

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**PACLOBUTRAZOL EM MUDAS DE *Eucalyptus urophylla* E
INDUÇÃO DE MECANISMOS DE RESISTÊNCIA À RESTRIÇÃO
HÍDRICA**

ALINE AMORIM DA SILVA

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
ABRIL – 2025

ALINE AMORIM DA SILVA

**PACLOBUTRAZOL EM MUDAS DE *Eucalyptus urophylla* E
INDUÇÃO DE MECANISMOS DE RESISTÊNCIA À RESTRIÇÃO
HÍDRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo e Produção Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora: D. Sc. Sylvana Naomi Matsumoto (UESB)

VITÓRIA DA CONQUISTA

BAHIA – BRASIL

ABRIL – 2025


Aline Amorim da Silva

**PACLOBUTRAZOL EM MUDAS DE *Eucalyptus urophylla* E
INDUÇÃO DE MECANISMOS DE RESISTÊNCIA À RESTRIÇÃO
HÍDRICA**


Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 28 de abril de 2025.


Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ELIZABETH ORIKA ONO**
Data: 03/05/2025 17:18:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Elizabeth Orika Ono (D.Sc. Ciências Biológicas) – UNESP

Documento assinado digitalmente
 **JOILSON SILVA FERREIRA**
Data: 07/05/2025 08:00:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Joilson Silva Ferreira (D.Sc. Ciências do Solo) – UESB

Documento assinado digitalmente
 **SYLVANA NAOMI MATSUMOTO**
Data: 02/05/2025 14:18:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Sylvana Naomi Matsumoto (D.Sc. Fisiologia Vegetal) - UESB, orientadora

S578p

Silva, Aline Amorim da.

Paclobutrazol em mudas de *Eucalyptus urophylla* e indução de mecanismos de resistência à restrição hídrica. / Aline Amorim da Silva, 2025.

76f. : il. color.

Orientador(a): Dr.^a Sylvana Naomi Matsumoto.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Vitória da Conquista, 2025.

Inclui referências F. 62 - 76

1. *Eucalyptus urophylla*. 2. Estresse hídrico. 3. Paclobutrazol. 4. Anatomia e fisiologia vegetal. 5. Silvicultura. I. Matsumoto, Sylvana Naomi. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. III. T.

CDD 634.99

Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134

UESB – Campus Vitória da Conquista - BA

À minha mãe, Heloisa Maria Amorim da Silva, ao meu pai, Arlindo Alfredo da Silva, à minha irmã, Helen Amorim da Silva, e ao meu tio, Ivan Amorim da Silva, pelo grande apoio, incentivo, cuidado e carinho.

Ao meu amigo Nattan Ádler Tavares dos Santos, pela escuta, pelo apoio e respeito.

Dedico.

“Para a vida necessário é: coragem, paciência e persistência.”

Autor(a) desconhecido(a)

AGRADECIMENTOS

A Deus e a toda espiritualidade de luz, por me guiarem e ampararem em todos os momentos da minha vida. Pela força, coragem e serenidade concedidas diante dos desafios, e por aquietarem meu coração nas horas de incerteza.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), por proporcionar não apenas a estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho, mas também um ambiente fértil para o crescimento acadêmico e pessoal.

À minha família e aos amigos próximos, pelo amor incondicional, apoio constante, palavras de encorajamento e por serem minha base firme nos momentos difíceis. A cada um de vocês, minha eterna gratidão por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei.

À minha orientadora, Sylvana Naomi Matsumoto, por todo acolhimento, paciência, dedicação, incentivo e confiança ao longo dessa caminhada. À minha coorientadora, Delmira da Costa Silva, pelo apoio e contribuições valiosas durante a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCIFLOR), pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos, pelo suporte ao longo do curso e por contribuir diretamente para a concretização deste sonho.

Aos colegas de mestrado, que dividiram comigo os aprendizados, desafios e conquistas dessa trajetória, especialmente às queridas amigas Gabriela de Oliveira, Alda Nhantumbo, Neide Ribeiro e Alexandra Damasceno, que estiveram presentes com amizade, companheirismo e incentivo incondicional.

Aos colegas e amigos dos laboratórios de Fisiologia Vegetal, pelo acolhimento, troca de experiências e colaboração na execução desta pesquisa. Em especial, a Raul Antônio, Luís Vicente, Aline Novais e Virgiane Silva, por toda ajuda, carinho e parceria.

Aos estagiários do CETEP, que participaram com entusiasmo, disposição e muita boa vontade nas atividades do experimento, colaborando com carinho em cada etapa. Ao pessoal do campo e do Viveiro de Mudas, pelo empenho, dedicação e apoio constantes durante as atividades práticas e a coleta de dados — o trabalho de vocês fez toda a diferença nessa caminhada.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para que eu chegasse até aqui, o meu mais sincero e profundo agradecimento.

RESUMO

SILVA, Aline Amorim da, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, abril de 2025. **PACLOBUTRAZOL EM MUDAS DE *Eucalyptus urophylla* E INDUÇÃO DE MECANISMOS DE RESISTÊNCIA À RESTRIÇÃO HÍDRICA**. Orientadora: Sylvana Naomi Matsumoto.

Objetivou-se investigar se o manejo de mudas com o regulador vegetal Paclobutrazol (PBZ) pode otimizar os mecanismos de sobrevivência à seca em plantas da espécie *Eucalyptus urophylla*, em condição pós-transplante com restrição hídrica. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, com aplicação radicular de cinco concentrações de PBZ (0, 20, 40, 60 e 80 mg L⁻¹) em mudas clonais (AEC 144), submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica (40% e 90% da capacidade de vaso). Foram avaliadas variáveis morfológicas, fisiológicas, metabólicas e anatômicas ao longo de 90 dias. Os resultados indicaram que o PBZ modulou o crescimento vegetativo, reduzindo altura e área foliar, mas favorecendo a alocação de biomassa radicular e o acúmulo de açúcares redutores, especialmente sob déficit hídrico. A manutenção do teor relativo de água e o aumento da densidade e espessura de tecidos xilemáticos evidenciaram maior segurança hidráulica nas plantas tratadas. Em condições de 90% de disponibilidade hídrica, concentrações intermediárias de PBZ potencializaram a assimilação de carbono e eficiência do uso da água. Conclui-se que o PBZ, em concentrações adequadas, atua como modulador da plasticidade morfofisiológica e anatômica, promovendo respostas adaptativas. A estratégia demonstra viabilidade para uso silvicultural em ambientes com disponibilidade hídrica.

Palavras-chave: *Eucalyptus urophylla*; estresse hídrico; Paclobutrazol; anatomia e fisiologia vegetal; silvicultura.

ABSTRACT

SILVA, Aline Amorim da, M.Sc., State University of Southwest Bahia, April 2025. **PACLOBUTRAZOL IN *Eucalyptus urophylla* SEEDLINGS AND THE INDUCTION OF RESISTANCE MECHANISMS TO WATER STRESS.** Advisor: Sylvana Naomi Matsumoto.

This study aimed to investigate whether the application of the plant growth regulator Paclobutrazol (PBZ) can optimize drought survival mechanisms in *Eucalyptus urophylla* seedlings under post-transplant conditions with water restriction. The experiment was conducted in a greenhouse at the State University of Southwest Bahia, using root application of five PBZ concentrations (0, 20, 40, 60, and 80 mg L⁻¹) in clonal seedlings (AEC 144), subjected to two water availability levels (40% and 90% of pot capacity). Morphological, physiological, metabolic, and anatomical variables were assessed over 90 days. Results indicated that PBZ modulated vegetative growth by reducing plant height and leaf area, while promoting root biomass allocation and the accumulation of reducing sugars, especially under water deficit. The maintenance of relative water content and the increase in xylem tissue density and thickness indicated greater hydraulic safety in treated plants. Under 90% water availability, intermediate PBZ concentrations enhanced carbon assimilation and water use efficiency. It is concluded that PBZ, at appropriate concentrations, acts as a modulator of morphophysiological and anatomical plasticity, promoting adaptive responses. The strategy demonstrates feasibility for silvicultural use in environments with adequate water availability.

Keywords: *Eucalyptus urophylla*; water stress; Paclobutrazol; plant anatomy and physiology; silviculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do experimento conduzido na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), campus de Vitória da Conquista – BA.....	23
Figura 2 – Croqui esquemático da disposição das unidades experimentais no delineamento adotado.....	25
Figura 3 – Comprimento da haste principal (HP, cm) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144), obtido a partir da aplicação radicular de Paclobutrazol (PBZ), e submetidas na fase pós-transplântio a diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%), avaliadas aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.....	33
Figura 4 – Diâmetro do caule (DIA, mm) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144), tratadas com diferentes concentrações de PBZ aplicadas ao sistema radicular e submetidas na fase pós-transplântio a CAV de 40% e 90%, com avaliações aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.....	35
Figura 5 – Número de folhas (NF) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144), sob diferentes concentrações de PBZ aplicadas no sistema radicular e submetidas à CAV de 40% e 90%, avaliadas aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.....	36
Figura 6 – Número de ramos (NR) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) tratadas com PBZ no sistema radicular e cultivadas sob CAV de 40% e 90%, com avaliações aos 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.....	37
Figura 7 – Área foliar total (AFT, cm ²) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) tratadas com PBZ via drench, submetidas na fase pós-transplântio a diferentes capacidades de vaso (40% e 90%).....	39
Figura 8 – Volume radicular (VOLR, mL) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) sob aplicação radicular de PBZ e expostas na fase pós-transplântio a CAV de 40% e 90%.....	40
Figura 9 – Massa fresca (MFR, g) e massa seca da raiz (MSR, g) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144), obtidas sob aplicação radicular de PBZ e submetidas na fase pós-transplântio a condições diferenciadas de capacidade de vaso (40% e 90%).....	40

