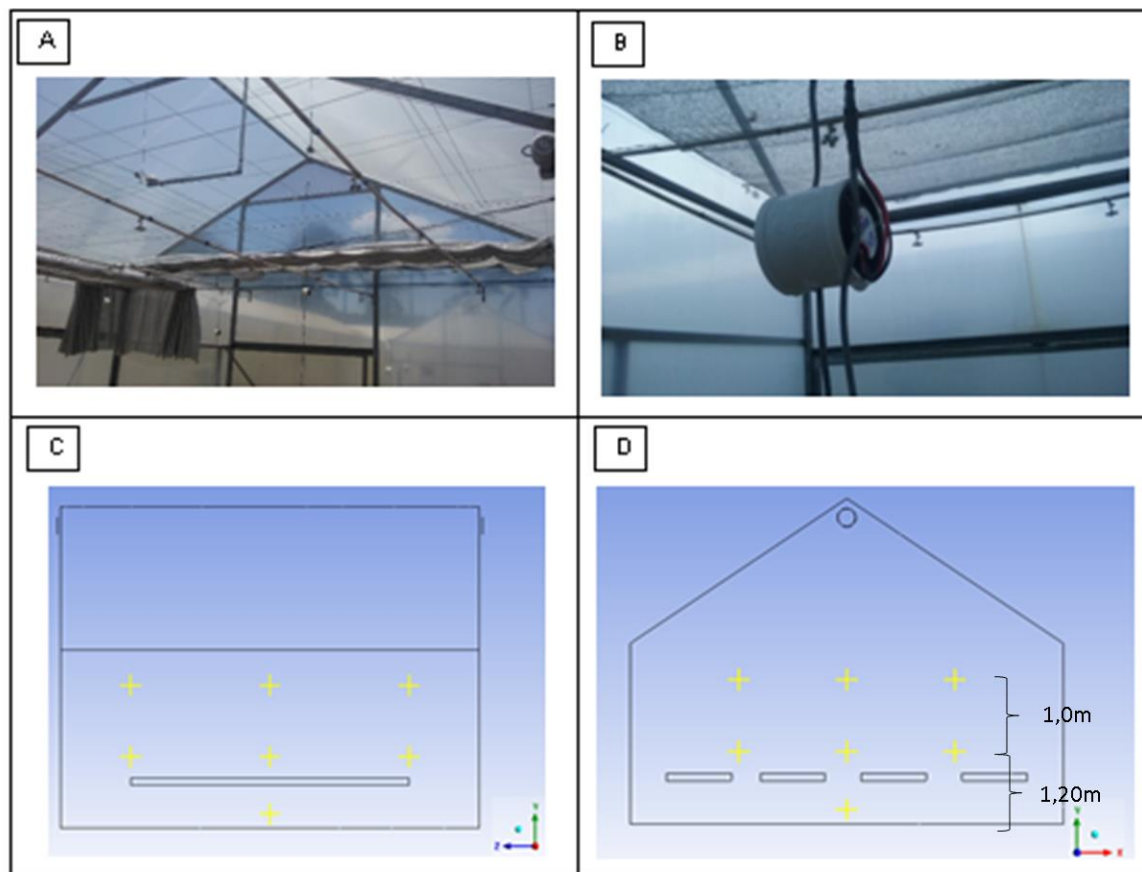


Figura 1.6. Sensores de temperatura do ar instalados no interior das casas de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional para coleta dos dados de temperatura do ar observados. Imagem com ilustração da rede de sensores de temperatura do ar no interior da casa de vegetação automatizada (A). Encapsulamento dos sensores de temperatura do ar com protetor de PVC (B), distribuição longitudinal dos sensores de temperatura do ar (C) e distribuição transversal dos sensores de temperatura do ar na interface computacional (D).

O desempenho dos modelos foi verificado pelos índices BIAS, Willmott (d) e pelo Erro predição absoluto médio (EPAM):

O índice de BIAS expressa a tendência do modelo em subestimar ou superestimar a temperatura do ar em relação ao observado, sendo que os menores valores identificam melhor representar a física do modelo.

O índice de concordância de Willmott (d) mede o quanto os valores estimados estão livre de erro (WILLMOTT, 1981) (equação 7) e variam de 0 a 1, sendo mais próximo de um, maior a concordância entre dados observados e estimados (MARTINS et al., 2014).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E - O)^2}{\sum_{i=1}^n (|E - \bar{O}| + |O - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

O EPAM (Equação 8) é uma medida de erro utilizada para representar as diferenças médias entre os valores observados e estimados (MATSUURA, 2005).

$$EPAM = \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n (est - obs)^2 \right) * 100 \quad (8)$$

1.3. RESULTADOS

1.3.1. Irradiância solar no interior das casas de vegetação

No interior da casa de vegetação automatizada, a irradiância solar foi em média 22 % da irradiância solar externa, com sombreamento médio total de 77,0 %. Como o esperado, a atenuação da irradiância solar foi maior em dias de sol intenso, em decorrência da maior frequência de ativação das malhas de 50 % e 80 % em conjunto.

Por exemplo, em um dia típico de sol, com baixa incidência de nuvens (11/01/2020 e 12/01/2020), a irradiância solar global no interior da casa de vegetação automatizada foi de até 8 % (± 4 %) da irradiância solar externa com sombreamento médio de até 92 % nos horários de maior incidência de irradiância solar. Nestes dias, os picos irradiância solar global foram de 83 W m²s⁻¹ para a casa de vegetação automatizada (Figura 1.7).

Já em dias nublados (14/01/2020 a 15/01/2020) a irradiância solar global no ambiente automatizado correspondeu a 15 % (± 10 %) da irradiância solar externa. Os picos irradiância solar global, para a casa de vegetação automatizada, foram de até 200 W m²s⁻¹ (Figura 1.7). Nestes dias existem maior incidência de irradiância solar indireta devido a maior difusão da energia solar resultado da maior presença de nuvens.

Na casa de vegetação convencional a irradiância solar correspondeu a 42 % da irradiância solar externa com sombreamento médio de 56 %. Para estes dias, a casa de vegetação convencional os picos de irradiância solar foram de 400 W m²s⁻¹ (Figura 1.7).

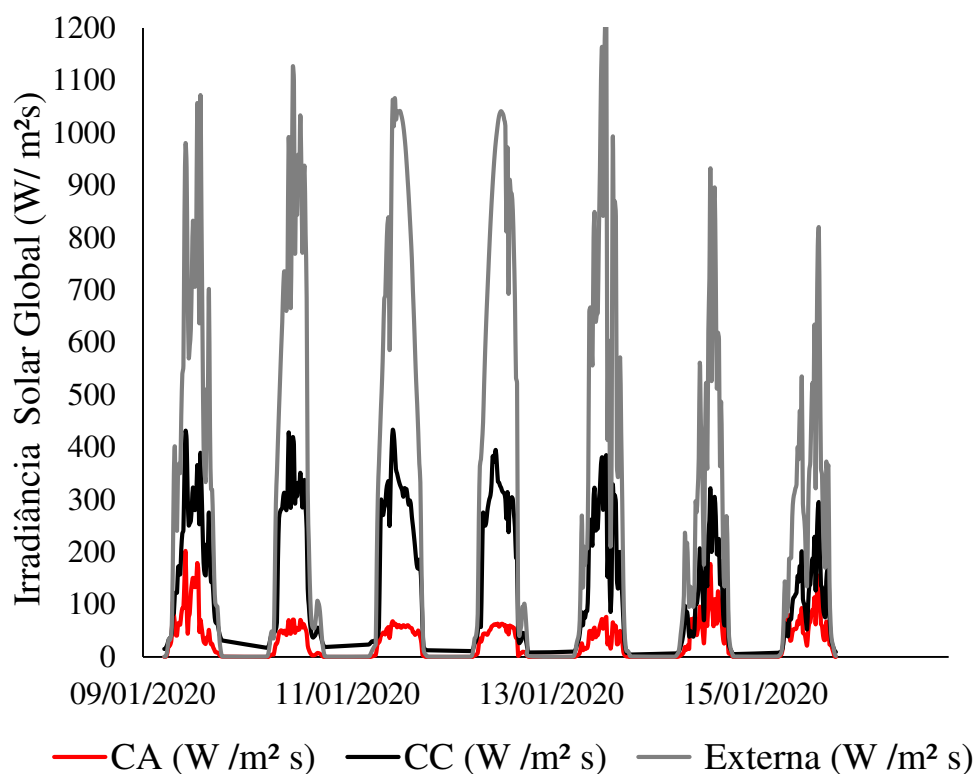


Figura 1.7. Efeito de atenuação da irradiância solar no interior de casa de vegetação com sistema convencional (CC) e sistema automatizado (CA).

1.3.2. Temperatura do ar no interior da casa de vegetação

A temperatura do ar média no interior da casa de vegetação automatizada foi de 26,8 °C ($\pm 4,5$ °C) e na casa de vegetação convencional foi de 28,4 °C ($\pm 5,5$ °C) enquanto a parte externa registrou médias de 25,7 °C ($\pm 4,1$ °C).

A casa de vegetação automatizada teve um aquecimento de 1,1 °C maior em relação a parte externa, enquanto a casa de vegetação convencional a temperatura do ar média foi 2,7 °C maior em relação a parte externa (Figura 1.8).

No interior da casa de vegetação convencional houve um aquecimento de 1,6 °C maior em relação a casa de vegetação automatizada. Porém, nos horários mais quentes, se observa que esta diferença aumenta sendo que as temperaturas do ar podem chegar até 35,6 °C ($\pm 3,5$ °C) na casa de vegetação convencional e 32,1 °C ($\pm 2,1$ °C) na casa automatizada. A casa de vegetação automatizada registrou temperaturas do ar 5,6 % menores, além de menor amplitude térmica se comparada a casa de vegetação convencional (Figura 1.8).

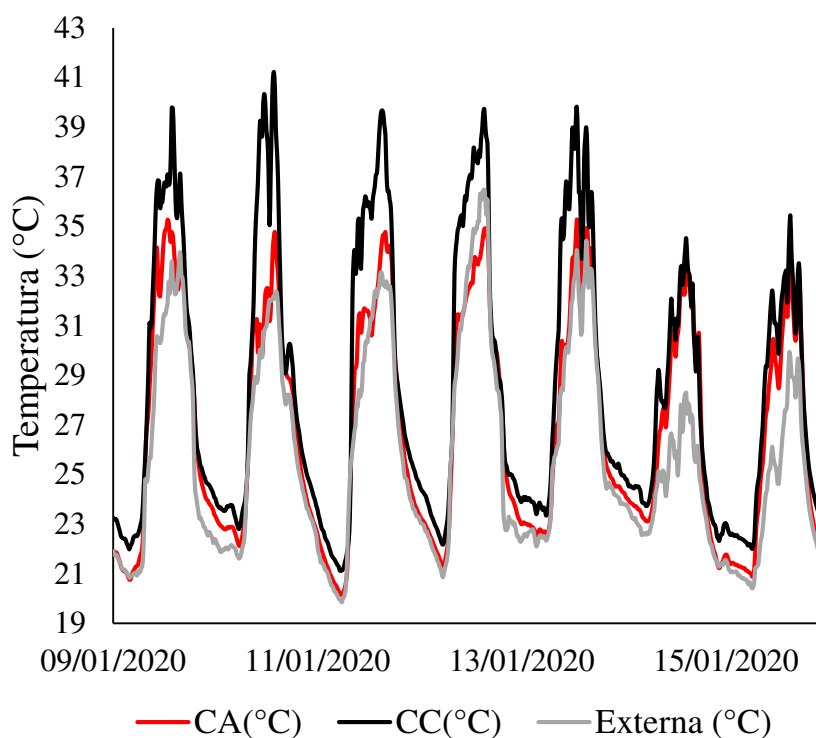


Figura 1.8. Temperatura do ar no interior de casa de vegetação convencional (CC) e casa de vegetação automatizada (CA) e na parte externa.

1.3.3. Simulação de CFD

1.3.3.1. Teste de independência de malhas

O teste de independência das malhas foi realizado afim de garantir que os cálculos numéricos fossem independentes da densidade das malhas (TU JIYUAN et al., 2013). Este teste é realizado afim de garantir que a densidade das malhas não influenciem os resultados da simulação, visto que, quanto maior a densidade das malhas mais precisa a simulação e menores são os erros, porém mais demorada a simulação (TU JIYUAN et al., 2013).

Assim, realizamos a simulação da temperatura do ar em um ponto fixo do domínio, com cinco densidades de malhas tetraédricas sendo 6966, 7934, 10271, 21338 e 43346 elementos de nós e observamos a partir de quantos elementos de nós ocorre a estabilização da temperatura do ar (TU JIYUAN et al., 2013).

A partir de 20000 elementos de nós a temperatura do ar simulada estabilizou-se demonstrando que a densidade das malhas não mais influenciam os resultados da simulação (Figura 1.9). Assim, a discretização computacional foi realizada com 21338 nós correspondentes a 63757 malhas tetraédricas.

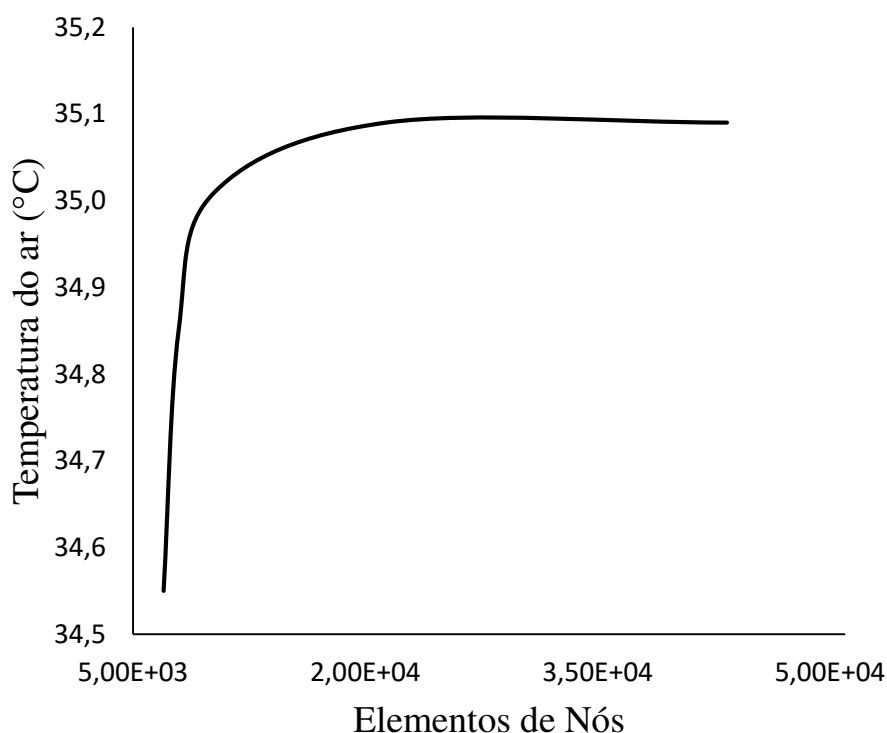


Figura 1.9. Teste de independência das malhas, afim de garantir que os cálculos numéricos fossem independentes da densidade de malhas. O teste foi realizado para determinar em qual densidade de malhas ocorre estabilização da temperatura do ar.

1.3.3.2. Validação do resultados

A tabela 1.3 demonstram que os dados simulados durante a validação se apresentam fidedignos aos dados reais e podem ser corroborados pelos valores de índices de viés, Willmott e pelo erro de predição absoluto médio.

Para parâmetro estatísticos de índice de Bias os valores foram de 0,007 e 0,018, enquanto para o índice de Willmott os resultados foram de 0,919 e 0,912 para os ambientes CA e CC respectivamente. Por sua vez, o Erro predição Absoluto médio (%) foi de 3,087 % para casa de vegetação automatizada e 4,369 % para casa de vegetação convencional. Para os três parâmetros estatísticos foram observados um excelente desempenho do modelo de CFD para o resultados das simulações (Tabela 1.4).

Tabela 1.3. Valores de temperatura do ar observados (OBS) e estimado (EST) pelo modelo de CFD dentro das casas de vegetação automatizadas (CA) e convencionais (CC).

CC		CA	
OBS	EST.	OBS.	EST.
35.3	35.0	29.6	30.7
33.5	34.9	30.1	30.7
35.0	34.9	30.0	30.8
32.4	34.8	30.0	30.8
30.3	35.1	29.1	30.7
33.9	34.9	32.2	30.8
36.0	34.8	31,7	30.8
34.0	34.9	31.0	30.8
36.3	34.8	29.6	30.8
35.7	34.8	31.8	30.8
36.7	34.8		

Tabela 1.4. Índices estatísticos calculados para avaliar o modelo.

Índice	Símbolo	CA	CC	Condição
Índice BIAS	BIAS	0.007	0.018	Mais próximo de 0, melhor
Índice de Willmott	d	0.919	0.912	Mais próximo de 1, melhor
Erro pred. Absoluto médio (%)	EPAM	3.087	4.369	Quanto menor, melhor

1.3.3.3. Distribuição espacial da temperatura do ar no interior das casas de vegetação

A simulação da temperatura do ar dentro da casa de vegetação demonstraram que a irradiância solar incidente nos telhados, paredes laterais, solos e bancadas governam a variação térmica espacial no ambiente. A casa de vegetação automatizada permitiu maior controle sobre a irradiância solar incidente que resultou em temperaturas menores e maior homogeneidade (Figura 1.10A e 1.10B). Nas regiões próximas ao telhado das casas de vegetação observou-se maior aquecimento com temperaturas do ar superior a 31,1 °C na casa de vegetação automatizadas e a 35 °C na casa de vegetação convencional (Figura 1.10C e 1.10D).

Na casa de vegetação automatizada a temperatura do ar, para simulação realizada no horário de meio dia, variou de 30,7 a 30,8 °C ao passo que na casa de vegetação convencional, com maior incidência da irradiância solar, a temperatura do ar média variou de 34,8 a 35 °C, considerando os dados obtidos nos planos longitudinal e transversal (Figura 1.11A e 1.11 B).

O gradiente de temperatura é maior no plano transversal, perpendicular ao fluxo de ar promovido pelo exaustor, principalmente para casa de vegetação convencional, com maior incidência de irradiância solar (Figura 1.11 C e 1.11 B).

Houve um aumento da temperatura do ar nas bancadas de crescimento das miniestacas na casa de vegetação convencional devido ao efeito da irradiância solar direta. A temperatura do ar que foi de 34,8 °C na casa de vegetação convencional e 31,0 °C na casa de vegetação automatizada (Figura 1.11E e 1.11F).

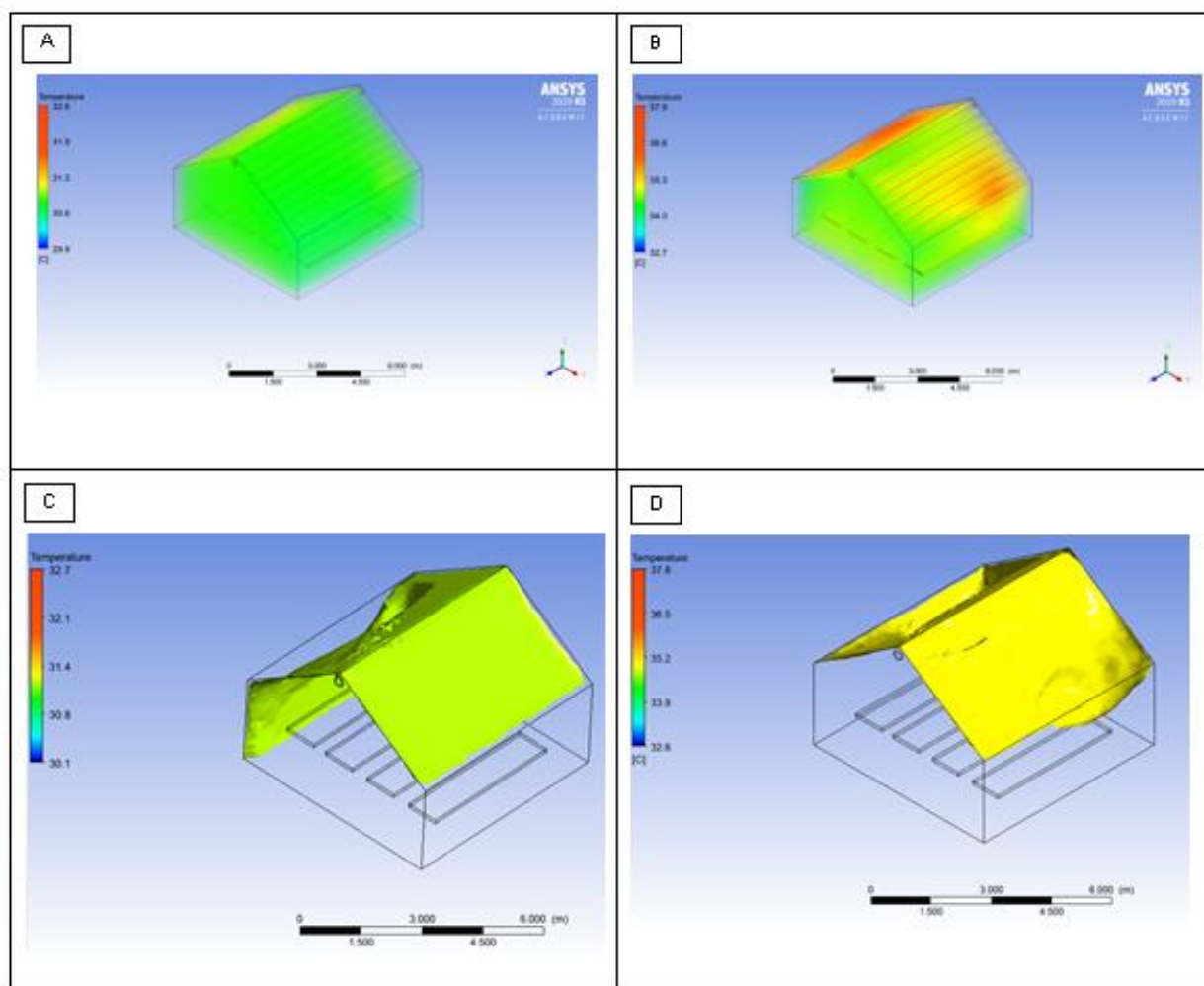


Figura 1.10. Distribuição de temperatura do ar para casas de vegetação automatizada (A) e casa de vegetação convencional (B). Iso-superfície dividindo o volume útil do ar no interior da casa de vegetação automatizada com temperatura do ar acima de 31,1 °C (acima da iso-superfície) e volume de ar útil com temperatura do ar variando de 30,6 a 31,1°C (abaixo da iso-superfície) (C). Iso- superfície dividindo volume de ar útil no interior da casa de vegetação convencional acima de 35,0 °C (acima da iso-superfície) e volume de ar com temperatura do ar variando de 33,6 a 35 (abaixo da iso-superfície) (D).

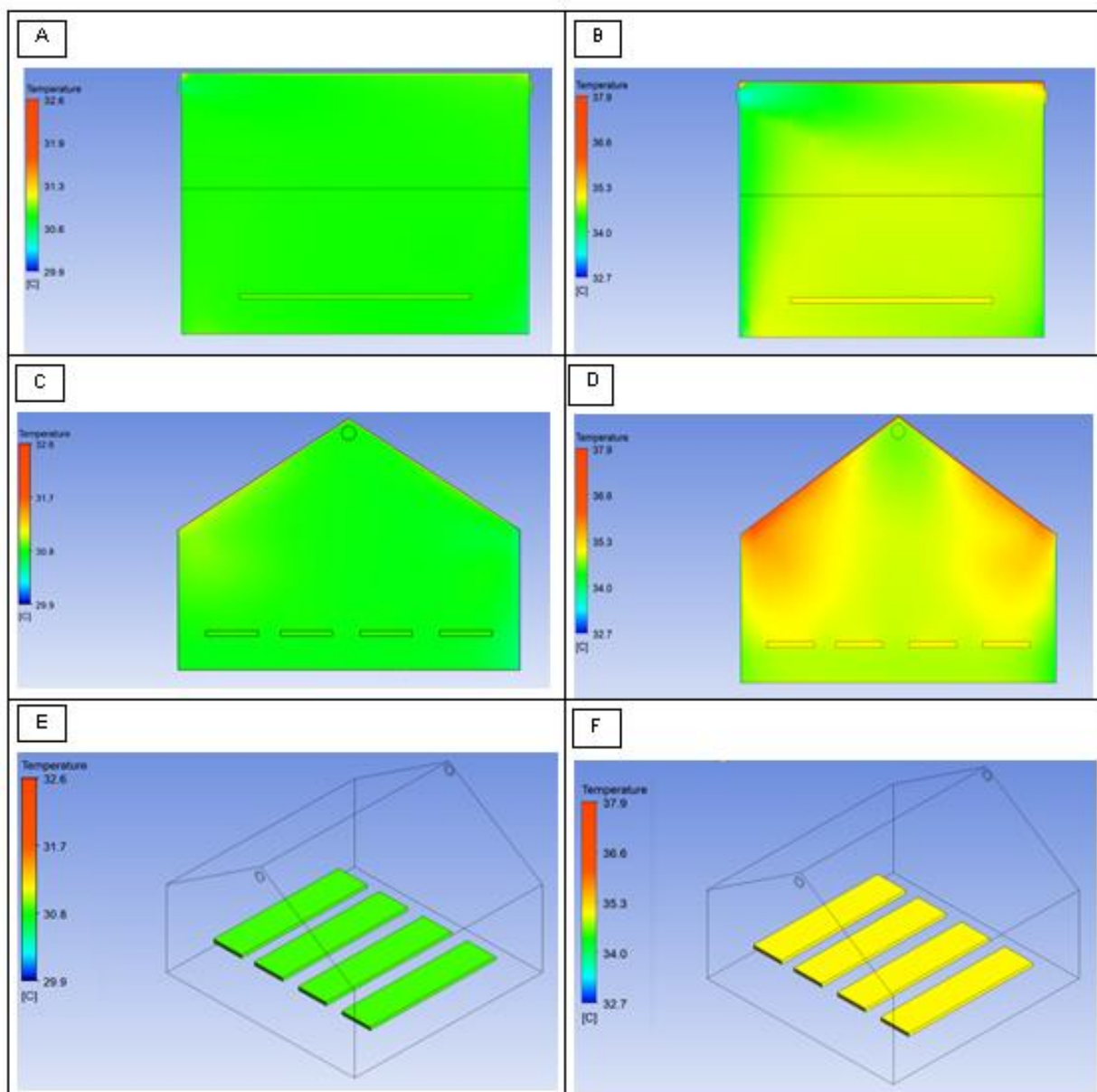


Figura 1.11. Distribuição de temperatura do ar no interior da casa de vegetação automatizada (A, C e E) e no interior da casa de vegetação convencional (B, D e F).