Figura 10 – Massa fresca (MFF, g) e massa seca das folhas (MSF, g) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144), em razão das concentrações de PBZ aplicadas ao sistema radicular e das condições de CAV (40% e 90%) na fase pós-transplântio....	41
Figura 11 – Massa fresca (MFC, g) e massa seca do caule (MSC, g) em razão das concentrações de PBZ aplicadas no sistema radicular de mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144), submetidas na fase pós-transplântio a condição de 40% e 90% de capacidade de vaso.....	42
Figura 12 – Massa fresca total (MFT, g) e massa seca total (MST, g) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) sob aplicação radicular de PBZ e cultivo em vasos com 40% e 90% de capacidade de vaso.....	43
Figura 13 – Índice SPAD ao longo do tempo (0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144), submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%).....	45
Figura 14 – Potencial hídrico foliar (Ψ_w) às 5h, 12h e a diferença ($\Delta\Psi_w$) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (clone AEC 144), provenientes de aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e avaliadas aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%).....	46
Figura 15 – Teor relativo de água (TRA) das folhas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144), avaliado aos 90 dias após o início do manejo hídrico, em razão da aplicação radicular de PBZ e das capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%).....	48
Figura 16 – Trocas gasosas em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) sob aplicação de PBZ e condições diferenciadas de CAV (40% e 90%): A) condutância estomática (G_s), B) taxa de fotossíntese (A), C) eficiência de carboxilação (A/C_i) e D) concentração interna de CO_2 (C_i).....	49
Figura 17 – Temperatura foliar (T_{leaf} , °C) aos 90 dias após o início do manejo hídrico (CAV de 40% e 90%) em mudas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) submetidas à aplicação radicular de PBZ.....	51
Figura 18 – Teores de açúcares redutores (AR) nas folhas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) submetidas à aplicação de PBZ e cultivadas sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%).....	52

Figura 19 – Teores de açúcares solúveis totais (AST) nas folhas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) em razão das concentrações de PBZ e das condições de disponibilidade hídrica (CAV: 40% e 90%).....	52
Figura 20 – Teores de amido nas folhas de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) em razão das concentrações de PBZ e da CAV (40% e 90%), aos 90 dias após o início do manejo hídrico.....	53
Figura 21 – Variação das variáveis anatômicas do caule (DIAV, ESPX, FAIC e DENV) em <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) tratados com PBZ via radicular e cultivados sob CAV de 40% e 90%.....	55
Figura 22 – Imagens histológicas do xilema do caule de <i>Eucalyptus urophylla</i> (clone AEC 144), aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, obtidas a partir de mudas submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%). Tratamentos: A) Testemunha 40%; B) 40 mg L ⁻¹ 40%; C) 80 mg L ⁻¹ 40%; D) Testemunha 90%; E) 40 mg L ⁻¹ 90%; F) 80 mg L ⁻¹ 90%. Tamanho das imagens: 200 µm.....	55
Figura 23 – Variação das variáveis anatômicas das raízes (DIAV, ESPX, FAIC e DENV) de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) sob aplicação de PBZ e condições de CAV de 40% e 90%.....	57
Figura 24 – Imagens histológicas do xilema das raízes de <i>Eucalyptus urophylla</i> (clone AEC 144), aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, obtidas a partir de mudas submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%). Tratamentos: A) Testemunha 40%; B) 40 mg L ⁻¹ 40%; C) 80 mg L ⁻¹ 40%; D) Testemunha 90%; E) 40 mg L ⁻¹ 90%; F) 80 mg L ⁻¹ 90%. Tamanho das imagens: 500 µm.....	57
Figura 25 – Espessura do tecido floemático (ESPF, µm) nas raízes de <i>Eucalyptus urophylla</i> (AEC 144) submetidas à aplicação de PBZ e a diferentes CAV (40% e 90%).....	59
Figura 26 – Imagens histológicas do floema das raízes de <i>Eucalyptus urophylla</i> (clone AEC 144), aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, obtidas a partir de mudas submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob condição de 90% de capacidade de vaso (CAV). Tratamentos: A) Testemunha 90%; B) 80 mg L ⁻¹ 90%. Tamanho das imagens: 200 µm.....	59

- Figura 27** – Conteúdo relativo de água (%) em *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) sob diferentes concentrações de PBZ e regimes hídricos (CAV: 40% e 90%)..... 59
- Figura 28** – Imagens histológicas de fibras gelatinosas no caule de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC 144), aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, obtidas a partir de mudas submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob condição de 90% de capacidade de vaso (CAV). Tratamentos: A) Testemunha 90%; B) 80 mg L⁻¹ 90%. Tamanho das imagens: 200 µm..... 60

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Resumo da análise de variância das variáveis morfológicas (HP, DIA, NF e NR) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC 144), obtidas a partir de aplicação radicular de PBZ e submetidas na fase pós-transplântio a CAV de 40% e 90%, com avaliações aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos..... 32
- Tabela 2** – Resumo da análise de variância das variáveis biométricas relacionadas à biomassa (AFT, MFR, MSR, VOLR, MFF, MSF, MFC, MSC, MFT e MST) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), tratadas com PBZ via radicular e cultivadas sob CAV de 40% e 90%..... 38
- Tabela 3** – Resumo da análise de variância do índice SPAD em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) tratadas com PBZ no sistema radicular, submetidas a condições de CAV de 40% e 90%, com avaliações aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos..... 44
- Tabela 4** – Resumo da análise de variância dos parâmetros fisiológicos (TRA, Ψ_{w5h} , Ψ_{w12h} , $\Delta\Psi_w$) e metabólitos (AR, AST, amido) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), aos 90 dias após o início do manejo hídrico, em razão da aplicação radicular de PBZ e das condições de CAV (40% e 90%)..... 44
- Tabela 5** – Resumo da análise de variância das variáveis de trocas gasosas foliares (*Tleaf*: temperatura foliar; *Ci*: concentração interna de CO₂; *E*: taxa de transpiração; *Gs*: condutância estomática ao vapor d'água; *A*: taxa de assimilação líquida de CO₂; *A/E*: eficiência instantânea do uso da água; *A/Ci*: eficiência de carboxilação em *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), obtidas a partir de mudas submetidas à drenching das raízes em diferentes concentrações de Paclobutrazol (PBZ), submetidas na fase pós-transplântio à condições diferenciadas de capacidade de vaso (CAV: 40% e 90%) e da interação entre os fatores..... 49
- Tabela 6** – Resumo da análise de variância das variáveis anatômicas do caule e raiz (DIAV, ESPX, FAIC, DENV e ESPF – apenas raízes) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), aos 90 dias após o início do manejo hídrico (CAV: 40% e 90%), sob aplicação radicular de PBZ..... 53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1. Crise hídrica e as mudanças climáticas.....	17
2.2. Aspectos hidráulicos da tolerância à seca.....	18
2.3. O gênero <i>Eucalyptus</i>.....	19
2.4. Reguladores vegetais: o Paclobutrazol (PBZ).....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Descrição geral e localização do experimento.....	23
3.2. Seleção das amostras.....	24
3.3. Preparo das soluções de PBZ, procedimentos de aplicação e delineamento experimental.....	24
3.4. Determinação dos regimes de disponibilidade hídrica.....	25
3.5. Avaliação morfológica e fisiológica.....	26
3.6. Quantificação de amido, açúcares solúveis totais e redutores.....	29
3.7. Análises anatômicas.....	30
3.8. Análises estatísticas.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas afeta os recursos hídricos globais, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. O aumento da temperatura média e a alteração nos padrões de precipitação estão relacionados com a elevação da frequência e severidade de eventos extremos, como secas prolongadas, reduzindo a disponibilidade de água para usos agrícolas e florestais (KUO et al., 2015; ALLAN et al., 2020). Esses fatores representam um desafio crescente para a sustentabilidade da produção florestal, que depende diretamente da regularidade hídrica para garantir o crescimento e a produtividade das espécies cultivadas (HAGHIGHI et al., 2020).

As espécies do gênero *Eucalyptus* têm ampla adaptabilidade nas florestas plantadas do Brasil, apresentando rápido crescimento e importância econômica, ocupando cerca de 9,93 milhões de hectares em diversos locais do território nacional (IBÁ, 2022). Entretanto, a produtividade desses plantios está intrinsecamente ligada ao suprimento hídrico adequado (FAVREAU et al., 2019), sendo, portanto, vulnerável aos efeitos das alterações climáticas. Diante desse cenário, torna-se necessário adotar estratégias de manejo que elevem a resistência das espécies ao estresse hídrico, assegurando o rendimento mesmo sob condições climáticas adversas.

Entre as espécies utilizadas comercialmente, *Eucalyptus urophylla* destaca-se por sua elevada plasticidade ecológica, vigor e resistência a doenças, sendo amplamente empregada em programas de melhoramento genético e em plantios clonais em diferentes regiões brasileiras (CUNHA et al., 2023; MARQUES et al., 2023). Características anatômicas e fisiológicas favoráveis à condução de água e à manutenção da integridade hídrica sob estresse desta espécie, favorece a adaptação à escassez hídrica.

Entre as alternativas para mitigar os efeitos da seca em sistemas florestais está o uso de reguladores vegetais vegetal, como o Paclobutrazol (PBZ), um composto do grupo dos triazóis. O PBZ inibe a biossíntese de giberelinas, reduzindo o crescimento vegetativo e induzindo a alterações metabólicas que favorecem a sobrevivência das plantas sob déficit hídrico, direcionando fotoassimilados da parte aérea para o sistema radicular, resultando em maior eficiência no uso da água e redução da área foliar e da taxa de transpiração (GAZOLA et al., 2019; THOMAS e HEDDEN, 2018; XU et al., 2020).

O PBZ contribui para o aumento da resistência das plantas a estresses abióticos, alterando aspectos anatômicos e fisiológicos relacionados à condução e ao armazenamento de água, além de potencializar mecanismos de resistência à seca, como o acúmulo de carboidratos não estruturais e a manutenção da integridade hidráulica do xilema (MAGUIRE e KOBE, 2015; ZANATTO, 2022). Esses mecanismos são particularmente relevantes para *Eucalyptus spp.*, cuja anatomia da madeira – com vasos solitários, traqueídes vasicêntricas e fibrotraqueídes – influencia diretamente sua eficiência hidráulica e capacidade de adaptação ao estresse hídrico (BAROTTO et al., 2016).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo investigar se o manejo de mudas com o regulador vegetal Paclobutrazol (PBZ) pode otimizar os mecanismos de sobrevivência à seca em plantas da espécie *Eucalyptus urophylla*, em condição pós-transplante com restrição hídrica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Crise hídrica e as mudanças climáticas

As projeções evidenciam que as alterações climáticas recorrentes terão efeitos adversos nos recursos hídricos em escala global. As modificações nos ciclos da água são progressivamente influenciadas pelas atividades humanas, em resposta à climatologia associada às emissões de gases do efeito estufa. Além disso, observa-se uma interferência direta na superfície terrestre, assim como na extração de água de sistemas terrestres e fluviais, destinada a usos agrícolas, industriais e domésticos (ALLAN et al., 2020).

A evolução dos padrões climáticos continua a ser influenciada pela variação nos processos de aquecimento e resfriamento em toda a atmosfera e na superfície terrestre. À medida que o clima se transforma, essas influências concorrentes, operando em escalas globais e locais, alteram as características essenciais do ciclo da água, incluindo a frequência, intensidade e duração das precipitações (KUO et al., 2015). Antecipa-se, de maneira geral, que o aumento da temperatura resulte em maiores taxas de evapotranspiração (ET), ocasionando um aumento na umidade do ar e, por conseguinte, influenciando os padrões de precipitação (ASHU e LEE, 2020).

A futura disponibilidade de água, crucial para o uso humano e para os ecossistemas, está cada vez mais sujeita à elevação da demanda evaporativa atmosférica, além da maior eficiência no uso da água pelas plantas em resposta ao aumento dos níveis de CO₂. A segurança da água está se tornando uma preocupação crescente, pois, além das mudanças climáticas, o crescimento populacional, a rápida urbanização e as demandas crescentes por água potável devido à recuperação do crescimento econômico pressionam consideravelmente os recursos hídricos disponíveis (DE ARAÚJO et al., 2019; ALLAN et al., 2020).

Devido às mudanças climáticas globais, observa-se um aumento na extensão, intensidade e frequência das secas em regiões áridas e semiáridas. As secas, que afetam vastas áreas e persistem por períodos relativamente longos, contrastam com outros desastres naturais, como inundações e deslizamentos de terra. Dada a extrema variação no volume de precipitação, as secas se apresentam como um desafio significativo, especialmente em áreas rurais. Seus efeitos críticos são evidentes em

setores dependentes de recursos hídricos, como a agricultura e a produção florestal (HAGHIGHI et al., 2020).

Assim como ocorre em muitos países tropicais, as plantações florestais no Brasil já estão sujeitas aos efeitos das mudanças climáticas, refletidos na crescente variação da frequência e intensidade das chuvas. Nesse sentido, torna-se crucial adaptar o manejo das plantações para enfrentar os desafios em ascensão relacionados aos estresses bióticos e abióticos. Embora os plantios de *Eucalyptus spp.* tenham sido cultivados em uma ampla variedade de condições ambientais, seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado à fertilidade do solo e ao adequado suprimento de água (FAVREAU et al., 2019).

2.2. Aspectos hidráulicos da tolerância à seca

O aumento nos eventos de seca já está provocando uma maior frequência de mortalidade de árvores em diversas regiões do mundo. Entre os vários fatores fisiológicos que contribuem para a mortalidade de plantas durante eventos de seca prolongada, destacam-se a escassez de carbono devido à redução nas taxas fotossintéticas resultantes do fechamento estomático e, principalmente, a falha completa do sistema hidráulico devido às elevadas taxas de embolismo no xilema (OLIVEIRA, 2020). O impacto da falta de água nas plantas é complexo, e não existe um mecanismo universal de resistência à seca. As plantas respondem à escassez de água por meio de vários processos adaptativos, incluindo a capacidade de reduzir o potencial hídrico, juntamente com adaptações fisiológicas, anatômicas e morfológicas (FELIPPE, 2020).

As plantas são diretamente influenciadas pelas condições impostas a elas, o que, por sua vez, determina seu índice de sobrevivência. A resposta inicial à deficiência hídrica é a perda de turgescência, resultando no fechamento dos estômatos, redução na fotossíntese e diminuição do alongamento celular (SILVA, 2020). A deficiência hídrica causa ainda a redução no conteúdo relativo de água e do potencial hídrico, alteração no metabolismo de açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos e metabólitos secundários (compostos fenólicos) e redução na condutividade hidráulica do xilema (ZANATTO, 2022). No entanto, as plantas possuem a capacidade de desenvolver mecanismos de adaptação.

Sob condições prolongadas de seca, observam-se acúmulos de carboidratos não estruturais nas plantas. Esses carboidratos funcionam como fonte de energia para o metabolismo e defesa da planta, contribuindo para a manutenção do turgor celular e a sustentação da fotossíntese. Durante períodos de seca mais intensa, o fechamento estomático desencadeia a paralisação da fotossíntese. Nesse cenário, as plantas recorrem aos carboidratos armazenados (MAGUIRE e KOBE, 2015), e quando esses se esgotam, as plantas podem enfrentar a ameaça de "fome de carbono", podendo resultar em embolismo no xilema. Isso, por sua vez, leva a uma falha hidráulica, pois o transporte de água nas plantas está diretamente relacionado à produção e condução de carboidratos (ZANATTO, 2022).

A madeira de espécies de angiospermas, como o *Eucalyptus spp.*, possui um sistema axial composto por vasos solitários para o transporte de água, fibras para suporte e quantidades variáveis de parênquimas para armazenamento de carboidratos. Além disso, existem outros tipos de células com anatomia e função intermediárias entre vasos e fibras, como traqueídes vasicêntricas e fibrotraqueídes (CARLQUIST, 1985). A complexidade anatômica da madeira nessas espécies desempenha um papel crucial no transporte de água, sendo diretamente influenciada pelos vasos e, indiretamente, pelo conjunto de células adjacentes. Esta funcionalidade singular ainda não foi extensivamente estudada (BAROTTO et al., 2016).

Nos últimos anos, as florestas plantadas com objetivos comerciais têm enfrentado crescentes eventos de mortalidade devido à seca. Como resultado, há um interesse frequente nos mecanismos que determinam a tolerância à seca em espécies vegetais. Estudos neste campo frequentemente destacam os impactos significativos que as mudanças climáticas exercem sobre a produtividade e a sobrevivência das florestas (COSTA et al., 2023). Devido ao seu crescimento rápido, elevada produtividade, diversidade de espécies, plasticidade e versatilidade em termos de aplicação, o eucalipto é cultivado em praticamente todo o País, demonstrando uma ampla variação morfológica e diversas respostas ecofisiológicas.

2.3. O gênero *Eucalyptus*

O grupo botânico conhecido como *Eucalyptus* (família Myrtaceae, da ordem Myrtales, das angiospermas) configura-se um gênero de relevância substantiva,

abarcando aproximadamente 800 variedades de plantas (EMBRAPA, 2019). No Brasil, mais de uma centena dessas variantes foi introduzida e cultivada no período histórico correspondente ao século 20. Dentro da extensão geográfica natural deste gênero, somente quatro espécies não se caracterizam como endêmicas da Austrália, tendo sua origem na Indonésia, Filipinas, Papua Nova Guiné e Timor Leste: *Eucalyptus deglupta* Blume, *E. orophila* L.D.Pryor, *E. urophylla* S.T.Blake e *E. wetarensis* L.D.Pryor (REFLORA, 2020).

O eucalipto se destaca como a escolha predominante nos programas de reflorestamento do Brasil, atendendo às exigências de diversas indústrias relacionadas à base florestal. Essa preferência é impulsionada por uma conjunção de fatores, incluindo condições favoráveis de solo e clima e investimentos históricos significativos em pesquisa e desenvolvimento. No território brasileiro, cerca de 9,93 milhões de hectares são dedicados ao cultivo do gênero *Eucalyptus*, e as maiores áreas plantadas estão localizadas nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Bahia e Rio Grande do Sul (IBÁ, 2022; VIEIRA et al., 2023).

Os plantios florestais têm emergido como o principal recurso para a restauração de áreas desmatadas, e sua aplicação em áreas degradadas pode significativamente aliviar a pressão sobre as espécies nativas. Dada a crescente demanda por recursos florestais no Semiárido nordestino, especialmente para propósitos energéticos, torna-se premente a ampliação e a disponibilidade de madeira, mediante o reflorestamento com espécies de crescimento rápido (DRUMOND, 2007; CARMO et al., 2010). O gênero *Eucalyptus* exibe notável plasticidade e pode crescer de maneira satisfatória em ambientes com variadas condições edafoclimáticas.

O eucalipto confere à nação uma vantagem comparativa na geração de matérias-primas provenientes de florestas cultivadas, devido à qualidade da sua madeira, avanços nas técnicas de silvicultura, aprimoramento no manejo florestal e progressos em melhorias genéticas. O ajuste do eucalipto por meio de iniciativas de aprimoramento tem constantemente melhorado essa perspectiva (BROCKERHOFF et al., 2013; MORAES et al., 2014; LIMA et al., 2020).

Além disso, o gênero *Eucalyptus* apresenta características distintivas em relação à anatomia da madeira, incluindo vasos solitários, traqueídes vasicêntricas, fibrotraqueídes, entre outros, resultando em uma funcionalidade única (BAROTTO et al., 2016). Nesse contexto, métodos de pesquisa da anatomia da madeira, como a

densidade da madeira, o diâmetro e a densidade dos vasos por área de alburno, revelam-se especialmente valiosos ao procurar obter informações sobre as relações solo-água-plantas em um determinado ambiente.

O sucesso do gênero *Eucalyptus* possui uma notável variedade de aplicações, abrangendo desde o uso como fonte de combustível para locomotivas, fabricação de dormentes ferroviários, produção de postes para redes elétricas, contribuições para o setor da construção civil, até a extração de óleos essenciais, entre outras utilidades fundamentais durante as primeiras décadas dos séculos 19 e 20 (ANDRADE, 1911; SILVA, 2008-2009). Atualmente, a cultura do eucalipto desempenha um papel crucial na geração de diversos produtos, incluindo carvão vegetal, tecidos de viscose, móveis, celulose para a fabricação de papel, etanol celulósico, energia, além de contribuir para a produção de máscaras e tecidos cirúrgicos (IBÁ, 2022).