1.4. DISCUSSÃO

1.4.1 Irradiância solar e temperatura no interior da casa de vegetação convencional e automatizada

No interior da casa de vegetação automatizada, a irradiância solar correspondeu em média 22 % da irradiância solar externa, com sombreamento médio total de 77,0 %. Os níveis de irradiância solar obtidos estão em acordo com Pedroso (2016), que demonstrou que o excesso de irradiância solar influenciaram negativamente a porcentagem de enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus*. Do ponto de vista ecofisiológicos, vários estudos apontam que a irradiância solar afeta a produção das auxinas, um hormônio fotodegradável, além da produção e distribuição de carboidratos, ambos relacionados à regulação de sinais envolvidos no processo de formação de raízes adventícias de miniestacas de *Eucalyptus* (FETT-NETO et al., 2001; CORREA; FETT-NETO, 2004; ALMEIDA et al., 2017).

Além disso, a irradiância solar afeta diretamente a dinâmica de temperatura do ar no interior das casas de vegetação. A casa de vegetação automatizada, sob menor incidência de irradiância solar, a temperatura do ar foi em média 1,6 °C menor em relação a casa de vegetação convencional, além de menor variação espacial e menor amplitude térmica. As faixas de temperatura observadas na casa de vegetação automatizada estão dentro da faixa ótima para estímulo do enraizamento adventícios de microestacas de *Eucalyptus* de 20 a 30 °C (CORREA et al., 2001, ALMEIDA et al., 2017).

Por sua vez, o maior aquecimento observada na casa de vegetação convencional, sob maior incidência de irradiância solar, resultou em temperaturas do ar em média 2,7 °C maior em relação a parte externa. Nas casas de vegetação convencional, as temperaturas máximas ficaram mais próximas dos limites basal superior de 36 °C dos *Eucalyptus* (ALMEIDA et al., 2004). Em contraste, estudos demonstram que temperaturas de 33 °C aplicados em plantas doadoras de miniestacas tiveram bons resultados para enraizamento adventícios em *Eucalyptus cloeziana* (TRUEMAN et al., 2013).

Em uma casa de vegetação, a irradiância solar atravessa a cobertura plástica sendo parte refletida e parte transmitida para cultura no interior. As coberturas são transparentes em média a 74,7 % da radiação de onda curta (AHMED & GHANY, 2011), mas ao mesmo tempo impedem a maior parte da saída de ondas longas aumentando a temperatura do ar e intensificando o efeito estufa conforme o observado na casa de vegetação convencional.

Assim, para abrandar o efeito de aquecimento as malhas termo-refletoras atenuaram a irradiância solar transmitida e aumentam difusão da irradiância solar, evitando queimas das folhas e aumentando o rendimento (FAO & AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2013). Neste sentido, as malhas contribuem para reduzir o aumento da temperatura do ar e a temperatura foliar das plantas cultivadas nas bancadas dentro de casas de vegetação como observado na casas de vegetação automatizada e de acordo com o trabalho de Guiselini (2004).

Assim, em regiões de climas tropicais, sob alta incidência de irradiância solar, o sistema proposto pode ser viável por permitir maior controle dos fatores meteorológicos como irradiância solar e temperatura do ar. Porém, se faz necessários estudos prévios para ajustar característica do material genético e variação local do ambiente.

1.4.2. Modelo de interface computacional de CFD

Os processos de construção do modelo de interface computacional foram adequadas para as simulações propostas. As malhas tetraédricas são indicadas pela sua facilidade de construção, boa qualidade e recomendável para geometrias complexas, estando de acordo com os trabalhos de Rocha (2014).

Já a densidade e qualidades das malhas utilizadas foram consideradas muito boas para simulação, demonstrados pelo índice de qualidade ortogonal médio que foi de 0.70, acima de trabalhos semelhantes como o de Silva (2017).

Na etapa de processamento da simulação computacional, os valores dos resíduos adotados, para o critério de convergência, foram de 10^{-4} , estando de acordo com trabalhos de Silva (2017) e Boulard (2017).

O modelo de interface computacional de CFD validado, permitiram simular a temperatura do ar e sua distribuição dentro das casas de vegetação automatizada e convencional com erro absoluto médio de 3,7 %. As diferenças médias entre temperaturas observadas e temperaturas estimadas foram de 0,19 °C bastante semelhantes aos resultados observados por Silva (2017). Assim, a simulação de CFD permitiu simular as condições de temperaturas internas a casa de vegetação em condições bem próximas das reais, sendo portanto, uma técnicas bastante promissora para estudos de ambiência no interior de casas de vegetação.

As diferenças entre a temperaturas medidas e temperaturas observadas podem ser explicadas pela ausência de parâmetros mais detalhados referentes à interação solo-planta-

atmosfera, simplificação do modelo geométrico e dos processos físicos, além de erros inerentes ao cálculo computacional.

Neste trabalho, para as condições de contorno, adotamos medidas de irradiância solar incidente nas paredes, velocidade do ar e temperatura do ar medidos em tempo real juntamente com a coleta de dados de temperatura do ar. Assim, estes parâmetros utilizados são fidedignos como a condição real, aumentando a precisão dos cálculos de balanço e entradas e saídas nos volumes de controle realizadas pelo computador.

1.4.3. Distribuição espacial da temperatura do ar no interior das casas de vegetação automatizada e convencional

A simulação da temperatura do ar no interior das casas de vegetação demonstraram que a irradiância solar incidente nos telhados, paredes laterais, solos e bancadas das casas de vegetação governam a variação térmica espacial no ambiente. Houve efeito mais pronunciado de aquecimentos nas paredes laterais e telhados, além da maior heterogeneidade espacial da temperatura do ar na casa de vegetação convencional, sob maior incidência de irradiância solar.

Em horários mais quentes, a maior irradiância solar, nas bancadas, promoveu um aumento da temperatura do ar que foi de 31,0 °C na casa de vegetação automatizada, e 34,8 °C na casa de vegetação convencional. O aumento intensidade de irradiância solar promoveu um aquecimento ligeiramente maior da superfície da bancada, se comparado a temperatura do ar, resultado da irradiância solar direta sobre a superfície conforme observado no interior casa de vegetação convencional.

Isso pode influenciar o enraizamento e desenvolvimentos das mudas, visto que é importante evitar o excesso térmico e manter as plantas em uma faixa ótima de desenvolvimento. Assim, este estudo abre caminho para o manejo de altura das bandejas bem como o material e coloração do solo e bancadas visando evitar o excesso térmico.

Utilizando ferramentas de simulação de CFD, Wang (2013) também observou heterogeneidade microclimática em relação a largura e comprimento no interior de casa de vegetação, principalmente em relação a temperatura do ar. Da mesma forma, Silva (2017) observou resultado semelhante e concluiu que próximos as paredes, o efeito de convecção de energias são mais acentuados se comparado a parte central da casa de vegetação. Assim, existe um efeito da temperatura do telhado e perdas de calor do solo dentro da casa de vegetação (PISCIA et al., 2012). A maior incidência de irradiância solar aumenta a temperatura do ar em

contato com a superfície da parede e promove a ascensão do ar pela diferença de densidade do ar conforme explicado por Monteith & Unsworth, 2008.

1.5. CONCLUSÕES

✓ As condições de temperatura do ar dentro da casa de vegetação automatizadas registraram médias 1,6 °C menores se comparada a casa de vegetação convencional, além de, apresentarem menor variabilidade espacial. Houve melhor controle da irradiância solar no interior das casas de vegetação automatizada, que permaneceu dentro de uma faixa ótima que pode favorecer o enraizamento das miniestacas de *Eucalyptus*.

✓ Os estudos com CFD permitiram simular a dinâmica da temperatura do ar no interior das casas de vegetação com erro absoluto médio de 3,7 % o que evidencia o grande potencial da simulação computacional ser utilizada para estudos de ambiência dentro de casas de vegetação.

1.6. REFERÊNCIAS

AHMED, E.M.; ABAAS, O.; AHMED, M.; ISMAIL, M.R. Performance evaluation of three different types of local evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 18, p. 45–51, 2011.

ALFENAS, A. C.; ZAUZA E. A. V.; MAFIA, G. R.; ASSIS T. F. Clonagem e Doenças do *Eucalyptus*. Editora UFV 2ª edição, Viçosa, MG, p. 53 e 118, 2004.

ALMEIDA, M. R.; AUMOND, M. J.; COSTA, C. T.; SCHWAMBACH, J.; RUEDEL C. M.; CORREA, L. R.; FETT-NETO A. G. Environmental control of adventitious rooting in *Eucalyptus* and *Populus* cuttings. *Trees*, v. 31, p. 1377-1390, 2017.

ASSIS, T. F.; FETT-NETO, A. G.; ALFENAS, A. C. Current techniques and prospects for the clonal propagation of hardwoods with emphasis on *Eucalyptus*. *Plantation Forest Biotechnology for the 21 century*, Kerala, India, 2004.

BARTZANAS; KACIRA, T. M.; ZHU, H.; KARMAKAR, S.; TAMIMI, E.; KATSOULAS, N.; BOK, L.I.; KITTAS, C. Computational fluid dynamics applications to improve crop production systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 93, p.151–167, 2013.

BJERG, B.; CASCONI, G.; LEE, I. B.; THOMAS, B. T.; NORTON, T.; HONG; S.W.; SEO; I.H.; BANHAZI, T.; LIBERATI, P.; MARUCCI, A.; GUOQIANG, Z. G. Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 3: CFD modelling *Biosystems engineering*, v. 116, p. 259 -275, 2013.

BOULARD, T.; ROY, J.C.; POUILLARD, J.B; FATNASSI, H.; GRISEY, A. Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems engineering*, v. 158, p. 110-133, 2017.

COELHO, D. J. R. Mapeamento e análise espacial do ambiente térmico de aviários de postura abertos em sistemas verticais. Disponível: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3678/tese-diogo-jose-rezende-coelho>, 2014.

CORREA, L. R.; FETT-NETO, A. G. Effects of temperature on adventitious root development in microcutting of *Eucalyptus Saligna Smith* and *Eucalyptus globulus Labil*. *Journal of Thermal Biology* n. 29, p. 315 - 324, 2004.

ESPINOZA, K.; LOPEZ, A.; VALERA, D.L.; MOLINA-AIZ F.D; TORRES, PENA, A. Effects of ventilator configuration on the flow pattern of a naturally- ventilated three-span Mediterranean greenhouse. *Biosystems engineering*, v.164 p. 13-30, 2017.

FETT-NETO, A. G.; FETT, J. P.; GOULART, G. P.; TEMIGNONI, R. R.; FERREIRA, A. G.; Distinct effects of auxin and light on adventitious root development in *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus globulus*. *Tree physiology*, Victoria, 21, p. 457- 464, 2001.

FAO; AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas. FAO plant production and protection paper 217, p. 1- 640, 2013.

GUISELINI, C.; SENTELHA, P.C.; OLIVEIRA, R.C.; PRELA, A.; Uso de Malhas de sombreamento em ambiente protegido I: efeito na temperatura e na umidade relativa do ar. *Revista Brasileira de agrometeorologia*, Santa Maria, v. 12, p. 27-34, 2004.

HARTMANN, H. T. Plant propagation: principles and practices. 7^a ed., New Jersey: Prentice-Hall, p. 880, 2002.

IBÁ. Relatório 2020, Indústria brasileira de árvores. Disponível em: <https://iba.org/>
Acesso:21/11/2020.

KIM, R.W; HONG, S.W; LEE, I; KWON, K. Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 2: Application of the CFD model. Biosystems engineering, v. 164 p. 257 -280, 2017.

LEE, S. Y.; LEE, I. B.; KIM, R.W. Evaluation of wind-driven natural ventilation of single-span greenhouses built on reclaimed coastal Land. Biosystems engineering, v. 171 p. 120-142, 2018.

MARTINS, F.B.; PEREIRA, R. A. A.; PINHEIRO, M.V.M.; ABREU, M.A. Desenvolvimento foliar em duas cultivares de oliveira estimado por duas categorias de modelos. Revista Brasileira de Meteorologia, v.29, p.505-514, 2014.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. Principles of Environmental Physics Plants, Animals, and the Atmosphere. Elsevier v.5, p1-401, 2013.

NIYOGI, K. K.; TRUONG, T. B. Evolution of flexible non-photochemical quenching mechanisms that regulate light harvesting in oxygenic photosynthesis. Plant Biology, v. 16, p.307-314, 2013.

OSORIO, H. R.; TINOCO, I. F. F; OSORIO, J. A. S.; MENDES, L. B.; ROCHA, K. S. O; GUERRA, L. M. G. Thermal environment in two broiler barns during the first three weeks of age. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.20, n.3, p.256–262, 2016.

PEDROSO, E.J. Enraizamento de miniestacas e ecofisiologia de mudas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* submetidas a diferentes intensidade de irradiância solar. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, p.46, 2016.

PISCIA, D.; MONTERO, J.I; BAEZA, E; BAILEY, B.J. A CFD greenhouse night-time condensation model. Biosystem engineering, n.111, p.141 -154, 2012.

ROCHA, K.S.O.; MARTINS, J.H.; MARTINS, M.A.; TINÔCO, I.F.F.; SARAZ, J.A.O.; LACERDA, A.F.; FERNANDES, L.H.M. Modeling and simulation of the transient response

of temperature and relative humidity sensors with and without protective housing. Plos one, v. 9, p. 1-8, 2014.

SILVA, R.C.; CORDEIRO, J.J.F.; PANDORFI, H.; VIGODERIS, R.B.; GUISELINI, C. Simulation of ventilation systems in a protected environment using computational fluid dynamics.v. 37, p.414-425, 2017.

SHAMSHIRI, R.; ISMAIL, W.I.W. Investigation of climate control techniques for tropical lowland greenhouse in malaysia. Journal of applied Sciences v.14 p 60-65, 2014.

STEIDLE, N. A. J. S.; BAÊTA, F. C; MARTINS, J. H.; ZOLNIER, S.; MONTEIRO, P. M. B. Avaliação da transmissão de dados de temperatura no sistema 1-Wire™. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.1, p.29-36, 2005.

TERUEL, B.J. Controle automatizado de casas de vegetação: Variáveis climáticas e Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.14, p.237–245, 2010.

TRUEMAN, S.J.; MCMAHON, T.V.; M BRISTOW, M. Production of *Eucalyptus cloeziana* cuttings in response to stock plant Temperature. Journal of Tropical Forest Science, v. 25, p. 60–69, 2013.

TU, J; YEOH, G. H.; L. U. C. Computational Fluid dynamics: A practical approach. Elsevier Ltd, Oxford USA, p.440, 2013.

WANG, X.W; LUO, J.Y; LI, X.P. CFD Based study of heterogeneous microclimate in a typical Chinese greenhouse in central China. Journal of Integrative Agriculture, v.12, p. 914-923, 2013.

WILLMOTT, C.J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research, v.30, p.79-82, 2005.

XAVIER, A.; WENDLING, I.; SILVA, R.J. Silvicultura clonal: princípios e técnicas. Editora UFV. Viçosa - MG, 2013.

CAPÍTULO 2

ENRAIZAMENTO DE MINIESTACAS EM CASA DE VEGETAÇÃO COM CONTROLE AUTOMÁTICO DA IRRADIÂNCIA SOLAR

2.1. INTRODUÇÃO

O controle adequado dos elementos meteorológicos dentro das casas de vegetação, entre eles a irradiância solar, temperatura do ar e a umidade relativa, constituem um dos principais fatores que influenciam o enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus* (ALMEIDA et al., 2017). O enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus* envolvem mecanismos fisiológicos e bioquímicos onde a irradiância solar e a temperatura do ar, influenciam a concentração de hormônios e carboidratos, substâncias que modulam o enraizamento adventícios (FETT-NETO et al., 2001; CORREA & FETT-NETO, 2004; RUEDELL et al., 2013; ALMEIDA et al., 2017).

O enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus* em casa de vegetação é uma das etapas mais sensíveis do processo de produção de mudas de *Eucalyptus*, pela fragilidade dos propágulos vegetativos e dificuldade no controle ambiental no interior das casas de vegetação (ALFENAS et al., 2004). Estudos anteriores demonstraram que níveis elevados de irradiância solar influenciaram negativamente na porcentagem de enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus* (PEDROSO, 2016). Outros estudos demonstraram o efeito de aumento da temperatura do ar mediante incidência da irradiância solar em casa de vegetação (GUISELINI et al., 2004, SHAMSHIRI; ISMAIL, 2013), mas poucos estudos têm avaliados em conjunto variáveis meteorológicas e seu efeito sobre o enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus*.

Neste cenário, a automação de casas de vegetação permite um maior controle das variáveis meteorológicas, com grande potencial para ser aplicado na produção de mudas de *Eucalyptus* em larga escala. A automação permite a ativação de equipamentos como motores de irrigação, exaustores e malhas de atenuação da irradiância solar em respostas a medidas das variáveis meteorológicas realizadas em tempo real, o que viabiliza o melhor controle ambiental (SHAMSHIRI; ISMAIL, 2013).

A automação dos viveiros comerciais de mudas clonais de *Eucalyptus* comumente restringe-se a irrigação e o controle da temperatura do ar por sistemas de abertura de janelas zenitais e nebulização intermitente por resfriamento evaporativo. O sombreamento na fase de enraizamento é normamento feito usando malhas de atenuação 50 % fixas sobre o dossel das plantas. Pedroso (2016) estudou o efeito de níveis de irradiância solar no enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus*, demonstrando que a abordagem de atenuação fixa pode não ser mais

adequada, visto que, as miniestacas tiveram melhor enraizamento adventícios utilizando malhas de atenuação de 65 e 80 % de atenuação.

Atualmente, existe uma demanda crescente com o intuito de superar as dificuldades comuns ao processo de produção de mudas, inerentes aos fatores ambientais e alguns materiais genéticos, que possuem algumas limitações como, por exemplo, dificuldade de enraizamento (XAVIER et al., 2013; ALMEIDA, et al., 2017). Como exposto, o enraizamento é uma das fases mais críticas para o desenvolvimento de mudas de qualidade superior para minimizar a necessidade de replantio em campo e obter florestas de qualidade superior e homogênea.

Esse trabalho baseia-se na hipótese que a irradiância solar, como elemento meteorológico determinante para enraizamento das miniestacas, deve ter seus níveis controlados no interior da casa de vegetação, o que levará ao aumento/favorecimento no enraizamento de miniestacas em clones de *Eucalyptus*.

O objetivo é otimizar a ambiência no interior de casas de vegetação pelo manejo ativo da irradiância solar visando aprimorar a qualidade do enraizamento adventício de miniestacas de *Eucalyptus*.

Para alcançar nossas propostas, estudou-se o efeito do sombreamento automatizado no enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus* e, em uma segunda casa de vegetação, o ambiente de produção convencional consistiu no uso de malhas fixas que atenuam 50 % da irradiância solar. Após o enraizamento das miniestacas em casa de vegetação automatizada e convencional realizou-se a aclimação em casa de sombra para estabilização do enraizamento adventício.

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1. Área experimental

O experimento foi realizado no município de Viçosa, Minas Gerais (20°45'45" S de latitude, 42°52'04" W de longitude e 690 m de altitude), no viveiro de pesquisa do Departamento de Engenharia Florestal, pertencente a Universidade Federal de Viçosa. O clima da região é caracterizado com verões chuvosos e invernos secos, com precipitação média anual de 1220 mm, temperatura média máxima de 26 °C e média mínima de 14 °C (ALVARES et al., 2013). O experimento cobriu os períodos de verão e inverno buscando amostrar dados nas condições de maior e menor intensidade de irradiância solar. A etapa de inverno foi realizado

entre 06/2019 a 09/2019 e a etapa de verão foi realizado entre 01/2020 a 04/2020. Foram realizados quatro ciclos de produção no inverno e quatro ciclos de produção no verão.

2.2.2. Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi estabelecido em um delineamento inteiramente casualizados com um arranjo fatorial 4 x 2, contemplando o efeito de quatro materiais genéticos (Clones A, B, C e D) e efeito de dois ambientes representados pela casa de vegetação automatizada (CA), onde os níveis de irradiância solar foram ajustados com sombreamento próximo de 80 % de acordo com Pedroso (2016) e casa de vegetação convencional (CC), caracterizada por sombreamento fixo com malhas 50 %, num total de oito tratamentos, formados pela combinação dos clones e casa de vegetação (Tabela 2.1).

Em cada experimento foram feitas quatro repetições num total de 32 unidade experimentais de 16 miniestacas. O experimento foi repetido 4 vezes em cada estação, num total de 4096 plantas medidas.

Tabela 2.1. Tratamentos formados pelo efeito do ambiente na fase de enraizamento adventício, proporcionados pela casa de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional, com sombreamento de 50 % fixo (CC) e efeito dos clones A, B, C e D. As unidades experimentais foram formadas por 16 miniestacas que foram distribuídas aleatoriamente.

Tratamentos				
Ambientes	Clone A	Clone B	Clone C	Clone D
CA	16	16	16	16
	16	16	16	16
	16	16	16	16
	16	16	16	16
CC	16	16	16	16
	16	16	16	16
	16	16	16	16
	16	16	16	16

2.2.3. Estrutura experimental e montagem do experimento

A montagem dos experimentos e os tratos culturais foram realizados segundo o protocolo de produção comercial de mudas de *Eucalyptus*, abrangendo as etapas de produção das miniestacas em minijardim clonal, enraizamento das miniestacas em casa de vegetação pelo

período de 30 dias e aclimação em casa de sombra por mais 15 dias, para estabilização do enraizamento, conforme descrito por Xavier (2013).

O minijardim clonal para obtenção nas miniestacas, foi cultivado com os quatro clones comerciais todos híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em sistema semi-hidropônico, em leitos de areia em sistema de canaletões de telhas fibra-cimento dentro de uma casa de vegetação coberta com plásticos transparentes de 150 microns com laterais abertas (XAVIER et al., 2013).

A fertirrigação do minijardim clonal foi feita por gotejamento, atendendo a lâminas de 9 mm dia⁻¹ em dias de sol pleno e 5 mm dia⁻¹ em dias nublados. Tirou-se a alíquotas de 10 L das soluções 1, 2 e 3 e 0,900 L da solução 4, 5, e 6 (Tabela 2.2.), para misturar em reservatório de 800 L de água resultando em uma solução nutritiva com condutividade elétrica de 1.4 mS cm⁻² e pH igual à 6,20 (CARVALHO, 2015).

Tabela 2.2. Sais utilizados para preparo das soluções nutritivas aplicadas no minijardim clonal.

Solução estoque	Fertilizantes	Dose solução estoque (g L ⁻¹)
Solução 1	Nitrato de cálcio	5.86
	Cloreto de cálcio	21.0
Solução 2	Sulfato de Magnésio	19.7
	Fosfato de Potássio	9.67
	Sulfato de Potássio	25.3
	Sulfato de Amônio	3.28
Solução 3	Nitrato de Amônio	27.2
Solução 4	Ácido Bórico	1.22
Solução 5	Sulfato de Zinco	0.22
Solução 6	Sulfato de Cobre	0.11
	Sulfato de Manganês	0.44
	Molibdato de sódio	0.02
	Ferrilene	19.3

As miniestacas foram coletadas no minijardim clonal com dois pares de folhas apicais com tamanho aproximado de 8 cm e matéria seca de 0,14 g em média. As miniestacas foram estaqueadas em tubetes de polipropileno com volume de 55 cm³ preenchidos com substrato constituído por palha de arroz carbonizada, vermiculita e fibra de coco na proporção 40:40:20.

A nutrição do substrato foram realizadas com adubações de base com $8,0 \text{ kg m}^{-3}$ de superfosfato simples (18 % de P_2O_5 e 12 % de S), $0,208 \text{ kg m}^{-3}$ de KCl, $0,021 \text{ kg m}^{-3}$ de Bo, Zn, Cu e Mn.

O enraizamento das miniestacas foram realizados em casa de vegetação com automação dos níveis de irradiância solar (CA) e sem automação (CC) pelo período de 30 dias. Após retirada da casa de vegetação, as miniestacas foram levadas para casa de sombra para estabilização do enraizamento onde ficou até completar 45 dias com bloqueio de 46 % da irradiância solar. Neste período, foi realizada uma adubação de cobertura com $16,9 \text{ g L}^{-1}$ de fosfato-monopotássico (MKP) e $8,25 \text{ g L}^{-1}$ de sulfato de amônio, sendo aplicado 5 mL da solução em cada tubete. Na casa de sombra, a irrigação utilizada foi o sistema de microaspersão com sete irrigações diárias de três minutos totalizando uma lâmina de $5 \text{ mm m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

As duas casas de vegetação (automatizada para controle da irradiância e convencional) utilizadas nesta experimentação possuem estruturas semelhantes, construídas para enraizamento das miniestacas, sendo similares às utilizadas para produção comercial com tamanho reduzido com dimensões de $6 \times 6 \times 3 \text{ m}$ de pé direito, sendo inteiramente revestida por plástico filme transparente de 150 microns.

Em ambas a irrigação foi realizada utilizando um sistema de nebulização intermitente mediante o uso de bicos (coolnet, NetafimTM) com “set point” para acionamento da nebulização baseados nos limites da umidade relativa e da temperatura do ar, sendo, respectivamente, valores menores que 80 % e maiores que $30 \text{ }^\circ\text{C}$ para dias ensolarados. Para dias nublados e com temperaturas baixas, estabeleceu ativação da nebulização de 20 segundos a cada 15 minutos. Em ambas as casas de vegetação a nebulização foi ativadas no mesmo horários e lâminas de água sendo observado diariamente restrição ou excesso de água para ajustes necessários.

Na casa de vegetação convencional (CC) o controle da irradiância solar foi realizada conforme a produção convencional onde utiliza-se uma malha Aluminet (Aluminet[®] modelos O50 Ginegar Polysack) fixa sobre o dossel das miniestacas com atenuação de 50 % da irradiância solar, instaladas a $2,70 \text{ m}$ de altura de altura pé direito.

Na casa de vegetação automatizada (CA) foi realizado o controle automatizado dos níveis de irradiância solar, com a instalação de duas malhas sobrepostas, sendo uma malha tipo Aluminet que bloqueia 80 % e outra malha que bloqueia 50 % (Aluminet[®] modelos O50 e O80, Ginegar Polysack), também foram instaladas à $2,7 \text{ m}$ de altura de pé direito.

O sistema automatizado foi projetado para regular os níveis de irradiância solar que atinge as folhas das miniestacas reduzindo os efeitos de estresse promovido pelo excesso de irradiância solar. As duas malhas sobrepostas são acionadas por dois motoredutores (Modelo

motoredutor, 1/6 cv - MDR2 - motor/ 220 trifásico), acoplado a sistemas de tubo/eixo (diâmetro 63,3, parede 3mm; comp. 6m) e mancais que realizam a abertura e fechamento das malhas.

Um sensor piranômetro (Piranômetro CMP3, Campbell Scientific, Inc) mede a irradiância solar e o *datalogger* CR1000, (Campbell Scientific, Inc.) faz a leitura do sensor e envia um sinal elétrico para acionar os motoredutores por meio dos contadores.

Foi desenvolvido um algoritmo que é executado internamente no datalogger e tem como *input* os valores de irradiância solar global medidos pelo piranômetros (R_g) armazenados internamente. A tomada de decisão de sombreamento pelo algoritmo tem quatro setups que foram definidos de acordo os níveis de sombreamento próximos de 80 % na etapa de enraizamento das miniestacas conforme Pedrosa (2016).

- i) Se a R_g for menor que $150 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, o dossel vegetativo das miniestacas ficará sem a cobertura do Aluminet (De 0 até 25 dias após estaqueamento).
- ii) Estende o Aluminet 50 % se a R_g estiver entre 150 e $500 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (De 0 até 30 dias após estaqueamento).
- iii) Estende do Aluminet 80 % se a R_g estiver entre 500 a $800 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (De 0 até 25 dias após estaqueamento).
- iv) Estende do Aluminet 80 % e 50 % em conjunto se a R_g for maior que $800 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (De 0 até 25 dias após estaqueamento).

2.2.4. Variáveis meteorológicas

Três estações meteorológica foram instaladas, sendo uma interna em cada casa de vegetação, composta por um termohigrômetro, um piranômetro e outra externa compostos pelo mesmos sensores adicionada de um anemômetro e pluviômetro. As informações das estações foram armazenadas em um datalogger (CR1000 ST-SW-NC, Campbell Scientific, Inc.), e as condições atmosféricas foram medidas e registradas ao mesmo tempo. As leituras dos sensores foram realizadas a cada cinco segundos e a média foi armazenada a cada 15 minutos (Tabela 2.3).

Tabela 2.3. Relação dos sensores instalados nas estações meteorológicas utilizados no experimento.

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, The Netherlands)
Piranômetro	Irradiância solar global	- Black & Write 8- 48, Eppley
Piranômetro	Irradiância solar global	- Silicone Pyranometer 075239, Kipp & Zonen, Röntgenweg, The Netherlands
Anemômetro	Velocidade do vento	- Modelo TE 525, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA

O déficit de pressão de vapor (DPV) foi determinado de acordo com Pereira (2002), equação 1.

$$DPV = es - ea \quad (1)$$

Em que es é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa) e ea é a pressão parcial de vapor d'água (kPa). A pressão de saturação do vapor d'água (es) foi calculada de acordo com a equação de Tetens (Equação 2).

$$es = 0,6108 * 10^{[(7,5 * t / 237,3 + t)]} \quad (2)$$

t = temperatura do ar em °C.

A radiação solar no topo da atmosfera (R_o) foi estimada de acordo com a metodologia descrita por Vianello (2012).

$$R_o = 37,6 \left(\frac{D_m}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) H \cdot \sin \delta \sin \theta + \cos \delta \cos \theta \cdot \sin H \quad (3)$$

$$\frac{Dm}{D} = \text{distancia média terra sol} = 1,00011 + 0,034221 \cdot \cos\left(\frac{360}{365}(\text{dia juliano} - 1)\right)$$

$$H = \text{angulo horário do por do sol} = a \cos(-\text{tag}\theta \cdot \text{tag} \delta)$$

$$\delta = \text{declinação solar} = 23,45^\circ \text{sen}\left(\frac{360}{365}(284 + \text{dia juliano})\right)$$

$$\theta = \text{latitude de Viçosa} = -20,75$$

2.2.5. Porcentagem de enraizamento, medidas biométricas e índice de qualidade

A porcentagem de sobrevivência e enraizamento foram determinadas aos 45 dias após o estaqueamento em todas as miniestacas, considerando raízes maior que 1cm como plantas enraizadas (Equação 4 e 5).

$$S \% = \left(\frac{e1}{s}\right) \times 100 \quad (4)$$

$$E \% = \left(\frac{e2}{s}\right) \times 100 \quad (5)$$

Onde S % = Porcentagem de sobrevivência, E % = Porcentagem de enraizamento, e1 = o número de miniestacas sobreviventes em 45 dias, e2 = o número de miniestacas enraizadas em 45 dias, s = número de miniestacas estaqueadas.

A análise da qualidade das mudas de *Eucalyptus* foi realizada com base no Índice de Qualidade de Dickson (IQD), (DICKSON, et al., 1960). O IQD, considerará a altura da parte aérea e o diâmetro do coleto das mudas, além da matéria seca da parte aérea, raiz e total (Equação 6).

$$IQD = \frac{BSM_{total}}{\left[\frac{H}{D}\right] + \left[\frac{BSM_{p.aérea}}{BSM_{sraiz}}\right]} \quad (6)$$

Onde:

- BSM_{tot} = Biomassa seca total, g
 H = altura da parte aérea, cm
 D = diâmetro do colo, mm
 BSM_{p. aérea} = Biomassa seca da parte aérea, g
 BSM_{raiz} = Biomassa seca da raiz, g

2.2.6. Eficiência do uso da irradiância solar (EUR)

A eficiência do uso da irradiância solar foi calculada pela razão entre a matéria seca total (g) medida e a energia solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) acumulada correspondente ao período de 30 dias na casa de vegetação para enraizamento adventícios e 15 dias na casa de sombra onde as miniestacas ficaram para estabilização do enraizamento (Equação 7).

$$\text{EUR} = \frac{\text{Matéria seca total}}{\text{Energia solar Acumulada}} \frac{g}{(\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1})} \quad (7)$$

2.2.7. Análise dos dados

Os dados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) e teste F ($P \leq 0.05$) à 5 % de significância, seguido de um teste de média Tukey. Os testes estatísticos foram conduzidos usando o *software* *Statística*® 13 da empresa Dell.

2.3. RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados são divididos em duas etapas: A primeira parte (item 2.3.1) caracteriza as condições meteorológicas na parte externa e no interior das casas de vegetação convencional (CC) e casa de vegetação automatizada (CA) dos quais a irradiância solar global, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor do ar e umidade relativa no interior das casas de vegetação e irradiância solar, temperatura do ar e nebulosidade na parte externa.

Na segunda parte (item 2.3.2) é apresentado os resultados de variáveis biométricas, entre os quais, enraizamento, sobrevivência, índice de qualidade de Dicson (IQD), eficiência no uso da irradiância solar (EUR) e distribuição de matéria seca (folha, caule e raiz).

2.3.1. Condições meteorológicos

2.3.1.1. Irradiância solar, temperatura do ar e nebulosidade no ambiente externo

Como o esperado, durante o inverno observamos menores picos de irradiância solar, com médias de $616,4 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$, máximos de $925 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ e mínimos de $171 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$. Já no verão foram observados picos de irradiância solar médios de $616,2 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$, mas houve valores máximos de até $1178 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ e mínimos de $55,6 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ (Figura 2.1A e B).

No verão observamos que a nebulosidade, medida pela razão entre a radiação solar global (R_g) e a radiação solar no topo da atmosfera (R_0) foi de 0,43, enquanto no inverno, a nebulosidade foi de 0,56 (Figura 2.1C e D). Assim no verão, apesar de irradiância solar mais intensa, a maior nebulosidade proporcionou vários dias nublados, com menor incidência de irradiância solar.

No inverno, a temperatura do ar foi menor e a amplitude térmica foi maior com médias de $18,47 \text{ }^\circ\text{C}$, máximas de $36,4 \text{ }^\circ\text{C}$ e mínimas de até $6,29 \text{ }^\circ\text{C}$. Já no verão as médias foram de $23,3 \text{ }^\circ\text{C}$ e máximas de $36,4 \text{ }^\circ\text{C}$ e mínimas de até $13,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 2.1E e F).

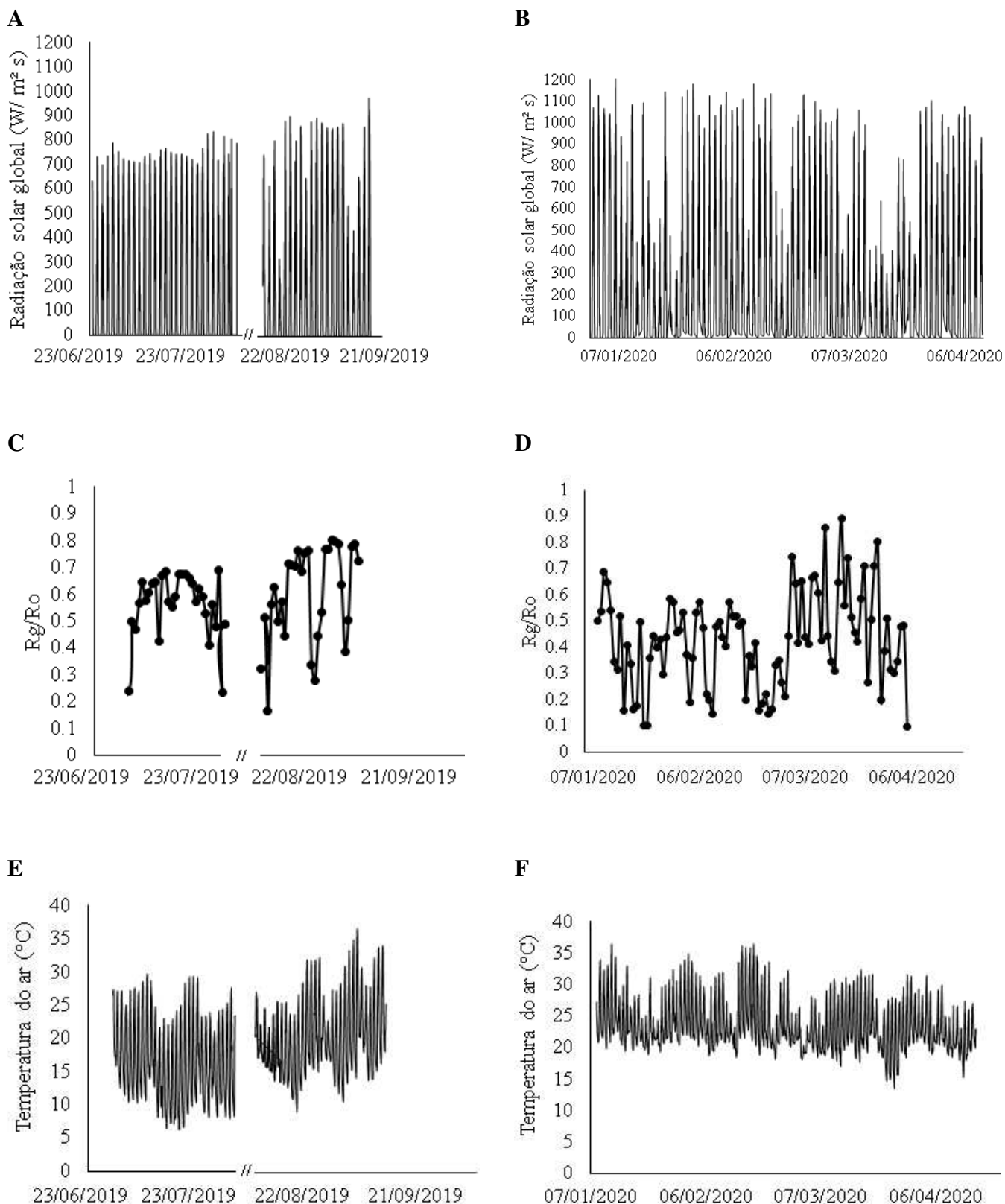


Figura 2.1. Irradiância solar durante o ciclo de inverno (A) e verão (B), razão entre irradiância solar global (R_g) e irradiância solar no topo da atmosfera (R_o) (nebulosidade) para inverno (C) e verão (D) e temperatura do ar durante o ciclo de inverno (E) e verão (F).

2.3.1.2. Radiação solar global no interior das casas de vegetação

Na casa de vegetação convencional (CC), durante o experimento de inverno, em 20 % dos dias de experimento, a irradiância solar teve picos acima de $275 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$. Na casa de vegetação automatizada os picos de irradiância solar acima de $100,0 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ corresponderam a 53 % dos dias no inverno (Figura 2.2A e 2.2B).

Na casa de vegetação convencional (CC) em 45 % dos dias de verão a irradiância solar foi acima de $275 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$, com picos de até $400 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$. Na casa de vegetação automatizada os picos de irradiância solar acima de $100,0 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ corresponderam a 35 % dos dias no verão (Figura 2.3A e 2.3B).

Por exemplo, um dia típico de sol pleno (11/01/2020 e 12/01/2020) a irradiância solar global dentro da casa de vegetação automatizada corresponderam a 8 % (± 4 %) da irradiância solar externa, enquanto que a irradiância solar na casa de vegetação convencional correspondeu a 41 % da irradiância solar externa (Figura 2.4.B). No verão, em decorrência da maior irradiância solar, o *setup* que ativa as malhas de 50 % e 80 % em conjunto é mais frequentemente ativado.

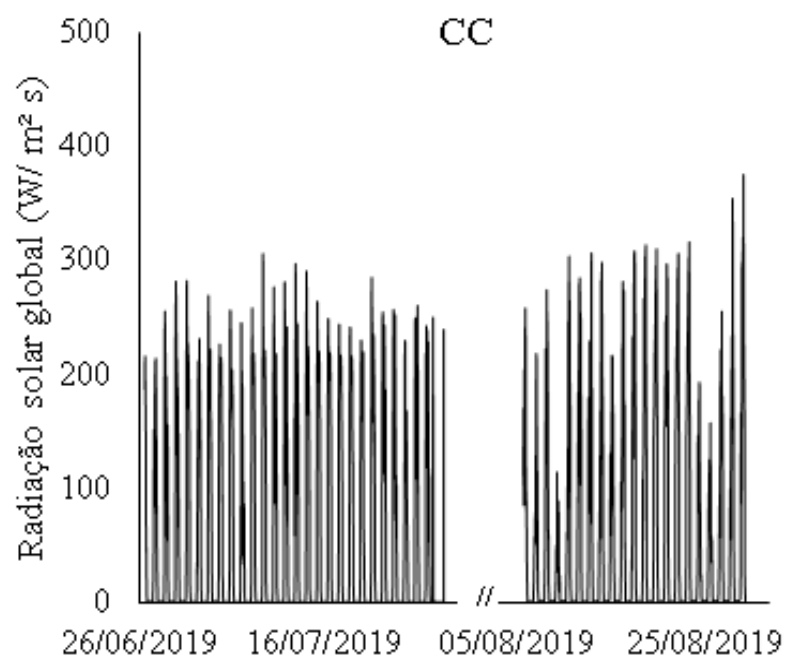
Já em dias nublados (13/01/2020 a 15/01/2020) a irradiância solar global no ambiente automatizado correspondeu a 15 % (± 10 %) da irradiância solar externa enquanto na casa de vegetação convencional a irradiância solar global correspondeu a 37 % (Figura 2.4.B). Nestes dias existe maior incidência de irradiância solar indireta devido a maior difusão da energia solar resultado da maior presença de nuvens.

Os picos irradiância solar horária média para a casa de vegetação automatizada foram de $97 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ ($\pm 38,7,4$) no inverno e de $83, \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ ($\pm 43,5$) no verão. Na casa de vegetação convencional os picos de irradiância solar global horária foram de $186,15 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ ($\pm 54,2$) no inverno e no verão foi de $212 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ ($\pm 86,4$), (Figura 2.4C e 2.4D).

A energia solar global integrada no inverno na etapa de enraizamento em casas de vegetação automatizada e no período de aclimação em casa de sombra foram de 106 MJ m^2 , enquanto na casa de vegetação convencional e no período de aclimação foram de $160,67 \text{ MJ m}^2$.

No verão, a energia solar global integrada na etapa de enraizamento em casas de vegetação automatizada e no período de aclimação foram de $81,2 \text{ MJ m}^2$, enquanto na casa de vegetação convencional e no período de aclimação foram de $129,3 \text{ MJ m}^2$ (Figura 2.4E e F).

A



B

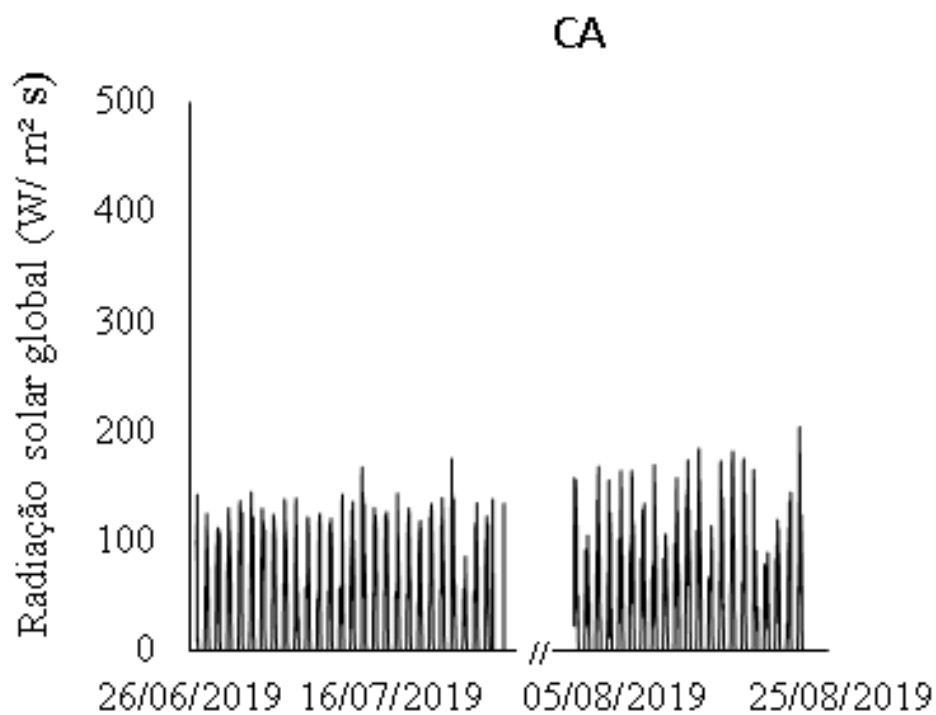
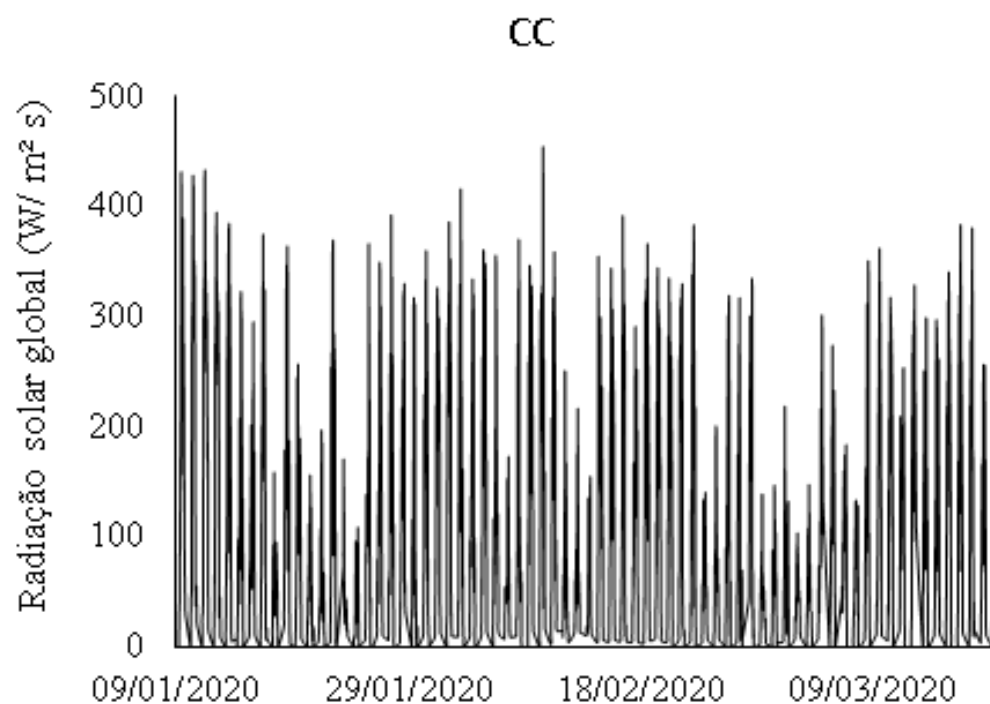


Figura 2.2. Irradiância solar para ciclo de inverno no interior da casa de vegetação convencional = CC, (A) e casa de vegetação automatizada = CA, (B).

A



B

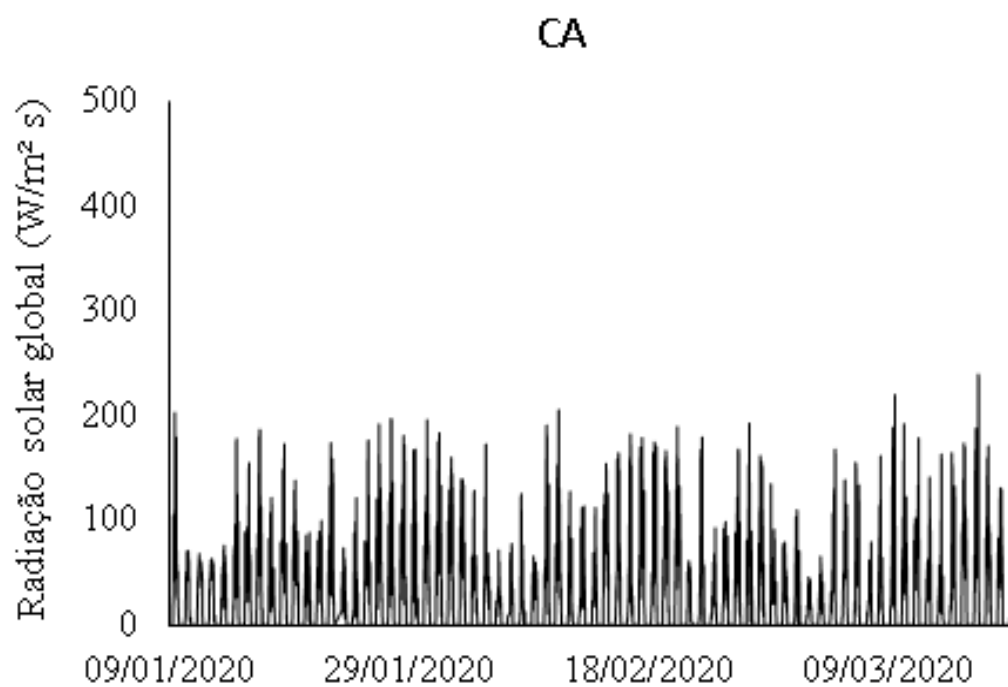


Figura 2.3. Irradiância solar para ciclo de verão no interior da casa de vegetação convencional = CC, (A) e casa de vegetação automatizada = CA, (B).