2.4. Reguladores vegetais: o Paclobutrazol (PBZ)

Os reguladores vegetais de plantas são produtos químicos amplamente utilizados na agricultura, especialmente para ajustar as culturas aos padrões comerciais. Esses reguladores suprimem o crescimento sem comprometer a qualidade visual, evitando fitotoxicidade ou rarefação (GAZOLA et al., 2019). O paclobutrazol (PBZ), um triazol, atua principalmente reduzindo as taxas de crescimento da planta, reforçando a proteção contra doenças e aumentando a tolerância ao estresse hídrico (MOHAMMADI et al., 2017). O PBZ inibe a síntese de ácido giberélico, induzindo alterações metabólicas no ácido abscísico, citocininas e etileno, resultando na diminuição do crescimento vegetativo inicial e, conseqüentemente, na área total da transpiração (THOMAS & HEDDEN, 2018).

Estudos indicam que o Paclobutrazol (PBZ) possui propriedades reguladoras de crescimento em plantas, oferecendo proteção contra estresses bióticos e abióticos. Comercialmente, sua utilização visa controlar a altura das plantas, promovendo uma aparência mais compacta, intensificando a coloração verde das folhas e aumentando a resistência ao estresse. O PBZ também foi considerado uma opção no combate a patógenos, além de outras abordagens químicas. Houve relatos de sucesso ao retardar o crescimento de *Botrytis cinerea*, causador da doença da ferrugem em uma planta paisagística, a *Chamaelucium uncinatum*, por meio da aplicação do regulador

vegetal. Da mesma forma, o tratamento com PBZ em plantas de *Zea Mays* infectadas pelo vírus do mosaico anão mostrou eficácia, resultando na recuperação de 56% das plantas após tratamento com 200 mg/L (ROSELI & AHMAD, 2019).

Além disso, o PBZ modifica a relação fonte-dreno, direcionando mais fotoassimilados para o sistema radicular e aumentando o número de raízes adventícias. Este efeito de redução na área de transpiração, combinado com um maior número de raízes envolvidas na absorção de água, resulta em maior vigor da planta (MILLER, 2016). A aplicação de Paclobutrazol pode ser realizada tanto via solo quanto foliar (SANTOS FILHO et al., 2022). O PBZ impacta o potencial fotossintético da planta e, conseqüentemente, sua troca gasosa, uma vez que as giberelinas desempenham um papel na biogênese dos cloroplastos (RODRIGUES et al., 2016). O PBZ também influencia a eficiência do uso de carbono nas folhas, um equilíbrio dependente entre fotossíntese e respiração. A melhoria promovida pelo Paclobutrazol no uso de carbono resulta em uma fotossíntese mais eficaz e menor taxa de respiração da planta (XU et al., 2020).

A redução das áreas disponíveis tem levado a cultura do eucalipto a se afastar de regiões marginais, como aquelas com baixa disponibilidade de água e solos menos férteis. Estratégias para superar os desafios nessas áreas envolvem a escolha de clones de eucalipto mais adaptados e práticas de manejo ajustadas ao ambiente específico (SANTOS et al., 2018). Além disso, a análise de características morfológicas e fisiológicas desempenham um papel crucial na compreensão dos mecanismos de resposta das plantas, proporcionando insights mais abrangentes sobre as estratégias para mitigar os efeitos da seca.

Uma abordagem possível para induzir alterações morfofisiológicas é a aplicação de reguladores vegetais. Vários estudos destacaram a eficácia desses reguladores na atenuação dos efeitos adversos do estresse hídrico, provocando modificações na morfologia e fisiologia das plantas. Quanto ao impacto na estrutura morfológica, os retardadores de crescimento agem de forma antagônica às giberelinas e auxinas, os principais hormônios vegetais responsáveis pelo crescimento da parte aérea. A ação principal desses produtos químicos ocorre pela inibição da biossíntese de giberelina, e vale ressaltar que a aplicação de giberelinas em plantas tratadas com retardante reverte a maior tolerância observada ao estresse (DOS SANTOS et al., 2020).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição geral e localização do experimento

O experimento foi realizado em 2024, em uma estufa situada na unidade experimental do campus da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), no município de Vitória da Conquista – BA (Figura 1). Este município localiza-se na região sudoeste do Estado, às coordenadas geográficas 14°51' de latitude Sul e 40°50' de longitude Oeste. O clima da região apresenta precipitação média anual de 733,9 mm, concentrada principalmente entre os meses de novembro e março, com temperatura média anual em torno de 21 °C. A altitude média da área experimental é de 923 metros (SEI, 2013) e a vegetação predominante é classificada como Floresta Estacional Semidecidual Montana, conhecida popularmente como Mata de Cipó (BONFIM et al., 2009).

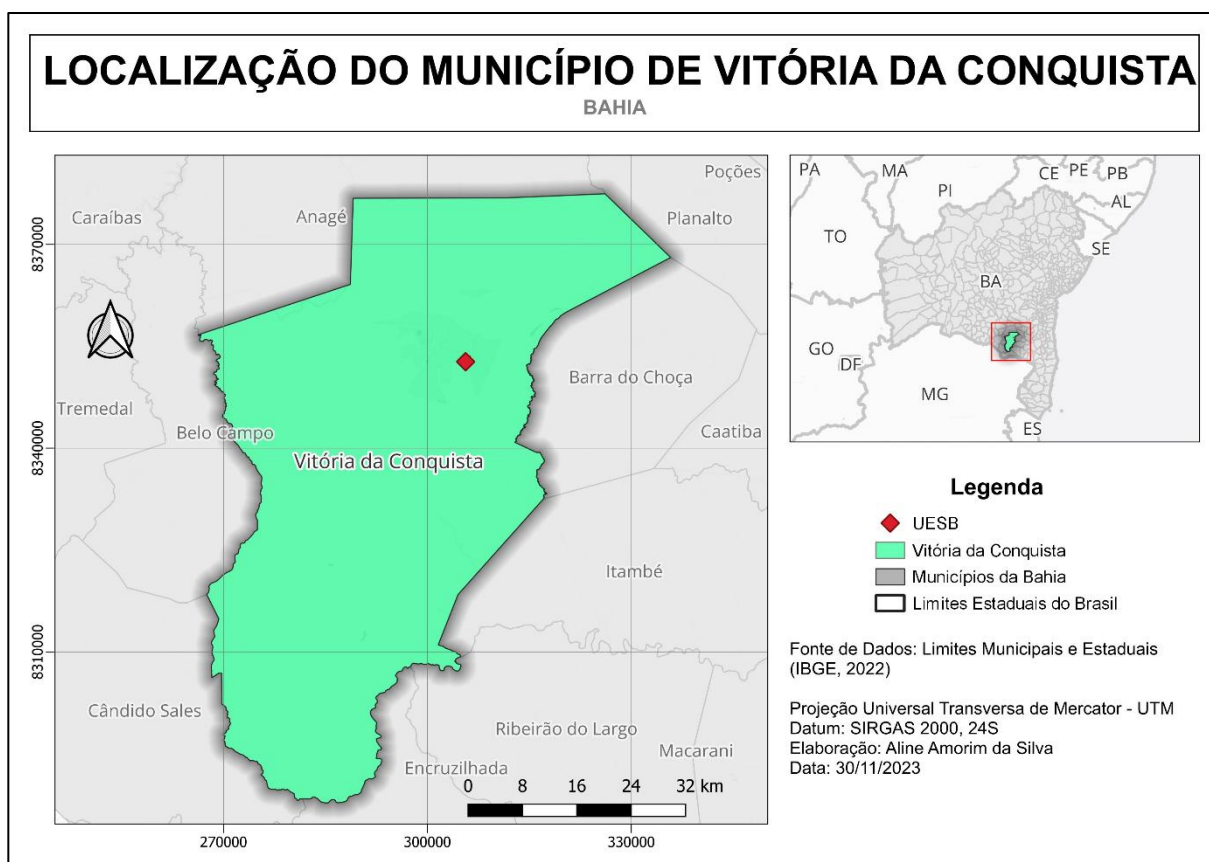


Figura 1 – Localização do experimento conduzido na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), campus de Vitória da Conquista – BA.

3.2. Seleção das amostras

As mudas utilizadas no experimento pertencem ao genótipo AEC 144, um híbrido espontâneo da espécie *Eucalyptus urophylla*. O clone foi fornecido pelo viveiro Replan Florestal, localizado no município de Águas Vermelhas, região Norte do estado de Minas Gerais. Reconhecido pela produção de material genético florestal de elevada qualidade, o viveiro adota práticas avançadas de manejo e clonagem, assegurando a uniformidade fenotípica e a integridade genética das plântulas.

As mudas foram entregues com 45 dias de idade, acondicionadas em tubetes cônicos com 12,5 cm de altura, 3 cm de diâmetro interno na extremidade superior, fundo aberto com aproximadamente 1 cm e capacidade volumétrica de 54 cm³. O substrato utilizado nos tubetes era de marca comercial Bioplant®. A procedência controlada e as condições padronizadas de cultivo das mudas conferiram maior confiabilidade aos resultados obtidos, proporcionando robustez à análise dos efeitos investigados neste estudo.

3.3. Preparo das soluções de PBZ, procedimentos de aplicação e delineamento experimental

Foi utilizado o regulador vegetal Paclobutrazol (PBZ) a partir do produto comercial Cultar® (250 g L⁻¹), previamente diluído em um litro de água destilada para obtenção das concentrações 20, 40, 60 e 80 mg L⁻¹, sendo mantido um tratamento testemunha, sem regulador. As soluções foram preparadas no Laboratório de Fisiologia Vegetal da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) e, posteriormente, diluídas em 39 L de água, totalizando 40 L por tratamento. A aplicação foi realizada por imersão dos tubetes contendo as mudas nas respectivas soluções, durante 1 minuto e 20 segundos, assegurando a completa saturação do substrato, conforme metodologia adaptada de Santos (2016).

Após a submersão, as mudas foram selecionadas com base em critérios de uniformidade e imediatamente transplantadas para vasos previamente preenchidos. Foram utilizados vasos plásticos com capacidade de 20 litros, contendo quatro perfurações na base para facilitar o escoamento da água. Cada vaso foi preenchido com 20 kg de substrato seco, preparado na própria Universidade. O substrato foi

composto por uma mistura homogênea de solo coletado a 20 cm de profundidade, em uma área do campus da UESB, e material orgânico proveniente do viveiro de mudas da instituição, na proporção de 3:1, respectivamente. Após o transplântio, todas as plantas foram irrigadas de forma uniforme durante um período de 30 dias, com o objetivo de garantir o estabelecimento inicial das mudas.