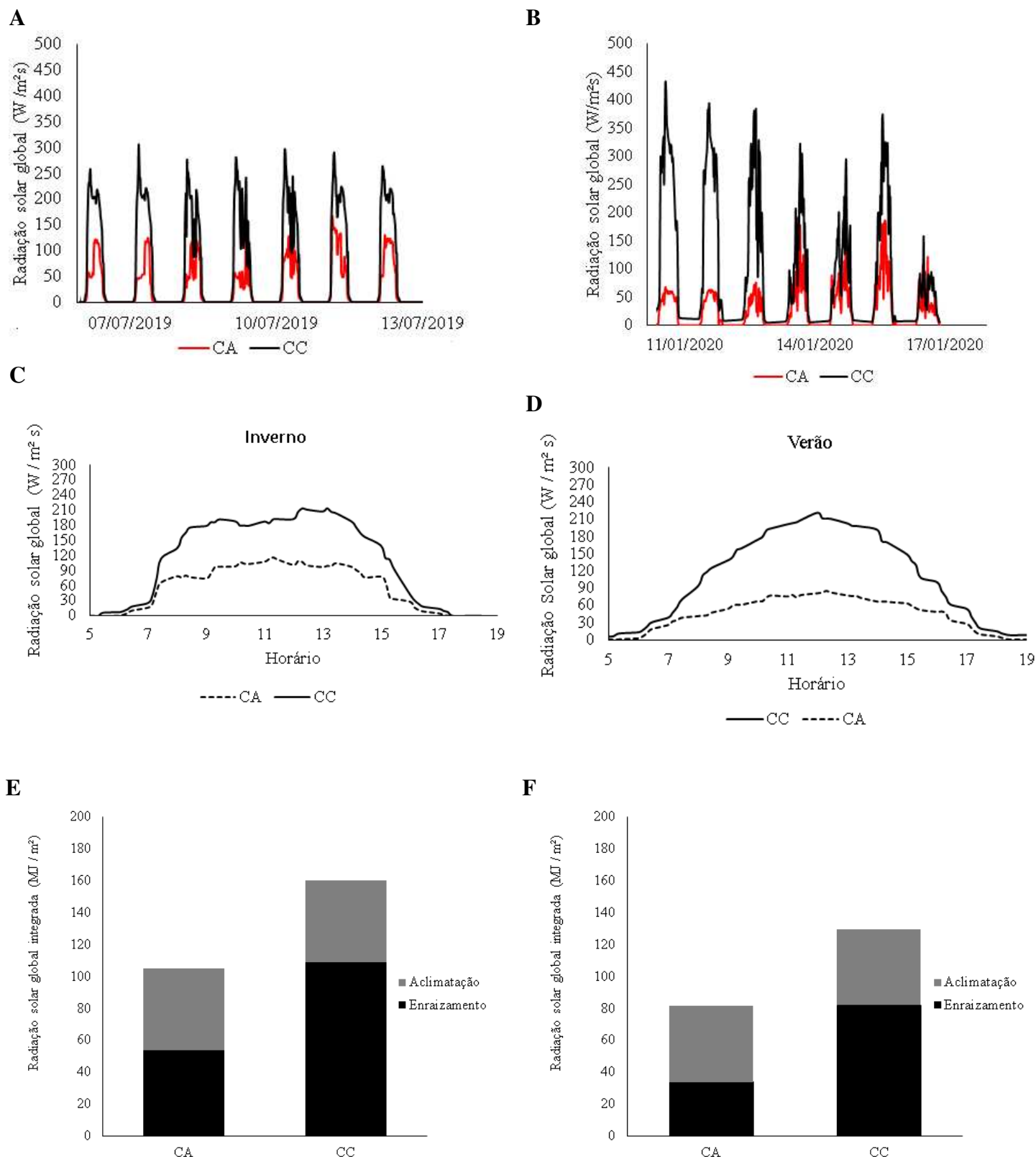


Figura 2.4. Irradiância solar para dias típicos de inverno (A) e verão (B). Irradiância solar com média horária no inverno (C) e verão (D). Irradiância solar integrada para período de enraizamento em casa de vegetação convencional (CC) e automatizada (CA) e aclimação em casa de sombra para inverno (E) e verão (F).

2.3.1.3. Temperatura do ar no interior das casas de vegetação

A temperatura do ar no interior da casa de vegetação automatizada no ciclo de inverno tiveram médias de $19,7\text{ °C}$ ($\pm 5,4\text{ °C}$) enquanto na casa de vegetação convencional as médias foram de $20,9\text{ °C}$ ($\pm 6,09\text{ °C}$) (Figura 2.5C). As temperaturas médias mínimas foram de $13,9\text{ °C}$ e $14,6\text{ °C}$ e as máximas foram de $28,6\text{ °C}$ e $30,4\text{ °C}$ para a casa de vegetação automatizada e convencional, respectivamente (Figura 2.5A).

Já no verão, a temperatura do ar para a casa de vegetação automatizada tiveram médias de $24,2\text{ °C}$ ($\pm 2,28\text{ °C}$) e a casa de vegetação convencional registrou médias de $26,2\text{ °C}$ ($\pm 2,27\text{ °C}$) (Figura 2.5D). As temperaturas médias mínimas foram de $20,1\text{ °C}$ e $21,6\text{ °C}$ e as máximas foram de $30,5\text{ °C}$ e $33,9\text{ °C}$ para a casa de vegetação automatizada e convencional respectivamente (Figura 2.5B).

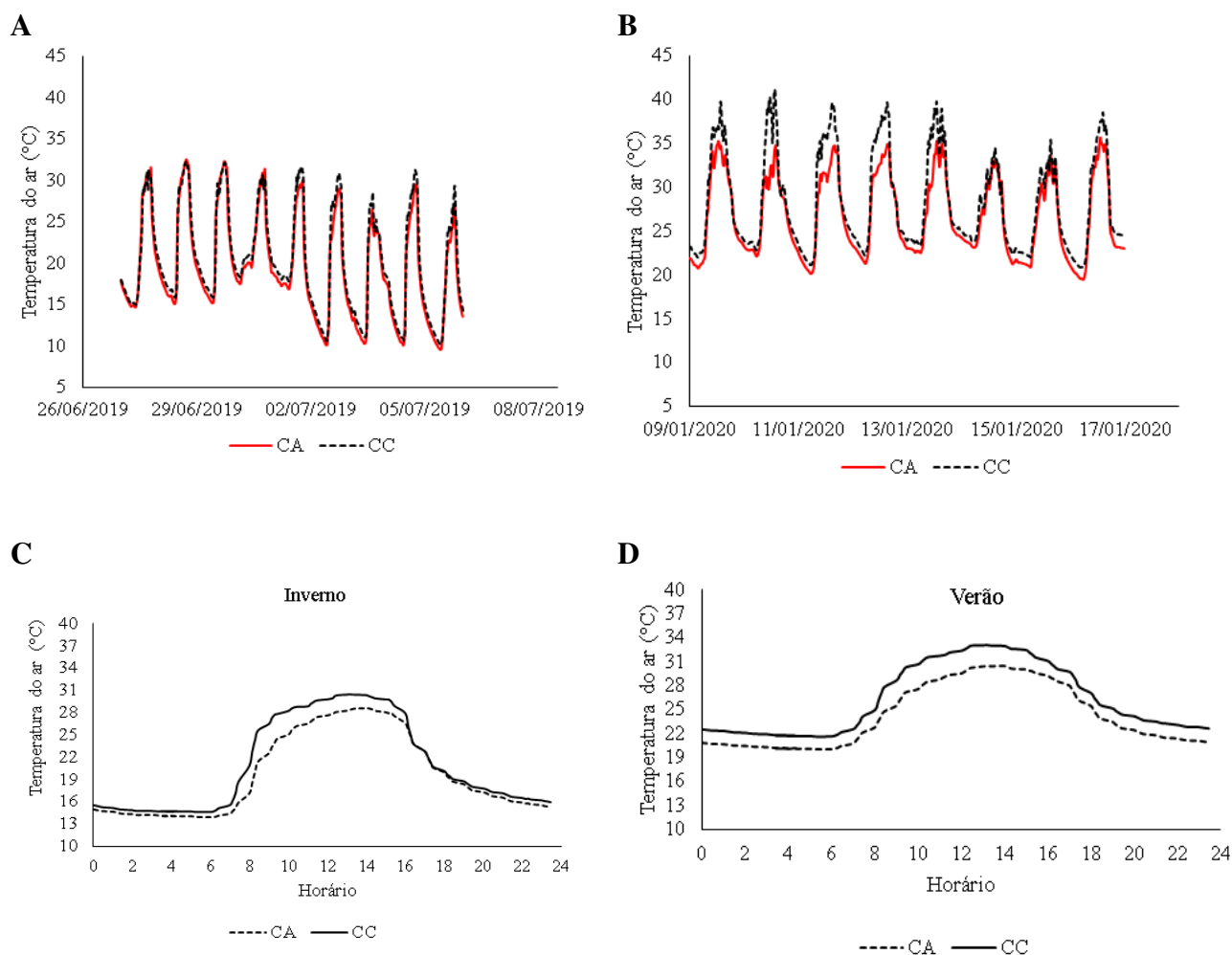


Figura 2.5. Temperatura do ar durante o ciclo de inverno (A) e ciclo de verão (B) no interior da casas de vegetação automatizado para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).

2.3.1.4. Umidade relativa e Déficit de pressão de vapor (DPV)

A umidade relativa do ar no ciclo de inverno, para a casa de vegetação automatizada, foi em média de 86,4 % ($\pm 10,3$ %) e a casa de vegetação convencional registrou médias de 84,3 % ($\pm 10,3$ %). No verão, a umidade relativa do ar para a casa de vegetação automatizada foi em média de 86,0 % ($\pm 4,4$ %) e a casa de vegetação convencional registrou médias de 84,2 % ($\pm 4,9$ %) (Figura 2.6A e 2.6B).

A déficit de pressão de vapor (DPV) no inverno, para a casa de vegetação automatizada, foi em média de 0,42 kPa ($\pm 0,42$) e a casa de vegetação convencional registrou médias de 0,65 KPa ($\pm 0,57$). No verão, o déficit de pressão de vapor do ar para a casa de vegetação automatizada foi em média de 0,42 kPa ($\pm 0,41$) e a casa de vegetação convencional registrou médias de 0,52 kPa ($\pm 0,50$) (Figura 2.6C e 2.6D).

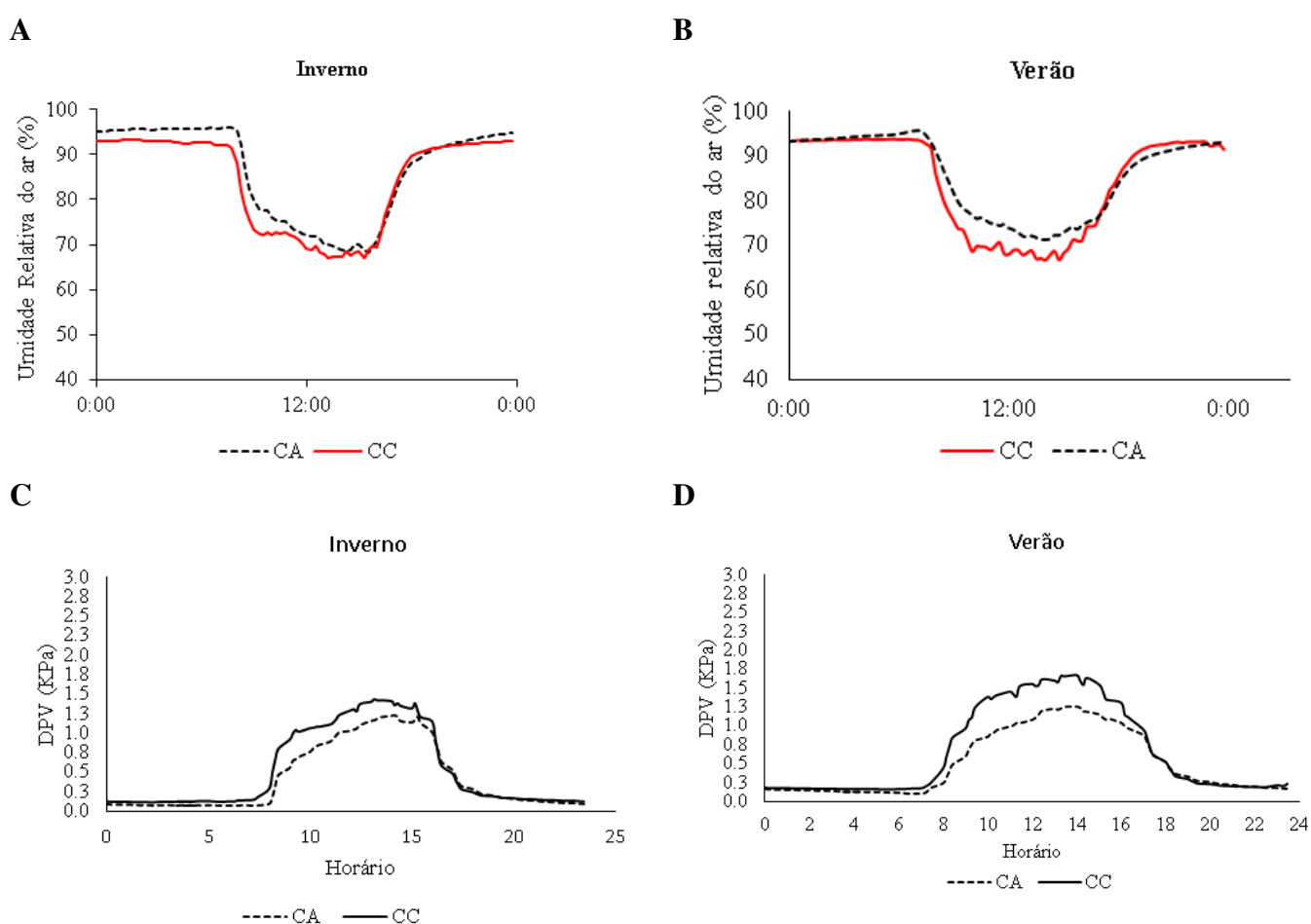


Figura 2.6. Umidade relativa (A e B) e déficit de pressão de vapor (DPV) (C e D) no ciclo de inverno e ciclo de verão no interior de casa de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).

2.3.2. Porcentagem de enraizamento e sobrevivência, IQD e EUR

O enraizamento, a sobrevivência e o índice de qualidade de Dicson (IQD) não tiveram diferença significativa entre as casas de vegetação automatizada (CA) e convencional (CC) durante o ciclo de inverno.

Porém, no ciclo de inverno, houve diferença significativa entre os materiais genéticos para o enraizamento, com destaque para o clone A com 96,3 % ($\pm 1,6$ %) e o clone C com 91,0 % ($\pm 2,1$ %) de enraizamento. Por sua vez, o clone B e o clone D tiveram maior dificuldade de enraizamento com média de 50,0 % ($\pm 10,2$ %) e 61,7 % ($\pm 9,7$ %), respectivamente (Tabela 2.4).

No verão, a sobrevivência e o IQD não mostraram diferença entre as casas de vegetação automatizada e convencional, mas houve diferença significativa para enraizamento. O enraizamento na casa de vegetação automatizada tiveram em média 84,7 % ($\pm 2,02$ %) e a casa de vegetação convencional tiveram em média 73 % ($\pm 4,05$ %). Nestas condições, os clones B e D, com maior limitação para o enraizamento, tiveram ganhos de 14,9 % e 19,7 % superior à casa de vegetação convencional para o ciclo de verão (Tabela 2.4).

Novamente no verão, houve diferença significativa entre os materiais genéticos com destaque para os clones A e C, com enraizamento de 95,7 % ($\pm 3,03$ %) e 85,4 % ($\pm 7,87$ %), ao passo que o clone B e A tiveram o enraizamento de 75,6 ($\pm 13,9$ %) e 58,9 % ($\pm 19,8$ %), respectivamente. No ciclo de verão, houve um acréscimo de 25,6 % no enraizamento do clone B e diminuição de 5,6 % para o clone C se comparado ao inverno (Tabela 2.4).

Para eficiência de uso da radiação solar (EUR) houve diferença significativa entre a casa de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional no ciclo de inverno e verão. No inverno as médias foram de 0,0028 g/MJ m⁻² dia⁻¹ ($\pm 0,011$) na casa de vegetação convencional e 0,0039 g /MJ m⁻² dia⁻¹($\pm 0,005$) na casa de vegetação automatizada.

No verão as médias de EUR registradas foram de 0,0023 g/MJ m⁻² dia⁻¹ ($\pm 0,007$) na casa de vegetação convencional e 0,0036 g/MJ m⁻² dia⁻¹ ($\pm 0,005$) na casa de vegetação automatizada. A EUR foi em média 32 % maior que a casa de vegetação automatizada se comparada a casa de vegetação convencional (Tabela 2.4).

Tabela 2.4. Enraizamento, sobrevivências, índice de Qualidade de Dickson (IQD) e eficiência do uso da irradiância solar (EUR) nos ciclos de inverno e verão. Avaliação feita em mudas de *Eucalyptus* para os clones A, B, C e D enraizadas em casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC) e aclimatadas em casa de sombra.

Inverno												
Clones \Ambientes	Enraizamento (%)			Sobrevivência (%)			IQD			EUR (g / MJ.m ⁻² dia ⁻¹)		
	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média
A	95.4	96.8	96.3 a	96.1	97.7	96.9 a	0.028	0.034	0.031 ^{ns}	0.0039	0.0024	0.0039 ^{ns}
B	52.3	47.7	50.0 b	63.3	61.7	62.5 b	0.016	0.021	0.019 ^{ns}	0.0041	0.0029	0.0034 ^{ns}
C	90.6	91.4	91.0 a	91.8	93.4	92.6 a	0.025	0.026	0.026 ^{ns}	0.0038	0.0031	0.0034 ^{ns}
D	64.4	57.8	61.1 b	77.7	70.7	74.2 a	0.024	0.029	0.026 ^{ns}	0.0040	0.0030	0.0034 ^{ns}
Médias do ambiente	75.8 ^{ns*}	73.4 ^{ns*}		82.2 ^{ns*}	80.8 ^{ns*}		0.023 ^{ns*}	0,028 ^{ns*}		0,0039 A	0,0028 B	

Verão												
Clones \Ambientes	Enraizamento (%)			Sobrevivência (%)			IQD			EUR (g / MJ.m ⁻² dia ⁻¹)		
	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média
A	95.4	95.9	95.7 a	95.7	95.7	95.7 a	0.044	0.041	0.042 ^{ns}	0.0033	0.0021	0.0027 ^{ns}
B	82.9	68.4	75.6 bc	86.9	75.6	81.7 ab	0.039	0.036	0.037 ^{ns}	0.0038	0.0024	0.0031 ^{ns}
C	92.3	78.6	85.4 ab	94.5	83.9	89.2 ab	0.049	0.042	0.045 ^{ns}	0.0035	0.0024	0.0029 ^{ns}
D	68.6	49.2	58.9 c	77.3	61.32	69.3 b	0.042	0.034	0.038 ^{ns}	0.0037	0.0029	0.0030 ^{ns}
Média	84.7 A	73.0 B		88.6 ^{ns*}	79.4 ^{ns*}		0.043 ^{ns*}	0.038 ^{ns*}		0.0036 A	0.0023 B	

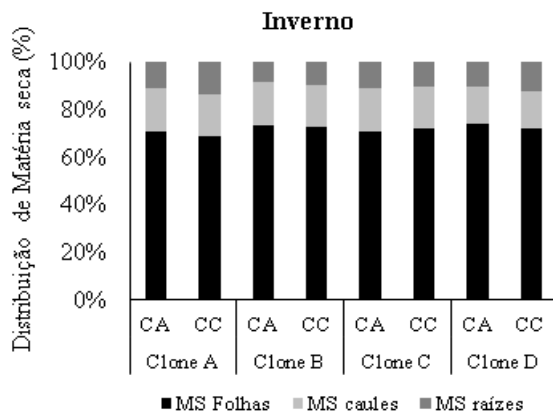
As médias seguidas da mesma letra indicam igualdade em cada variável analisada pelo teste de Tukey (p< 0,05). Diferença não significativa para efeito do clones A, B, C e D (^{ns}); não significativo para efeito dos ambientes CA, CC (^{ns*}) pelo Teste F (p< 0,05).

2.3.3. Distribuição de matéria seca

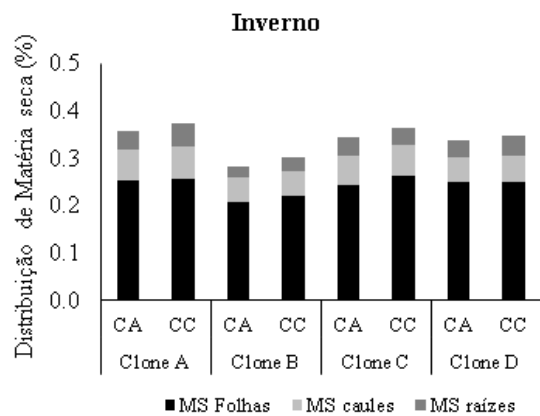
Houve mudanças na distribuição de matéria seca de folhas e raízes nos ciclos de inverno e verão. O acúmulo de matéria seca das raízes correspondem, a 10 % ($\pm 1,42$ %) da matéria seca total no inverno e 20 % ($\pm 1,2$ %) da matéria seca total no verão. Já a matéria seca das folhas representam aproximadamente 70 % ($\pm 1,27$ %) da matéria seca total no inverno e 60 % ($\pm 2,20$ %) da matéria seca total no verão (Figura 2.7 A e 2.7 C).

A matéria seca da raízes foram de 0,036 g ($\pm 0,004$) no inverno e 0,071 g ($\pm 0,004$) no verão, enquanto a matéria seca das folhas foram de 0,243 g ($\pm 0,01$) ambas as estações. Já a matéria seca dos caules foi em média 0,058 g ($\pm 0,001$) e 0,067 g ($\pm 0,003$) no inverno e verão, respectivamente (Figura 2.7 B e 2.7 D).

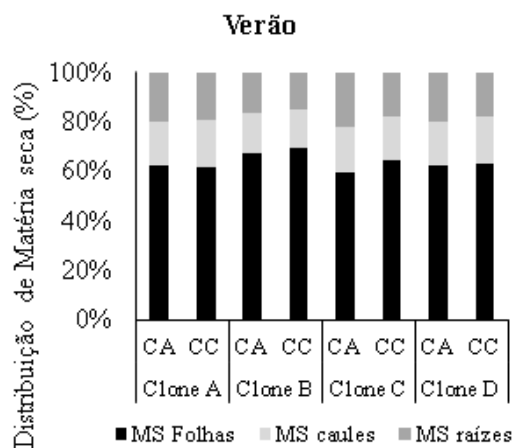
A



B



C



D

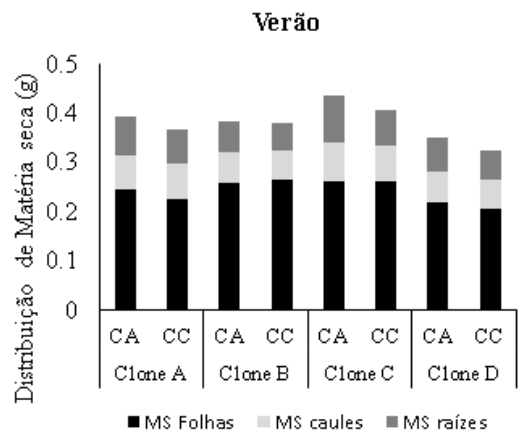


Figura 2.7. Distribuição de Matéria seca para ciclo de inverno e verão no interior da casa de vegetação automatizada (CA) e casa de vegetação convencional (CC), para os clones A, B, C e D.

2.4. DISCUSSÃO

A automação das malhas de atenuação permitiu maior controle da irradiância solar e indiretamente da temperatura do ar, melhorando as condições de ambiência durante o enraizamento adventício das miniestacas de *Eucalyptus* no interior da casa de vegetação automatizada.

A casa de vegetação automatizada para controle da irradiância solar proporcionou um ganho médio de 11,7 % no enraizamento adventícios apenas para período de verão. Houve diferenças significativas entre os clones nas respostas ao enraizamento e sobrevivência, onde os clones B e D, apresentaram maior limitação de ordem genética para o enraizamento, mas tiveram ganhos médios de 14,9 % e 19,7 % superior na casa de vegetação automatizada. Além disso, não houve diferença significativa entre a casa de vegetação automatizada e convencional para os parâmetros de sobrevivência e qualidade das mudas.

No verão foram observados os maiores picos de irradiância solar em relação ao inverno o que justifica o controle ativo dos níveis de irradiância solar na casa de vegetação automatizada. Em condições semelhantes observou-se ganhos no enraizamento de miniestacas de *Eucalyptus* com irradiância solar de 125 a 175 W m⁻²s⁻¹ para o verão (PEDROSO, 2016). Por sua vez, em intensidade de irradiância de 15 a 50 W m⁻²s⁻¹ foram favoráveis para estimular o enraizamento em microestacas de clones recalcitrantes (FETT-NETTO et al., 2005). Diferentemente, mudas de *Eucalyptus* propagadas por sementes, a atenuação de apenas 30% favoreceu as características dendométricas (SANTOS et al., 2010).

Todavia, no ciclo de inverno, não houve diferença para o enraizamento adventícios, das mudas entre a casa de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional. Neste período, as condições de temperaturas mais baixas e maior amplitude térmica, limitaram o enraizamento adventícios em ambas condições, principalmente para os clones B e D. A temperatura do ar para um bom desenvolvimento das raízes precisam estar em uma faixa ótima e existem límetes tênues de ganhos máximos quanto mais próximos da temperatura máxima superior.

Em temperaturas baixas a atividade enzimática da rubisco, principal enzima responsável pela fixação de carbonos, é reduzida sendo este um dos principais limitantes para crescimento das plantas (TAIZ & ZEIGER, 2013). Ademais, as baixas temperaturas, não propiciam condições adequadas para indução, desenvolvimento e crescimento radicial em miniestacas (XAVIER et al., 2013). No inverno, o período para formação das raízes é maior,

visto que a soma térmica necessária para o enraizamento adventício demandam dias a mais (OLIVEIRA et al., 2016).

Por sua vez, houve aumento no crescimento das raízes no ciclo de verão, indicado pela distribuição de matéria seca radicular que passou de 10 % no inverno para 20 % da matéria seca total, ao passo que a matéria seca das folhas reduziu de 70 % para 60 % da matéria seca total. As temperatura do ar de 20 a 30 °C, conforme as observadas no verão, são considerados ideais para o enraizamentos de microestacas de *Eucalyptus* (CORREA & FETT-NETO, 2001). Sabe-se que em temperaturas maiores, há aumento do metabolismo das miniestacas que resulta em maior atividade celular e contribui para a desdiferenciação celular e formação do meristema radicular que dará origem as raízes em miniestacas (HARTMANN et al., 2011).

A eficiência no uso da irradiância solar (EUR) foi 32 % maior na casa de vegetação automatizada em relação a casa de vegetação convencional. Isso demonstra que a síntese e distribuição de carboidratos nas miniestacas de *Eucalyptus* foi positivamente influenciada pelos níveis de irradiância solar na casa de vegetação automatizada, em tese explicados por maiores taxas de fotossíntese e melhor controle da transpiração foliar. A EUR calculados são próximos aos estimados por Sanquetta (2014) em viveiros de produção de mudas de *Eucalyptus* que determinou 5,57 g MJ⁻¹ considerando 45 plantas por metro quadrado.

Houve um aumento médio de 1,6 °C na temperatura do ar e 27,2 % no déficit de pressão de vapor (DPV) no interior da casa de vegetação convencional sob maior incidência de irradiância solar. O aumento do DPV eleva o poder dessecante do ar resultando em aumento da transpiração foliar e perda da turgescência nas miniestacas. Estas condições promovem o fechamento estomático nas miniestacas e, por consequência, reduzem a produção de carboidratos, na medida que menos CO₂ entra no ciclo de Calvin para fixação (THOMPSON, 1992).

Neste sentido, o controle da umidade relativa é fundamental, na medida que as miniestacas com enraizamento não estabelecidos são muitos sensíveis a perda da turgescência (HARTMANN et al., 2011). A umidade relativa do ar diária média foi de 85,1 % na maior parte do tempo, nas duas casas de vegetação conforme indicada Assis (2004). Em contraste, a umidade muito altas, podem reduzir a abertura estomática, visto que o DPV diminui (TAIZ, L.; ZEIGER, E, 2013). A umidade relativa alta nesta fase é desejável, porém ela também amplifica o efeito estufa podendo levar ao excesso térmico e, em casos mais severos, a desnaturação de proteínas e morte das mudas.

Sabe-se que o controle da irradiância solar para o enraizamento de miniestacas é importante para dinâmica hormonal, na medida que influencia a produção de auxina, um hormônio fotodegradável (FETT NETO et al., 2001, RUEDELL et al., 2015). Por sua vez, a alta irradiância solar tende a promover síntese de citocianina, hormônios que são relacionados ao crescimento da parte aérea, em detrimento do desenvolvimento de raízes adventícias em miniestacas (HARTMANN et al., 2011). A relação alta de auxina/citocianina é ideal para a formação de raízes em miniestacas (SKOOG; MILLER, 1957, HARTMANN et al., 2011; ALMEIDA et al., 2017).

Além disso, o excesso de irradiância solar pode reduzir direta ou indiretamente a síntese de carboidratos nas plantas por diversos mecanismos, em especial, os mecanismos de fotorrespiração ou a produção de espécies de oxigênio reativo (WALKER et al., 2016; PETERHANSEL et al., 2010). Ademais, sob alta incidência de irradiância solar, parte dos carboidratos são utilizados no metabolismo secundário para a produção de flavonóides, em especial as antocianinas, pigmento comumente utilizado como mecanismo de fotoproteção (PEDROSO, 2016), ligado a relação fonte/dreno nas plantas (LANDI et al. 2018) e mecanismos de aberturas e fechamentos de estômatos (WALTKINS et al., 2017).

Em síntese, o controle ativo da irradiância solar melhora a ambiência no interior da casa de vegetação no que diz respeito a temperatura do ar e DPV favorecendo as trocas gasosas, no que tange taxas fotossintéticas adequadas e maior controle da transpiração foliar. Além disso, inúmeros estudos já demonstraram que o controle ativo da irradiância solar permitem um melhor balanço hormonal entre auxina e citocianinas aumentando o enraizamento adventícios das miniestacas. Por sua vez, a temperatura do ar em uma faixa ótima aumenta a atividade das células no tecido das miniestacas e favorece suas desdiferenciação e redirecionamento para formação de um novo meristemas.

Em temas práticos para o manejo em viveiros, uma observação importante é a aclimação das miniestacas em casa de sombra e a pleno sol, nas etapas posteriores ao enraizamento realizado sob menor incidência de irradiância solar. Nesta etapa, é necessário aumentar frequência de irrigação e aduba-las, antes de expor as mudas a maiores níveis de irradiância solar, visto que existe maior acúmulo de pigmentos fotossintéticos e portanto, maior demanda por nutrientes, em especial o nitrogênio. Ainda, para alguns materiais genéticos a condição de baixa luminosidade pode favorecer algumas doenças fúngicas (ALFENAS et al., 2004), devendo os níveis serem ajustados de acordo com a características do material genético

A casa de vegetação automatizada proposta possibilita a implementação de quatro níveis de irradiância solar, que podem ser programado de acordo com a variabilidade diária, sazonal e a demanda ecofisiológicas das mudas de *Eucalyptus*. Este sistema possui potencial de aplicação prática, principalmente, em viveiros de produção comerciais localizados em baixa latitude que possuem níveis altos de irradiância solar o ano todo. As medidas de parâmetros ecofisiológicos como o ponto de compensação luminoso, ponto de saturação da irradiância solar e fotossíntese máxima é possível ajustar os níveis de irradiância solar dentro da faixa ótima durante a fase de indução, iniciação e expressão das raízes e após a miniestacas estabelecerem seu crescimento podendo levar a ganhos na eficiência de produção.

2.5. CONCLUSÕES

✓ As miniestacas enraizadas no interior de casa de vegetação automatizada, sob controle ativo da irradiância solar, apresentaram maior enraizamento em comparação com a casa de vegetação convencional somente para as condições de verão, períodos de elevados níveis de irradiância solar associados à temperaturas maiores. Em condição de inverno não houve diferença para enraizamento, sobrevivência e índice de qualidade das mudas entre a casa de vegetação automatizada e convencional, sendo as baixas temperatura do ar e a maior amplitude térmica o principal limitante para o enraizamento adventício e crescimento das plantas.

2.6. REFERÊNCIAS

- ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V.; MAFIA, G. R.; ASSIS, T. F. Clonagem e Doenças do *Eucalyptus*. Editora UFV 2ª edição, Viçosa, MG, p. 53 e 118, 2004.
- ALMEIDA, M. R.; AUMOND, M. J.; COSTA, C. T.; SCHWAMBACH, J.; RUEDEL C. M.; CORREA, L. R.; FETT-NETO, A. G. Environmental control of adventitious rooting in *Eucalyptus* and *Populus* cuttings. *Trees*, v. 31, p. 1377-1390, 2017.
- ASSIS, T. F.; FETT-NETO, A. G.; ALFENAS, A. C. Current techniques and prospects for the clonal propagation of hardwoods with emphasis on *Eucalyptus*. *Plantation Forest Biotechnology for the 21 century*, Kerala, India, 2004.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Sparovek G Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol Z* 22:711-728, 2013.

CARVALHO, A.P.V. Produtividade de minicepas de *Eucalyptus* sob aplicação de CO₂ via água de irrigação, Tese de doutorado apresentada a Universidade Federal de Viçosa.v1, p.331, 2015.Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7284>.

CORREA, L. R.; FETT-NETO, A. G. Effects of temperature on adventitious root development in microcutting of *Eucalyptus Saligna Smith* and *Eucalyptus globulus Labil*. Journal of Thermal Biology n. 29, p. 315 - 324, 2004.

FETT-NETO, A. G.; FETT, J. P.; GOULART, G. P.; TEMIGNONI, R. R.; FERREIRA, A. G.; Distinct effects of auxin and lighth on adventitious root development in *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus globulus*. Tree physiology, Victoria, Canada, n.21, p. 457- 464, 2001.

GUISELINI, C.; SENTELHA, P.C.; OLIVEIRA, R.C.; PRELA, A. Uso de malhas de sombreamento em ambiente protegido III: efeito sobre o crescimento e a produção comercial da *Gerbera jamesonii*. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 12, n.1, p. 27-34, 2004.

HARTMANN, H. T. Plant propagation: principles and practices. 7^a ed., New Jersey: Prentice-Hall, p. 880, 2002.

IBÁ. Relatório 2020, Indústria brasileira de árvores. Disponível em: <https://iba.org/>, Acesso: 21/11/2020.

LANDI, M.; TATTINI, M.; GOULD, K.S. Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions. Environmental and Experimental Botany, v.119, p.4-17, 2015.

OLIVEIRA, A.S.; NETO, A.S.; RIBEIRO, A.; RASCON, N.L.; RODY, P.; ALEMIDA, A.Q. Determinação do tempo térmico para desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus* na fase de enraizamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.16, p. 1223 - 1228, 2012.

PEDROSO, E.J. Enraizamento de miniminiestacas e ecofisiologia de mudas de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* submetidas a diferentes intensidade de irradiância solar. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, p.46, 2016.

PETERHANSEL, A.C.; INA HORST, A.I.; NIESSEN, A.M.; BLUME, A.C.; KEBEISH, A.R.; KÜRKCÜOĞLU, A.S.; KREUZALERB, F. Photorespiration, American Society of Plant Biologists, p. 2-24, 2010.

SANQUETTA, C.R.; BEHLING, A.; CORTE, A.P.D.; CADORI, G.C.; JUNIOR, S.C.; MACEDO, J.H.P. Eficiência de conversão da radiação fotossintética interceptada em Fitomassa de mudas de *Eucalyptus dunii* Maiden em função da densidade de plantas e do ambiente de cultivo. Sci. For., Piracicaba, v. 42, 573-580, 2014.

SHAMSHIRI, R.; ISMAIL, W.I.W. A Review of Greenhouse Climate Control and Automation Systems in Tropical Regions. Journal of Agricultural Science and Applications, v. 2, p. 173-183, 2013.

SKOOG, F.; MILLER, C. O. Chemical regulation of Growth and organ formation in plant tissues cultured in vitro. Symposia of the society for experimental biology, v.11, p. 118-131, 1957.

RUEDELL, C.M.; ALMEIDA, M.R; FETT-NETO, A.G. Concerted transcription of auxin and carbohydrate homeostasis-related genes underlies improved adventitious rooting of microcuttings derived from far – red treated *Eucalyptus globulus* Labill mother plants. Plant physiology and Biochemistry, v.97, 11-19, 2015.

TATTINE, M.; LANDI, M.; BRUNETTI, C.; GIORDANO, C; REMORINI, D.; GOULD, K.S; GUIDI, L. Epidermal coumaroyl anthocyanins protect sweet basil against excess light stress: multiple consequences of light attenuation. Physiologia Plantarum, v.152, p.585-598, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal, v.5, p. 354, Editora ARTMED, 2013.

WALKER, B.J.; VANLOOKE, Y.; BERNACCHI, C.J.; ORT, D.R.; The Costs of Photorespiration to Food Production Now and in the Future. Annu. Rev. Plant Biol., v. 67, p.107–29, 2016.

WATKINS, J.M.; CHAPMAN, J.M.; MUDAY, G.K. Abscisic Acid-Induced Reactive Oxygen Species Are Modulated by Flavonols to Control Stomata Aperture. Plant Physiology, 175:1807–1825, 2017.

XAVIER, A.; WENDLING, I.; SILVA, R.J. Silvicultura clonal: princípios e técnicas. Editora UFV. Viçosa - MG, 2013.

CAPÍTULO 3

ECOFISIOLOGIA DE MINIESTACAS DE *Eucalyptus* ENRAIZADAS EM CASA DE VEGETAÇÃO AUTOMATIZADA PARA CONTROLE DA IRRADIÂNCIA SOLAR

3.1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a clonagem de híbridos superiores de *Eucalyptus* por estaquia para produção de mudas, viabilizou o cultivo em grande escala, o aumento da produtividade e a qualidade da madeira no cultivo de florestas (ASSIS, 2015; XAVIER et al., 2013). No processo de produção de mudas de *Eucalyptus* em viveiros, o controle dos fatores meteorológicos, em especial a irradiância solar, a temperatura do ar e a umidade relativa durante o enraizamento das miniestacas de *Eucalyptus*, é determinante em função da fragilidades dos propágulos vegetativos (ALFENAS et al., 2004).

A irradiância solar e a temperatura do ar influenciam a síntese de hormônios e a produção de carboidratos que são diretamente relacionados à regulação de sinais envolvidos na formação de raízes em miniestacas de *Eucalyptus*. (FETT-NETO et al., 2001; CORREA; FETT-NETO, 2004; ALMEIDA et al., 2017). O enraizamento depende da desdiferenciação e o redirecionamento do desenvolvimento das células para a formação de um novo meristema que dará origem às raízes adventícias (LEGUÉ et al., 2014). Este processo envolve a transcrição de vários genes relacionados a síntese de auxina (RUEDELL et al., 2015), um hormônio fotodegradável, necessário para indução de raízes em miniestacas (HARTMANN et al., 2011).

Sob excesso de irradiância solar, as plantas apresentam mecanismos de defesa vários, como exemplo, a produção de pigmentos (carotenoides e clorofilas) e flavonóides (e.g. *antocianinas*) (NIYOGI; TRUONG, 2013; TATTINI et al., 2014), mudança na disposição e tamanho de folhas e estômatos (MOTT et al., 1982; MOTT; MICHAELSON 1991) e mecanismos de fotorrespiração e fotoinibição (WALKER et al., 2016; PETERHANSEL et al., 2010). Esta plasticidade fenotípicas, visando aclimação as mudanças do ambiente, são bastante variáveis nos diferentes genótipos (BORÉM & FRITSCHÉ-NETO, 2011).

Sob maiores intensidades de irradiância solar, as miniestacas de *Eucalyptus* aumentam o teor antocianinas para atenuar os efeitos nocivos do excesso de energia solar (PEDROSO, 2016). Alguns estudos indicam que os flavonóides (e.g. *antocianinas*) podem influenciar o transporte de auxinas (PEER; MURPHY, 2008), hormônios diretamente relacionados ao enraizamento das miniestacas (HARTMANN et al., 2011). Em contraste, flavonóides reduzem a concentração de espécies de oxigênio reativo nas células guardas e influenciam a aberturas e

fechamento estomáticos (WATKINS et al., 2017), mecanismo importante para manter a turgidez e produção de carboidratos em estacas (HARTMANN et al., 2011).

Analisados em conjunto, esses estudos sugerem que pode haver uma relação entre a produção de antocianina e o baixo nível de enraizamento das miniestacas observadas em condições de alta irradiância solar (PEDROSO, 2016). Da mesma forma, o crescimento e desenvolvimento de clones de *Eucalyptus* contrastantes com relação ao teor de antocianina tem sido pouco estudado. Entender as respostas ecofisiológicas principais e como isso influencia no crescimento e desenvolvimento das mudas podem fornecer subsídios para o planejamento e gestão do ambiente de produção em viveiros.

A nossa hipótese é que os clones de *Eucalyptus* possuem diferentes mecanismos de adaptação e aclimação a maiores intensidades de irradiância solar, entre eles níveis contrastantes do teor de antocianinas nas folhas, que podem vir a influenciar o enraizamento adventício em casa de vegetação, o crescimento e o desenvolvimento das mudas nos viveiros.

Assim, uma casa de vegetação automatizada com um sistema de controle automático da irradiância solar em tempo real foi desenvolvida com possibilidade de implementação de quatro níveis de irradiância solar. Neste estudo, no interior da casa de vegetação automatizada proposta, os níveis de irradiância solar foram programados de acordo com estudo de Pedroso (2016), visando atenuação de até 80 % da irradiância solar externa, diferente do manejo em casa de vegetação convencional, comumente realizado com malhas de atenuação de 50 % da irradiância solar fixas sobre o dossel das plantas.

O objetivo deste trabalho foi estudar as respostas ecofisiológicas de miniestacas de *Eucalyptus* enraizados em casa de vegetação automatizada com controle ativo da irradiância solar e uma casa de vegetação convencional com sistema fixo de atenuação da irradiância solar.

Para isso, analisamos as trocas gasosas, teores de pigmentos fotossintéticos, densidade estomática e biometria a fim de elucidar os mecanismos de adaptação e aclimação das mudas de *Eucalyptus* sob duas condições propostas e entender como isso influencia o enraizamento adventício, o crescimento e desenvolvimento das mudas, abrangendo as etapas de enraizamento em casa de vegetação e posterior aclimação em casa de sombra.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1. Área experimental

O experimento foi realizado no município de Viçosa, Minas Gerais (20°45'45" S de latitude, 42°52'04" W de longitude e 690 m de altitude), no Viveiro de Pesquisa do Departamento de Engenharia Florestal, pertencente a Universidade Federal de Viçosa. O clima da região é caracterizado com verões chuvosos e invernos secos, com precipitação média anual é de 1220 mm, temperaturas média máxima de 26 °C e média mínima de 14 °C (ALVARES et al., 2013). O experimento foi realizado entre 01/2020 a 04/2020 e cobriu o período de verão no hemisfério sul, buscando amostrar dados nas condições de maior intensidade de irradiância solar.

3.2.2. Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi estabelecido em um delineamento inteiramente casualizados com um arranjo fatorial 4 x 2, contemplando o efeito de quatro materiais genéticos (Clones A, B, C e D) e efeito de dois ambientes representados pela casa de vegetação automatizada (CA), onde os níveis de irradiância solar foram ajustados com sombreamento próximo de 80 % de acordo com Pedroso (2016) e casa de vegetação convencional (CC), caracterizada por sombreamento fixo com malhas 50 %, num total de oito tratamentos, formados pela combinação dos clones e casa de vegetação (Tabela 2.1).

Em cada experimento foram feitas quatro repetições num total de 32 unidades experimentais de 16 miniestacas. O experimento foi repetido quatro vezes num total de 2048 plantas medidas.

Tabela 3.1. Tratamentos formados pelos efeito do ambiente na etapa de enraizamento adventício, proporcionados pela casa de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional, com sombreamento de 50 % fixo (CC) e efeito dos clones A, B, C e D.

		Tratamentos			
Ambientes		Clone A	Clone B	Clone C	Clone D
CA		16	16	16	16
		16	16	16	16
		16	16	16	16
		16	16	16	16
CC		16	16	16	16
		16	16	16	16
		16	16	16	16
		16	16	16	16

3.2.3. Estrutura experimental e montagem do experimento

A montagem dos experimentos e os tratos culturais foram realizados segundo o protocolo de produção comercial de mudas de *Eucalyptus*, abrangendo as etapas de produção das miniestacas em minijardim clonal, enraizamento das miniestacas em casa de vegetação pelo período de 30 dias e aclimatação em casa de sombra por mais 15 dias, para estabilização do enraizamento, conforme descrito por Xavier (2013).

O minijardim clonal para obtenção nas miniestacas, foi cultivado com os quatro clones comerciais todos híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*, sendo os clones A e B caracterizado pela produção de antocianinas nas folhas durante o enraizamento das miniestacas em casas de vegetação e os clones C e D sem produção de antocianinas, características estas observadas visualmente. Os clones foram cultivados sob leitos de areia em sistema de canaletões de telhas fibra-cimento no interior de uma casa de vegetação coberta com plásticos transparentes de 150 microns com laterais abertas (XAVIER et al., 2013).

A fertirrigação do minijardim clonal foi feita por gotejamento, atendendo a lâminas de 9 mm dia⁻¹ em dias de sol pleno e 5 mm dia⁻¹ em dias nublados. Tirou-se a alíquotas de 10 L das soluções 1, 2 e 3 e 0,900 L da solução 4, 5, 6 (Tabela 3.2), para misturar em reservatório de 800 L de água resultando em uma solução nutritiva com condutividade elétrica de 1,4 mS cm⁻² e pH igual à 6.20 (CARVALHO, 2015).

Tabela 3.2. Sais utilizados nas soluções nutritivas aplicadas no minijardim clonal.

Solução estoque	Fertilizantes	Dose solução estoque (g L ⁻¹)
Solução 1	Nitrato de cálcio	5.86
	Cloreto de cálcio	21.0
Solução 2	Sulfato de Magnésio	19.7
	Fosfato de Potássio	9.67
	Sulfato de Potássio	25.3
	Sulfato de Amônio	3.28
Solução 3	Nitrato de Amônio	27.2
Solução 4	Ácido Bórico	1.22
Solução 5	Sulfato de Zinco	0.22
Solução 6	Sulfato de Cobre	0.11
	Sulfato de Manganês	0.44
	Molibdato de sódio	0.02
	Ferrilene	19.3

Seguindo os procedimentos usuais em viveiros comerciais de *Eucalyptus* as miniestacas foram coletadas no minijardim clonal com dois pares de folhas apicais com tamanho aproximado de 8 cm e matéria seca de 0,14 g em média. As miniestacas foram estaqueadas em tubetes de polipropileno com volume de 55 cm³ preenchidos com substrato constituído por palha de arroz carbonizada, vermiculita e fibra de coco na proporção 40:40:20. A nutrição do substrato foram realizadas com adubações de base com 8,0 kg m⁻³ de superfosfato simples (18 % de P₂O₅ e 12 % de S), 0,208 kg m⁻³ de KCl e 0,021 kg m⁻³ de Bo, Zn, Cu e Mn.

O enraizamento das miniestacas foram realizados em casa de vegetação com automação dos níveis de irradiância solar (CA) e sem automação (CC) pelo período de 30 dias. Após retirada da casa de vegetação, as miniestacas foram levadas para casa de sombra para estabilização do enraizamento onde ficou até completar 45 dias com bloqueio de 46% da irradiância solar. Neste período, foi realizada uma adubação de cobertura com 16,9 g L⁻¹ de fosfato-monopotássico (MKP) e 8,25 g L⁻¹ de sulfato de amônio, sendo aplicado 5 mL da solução em cada tubete. Na casa de sombra, a irrigação utilizada foi o sistema de microaspersão com sete irrigações diárias de três minutos totalizando uma lâmina de 5 mm m⁻² dia⁻¹.

As duas casas de vegetação (automatizada para controle da irradiância e convencional) utilizadas nesta experimentação possuem estruturas semelhantes, construídas para enraizamento das miniestacas, sendo similares às utilizadas para produção comercial com tamanho reduzido com dimensões de 6 x 6 x 3 m de pé direito, sendo inteiramente revestida por plástico filme transparente de 150 microns.

Em ambas a irrigação foi realizada utilizando um sistema de nebulização intermitente mediante o uso de bicos (coolnet, NetafimTM) com “set point” para acionamento da nebulização baseados nos limites da umidade relativa e da temperatura do ar, sendo, respectivamente, valores menores que 80 % e maiores que 30 °C para dias ensolarados. Para dias nublados e com temperaturas baixas, estabeleceu ativação da nebulização de 20 segundos a cada 15 minutos. Em ambas as casas de vegetação a nebulização foi ativadas no mesmo horários e lâminas de água sendo observado diariamente restrição ou excesso de água para ajustes necessários.

Na casa de vegetação convencional (CC) o controle da irradiância solar foi realizada conforme a produção convencional onde utiliza-se uma malha Aluminet (Aluminet[®] modelos O50 Ginegar Polysack) fixa sobre o dossel das miniestacas com atenuação de 50 % da irradiância solar, instaladas a 2,70 m de altura de altura pé direito.