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC), com quatro blocos, em esquema fatorial 5×2 , correspondendo a cinco concentrações de PBZ (T1 = 0 (Testemunha), T2 = 20, T3 = 40, T4 = 60 e T5 = 80 mg L⁻¹) e dois níveis de disponibilidade hídrica (P1 = 40% e P2 = 90%) da média da capacidade de vaso (CAV) do substrato. Cada bloco foi constituído por 10 plantas, totalizando 40 unidades experimentais (Figura 2).

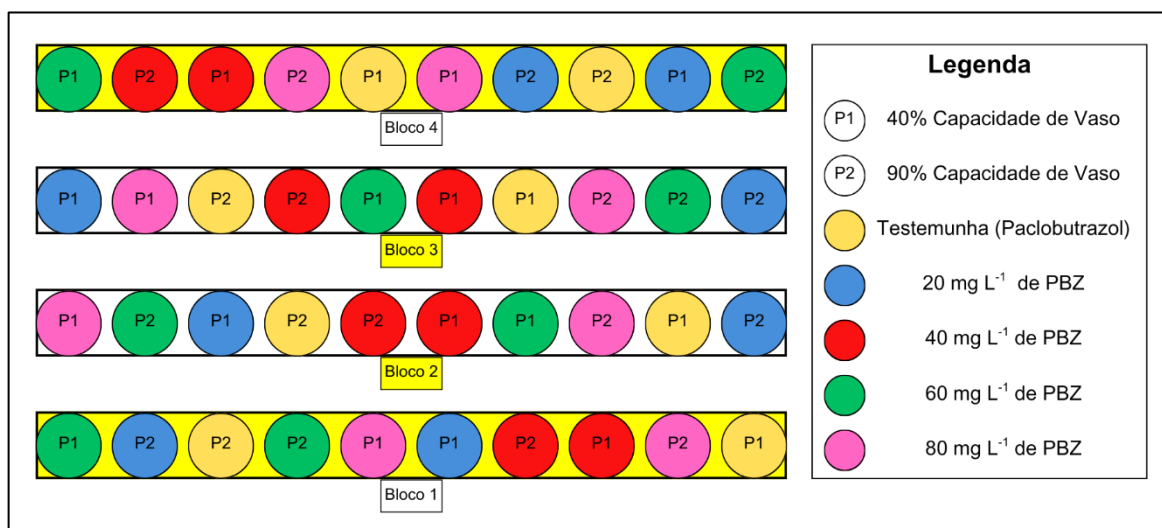


Figura 2 – Croqui esquemático da disposição das unidades experimentais no delineamento adotado.

3.4. Determinação dos regimes de disponibilidade hídrica

A umidade do substrato foi mantida próxima à capacidade de vaso, definida como o limite superior de retenção de água no solo após o escoamento do excedente gravitacional (BERNARDO et al., 2005). Os regimes de disponibilidade hídrica foram implementados 30 dias após a aplicação dos tratamentos com Paclobutrazol. Para o início do manejo hídrico, foram determinados os pesos dos vasos nas condições de substrato completamente seco e na capacidade de campo. O monitoramento da umidade durante o experimento foi realizado pelo método gravimétrico, permitindo ajustes precisos na reposição hídrica. Os níveis de disponibilidade foram

estabelecidos em 40% e 90% da média da capacidade de vaso (CAV) do substrato, conforme metodologia descrita por Cunha (2016).

3.5. Avaliação morfológica e fisiológica

3.5.1. Características morfológicas

As características morfológicas de crescimento foram avaliadas no dia inicial da implementação da capacidade de vaso (dia 0) e aos 15, 30, 45, 75 e 90 dias após o início do manejo hídrico. As variáveis morfológicas analisadas foram as seguintes:

- Comprimento da Haste Principal (HP): obtida pela medição da parte basal até o ápice caulinar, utilizando-se uma régua graduada (cm);
- Diâmetro do Caule (DIA): medido a 3 cm do solo, utilizando-se um paquímetro digital (mm);
- Número de Folhas (NF): obtido a partir da contagem manual de todas as folhas de cada planta;
- Número de Ramos (NR): obtido a partir da contagem manual de todos os ramos laterais de cada planta.

Ao final do experimento, aos 90 dias após a implementação da capacidade de vaso, foram avaliadas adicionalmente outras características de crescimento das plantas:

- Área Foliar Total (AFT): determinada a partir da coleta de todas as folhas das plantas avaliadas. As folhas foram fotografadas, e as imagens processadas no software ImageJ, com o objetivo de estimar a área foliar, expressa em cm². O ImageJ é um software de domínio público, desenvolvido em Java, amplamente utilizado para análise e processamento de imagens científicas.
- Massa Fresca das Folhas (MFF), Massa Fresca do Caule (MFC), Massa Fresca das Raízes (MFR) e Massa Fresca Total (MFT): inicialmente, as plantas foram segmentadas em folhas, caule e raízes. Cada parte foi pesada separadamente em balança de precisão (g). As raízes foram lavadas cuidadosamente para a completa remoção do substrato e, em seguida, submetidas à secagem em temperatura ambiente, sobre bancada de laboratório, até o escoamento total da água residual. Após esse período, foram pesadas em balança de precisão.

A massa fresca total (MFT) foi obtida pelo somatório das massas frescas das três partes, sendo expressa em gramas (g);

- Volume das Raízes (VOLR): a determinação do volume da raiz foi realizada por meio do método do deslocamento volumétrico, com base no Princípio de Arquimedes. O procedimento consistiu na imersão completa da raiz em um recipiente previamente preenchido com água, registrando-se o volume do líquido antes e após a submersão. A diferença entre os volumes correspondeu ao volume de água deslocado, equivalente ao volume da raiz, expresso em mililitros (mL);
- Massa Seca das Folhas (MSF), Massa Seca do Caule (MSC), Massa Seca das Raízes (MSR) e Massa Seca Total (MST): após a obtenção das massas frescas, os diferentes órgãos das plantas (folhas, caule e raízes) foram acondicionados separadamente em sacos de papel, devidamente identificados e submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 65 °C, por um período de 72 horas, até atingirem peso constante. Em seguida, as massas secas foram determinadas com o auxílio de balança de precisão (g). A massa seca total (MST) foi calculada por meio do somatório das massas secas individuais, sendo expressa em gramas (g).

3.5.2. Características fisiológicas

O índice SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) foi avaliado no dia inicial da implementação da capacidade de vaso (dia 0) e aos 15, 30, 45, 75 e 90 dias após o início do manejo. As leituras foram realizadas com um clorofilômetro Minolta, modelo SPAD-502 (MINOLTA, Japão), em quatro folhas totalmente expandidas, localizadas no terço médio da copa de cada planta. Em cada folha, foram efetuadas quatro medições em pontos distintos, totalizando 16 leituras por unidade experimental. A média dessas leituras foi utilizada como valor representativo do índice SPAD para cada planta.

As variáveis fisiológicas teor relativo de água (TRA), potencial hídrico foliar (Ψ_w), teores de carboidratos — açúcares redutores (AR), açúcares solúveis totais (AST) e amido —, bem como as trocas gasosas, foram avaliadas exclusivamente aos

90 dias após a implementação da capacidade de vaso, ou seja, ao final do experimento:

- Teor Relativo de Água (TRA): a determinação do teor relativo de água foi realizada a partir de seis discos foliares obtidos do limbo das mesmas folhas utilizadas nas avaliações de potencial hídrico. Inicialmente, foi determinada a massa de matéria fresca (MF). Em seguida, os discos foram imersos em água destilada por 24 horas para a obtenção da massa de matéria túrgida (MT), sendo posteriormente secos em estufa a 65 °C, por 48 horas, para determinação da massa de matéria seca (MS). O teor relativo de água foi calculado conforme a fórmula proposta por Weatherley (1950): $TRA = [(MF - MS) / (MT - MS)] \times 100$.
- Potencial Hídrico Foliar (Ψ_w): o potencial hídrico foliar foi mensurado em dois horários: antes do amanhecer, às 5h (Ψ_{am}), e ao meio-dia (Ψ_{md}). Para cada avaliação, foi coletada uma folha localizada no terço médio da copa de cada planta, no respectivo horário. As folhas foram imediatamente acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em caixas térmicas contendo gelo, a fim de minimizar a perda de água durante o transporte ao Laboratório de Fisiologia Vegetal. A determinação do Ψ_w foi realizada por meio de uma câmara de pressão (PMS 1000, PMS, Inglaterra), conforme metodologia descrita por Scholander et al. (1965).
- Trocas Gasosas Foliaves: as medições das trocas gasosas foram realizadas na primeira folha totalmente expandida, no sentido basípeto, situada no terço médio da copa de cada planta, utilizando-se um analisador portátil de gases por infravermelho, em sistema aberto (modelo LCpro-SD, ADC BioScientific Ltd., UK). Durante as avaliações, empregou-se uma fonte de luz artificial dicróica, com intensidade fotônica de $1.000 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Foram determinados os seguintes par\u00e2metros fisiol\u00f3gicos: temperatura foliar (T_{leaf}), concentra\u00e7\u00e3o interna de CO_2 na câmara subestom\u00e1tica (C_i), taxa de transpira\u00e7\u00e3o (E), condut\u00e2ncia estom\u00e1tica ao vapor d'\u00e1gua (G_s), taxa de assimila\u00e7\u00e3o l\u00edquida de CO_2 (A), efici\u00eancia instant\u00e2nea do uso da \u00e1gua (A/E) e efici\u00eancia instant\u00e2nea de carboxila\u00e7\u00e3o (A/C_i). As medi\u00e7\u00f5es foram conduzidas entre as 7h e as 12h, sob condi\u00e7\u00f5es ambientais controladas.

3.6. Quantificação de amido, açúcares solúveis totais e redutores

As concentrações de açúcares redutores (AR) e açúcares solúveis totais (AST) foram determinadas a partir de extratos obtidos de folhas completamente expandidas. Para a extração, utilizaram-se 200 mg de matéria seca foliar previamente homogeneizada e triturada, aos quais foram adicionados 15 mL de solução tampão de KH_2PO_4 0,1 M (pH 7,4). O extrato foi dividido em três alíquotas e submetido à centrifugação por 45 minutos, a 2.500 g, com posterior coleta do sobrenadante.

A quantificação de AR foi realizada pelo método do ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), conforme descrito por Miller (1959), com adaptações. Foram utilizados 0,3 mL do extrato, 0,5 mL da solução de DNS e 0,45 mL de água deionizada, totalizando 1,25 mL. A mistura foi incubada em banho-maria a 100 °C por cinco minutos e, após resfriamento à temperatura ambiente, adicionou-se 3,75 mL de água deionizada para completar o volume final de 5,0 mL. A leitura foi realizada em espectrofotômetro (SP-22, Biospectro, Curitiba), a 540 nm, e os resultados expressos em mmol de AR por grama de matéria seca.

A determinação de AST seguiu o mesmo procedimento de extração adotado para AR. A quantificação foi realizada pelo método da antrona, conforme Willis e Yemm (1955), com modificações. Foram utilizados 0,02 mL do extrato, 2 mL da solução de antrona e 0,98 mL de água deionizada, totalizando 3 mL. A mistura foi mantida sob agitação, em baixa temperatura, por 15 segundos, seguida de aquecimento em banho-maria por três minutos. Após resfriamento, a leitura foi realizada em espectrofotômetro (SP-22, Biospectro, Curitiba) a 620 nm, com os resultados expressos em mmol de AST por grama de matéria seca.

A quantificação do amido foi realizada a partir de 0,125 g de matéria seca foliar, adicionada a 5 mL de H_2SO_4 0,5 M. A mistura foi aquecida em banho-maria a 100 °C por 1 hora. Em seguida, o volume foi completado com água destilada até atingir 250 mL. Uma alíquota de 1 mL foi retirada e mantida a 0 °C, à qual se adicionaram 5 mL da solução de antrona (5 mM). A reação foi conduzida por 11 minutos em banho-maria a 100 °C, e, após resfriamento, a leitura foi realizada em espectrofotômetro a 620 nm. Os resultados foram expressos em mmol de amido por grama de matéria seca (BRASIL, 1999).

3.7. Análises anatômicas

Amostras do caule e da raiz foram utilizadas para as análises anatômicas. Para isso, coletaram-se três amostras por tratamento, correspondentes a fragmentos do caule (5º entrenó a partir do ápice) e das raízes localizadas próximas à base do caule. As amostras foram lavadas em água corrente para a remoção do substrato residual.

O material foi fixado em solução FAA50, composta por formaldeído, ácido acético e etanol 70% (1:1:18 v/v), conforme metodologia descrita por Johansen (1940). Após a fixação, as amostras foram lavadas em água destilada e parcialmente desidratadas em série etílica crescente até a concentração de 70%, na qual permaneceram armazenadas, conforme protocolo de Berlyn e Miksche (1976).

Posteriormente, as amostras foram completamente desidratadas em série etílica, infiltradas e incluídas em resina metacrilato (Historesin® Leica, Leica Microsystems Nussloch GmbH, Heidelberg, Germany), seguindo as recomendações do fabricante. Cortes transversais e longitudinais foram obtidos com o auxílio de micrótomo rotativo (RM2235, Leica, Deerfield, Illinois, USA), utilizando navalhas de vidro, com espessura de 5 µm. As seções foram coradas com azul de toluidina em pH 4,5, conforme O'Brien e McCully (1981).

As análises e quantificações morfométricas dos tecidos foram realizadas a partir de fotomicrografias obtidas com microscópio de luz (DM2500, Leica Microsystems, Wetzlar, Germany), acoplado a um sistema de captura de imagem digital (DFC295, Leica Microsystems, Wetzlar, Germany), com utilização de filtro de luz polarizada. As medições foram realizadas com o auxílio do software Leica Application Suite (LAS) versão 4.1, em diferentes campos de visão de cada amostra.

No caule, foram mensurados: diâmetro dos vasos (DIAV), espessura do tecido xilemático (ESPX), faixa cambial (FAIC) e densidade de vasos (DENV). Na raiz, além dessas mesmas variáveis, foi incluída a mensuração da espessura do tecido floemático (ESPF). Todas as análises morfométricas foram realizadas com o auxílio do software Leica Application Suite versão 3.0.

3.8. Análises estatísticas

A homogeneidade das variâncias e a normalidade dos resíduos foram avaliadas, respectivamente, pelos testes de Bartlett e Lilliefors, utilizando o software SAEG, versão 9.1. Após a verificação das pressuposições, os dados foram submetidos à análise de variância geral (ANOVA). Para a comparação das médias entre as capacidades de vaso, aplicou-se o teste de Tukey, aos níveis de significância de 1% e 5%.

As respostas às concentrações de paclobutrazol (PBZ) foram analisadas por meio de regressão polinomial, utilizando o método dos polinômios ortogonais. Os modelos foram ajustados com base na análise de variância da regressão, no coeficiente de determinação ($R^2 \geq 0,50$) e na coerência biológica dos dados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Morfologia das plantas

A morfologia de *Eucalyptus urophylla* foi influenciada pelas concentrações de Paclobutrazol (PBZ), pela disponibilidade hídrica (CAV) e pela interação entre esses fatores, como observado nas variáveis comprimento da haste principal (HP), diâmetro do caule (DIA), número de folhas (NF) e número de ramos (NR) (Tabela 1).

Tabela 1 – Resumo da análise de variância das variáveis morfológicas (HP, DIA, NF e NR) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC 144), obtidas a partir de aplicação radicular de PBZ e submetidas na fase pós-transplante a CAV de 40% e 90%, com avaliações aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.

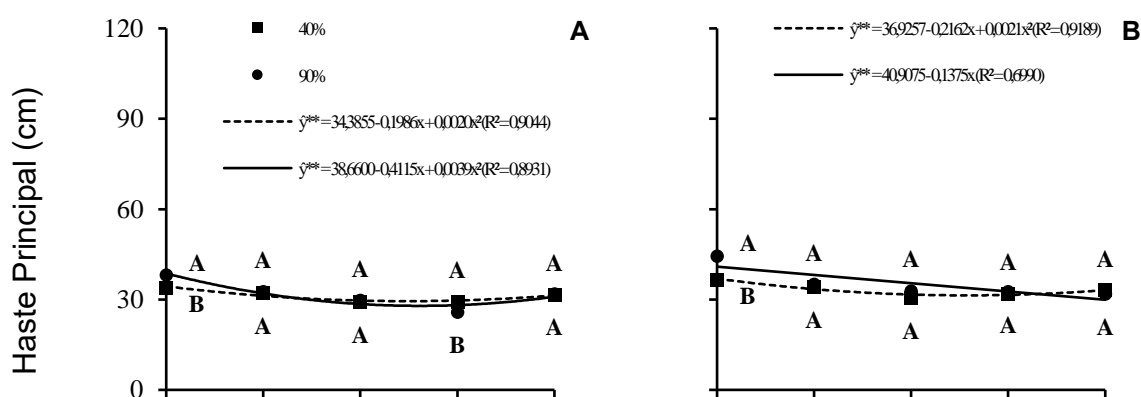
		Quadrados Médios											
FV	GL	Comprimento da Haste Principal (HP)						Diâmetro do Caule (DIA)					
		0 (x 10)	15 (x 10 ²)	30 (x 10 ²)	45 (x 10 ³)	75 (x 10 ³)	90 (x 10 ³)	0	15	30 (x 10)	45 (x 10 ²)	75 (x 10 ²)	90 (x 10 ²)
BL	3	0,02 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}
PBZ (A)	4	8,25 ^{**}	1,06 ^{**}	3,81 ^{**}	0,33 ^{**}	1,00 ^{**}	1,33 ^{**}	0,31 ^{**}	1,00 ^{**}	0,30 ^{**}	0,03 ^{**}	0,08 ^{**}	0,15 ^{**}
CAV (B)	1	0,15 ^{ns}	0,43 ^{**}	6,31 ^{**}	3,84 ^{**}	11,4 ^{**}	19,4 ^{**}	0,60 ^{**}	0,50 ^{ns}	5,07 ^{**}	2,38 ^{**}	4,22 ^{**}	6,19 ^{**}
A x B	4	1,47 ^{**}	0,23 ^{**}	0,86 ^{**}	0,09 ^{**}	0,16 [*]	0,54 ^{**}	0,31 ^{**}	0,18 ^{ns}	0,17 ^{**}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,08 ^{**}
Resíduo	27	2,14	3,94	4,91	8,07	53,81	32,61	0,07	0,20	0,35	0,41	0,58	1,63
CV (%)		4,65	5,77	5,63	6,27	12,00	7,71	7,99	11,35	12,58	9,88	8,22	10,75
Média													
CAV 40%		--	--	--	--	--	--	--	3,78a	--	4,02b	5,98b	--
CAV 90%		--	--	--	--	--	--	--	4,00a	--	8,90a	12,47a	--

FV	GL	Números de Folhas (NF)						Números de Ramos (NR)	
		0 (x 10)	15 (x 10 ²)	30 (x 10 ³)	45 (x 10 ³)	75 (x 10 ³)	90 (x 10 ³)	75 (x 10 ²)	90 (x 10 ²)
BL	3	0,77 ^{ns}	0,46 [*]	0,14 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,91 ^{ns}	1,19 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,13 ^{ns}
PBZ (A)	4	4,05 ^{**}	1,30 ^{**}	1,16 ^{**}	2,21 ^{**}	15,1 ^{**}	13,2 ^{**}	0,16 [*]	0,06 ^{ns}
CAV (B)	1	1,17 ^{ns}	8,99 ^{**}	56,0 ^{**}	81,8 ^{**}	350 ^{**}	546 ^{**}	4,07 ^{**}	3,65 ^{**}
A x B	4	0,65 ^{ns}	1,38 ^{**}	0,69 ^{**}	2,08 ^{**}	3,95 ^{**}	4,93 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,22 [*]
Resíduo	27	8,08	11,89	101,23	244,60	421,72	2606,28	5,09	5,67
CV (%)		19,57	11,12	15,08	19,44	10,87	20,21	17,16	15,48
Média									
CAV 40%		13,98a	--	--	--	--	135,71b	9,96b	--
CAV 90%		15,07a	--	--	--	--	369,47a	16,33a	--

Onde: FV = Fonte de Variação; GL = Grau de Liberdade; ns = não significativo pelo teste F; * = significativo a 5% pelo teste F; ** = significativo a 1% pelo teste F.