Na casa de vegetação automatizada (CA) foi realizado o controle automatizado dos níveis de irradiância solar, com a instalação de duas malhas sobrepostas, sendo uma malha tipo

Aluminet que bloqueia 80 % e outra malha que bloqueia 50 % (Aluminet® modelos O50 e O80, Ginegar Polysack), também foram instaladas à 2,7 m de altura de pé direito.

O sistema automatizado foi projetado para regular os níveis de irradiância solar que atinge as folhas das miniestacas reduzindo os efeitos de estresse promovido pelo excesso de irradiância solar. As duas malhas sobrepostas são acionadas por dois motoredutores (Modelo motoredutor, 1/6 cv - MDR2 - motor/ 220 trifásico), acoplado a sistemas de tubo/eixo (diâmetro 63,3, parede 3mm; comp. 6m) e mancais que realizam a abertura e fechamento das malhas.

Um sensor piranômetro (Piranômetro CMP3, Campbell Scientific, Inc) mede a irradiância solar e o *datalogger* CR1000, (Campbell Scientific, Inc.) faz a leitura do sensor e envia um sinal elétrico para acionar os motoredutores por meio dos contadores.

Foi desenvolvido um algoritmo que é executado internamente no datalogger e tem como *input* os valores de irradiância solar global medidos pelo piranômetros (R_g) armazenados internamente. A tomada de decisão de sombreamento pelo algoritmo tem quatro setups que foram definidos de acordo os níveis de sombreamento próximos de 80 % na etapa de enraizamento das miniestacas conforme Pedroso (2016):

- i) Se a R_g for menor que $150 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, o dossel vegetativo das miniestacas ficará sem a cobertura do Aluminet (De 0 até 25 dias após estaqueamento).
- ii) Estende o Aluminet 50 % se a R_g estiver entre 150 e $500 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (De 0 até 30 dias após estaqueamento).
- iii) Estende do Aluminet 80 % se a R_g estiver entre 500 a $800 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (De 0 até 25 dias após estaqueamento).
- iv) Estende do Aluminet 80 % e 50 % em conjunto se a R_g for maior que $800 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (De 0 até 25 dias após estaqueamento).

3.2.4. Variáveis Meteorológicas

Três estações meteorológica foram instaladas, sendo uma interna em cada casa de vegetação, composta por um termohigrômetro e um piranômetro e outra externa compostos pelo mesmos sensores adicionada de um anemômetro e pluviômetro. As informações das estações foram armazenadas em um datalogger (CR1000 ST-SW-NC, Campbell Scientific, Inc.),

e as condições atmosféricas foram medidas e registradas ao mesmo tempo. As leituras dos sensores foram realizadas a cada cinco segundos e a média foi armazenada a cada 15 minutos (Tabela 3.3).

Tabela 3.3. Relação dos sensores instalados na estação meteorológicas utilizadas no experimento.

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, The Netherlands)
Piranômetro	Irradiância solar global	- Black & Write 8- 48, Eppley
Piranômetro	Irradiância solar global	- Silicone Pyranometer 075239, Kipp & Zonen, Röntgenweg, The Netherlands
Anemômetro	Velocidade do vento	-Modelo TE 525, Campbell Scientific Instruments, Utah, USA

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi estimada como 50 % da irradiância solar global (SZEICZ, 1974).

O déficit de pressão de vapor (DPV) foi determinado de acordo com Pereira (2002), (Equação 1).

$$DPV = es - ea \quad (1)$$

Em que es é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa) e ea é a pressão parcial de vapor d'água (kPa). A pressão de saturação do vapor d'água (es) foi calculada de acordo com a equação de Tetens (Equação 2).

$$es = 0,6108 * 10^{[(7,5*tar / 237,3 + tar)]} \quad (2)$$

Em que tar corresponde à temperatura do ar em °C.

3.2.5. Medidas ecofisiológicas

No final da etapa de enraizamento foram analisados o conteúdo de pigmentos fotossintéticos e antocianina, densidade estomáticas e curvas de luz para verificar respostas ecofisiológicas diferentes. Na saída da casa de sombra foram realizadas as medidas de trocas gasosas para estudar o processo de aclimação na casa de sombra verificando processos como fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s), relação C_i/C_a na câmara subestomática, podendo entender como as plantas enraizadas em condições diferentes se comportam durante aclimação em casa de sombra (Figura 3.1).

Etapas de produção de mudas clonais de *Eucalyptus* pelo processo de estaquia



Figura 3.1. Cronologia de medidas ecofisiológicas ao longo do experimento: Até os 30 dias período que miniestacas ficaram no interior de casa de vegetação automatizada (CA) e convencional (CC) para enraizamento adventício. A partir desta etapa todas as plantas ficaram por um período de aclimação de quinze dias na casa de sombra.

3.2.5.1. Densidade estomática

A determinação da densidade estomática foi realizada aos 30 dias após o estaqueamento. Para isso, quantificou-se os estômatos nas folhas empregando-se a técnica da impressão de epiderme adaxial e abaxial em lâminas de vidro. As lâminas foram fotografadas no fotomicroscópio (Axio Scope A1, Carl Zeiss) gerando 5 imagens por lâmina, num total de

20 imagens/tratamento. Em seguida, utilizou-se o programa *software* de análise de imagens IMAGE-PRO®PLUS para a contagem dos estômatos.

3.2.5.2. Medidas das trocas gasosas

As medidas de trocas gasosas foram realizadas aos 45 dias após o estaqueamento com um analisador de gás infravermelho (IRGA; modelo portátil LI-6400XT, Lincoln, Nebraska, USA) com fonte de luz acoplada fixada em $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e concentração atmosférica ambiente de gás carbônico de 400 ppm estabilizada por meio de buffer. As medidas de fotossíntese líquida (A), transpiração (E) e condutância estomática (g_s) e concentração interna de CO_2 na câmara subestomática (C_i/C_a) foram realizadas em dias ensolarados no período da manhã das 8 às 11 horas em folhas totalmente expandidas em 6 plantas/tratamento.

3.2.5.3. Medidas de curva de luz

As curvas de luz foram realizadas com um analisador de gás infravermelho (IRGA; modelo portátil LI-6400XT, Lincoln, Nebraska, USA) com fonte de luz acoplada e concentração atmosférica ambiente de gás carbônico de 400 ppm estabilizada por meio de buffer. Os valores de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foram de 2000, 1500, 1000, 800, 600, 400, 200, 150, 100, 50, 25 e $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Os parâmetros foram obtidos em curvas de respostas da fotossíntese versus radiação fotossinteticamente ativa (RFA) medidas em oito miniestacas (oito curvas /tratamentos) 30 dias após estaqueamento. O ajuste da curva de luz permitiu a obtenção de modelo de simulação da fotossíntese (A), conforme descritos por PRADO e MORAES, 1997 (Equação 3).

$$A = A_{max} \cdot [1 - e^{0.0063(RFA-PCR)}] \quad (3)$$

A - fotossíntese líquida momentânea, ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

A_{max} – fotossíntese líquida máxima, ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

e - base do logaritmo natural ($e = 2,718$)

k – constante de proporcionalidade associada à concavidade da curva

PCR - ponto de compensação da radiação, ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

RFA - Radiação fotossinteticamente ativa, ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Os valores de A_{max} , K e PCR foram encontrados utilizando a rotina de curvas não-linear do software Origin versão 6,1 (Microcal Software, Northampton, USA).

A eficiência quântica (α), determinada pela declividade da região linear da curva de resposta da RFA, representa o rendimento quântico máximo da fotossíntese, (α = relação entre moles de CO_2 assimilados e moles de fótons absorvidos) (Equação 4).

$$\alpha = k A_{max} \cdot (e^{k PCR}) \quad (4)$$

α - eficiência quântica ($\mu\text{mol } CO_2 / \mu\text{mol fótons}^{-1}$).

3.2.5.4. Teor de pigmentos fotossintéticos e de antocianinas

Os teores dos pigmentos foliares fotossintéticos (clorofila *a*, *b* e *total*) e de *antocianinas* foram realizados aos 30 dias após o estaqueamento na saída casa de vegetação para determinar respostas apresentadas nas duas casas de vegetação de enraizamento. Foram realizadas quatro repetições para cada tratamento, totalizando quarenta discos foliares por tratamento. Para cada repetição, dez discos foliares de área conhecida foram coletados e tiveram as massas úmidas determinadas.

Para a determinação dos teores das clorofilas as amostras foliares foram incubadas em 5 ml de dimetilsulfóxido (DMSO), saturado com $CaCO_3$ a temperatura ambiente por 48 h. As absorvâncias das amostras foram determinadas em espectrofotômetro (UV 0790U2 M, Quimis) nos comprimentos de ondas de 470, 663,2 e 646,8 nm e os valores foram utilizados para o cálculo dos teores de *clorofila a*, *b*, *totais* e *carotenóides* conforme a metodologia proposta por WELLBURN (1964).

Para obtenção dos teores de *antocianina* as amostras foram homogeneizadas em metanol (HCL 1 % (v/v) em banho de gelo e centrifugadas a $10.000 \times g$ por 30 min, a 4 °C. O teor de antocianina será determinado pela diferença entre a absorvância a 536 e 600 nm conforme Hodges (1999). Os resultados foram expressos em $\mu\text{g g}^{-1}$ massa fresca como equivalentes de cianidina-3-glucosídeo com coeficiente de extinção molar ($26900 \text{ L cm}^{-1} \text{ mol}^{-1}$).

3.2.5.5. Medidas biométricas

As medidas biométricas do tamanho da parte aérea e do diâmetro do colo foram determinadas aos 45 dias após o estaqueamento em todas as mudas.

As medidas de área foliar foram realizadas no departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa com um medidor de área foliar de bancada (Modelo LI-3100, LI-COR). A área foliar específica foi obtida pela matéria seca foliar (g)/ área da foliar (cm²).

Posteriormente, para determinação da matéria seca, foi feito o particionamento das folhas, caules e raízes das mudas que foram levadas para uma estufa e ficaram a 65 °C por 48 h e, em seguida foram pesadas em balanças de precisão.

3.2.6. Análise dos dados

Os dados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) e teste F ($P \leq 0.05$) à 5 % de significância, seguido de um teste de média Tukey. Os testes estatísticos foram conduzidos usando o *software* Statística[®] 13 da empresa Dell.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Condições meteorológicas

3.3.1.1. Radiação solar global e temperatura externa

Como o esperado, foram observados picos de irradiância solar médios de $616,2 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$, mas houve valores máximos de até $1178 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ em dias de sol pleno e mínimos de $55,6 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$, em dias de maior nebulosidade na parte externa a pleno sol (Figura 3.2A). As temperaturas médias foram de $23,3 \text{ }^\circ\text{C}$, tendo máximas de $36,4 \text{ }^\circ\text{C}$ e mínimas de até $13,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 3.2B).

3.3.1.2. Radiação solar global diária, horária e integrada

Na casa de vegetação convencional (CC), em 45 % dos dias de experimentos a irradiância solar foi acima de $275 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$, com picos próximos de $400 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ (Figura 3.3A). Na casa de vegetação convencional a irradiância solar correspondeu a 42 % da irradiância solar externa com sombreamento médio de 56 %.

Na casa de vegetação automatizada (CA) os picos de irradiância solar acima de $100,0 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ corresponderam a 35 % dos dias de experimento (Figura 3.3B). No interior da casa de vegetação automatizada, a irradiância solar foi em média 22 % da irradiância solar externa, com sombreamento médio total de 77,0 %.

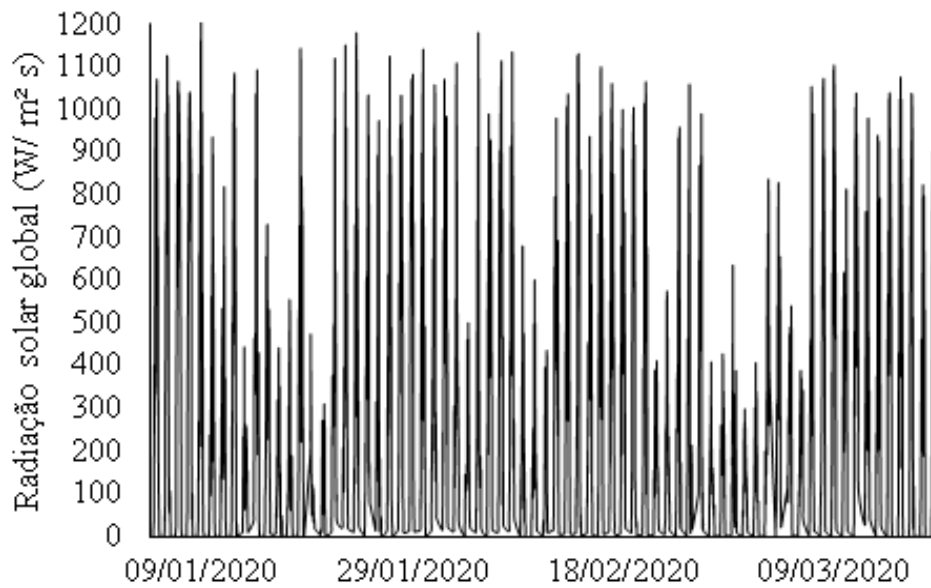
As medidas horárias de irradiância solar global no interior da casa de vegetação automatizada, tiveram intensidade médias máximas de $83, \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ ($\pm 43,5$). Na casa de vegetação convencional a irradiância solar global tiveram médias máximas de $212 \text{ W m}^2\text{s}^{-1}$ ($\pm 86,4$) (Figura 3.4A).

A energia solar global integrada na etapa de enraizamento em casas de vegetação automatizada e no período de aclimação em casa de sombra foram de $81,2 \text{ MJ m}^2$, enquanto na casa de vegetação convencional e no período de aclimação em casa de sombra a energia solar global integrada foi de $129,3 \text{ MJ m}^2$ (Figura 3.4B).

3.3.1.3. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA)

Na casa de vegetação convencional os picos maiores de RFA foram de $424 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 172,8$), sendo que em 45 % dos dias RFA esteve acima de $550 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, com picos de até $800 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Figura 3.5A). Se considerarmos a média horária de maior incidência de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), para a casa de vegetação automatizada, foram de $166,34 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($\pm 87,1$). A RFA acima de $200,0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ corresponderam a 35 % dos dias no verão (Figura 3.5B).

A



B

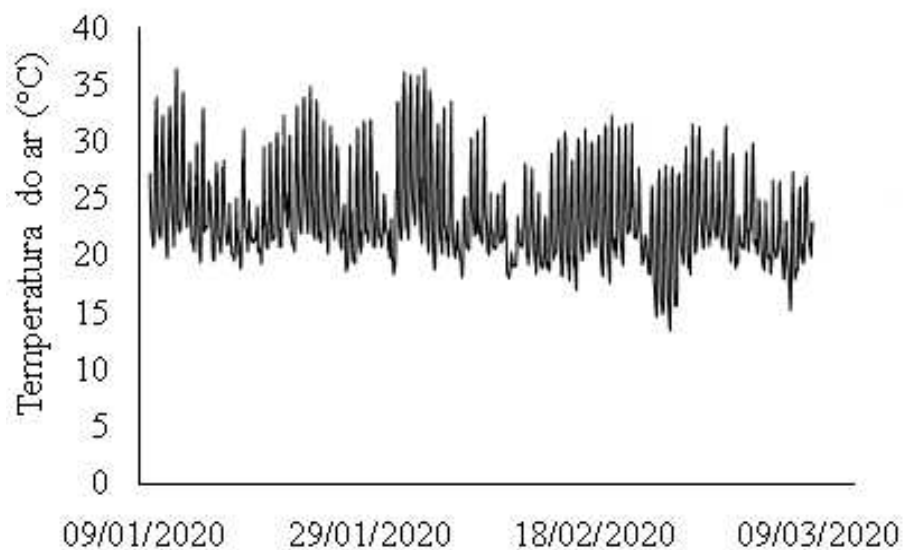
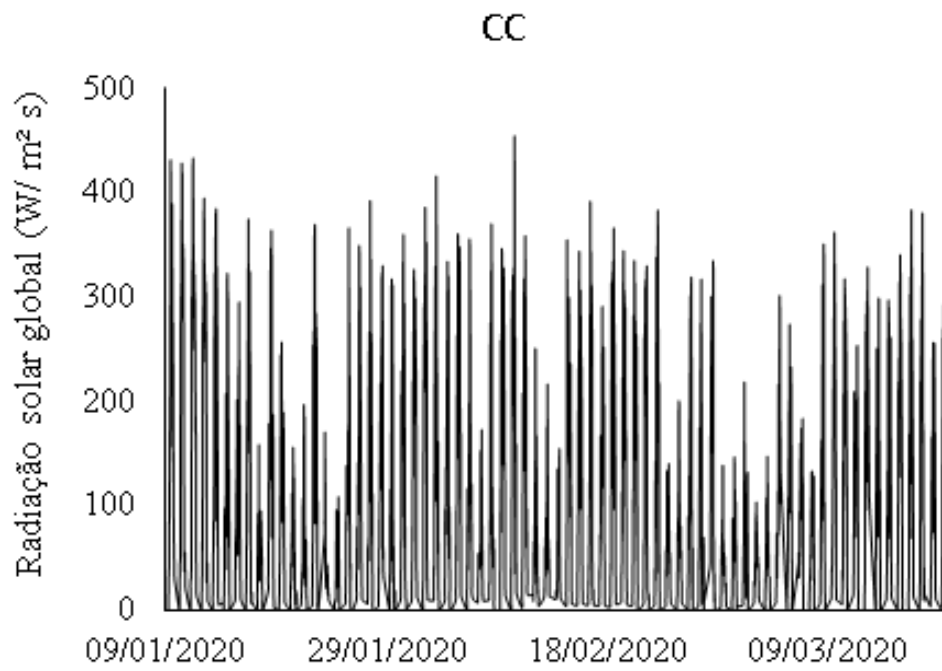


Figura 3.2. Irradiância solar (A) e temperatura do ar (B) na parte externa da casa de vegetação durante o período experimental.

A



B

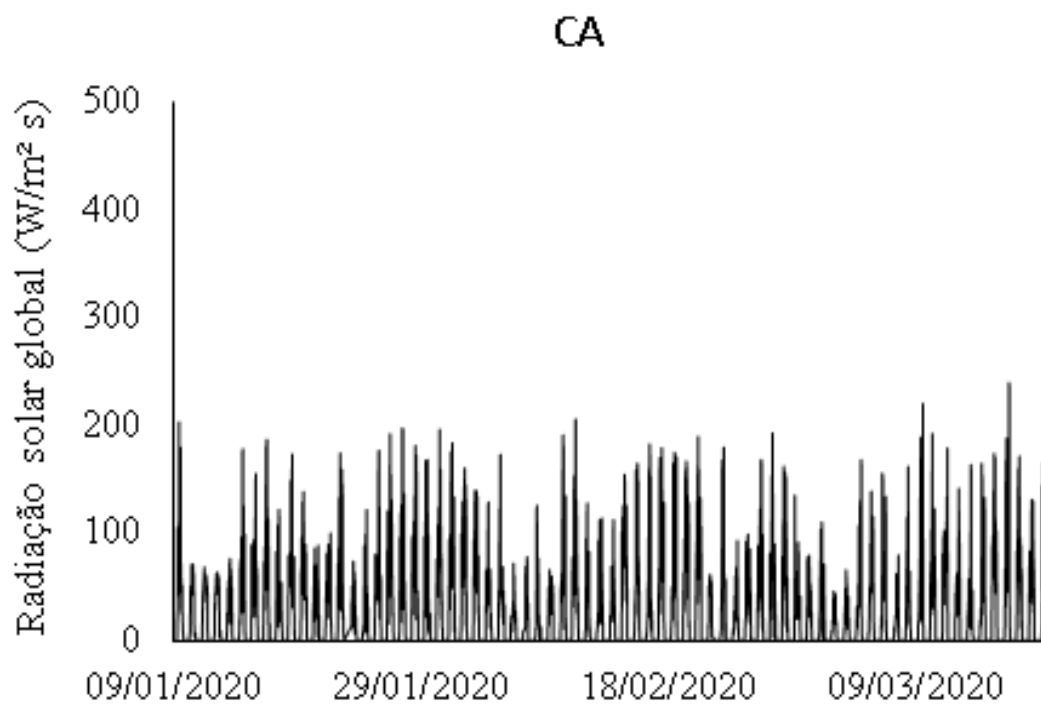
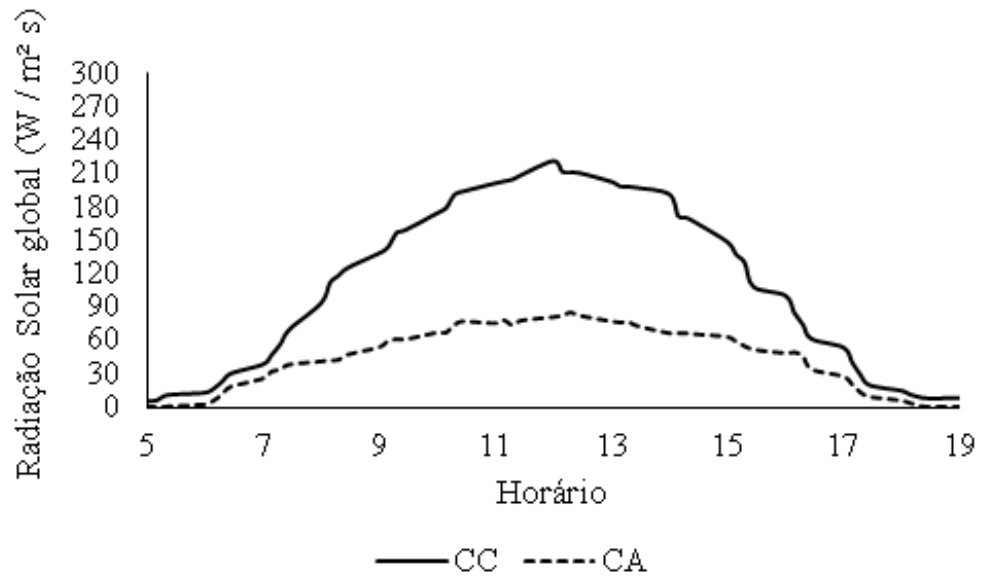


Figura 3.3. Irradiância solar no interior da casa de vegetação convencional (CC) e no interior da casa de vegetação automatizada (CA).

A



B

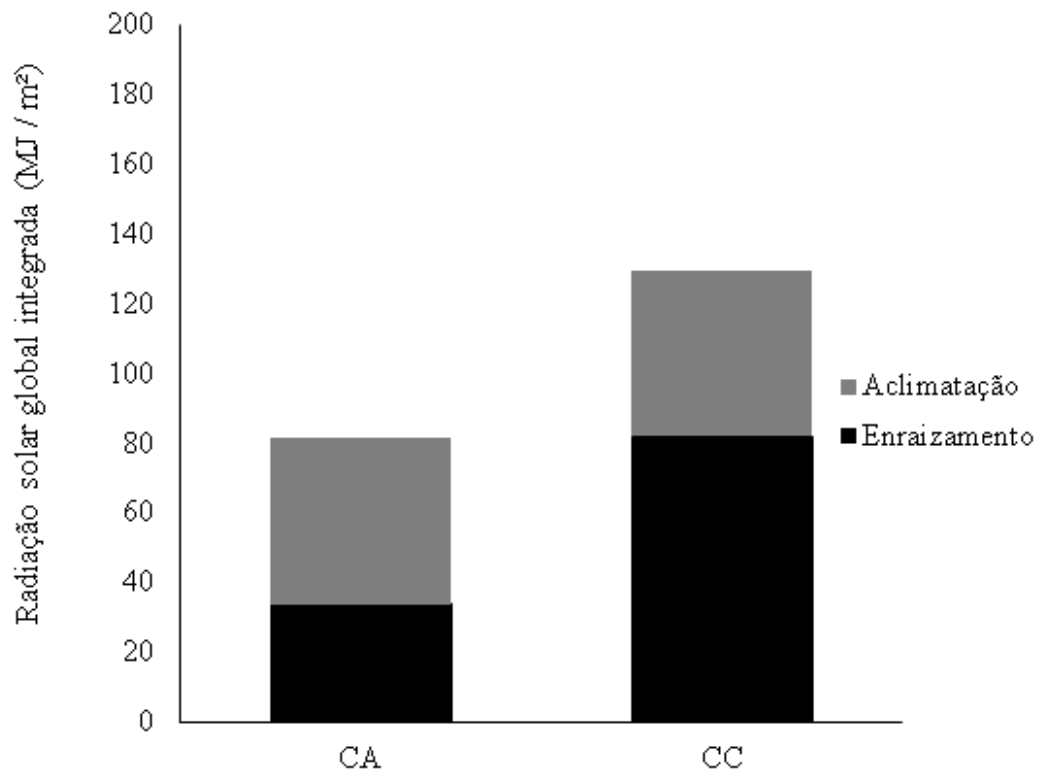
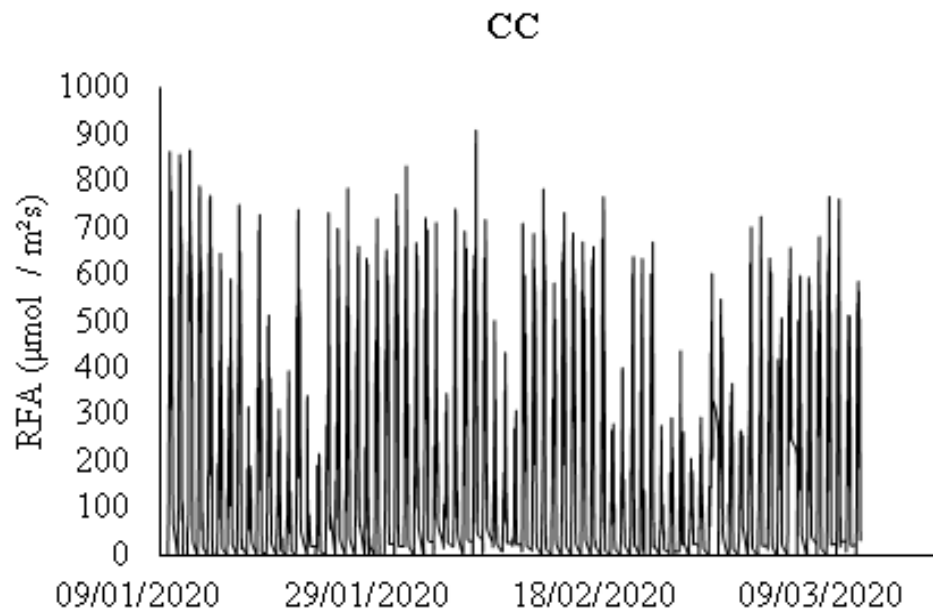


Figura 3.4. Médias horárias da Irradiância solar global no interior da casa de vegetação convencional (CC) e casa de vegetação automatizada (CA), (A). Radiação solar global integrada durante o ciclo de enraizamento e aclimação em casa de sombra (B).

A



B

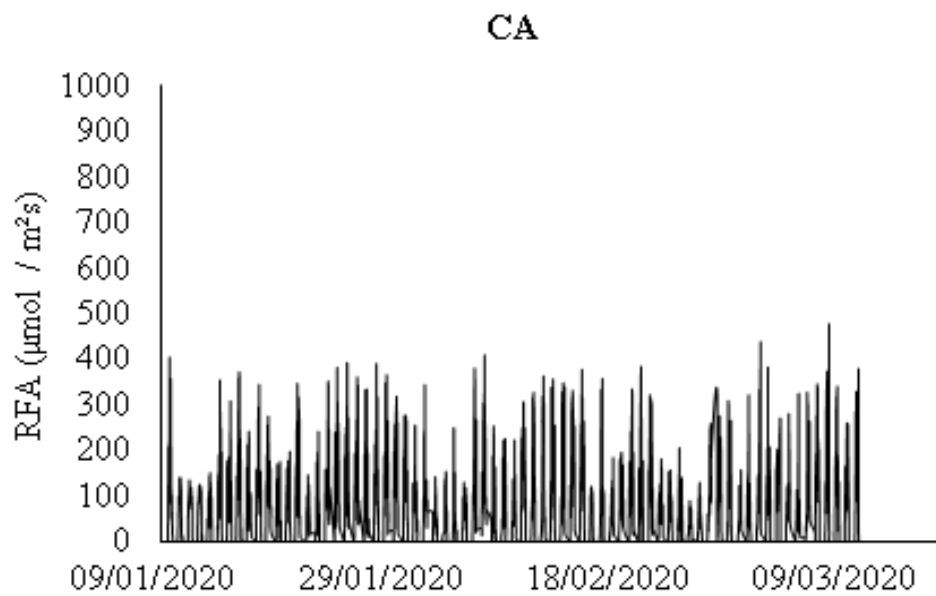


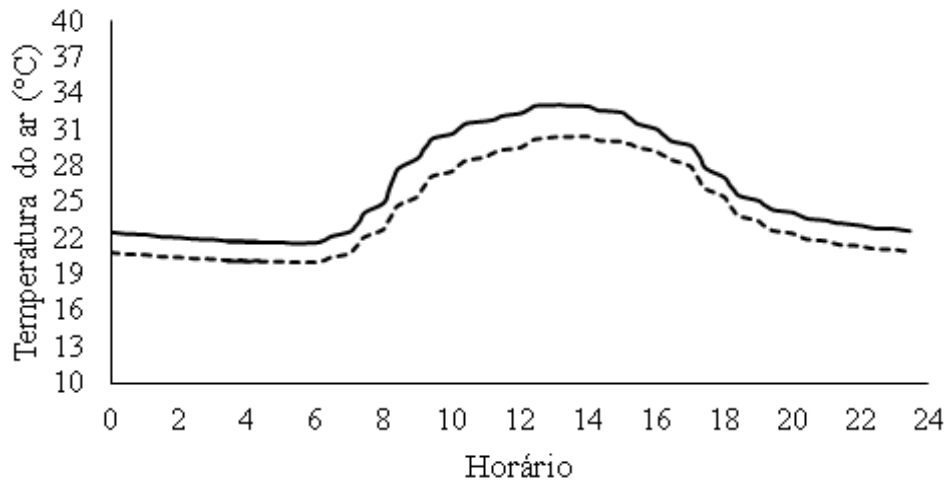
Figura 3.5. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) no interior da casa de vegetação convencional (CC) e casa de vegetação automatizada (CA) durante enraizamento das miniestacas.

3.3.1.4. Temperatura do ar e déficit de pressão de vapor

A temperatura do ar para a casa de vegetação automatizada tiveram médias de $24,2\text{ °C}$ ($\pm 2,28\text{ °C}$) e a casa de vegetação convencional registrou médias de $26,2\text{ °C}$ ($\pm 2,27\text{ °C}$) (Figura 3.6A). As temperaturas médias mínimas foram de $20,1\text{ °C}$ e $21,6\text{ °C}$ e as máximas foram de $30,5\text{ °C}$ e $33,9\text{ °C}$ para a casa de vegetação automatizada e convencional, respectivamente.

O déficit de pressão de vapor do ar para a casa de vegetação automatizada foi em média de $0,42\text{ KPa}$ ($\pm 0,41$) e a casa de vegetação convencional registrou médias de $0,52\text{ KPa}$ ($\pm 0,50$) (Figura 3.6B).

A



B

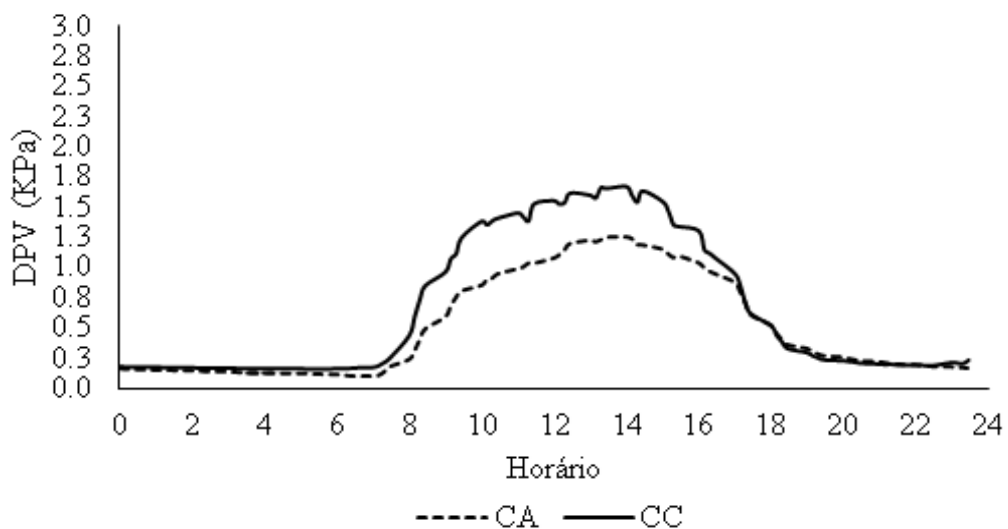


Figura 3.6. Temperatura do ar média (A) e déficit de pressão de vapor (DPV), (B) no interior da casa de vegetação automatizado (CA) e convencional (CC).

3.3.2. Medidas biométricas, matéria secas e área foliar

Na casa de vegetação automatizada, observamos uma diferença clara e significativa para aumento da área foliar ($p = 0,0473$) mas não houve diferença para diâmetro do colo, matéria seca da raiz e folhas. Sob baixo nível de irradiância solar a área foliar foi em média 4,1 cm² maior, com destaque para o clones A e C que apresentaram maiores ganhos. Já o clone D apresentou menor área foliar quando enraizado na casa de vegetação convencional, sob irradiância solar maior se comparado a outros clones (Tabela 3.4).

Para a eficiência no uso da irradiância solar (*EUR*) se observou uma diferença significativa ($p = 0,000$). As médias de *EUR* registradas foram de 0,0023 g/MJ m⁻² dia⁻¹ ($\pm 0,007$) para casa de vegetação convencional e 0,0036 g/MJ m⁻² dia⁻¹ ($\pm 0,005$) na casa de vegetação automatizada. A *EUR* foi em média 32 % maior na casa de vegetação automatizada se comparada a casa de vegetação convencional (Tabela 3.4).

Os materiais genéticos apresentaram porcentagem de enraizamento diferentes, onde o clones A e C, se destacaram com enraizamento de 95,7 % ($\pm 3,03$ %) e 85,4 % ($\pm 7,87$ %), ao passo que o clone B e A tiveram limitação com enraizamento de 75,6 % ($\pm 13,9$ %) e 58,9 % ($\pm 19,8$ %), respectivamente. Houve ganho médio de 11,7 % no enraizamento realizado na casa de vegetação automatizada (Tabela 3.4).

As Figuras 3.7 ilustram o enraizamento adventício realizado na casas de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional com posterior aclimatação em casa de sombra até completar 45 dias. As mudas inicialmente enraizadas em casa de vegetação automatizada, sob menor incidência de irradiância solar e aclimatadas em casa de sombra, aparentemente apresentaram maior vigor para o enraizamento evidenciado por maior comprimento de raízes para fora do tubete na casa de vegetação automatizada (3.7B) em relação a casas de vegetação convencional (3.7C).

A



B

C

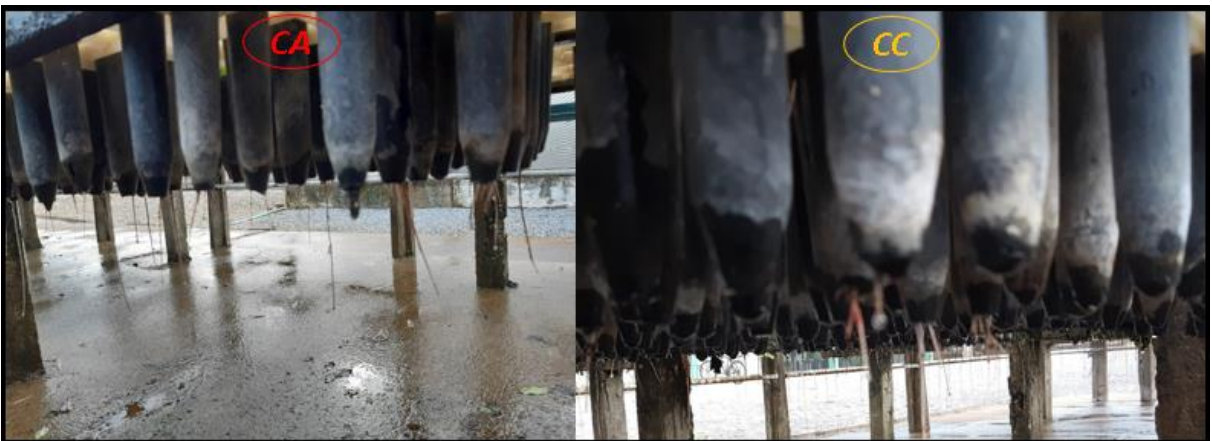


Figura 3. 7. Mudas dos clones A, B, C e D enraizadas em casa de vegetação automatizado (CA) e convencional (CC) e aclimatadas em casas de sombra (A). Detalhes das raízes saindo para fora do tubete na casas de vegetação automatizada (B) e convencional (C).

Tabela 3.4. Biometria da altura da parte aérea, diâmetro do caule e matéria seca das folhas, caules e raízes 45 dias após estaqueamento. Mudanças de híbridos superiores de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* para os clones A, B, C e D enraizadas em casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC) e aclimatadas em casa de sombra.

Clones Ambientes	Altura (cm ²)			Diâmetro (mm)			Matéria seca Folha (g)			Matéria seca Caule (g)			Matéria seca raiz (g)		
	CA	CC	Médias	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média
A	33.2	29.9	31.6 ab	2.20	2.17	2.18 ^{ns}	0.247	0.227	0.23 ^{ns}	0.069	0.070	0.070 ab	0.078	0.071	0.074 ^{ns}
B	28.2	28.6	28.3 ab	2.09	2.13	2.11 ^{ns}	0.259	0.266	0.26 ^{ns}	0.062	0.060	0.061 b	0.064	0.055	0.060 ^{ns}
C	35.7	29.7	32.7 a	2.15	2.11	2.13 ^{ns}	0.261	0.262	0.26 ^{ns}	0.079	0.073	0.077 a	0.097	0.072	0.085 ^{ns}
D	27.7	23.7	25.7 b	2.13	2.01	2.07 ^{ns}	0.221	0.207	0.21 ^{ns}	0.061	0.060	0.061 b	0.071	0.058	0.064 ^{ns}
Médias	31.3 ^{ns*}	27.9 ^{ns*}		2.14 ^{ns*}	2.11 ^{ns*}		0.24 ^{ns*}	0.24 ^{ns*}		0.066 ^{ns*}	0.068 ^{ns*}		0.078 ^{ns*}	0.064 ^{ns*}	

Clones \Ambientes	AF (cm ²)			AF específica (g/cm ²)			EUR (g / MJ.m ² dia ⁻¹)			Enraizamento (%)		
	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média
A	33.2	29.9	31.6 ab	0.0074	0.0076	0.0074 b	0.0033	0.0021	0.0027 ^{ns}	95.4	95.9	95.7 a
B	28.6	27.0	28.3 ab	0.0091	0.0094	0.0092 a	0.0038	0.0024	0.0031 ^{ns}	82.9	68.4	75.6 bc
C	35.7	29.7	32.7 a	0.0074	0.0087	0.0080 ab	0.0035	0.0024	0.0029 ^{ns}	92.3	78.6	85.4 ab
D	27.8	23.5	25.7 b	0.0080	0.0085	0.0082 ab	0.0037	0.0029	0.0030 ^{ns}	68.6	49.2	58.9 c
Médias	31.3 A	27.9 B		0.008 ^{ns*}	0.008 ^{ns*}		0.0036 A	0.0023 B		84.7 A	73.0 B	

As médias seguidas da mesma letra indicam igualdade em cada variável analisada pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). Diferença não significativa para efeito do clones A, B, C e D (^{ns}); não significativo para efeito dos ambientes CA e CC (^{ns*}) pelo Teste F ($p < 0.05$).

3.3.3. Curvas de respostas da fotossíntese

Os modelos estatísticos para determinação da fotossíntese líquida momentânea em função da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), foram ajustados para os clones A, B, C e D nas casas de vegetação automatizada (CA) e casas de vegetação convencional, 30 dias após estaqueamento com correlação r^2 acima de 0,96 (Tabela 3.5).

Tabela 3.5. Modelos de curvas de resposta da fotossíntese em função da radiação fotossinteticamente ativa medidas no interior das casas de vegetação automatizada (CA) e casa de vegetação convencional (CC) para os clones A, B, C e D.

Ambiente	Clones	Equação	r^2
CA	A	$A = 8.0[1 - e^{0.0058(RFA-40.11)}]$	0.99
CC	A	$A = 6.18[1 - e^{0.0062(RFA-36.25.00)}]$	0.99
CA	B	$A = 8.53[1 - e^{0.0061(RFA-37.81)}]$	0.98
CC	B	$A = 7.50[1 - e^{0.0050(RFA-50.10)}]$	0.99
CA	C	$A = 8.08[1 - e^{0.0051(RFA-44.22)}]$	0.98
CC	C	$A = 5.88[1 - e^{0.0059(RFA-47.89)}]$	0.98
CA	D	$A = 7.81[1 - e^{0.0063(RFA-37.15)}]$	0.98
CC	D	$A = 4.39[1 - e^{0.0063(RFA-96.06)}]$	0.96

Os modelos de curva de resposta da fotossíntese começam a se estabilizar com RFA a partir de $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Os clones A, B e C tiveram curvas de respostas similares nas duas casas de vegetação, entretanto, para o clone D as curvas de respostas da fotossíntese foram menores na CC, sob alta incidência da irradiância solar (Figura 3.8).

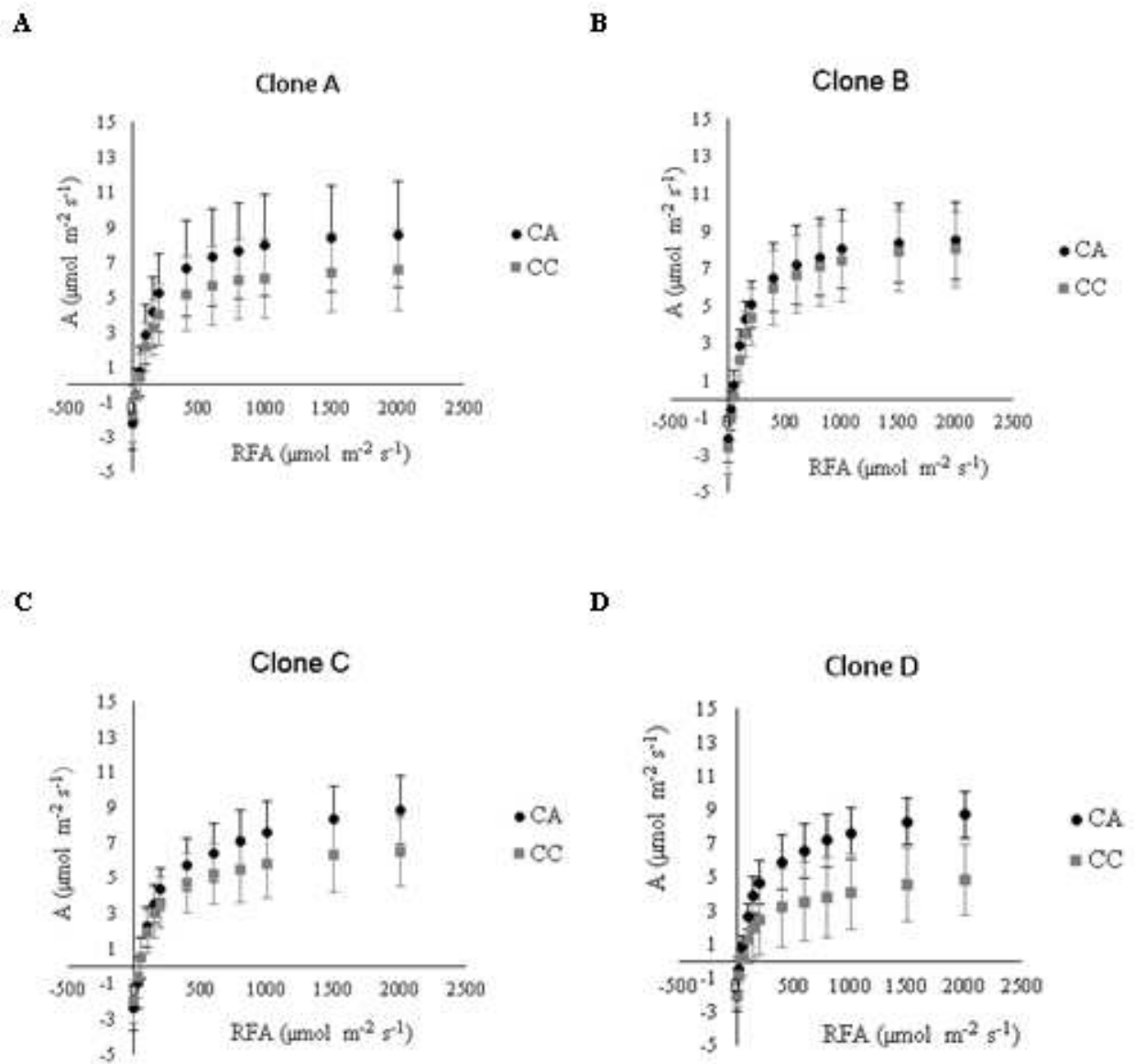


Figura 3.8. Curvas de resposta da fotossíntese em função radiação fotossinteticamente ativa (RFA), 30 dias após estaqueamento em mudas de *Eucalyptus* para os clones A, B, C e D enraizadas em casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).

Quando analisamos os parâmetros das curvas de respostas, a fotossíntese máxima (A_{max}) teve diferença significativa ($p = 0,0002$) para efeito do ambiente. Nas casas de vegetação automatizadas, em média a A_{max} foi 26 % maior que a casa de vegetação convencional. Na casa de vegetação convencional o clone D se destacou negativamente com redução de 43 % da A_{max} . O ponto de compensação de luz (PCR) e a eficiência quântica (α) não houve diferença estatística, mas houve uma tendência em maior α na CA (Tabela 3.6).

Tabela 3.6. Parâmetros de curva de luz para fotossíntese máxima (*Amax*), ponto de compensação de luz (*PCR*) e eficiência quântica (α) para híbridos superiores de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* para os clones A, B, C e D enraizadas em casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).

<i>Clones/ Ambientes</i>	<i>Amax</i> ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)			<i>PCR</i> ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)			α ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \mu\text{mol RFA m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		
	<i>CA</i>	<i>CC</i>	<i>Média</i>	<i>CA</i>	<i>CC</i>	<i>Média</i>	<i>CA</i>	<i>CC</i>	<i>Média</i>
A	8.00	6.18	7.09 ^{ns}	40.10	36.25	38.18 ^{ns}	0.056	0.051	0.053 ^{ns}
B	8.52	7.50	8.01 ^{ns}	37.8	50.10	43.95 ^{ns}	0.063	0.051	0.057 ^{ns}
C	8.08	5.88	6.98 ^{ns}	44.22	47.90	46.05 ^{ns}	0.050	0.044	0.047 ^{ns}
D	7.81	4.39	6.10 ^{ns}	37.16	96.05	66.06 ^{ns}	0.051	0.037	0.044 ^{ns}
Médias do ambiente	8.10 A	5.99 B		39.82 ^{ns*}	57.58 ^{ns*}		0.055 ^{ns*}	0.046 ^{ns*}	

As médias seguidas da mesma letra indicam igualdade em cada variável analisada pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). Diferença não significativa para efeito do clones A, B, C e D (^{ns}); não significativo para efeito dos ambientes CA e CC (^{ns*}) pelo Teste F ($p < 0.05$).

3.3.4. Medidas de Trocas gasosas e densidade estomática

Foi observado uma diferença significativa entre a casa de vegetação automatizada e convencional para a fotossíntese ($p = 0,0068$) e claramente significativa para condutância estomática ($p = 0,013$) e transpiração ($p = 0,046$) em medidas realizadas na saída da casa de sombra, 45 dias após estaqueamento.

Nas casa de vegetação automatizada a fotossíntese foi de $13,29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,47$) em média, enquanto na casa de vegetação convencional a fotossíntese foi de $10,82 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,85$) em média, tendo-se assim, uma diminuição de 18,58 % se comparada a casa de vegetação automatizada (Tabela 3.7).

A transpiração foliar foi 16,09 % maior nas miniestacas enraizadas nas casa de vegetação automatizadas com médias de $6,78 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,053$), enquanto para casa de vegetação convencional as médias foram de $5,68 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,85$). A condutância estomática média das miniestacas enraizadas na casa de vegetação automatizada foi 22,48 % maior se comparadas a casa de vegetação convencional. Em média, a condutância estomática foi de $0,467 \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,074$) na casa de vegetação automatizadas e de $0,362 \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\pm 0,0874$) na casa de vegetação convencional (Tabela 3.7).

Para a relação Ci/Ca os clones tiveram respostas diferente e houve efeito de interação entre clone e ambiente. Destaca-se aqui que o clone D teve a menor relação Ci/Ca com médias de 0,809 ($\pm 0,0419$). Nas condições de alta irradiância solar, na casa de vegetação convencional, existe um maior consumo de CO_2 interno, determinado pela baixa relação Ci/Ca de 0,780 ($\pm 0,023$) (Tabela 3.7).

A densidade estomática teve uma diferença significativa para efeito do clones ($p = 0,004$) e efeito de interação clone e ambiente ($p = 0,003$) para parte abaxial (abaixo) das folhas. Na parte adaxial (superior) das folhas, foi observada uma diferença significativa para efeito dos clone ($p = 0,00007$) e efeito de interação clone e ambiente ($p = 0,01$) (Tabela 3.7).

Destacou-se o clone D que apresentou 11 % menor densidade estomática em relação clone C e 14,5 % menor em relação ao clone B. Na parte superior das folhas a densidade estomática do clone D é três vezes menor que os clones A, B e D. O aumento da densidade estomática decorrente da maior irradiância foram observadas nos clones A e B na parte abaxial das folhas que tiveram um aumento de 18,7 % e 16,6 % na casa de vegetação convencional se comparado a casa de vegetação automatizada. Já os clones C e D não apresentaram aumento do número de estômatos na casa de vegetação convencional (Figura 3.7).