De modo geral, a aplicação de PBZ reduziu o crescimento em altura, o diâmetro do caule e a emissão de folhas e ramos, com efeito mais evidente sob déficit hídrico (40% CAV). A atuação do regulador está associada à inibição da biossíntese de giberelinas, restringindo o alongamento celular e a divisão meristemática (RADEMACHER, 2016; TAIZ et al., 2017). Contudo, o nível de disponibilidade hídrica modulou essa resposta, uma vez que as plantas sob 90% CAV apresentaram maior desenvolvimento em todas as variáveis, sugerindo que o regime hídrico mais favorável atenuou os efeitos inibitórios do PBZ, como também observado por Moreira et al. (2016) em outras espécies do gênero *Eucalyptus*.

Foi observado um padrão decrescente para a relação entre comprimento da haste principal (HP) e concentrações de PBZ, especialmente a partir de 45 dias após o início do manejo hídrico (Figura 3D). Em condição de 90% CAV, houve aumento de HP até 40 mg L⁻¹, seguido de redução nas concentrações mais elevadas de PBZ (Figura 3F). Sob 40% CAV, o crescimento foi continuamente limitado, intensificando os efeitos do PBZ relacionados à expansão celular (FENG et al., 2016). Resultados semelhantes foram verificados para *Eucalyptus grandis* e *Corymbia citriodora*, para as quais o déficit hídrico acentuou os efeitos de reguladores vegetais no crescimento apical (OLIVEIRA et al., 2016).



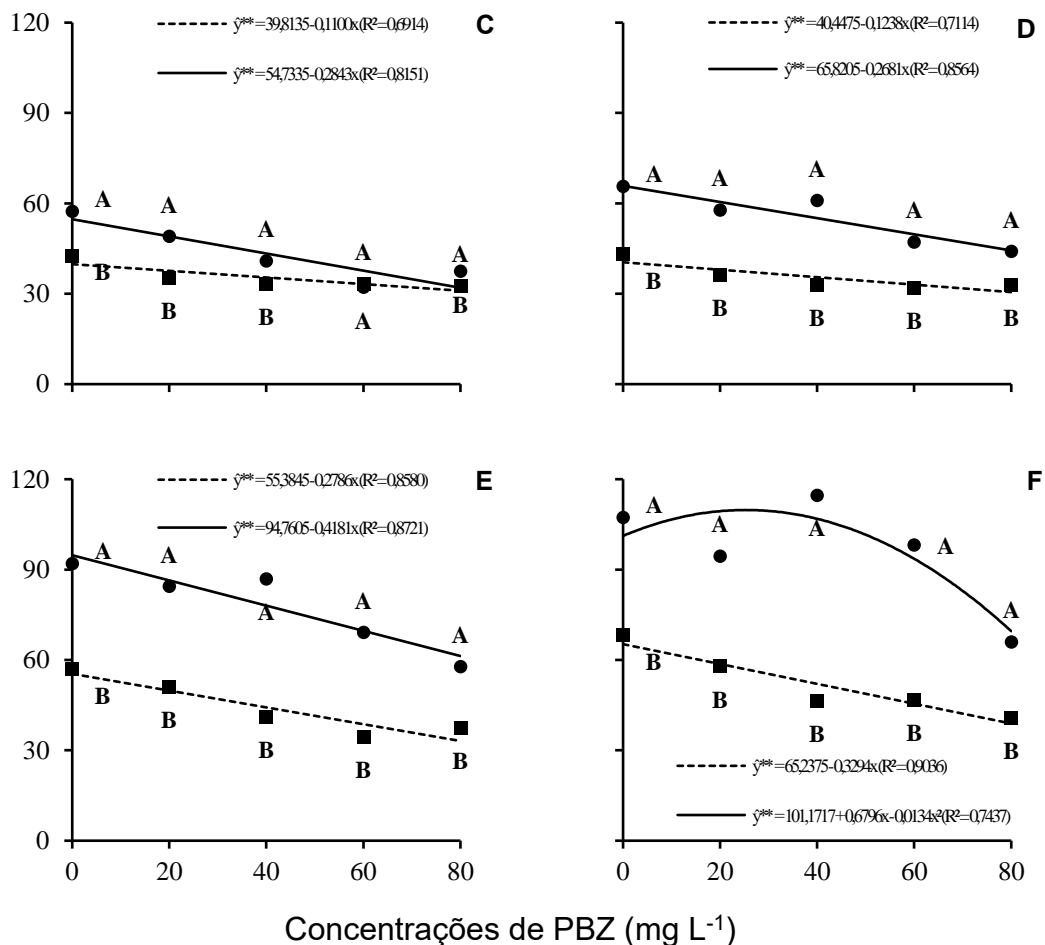


Figura 3 – Comprimento da haste principal (HP, cm) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), obtido a partir da aplicação radicular de Paclobutrazol (PBZ), e submetidas na fase pós-transplântio a diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%), avaliadas aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.

Para o diâmetro do caule (DIA), o padrão de resposta foi semelhante: plantas sob 90% CAV apresentaram maiores valores em comparação às sob 40%, independentemente da concentração de PBZ (Figura 4). A água é essencial para o crescimento radial por manter a turgescência e permitir a expansão dos tecidos (LAMBERS e OLIVEIRA, 2019). Contudo, mesmo em condições favoráveis, o aumento das concentrações do regulador resultou em redução progressiva do diâmetro, o que demonstra que o PBZ interfere na atividade cambial, como relatado por Rademacher (2000) e Robbins e Dinneny (2015). Em *E. urophylla*, o crescimento diametral é particularmente sensível à limitação hídrica, o que pode obscurecer os efeitos diretos do PBZ quando há déficit (STAPE et al., 2010).

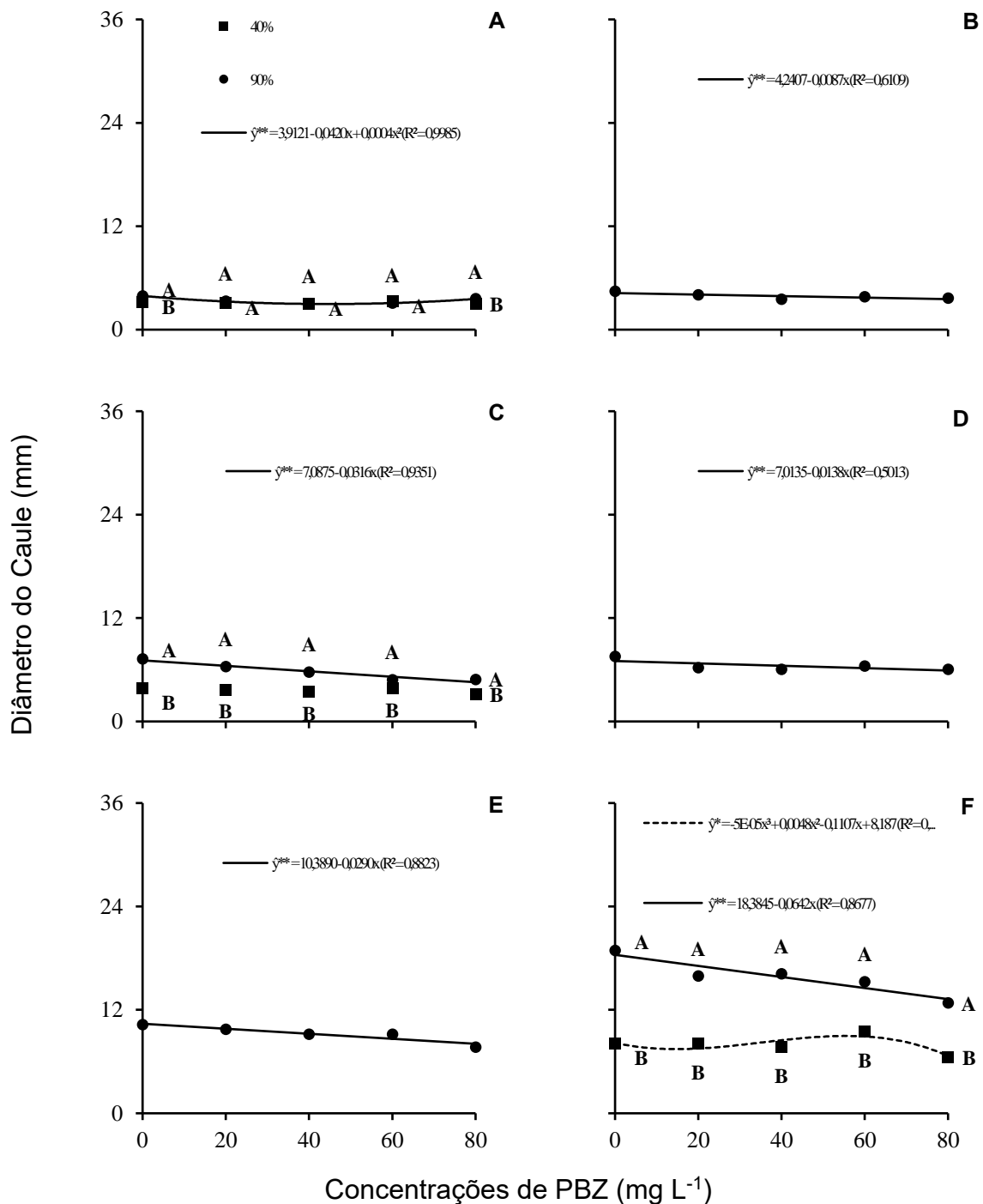


Figura 4 – Diâmetro do caule (DIA, mm) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), tratadas com diferentes concentrações de PBZ aplicadas ao sistema radicular e submetidas na fase pós-transplântio a CAV de 40% e 90%, com avaliações aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.