Tabela 3.7. Fotossíntese (*A*), transpiração (*E*), condutância estomática (*gs*) e relação *Ci/C* e densidade estomática (n° estômatos. mm⁻²) em mudas de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* para os clones A, B, C e D enraizadas em ambiente formado pelas casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC) e aclimatadas a casa de sombra.

Clones \ Ambiente	<i>A</i> (μmol m ⁻² s ⁻¹)			<i>E</i> (mmol m ⁻² s ⁻¹)			<i>gs</i> (mol m ⁻² s ⁻¹)			<i>Ci/Ca</i>		
	<i>CA</i>	<i>CC</i>	<i>Média</i>	<i>CA</i>	<i>CC</i>	<i>Média</i>	<i>CA</i>	<i>CC</i>	<i>Média</i>	<i>CA</i>	<i>CC</i>	<i>Média</i>
A	13.356	10.518	11.937 ^{ns}	6.952	6.157	6.554 ^{ns}	0.552	0.406	0.479 ^{ns}	0.865 a	0.858 a	0.861 a
B	12.693	10.330	11.512 ^{ns}	6.199	6.005	6.102 ^{ns}	0.377	0.413	0.395 ^{ns}	0.825 ab	0.859 a	0.841 ab
C	13.833	12.081	12.957 ^{ns}	7.043	5.966	6.505 ^{ns}	0.496	0.400	0.448 ^{ns}	0.848 a	0.831 ab	0.839 ab
D	13.115	10.337	11.512 ^{ns}	7.154	4.413	5.784 ^{ns}	0.443	0.232	0.337 ^{ns}	0.839 ab	0.780 b	0.809 b
Médias do ambiente	13.25 A	10.82 B		6.78 A	5.689 B		0.467 A	0.362 B		0.832 ^{ns*}	0.832 ^{ns*}	

Clones \ Ambiente	<i>Densidade estomática</i>			<i>Densidade estomática</i>		
	<i>abaxial</i> (n° estômatos mm ⁻²)			<i>adaxial</i> (n° estômatos mm ⁻²)		
	<i>CA</i>	<i>CC</i>	<i>Média</i>	<i>CA</i>	<i>CC</i>	<i>Média</i>
A	403 c	496 abc	450 b	27 acd	17 abcd	22 a
B	476 abc	571 a	523 a	32 a	31 a	31 a
C	537 ab	476 abc	506 ab	11 bcd	30 ad	21 a
D	460 bc	433 ab	447 b	9 bc	7 b	8 b
Médias Ambientes	469 ^{ns*}	494 ^{ns*}		19 ^{ns*}	21 ^{ns*}	

As médias seguidas da mesma letra indicam igualdade em cada variável analisada pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). Diferença não significativa para efeito do clones A, B, C e D (^{ns}); não significativo para efeito dos ambientes CA e CC (^{ns*}) pelo Teste F ($p < 0.05$).

3.3.5. Teor de pigmentos fotossintéticos e antocianinas

Observou-se uma diferença significativa para teor de clorofila *b* ($p = 0,001$) e relação clorofila *b/a* ($p = 0,000$) nas miniestacas enraizadas na casa de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional. Nestas condições, o teor de clorofila *b* foi 33,4 % maior em relação ao observado na casa de vegetação convencional (Tabela 3.8).

A clorofila *total* também teve uma diferença significativa ($p = 0,000$) nas miniestacas enraizadas na casa de vegetação automatizada, em relação a convencional com destaque para aumento de 22,9 % na clorofila *total* (Tabela 3.8).

Observou-se uma diferença altamente significativa para teor de *carotenóides* ($p = 0,011$) nas miniestacas enraizadas na casa de vegetação automatizada, sob menor irradiância solar. O teor de *carotenóide* foi 16,8 % maior na casa de vegetação automatizada (Tabela 3.8).

Já o teor de *antocianina* teve uma diferença altamente significativa para efeito do clone e efeito de interação ambiente e clone ($p = 0,000$). O clone A teve um aumento de 32,3 vezes na casa de vegetação convencional, sob maior irradiância solar e o clone B teve um aumento de 27 vezes na casa de vegetação convencional em relação a casa de vegetação automatizada. Os clones C e D não foram detectados produção de antocianinas nas folhas mesmo quando exposto a aumento de irradiância solar no interior das casas de vegetação convencional durante o enraizamento das miniestacas (Tabela 3.8).

Tabela 3.8. Teor de clorofila *a* (mg. g MF⁻¹), Clorofila *b* (mg. g MF⁻¹), carotenóide (mg.g MF⁻¹), e antocianina (ug.g MF) em massa fresca (MF) de folhas de mudas de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* para os clones A, B, C e D enraizadas em ambiente formado pelas casas de vegetação automatizada para controle da irradiância solar (CA) e casa de vegetação convencional (CC).

Clones\ Ambiente	Clorofila <i>a</i>			Clorofila <i>b</i>			Clorofila total			Clorofila <i>b/a</i>		
	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média	CA	CC	Média
A	1.459	0.951	1.205 ^{ns}	1.091	0.457	0.774 ^{ns}	2.550	1.407	1.979 ^{ns}	0.752 a	0.481 d	0.616 a
B	1.009	1.104	1.057 ^{ns}	0.736	0.570	0.653 ^{ns}	1.745	1.674	1.709 ^{ns}	0.728 ba	0.517 cd	0.622 a
C	1.380	1.474	1.427 ^{ns}	0.857	0.802	0.830 ^{ns}	2.236	2.277	2.257 ^{ns}	0.623 cb	0.524 cd	0.573 a
D	1.700	1.062	1.381 ^{ns}	0.836	0.511	0.674 ^{ns}	2.536	1.486	2.085 ^{ns}	0.493 d	0.481 d	0.487 b
Médias do ambiente	1.387 ^{ns*}	1.147 ^{ns*}		0.880 A	0.586 B		1.72 A	2.26 B		0.649 A	0.500 B	

Clones\ Ambiente	Carotenóides			Antocianinas		
	CA	CC	Média	CA	CC	Média
A	0.633	0.398	0.515 ^{ns}	8.281 c	267.78 a	138.033 a
B	0.437	0.461	0.449 ^{ns}	2.074 c	56.00 b	29.044 b
C	0.533	0.565	0.549 ^{ns}	0.000 c	0.000 c	0.00 c
D	0.625	0.425	0.525 ^{ns}	0.000 c	0.000 c	0.00 c
Médias do ambiente	0,557 A	0,463 B		2,59 A	80,96 B	

As médias seguidas da mesma letra indicam igualdade em cada variável analisada pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). Diferença não significativa para efeito do clones A, B, C e D (^{ns}); não significativo para efeito dos ambientes CA e CC (^{ns*}) pelo Teste F ($p < 0.05$).

3.4. DISCUSSÃO

As miniestacas de *Eucalyptus*, quando exposto a diferentes níveis de irradiância solar em casa de vegetação e aclimatadas em casa de sombra, possuem potencial de enraizamento adventício e respostas ecofisiológicas diferentes para aclimatar-se ao ambiente. O enraizamento adventício dos clones A e C se sobressaem aos clones B e D que possuem limitação moderada ao enraizamento. Por sua vez, os clones A e B apresentaram maior plasticidade fenotípica, a observar-se pelos maiores teores de antocianinas sob alta incidência de irradiância solar, um mecanismo de fotoproteção, enquanto o clone D, diferentemente apresentou redução das trocas gasosas.

Em termos práticos, a limitação genética ao enraizamento adventício, mesmo que moderada, diminuem o rendimento em viveiros de produção de mudas. Sabe-se que variabilidade genética observada, em relação ao potencial de enraizamento em *Eucalyptus*, aumentam tempo de enraizamento em casa de vegetação segundo Ferreira (2004). Da mesma forma, fatores ambientais como temperatura do ar (CORREA et al 2004, OLIVEIRA et al., 2012) e irradiância solar (PEDROSO, 2016) tem papel determinante no enraizamento adventício.

Assim, os clones B e D, por apresentarem limitação ao enraizamento, tem seu tempo de crescimento comprometido em relação ao clone A e C, por proverem menor quantidade de recursos como água e nutrientes ao longo de seu crescimento na casa de vegetação. Em consequência, os clones B e D ficam mais exposta a picos de irradiância solar e temperatura maiores sem que tenham estabelecido raízes, portanto, em condição de maior susceptibilidade, principalmente nos primeiros dias após estaqueamento.

De fato, na casa de vegetação convencional, a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) em 45 % dos dias de experimento esteve acima de $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com picos acima de $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Os modelos de curva de resposta da fotossíntese ajustados começam a se estabilizar a partir de $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, faixa onde o aumento da fotossíntese em respostas a RFA são menores semelhantes ao resultados observados por Carvalho (2015). Assim, os clones A, B e C tiveram curvas de respostas similares nas duas casas de vegetação, entretanto para o clone D, a fotossíntese máxima foi 73 % menor do que aquela observada nos demais clones na casa de vegetação convencional, sob alta irradiância solar.

Os níveis de irradiância solar maiores aumentaram o teor de antocianinas em 32,3 e 27 vezes nos clones A e B, respectivamente no interior da casa de vegetação convencional. O aumento dos teores de antocianinas em miniestacas de *Eucalyptus* em respostas ao aumento da

irradiância solar foi observado por Pedroso (2016). Sabe-se que as antocianinas são pigmentos que reduzem o efeitos nocivos do excesso de fótons no aparato fotossintético (AGATI; TATTINI, 2010). Por sua vez, a capacidade de produção de antocianinas, mediante estresse luminoso, é uma característica que favorece o processo de aclimatação a casa de sombra e pleno sol, o que foi claramente evidenciado nos clone A e B que apresentaram uma maior capacidade de aclimatação de mudas, concomitante à maior produção de antocianinas.

Além disso, os clones A e B possuem densidade estomática alta na parte adaxial (superior) das folhas característica que diminui a resistência a entrada de CO₂ na célula (MOTT et al., 1982; MOTT; MICHAELSON 1991) e propicia melhor adaptação à condição de elevada irradiância solar e restrição hídrica (LI; WANG, 2003; MATHUR, et al., 2018). De fato, os clones A e B apresentaram maior concentração de CO₂ na câmara sub estomática se comparado ao clone D, cujo mecanismos de dissipação do excesso de energia solar, consistiu na redução das trocas gasosas.

O clone D teve redução significativa da condutância estomática, transpiração e fotossíntese na casa de vegetação convencional. O excesso de irradiância solar promoveu aumento de temperatura do ar e, por consequência, aumento de 19,1 % no déficit de pressão de vapor, condição que aumenta o fluxo transpiracional e promove o fechamento estomático. A diminuição da transpiração foliar reduz a desidratação das folhas e limitam a perda de água em estacas, mas em contrapartida, reduzem a entrada de CO₂, até o sitio de carboxilação da rubisco (HARTMANN et al., 2011, ARAUJO et al., 2017), diminuindo a fotossíntese líquida (WALKER et al., 2016).

Já na casa de vegetação automatizada, sob menor irradiância solar, as minestacas se aclimataram para aumentar a eficiência do uso da irradiância solar. Houve um aumento significativo de 22,9 % no teor de *clorofila b* concomitante a maior expansão do limbo foliar resultando em aumento de 26 % na fotossíntese máxima. Sabe-se que as *clorofilas b* permitiram ampliar o espectro de absorção da radiação fotossinteticamente ativa pois absorvem em um comprimento de onda diferente da *clorofila a*, (BOARDMAN, 1977; MATHUR, et al., 2018), ao passo que, a expansão da área foliar permite maior interceptação da energia solar (BOARDMAN, 1977, MATHUR, et al., 2018).

Na casa de vegetação automatizada os ganho de matéria seca em raiz, caule e folhas foram iguais a casa de vegetação convencional, com apenas 40 % da irradiância solar incidente. Ainda assim, a radiação fotossinteticamente ativa observada na casa de vegetação automatizada esteve quatro vezes acima do ponto de compensação luminoso e abaixo do ponto de saturação

luminoso, ou seja, com fotossíntese líquida positiva e menos estresse luminoso (BOARDMAN, 1977). De fato, neste ambiente não observamos aumento no teor de antocianinas, um indicador de níveis elevados de irradiância solar no interior de casas de vegetação na etapa de enraizamento, de acordo com Pedroso (2016).

Por sua vez, os altos teores de antocianina não limitaram o enraizamento adventício como observado no clone A que teve enraizamento acima de 95 % nas duas casas de vegetação. Em contraste, estudos sugerem que os flavonóides, entre eles as antocianinas, podem afetar o enraizamento adventício, por influenciar o transporte basipeto de auxina (TATTINI et al., 2014), hormônio fundamental para o enraizamento adventícios (HARTMANN et al., 2011). Já Almeida (2017) indicam papel dual dos flavonóides no enraizamento adventício, inibindo o transporte auxina, mas reduzindo a oxidação na base das miniestacas.

Em adição, hipotizamos que os mecanismos baseados no aumento de antocianinas, podem favorecer a absorção e assimilação de carbono. Além de atuar como mecanismo de fotoproteção, as antocianinas são associados à distribuição de carboidratos na relação fonte dreno (LANDI et al., 2018), mecanismo de abertura estomáticos, pela redução de espécies de oxigênio reativo em células guardas e maior abertura dos estômatos (WALTKINS et al., 2017), mecanismo necessário para manter a entrada de CO₂ utilizado na fixação de cadeias de carboidratos (HARTMANN et al., 2011).

Sabe-se que o excesso de irradiância solar, pode limitar o crescimento de plantas pela redução da assimilação do CO₂ em cadeias de carbono no ciclo de Calvin em função do aumento de processos como a fotorrespiração e produção de espécies de oxigênios reativos (WALKER et al., 2016; POSPÍŠIL, 2016; PETERHANSEL et al., 2010). Por sua vez, as plantas possuem respostas aclimativas e adaptativas a mudanças nos níveis de irradiância solar e temperatura do ar conferindo maior plasticidade fenotípicas à alterações do ambiente.

Neste sentido, o clone A sem limitação ao enraizamento adventício e com mecanismo de fotoproteção se destacou nos dois ambientes, ao passo que o clone D com maior a limitação ao enraizamento adventício e sem mecanismo de fotoproteção, no que diz respeito a aumento do teor de antocianina, se desenvolveu melhor sob baixa irradiância solar. Por sua vez, os clones B e C, com limitação de enraizamento e com menor plasticidade fenotípica, respectivamente, tiveram melhor desempenho sob baixa irradiância solar, na casa de vegetação automatizada.

Em termos práticos, no que tange o manejo de diferentes materiais genéticos nos viveiros de produção, conhecer as principais respostas ecofisiológicas dos genótipos em condição estressantes de irradiância solar, permitem um manejo mais adequado a seu potencial

produtivo. Estas informações podem ser integradas como parâmetros que definem intervalos para acionamentos de malhas de atenuação da irradiância solar, sistemas de irrigação e resfriamento afim de otimizar os processos de produção de mudas.

A automação inteligente baseada no controle ativo dos elementos meteorológicos e respostas ecofisiológicas das mudas de *Eucalyptus*, podem proporcionar ganhos de qualidade e produtividades nos viveiros de produção de mudas, na medida que permitem um ajuste melhor das condições operacionais de manejo da ambiência no interior das casas de vegetação e podem aumentar sua eficiência de produção.

3.5. CONCLUSÕES

- ✓ Os materiais genéticos possuem diferentes mecanismos de adaptação e aclimação a elevados níveis de irradiância solar durante as etapas de enraizamento de miniestacas em casa de vegetação. Os genótipos com maior plasticidade fenotípica, a observar-se pelos clones A e B apresentaram aumento do teor de antocianinas, um mecanismo de fotoproteção, ao passo que o clone D, teve redução de trocas gasosas.
- ✓ No geral, clones com mecanismos de fotoproteção, no que diz respeito ao aumento da produção de antocianinas, e com facilidade de enraizamento, tiveram melhor desempenho do que clones sem mecanismos de fotoproteção e com limitação ao enraizamento que desenvolveram-se melhor na casa de vegetação automatizada, sob menor incidência da irradiância solar durante o enraizamento adventício.

3.6. REFERÊNCIAS

ALFENAS, A. C.; ZAUZA E. A. V.; MAFIA, G. R.; ASSIS T. F. Clonagem e Doenças do *Eucalyptus*. Editora UFV 2ª edição, Viçosa, MG, p. 53, 2004.

ALMEIDA, M. R.; AUMOND, M. J.; COSTA, C. T.; SCHWAMBACH, J.; RUEDEL C. M.; CORREA, L. R.; FETT-NETO A. G. Environmental control of adventitious rooting in *Eucalyptus* and *Populus* cuttings. *Trees*, v. 31, p. 1377-1390, 2017.

ARAÚJO, W.J.; FERNIE, A.R.; NUNES-NESI, A. control of stomatal aperture A renaissance of the old guard, *Plant Signaling & Behavior*, v.9, p.1305-1311, 2017.

ASSIS, T. F. Hybrids and mini-cutting: a powerful combination that has revolutionized the *Eucalyptus* clonal forestry. BMC proceedings, p. 118, 2015.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Sparovek G Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorol v.22, p.711-728, 2013.

BOARDMAN, N.K. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. Plant Physiology, v.28, p.355-377, 1977.

BORÉM; FRITSCHÉ-NETO Melhoramento de plantas para condição de estresse abiótico. Editora: edição Independente, p. 250, 2011.

CARVALHO, A.P.V. Produtividade de minicepas de *Eucalyptus* sob aplicação de CO₂ via água de irrigação, Tese de doutorado apresentada a Universidade Federal de viçosa.v1, p.331, 2015. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7284>.

CORREA, L. R.; FETT-NETO, A. G. Effects of temperature on adventitious root development in microcutting of *Eucalyptus Saligna Smith* and *Eucalyptus globulus Labil*. Journal of Thermal Biology, v. 29, p. 315 - 324, 2004.

FETT-NETO, A. G.; FETT, J. P.; GOULART, G. P.; TEMIGNONI, R. R.; FERREIRA, A. G.; Distinct effects of auxin and lighth on adventitious root development in *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus globulus*. Tree physiology, Victoria, Canada, v. 21, p. 457- 464, 2001.

FERREIRA, E. M.; ALFENAS, A.C., MAFIA, R.G.; LEITE, H.G., SARTORIO, R.C. PENCHEL, R.G.F. Determinação do tempo ótimo de enraizamento de miniestacas de clones de *Eucalyptus spp*. Revista Arvore, Viçosa - MG, v.28, p.183-187, 2004.

GUISELINI, C.; SENTELHA, P.C.; OLIVEIRA, R.C.; PRELA, A. Uso de malhas de sombreamento em ambiente protegido III: efeito sobre o crescimento e a produção comercial da *Gerbera jamesonii*. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 12, p. 27-34, 2004.

HARTMANN, H. T. Plant propagation: principles and practices. 7^a ed., New Jersey: Prentice-Hall, p. 880, 2011.

IBÁ. Relatório 2020, Indústria brasileira de árvores. disponível em: <https://iba.org/>, Acesso: 21/11/2020.

LANDI, M.; TATTINI, M.; GOULD, K.S. Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions. *Environmental and Experimental Botany*, v.119, p.4-17, 2015.

MATHUR, S.; JAIN, S.; JAJOO A.; Photosynthetic efficiency in sun and shade plants. *Photosynthetica*, v. 56, p.354-365, 2018.

MOTT, K.A.; GIBSON, A.C.; O'LEARY, J.W. The adaptative significance of amphistomatous leaves. *Plant, Cell and Environment*, v.5, p. 455- 460, 1982.

MOTT, K.A.; MICHAELSON, O. Amphistomy as an adaptation to high light-intensity in *Ambrosia cordifolia* (Compositae). *American Journal of Botany*, v.78, p.76-79, 1991.

NIYOGI, K.K., TRUONG, T.B. Evolution of flexible non-photochemical quenching mechanisms that regulate light harvesting in oxygenic photosynthesis. *Plant Biology*, v. 16, p.307-314, 2013.

OLIVEIRA, A.S.; NETO, A.S.; RIBEIRO, A.; RASCON, N.L.; RODY, P.; ALEMIDA, A.Q. Determinação do tempo térmico para desenvolvimento de mudas de *Eucalyptus* na fase de enraizamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.16, p. 1223 - 1228, 2012.

PEDROSO, E. J. Enraizamento de miniminiestacas e ecofisiologia de mudas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* submetidas a diferentes intensidade de irradiância solar. Disponível em: <http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/tese-elias-josé-pedroso.pdf>.

PEER, W. A.; MURPHY, A. S. Flavonóids and auxin transport: modulators or regulators? *Trends in plant Science*, Lafayette, v. 12, p. 12, 2008.

PETERHANSEL, A.C.; INA HORST, A.I.; NIESSEN, A.M.; BLUME, A.C.; KEBEISH, A.R.; KÜRKCÜOĞLU, A.S.; KREUZALERB, F. Photorespiration, *American Society of Plant Biologists*, p. 2-24, 2010.

POSPÍŠIL, P. Production of Reactive Oxygen Species by Photosystem II as a Response to Light and Temperature Stress. *Front. Plant Sci*, v. 7, p.1950, 2016.

RUEDELL, C.M.; ALMEIDA, M.R.; SCHWAMBACH, J.; POSENATO, C.F.; FETT-NETO, A.G. Pre and post-severance effects of light quality on carbohydrate dynamics and microcutting

adventitious rooting of two *Eucalyptus* species of contrasting recalcitrance Plant Growth Regul , v. 69, p. 235-245, 2013.

RUEDELL, C.M.; ALMEIDA, M.R; FETT-NETO, A.G. Concerted transcription of auxin and carbohydrate homeostasis-related genes underlies improved adventitious rooting of microcuttings derived from far – red treated *Eucalyptus globulus* Labill mother plants. Plant physiology and Biochemistry, v.97, 11-19, 2015.

TATTINE, M.; LANDI , M.; BRUNETTI, C.; GIORDANO, C; REMORINI, D.; GOULD, K.S; GUIDI, L. Epidermal coumaroyl anthocyanins protect sweet basil against excess light stress: multiple consequences of light attenuation. Physiologia Plantarum, v.152, p.585-598, 2014.

WALKER, B.J.; VANLOOKE, Y.; BERNACCHI, C.J.; ORT, D.R.; The Costs of Photorespiration to Food Production Now and in the Future. Annu. Rev. Plant Biol., v. 67, p.107–29, 2016.

WATKINS, J.M.; CHAPMAN, J.M.; MUDAY. G.K. Abscisic Acid-Induced Reactive Oxygen Species Are Modulated by Flavonols to Control Stomata Aperture. Plant Physiology, v.175, p.1807–1825, 2017.

WELLBURN, A.R. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. J. Plant Physiology, v.44, p.307-313,1964

XAVIER, A.; WENDLING, I.; SILVA, R.J. Silvicultura clonal: princípios e técnicas. Editora UFV. Viçosa - MG, 2013.

3.7. CONCLUSÃO GERAL

A casa de vegetação automatizada para controle dos níveis de irradiância solar melhorou as condições de ambiência no interior das casas de vegetação principalmente em condições de verão onde temos maiores picos de irradiância solar e de temperaturas mais altas. No verão, observamos um aumento de 11 % no enraizamento adventícios de miniestacas de *Eucalyptus* na casa de vegetação automatizada. Porém no inverno, o principal fator limitante foram as baixas temperatura do ar e maior amplitude térmica que não oferecem condições adequadas para o enraizamento adventício.

Destacam-se os clones com mecanismos de fotoproteção (aumento da produção de antocianinas) e sem limitação de enraizamento, a observar-se pelo clone A, que teve bom desempenho de enraizamento e desenvolvimento na casa de vegetação automatizada e casa de vegetação convencional sob alta incidência de irradiância solar. Já o clone D, sem mecanismos de fotoproteção e com limitação ao enraizamento, desenvolveu-se melhor na casa de vegetação automatizada, sob menor incidência da irradiância solar durante o enraizamento adventício.

Os materiais genéticos possuem formas diferentes para adaptar-se e ajustar-se aos níveis de irradiância solar, em destaque a produção de antocianinas para fotoproteção, presença de estômatos na parte adaxial das folhas e regulação das trocas gasosas. Ainda, decifrar os mecanismos ecofisiológicos, no que tange o nível de saturação da fotossíntese, ponto de compensação luminosos, fotossíntese máxima e eficiência quântica são parâmetros importantes para otimizar a automação ativa de sistemas de controle da irradiância solar, visando proporcionar ganhos de produtividade em viveiros de produção de mudas.

Ademais, ficou demonstrado que o grande potencial de uso de ferramentas de CFD para estudo de ambiência de casas de vegetação. Como o descrito, o CFD tem potencial para simular diversos cenários para estimar o efeito de temperaturas do ar, velocidade do vento e pressão do ar em projetos visando otimizar uso de exaustores para retirada de ar, abertura e fechamento de janelas zenitais, posição de saídas e entradas do ar em casa de vegetação.

Nos últimos anos o processo de automação é consideravelmente mais acessível com surgimento de diversas tecnologias como controladores mais baratos e eficientes no mercado. Desta forma, é possível ajustar o ambiente de produção de acordo com as características ecofisiológicas das plantas permitindo um aumento da eficiência de produção das mudas gerando um valor econômico e ambiental pela gestão racional e inteligente dos fatores de produção.