O número de folhas (NF) foi consistentemente maior sob 90% CAV em todas as concentrações de PBZ, com valores mais elevados nas últimas avaliações (Figura 5E). O declínio do NF com o aumento do regulador ocorreu de forma concentração-dependente. Esse efeito pode ser explicado tanto pela inibição do alongamento celular quanto pela modulação hormonal do PBZ, que, ao reduzir os níveis de giberelinas,

pode aumentar a concentração de ácido abscísico (ABA), hormônio associado à senescência e ao fechamento estomático (SOUMYA et al., 2017; LIU et al., 2022). Em estudos com *Eucalyptus grandis*, Butrinowski et al. (2013) também observaram redução da área foliar e da emissão de novas folhas em resposta ao estresse hídrico.

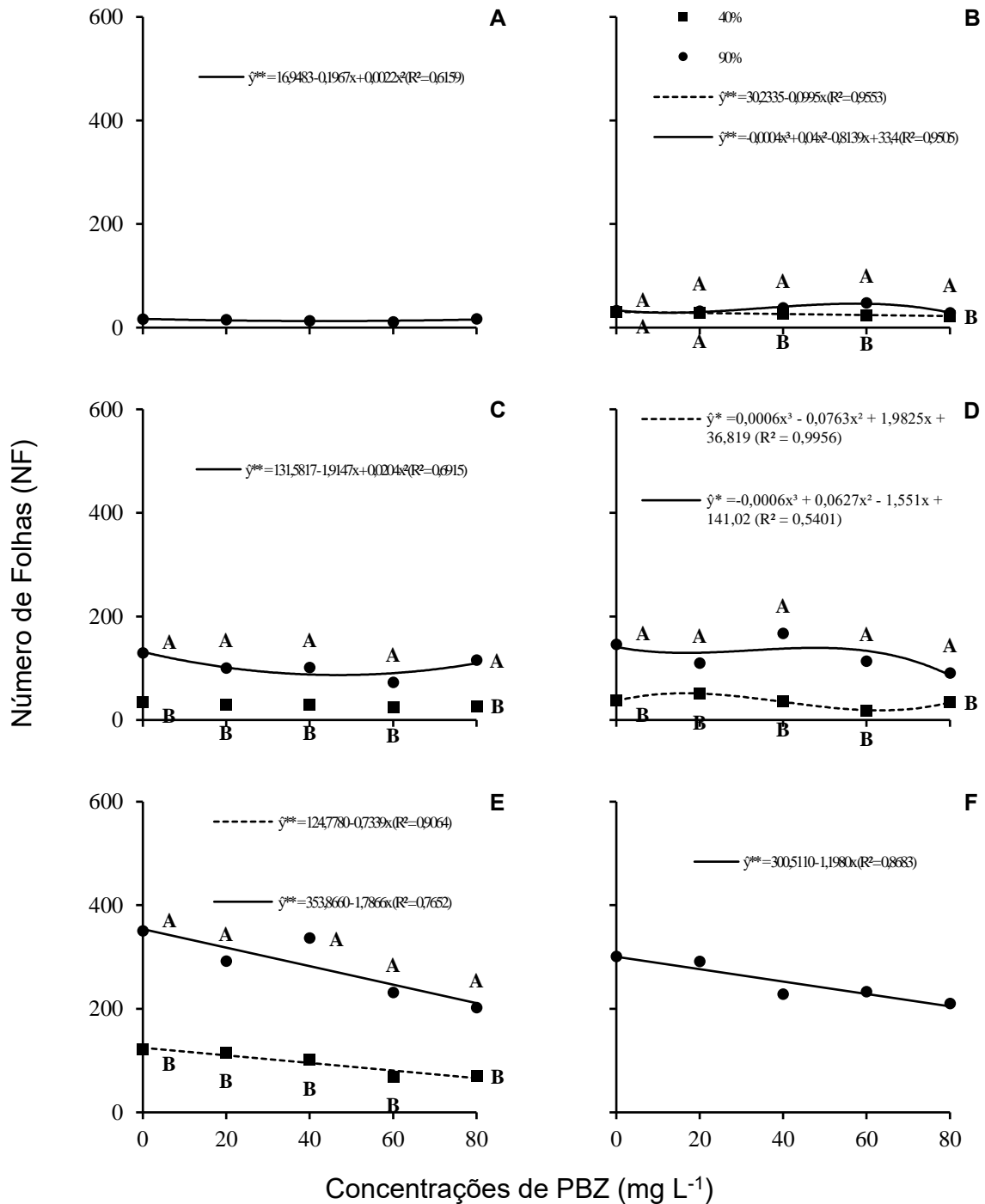


Figura 5 – Número de folhas (NF) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), sob diferentes concentrações de PBZ aplicadas no sistema radicular e submetidas à CAV de 40% e 90%, avaliadas aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.

O número de ramos (NR) mostrou maior sensibilidade à CAV do que ao PBZ. Sob 90% CAV, houve incremento inicial da ramificação em concentrações moderadas do regulador, seguido de redução nas concentrações mais altas (Figura 6B). Essa resposta sugere que o PBZ pode atenuar temporariamente a dominância apical, favorecendo a brotação lateral quando há disponibilidade hídrica adequada (ONGARO e LEYSER, 2008; CUNHA, 2016). Por sua vez, sob 40% CAV, observou-se redução progressiva do NR com o aumento das concentrações de PBZ, possivelmente em decorrência da redistribuição de recursos para o sistema radicular, uma estratégia de sobrevivência comum sob estresse hídrico (BRUNNER et al., 2015; WU et al., 2021).

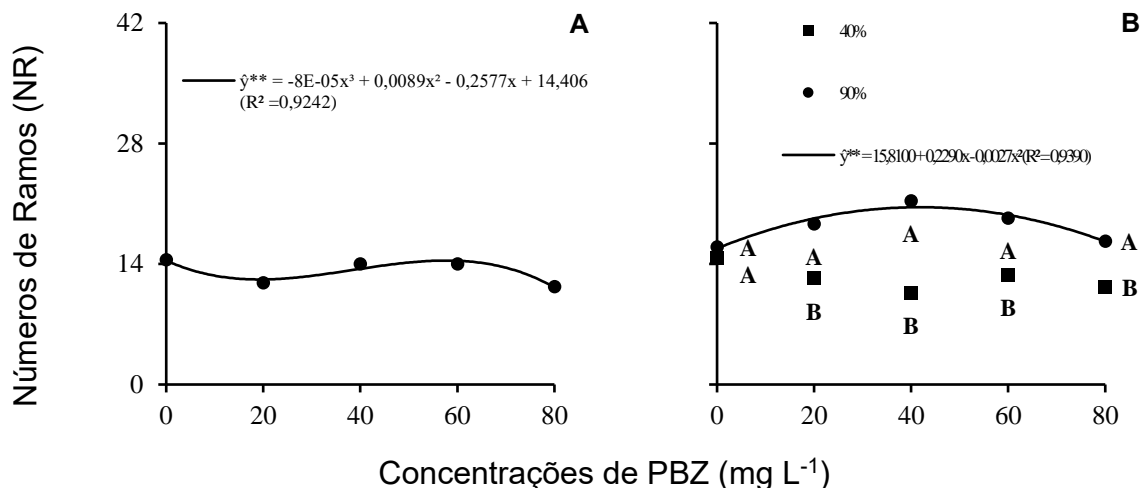


Figura 6 – Número de ramos (NR) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) tratadas com PBZ no sistema radicular e cultivadas sob CAV de 40% e 90%, com avaliações aos 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.

A conexão entre essas variáveis indica que o crescimento morfológico de *Eucalyptus urophylla* é resultado da interação dinâmica entre o regulador vegetal e a disponibilidade hídrica. O PBZ atua como um inibidor fisiológico do crescimento, com intensidade modulada pela água disponível no sistema. Portanto, o manejo adequado da irrigação é essencial para maximizar os efeitos benéficos do regulador sem comprometer a qualidade das mudas. Estratégias que combinem concentrações moderadas de PBZ com níveis satisfatórios de umidade podem permitir maior controle do crescimento sem perda da capacidade fotossintética e da arquitetura da planta, favorecendo o estabelecimento inicial em campo (STAPE et al., 2010; EL-METWALLY et al., 2022).

4.2. Acúmulo de biomassa e distribuição morfofisiológica

A distribuição de biomassa em *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) foi modulada pelas concentrações de Paclobutrazol (PBZ), pela disponibilidade hídrica (CAV) e pela interação entre esses fatores (Tabela 2). Foram analisadas variáveis relacionadas à alocação morfofisiológica, incluindo área foliar total (AFT), volume radicular (VOLR), massas fresca e seca das folhas, caule e raízes (MFF, MSF, MFC, MSC, MFR, MSR), além da massa total fresca (MFT) e seca (MST).

Tabela 2 – Resumo da análise de variância das variáveis biométricas relacionadas à biomassa (AFT, MFR, MSR, VOLR, MFF, MSF, MFC, MSC, MFT e MST) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), tratadas com PBZ via radicular e cultivadas sob CAV de 40% e 90%.

FV	GL	Quadrados Médios									
		AFT (x 10 ⁷)	MFR (x 10 ⁴)	MSR (x 10 ⁴)	VOLR (x 10 ⁴)	MFF (x 10 ⁴)	MSF (x 10 ⁴)	MFC (x 10 ⁴)	MSC (x 10 ⁴)	MFT (x 10 ⁴)	MST (x 10 ⁴)
BL	3	0,06 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00*	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}
PBZ (A)	4	0,94**	0,68**	0,06**	0,64**	0,26**	0,07**	0,25**	0,08**	2,31**	0,64**
CAV (B)	1	143**	84,5**	2,50**	62,5**	40,2**	6,28**	29,6**	3,91**	440**	36,8**
A x B	4	1,73**	0,07 ^{ns}	0,00**	0,20**	0,22**	0,01**	0,10**	0,01*	0,62**	0,04**
Resíduo	27	4,59*10 ⁵	379,86	6,92	414,22	89,83	10,94	131,48	16,82	794,87	56,46
CV (%)		6,71	8,72	6,46	10,65	5,51	5,19	8,44	8,43	5,31	4,91
Média											
CAV 40%		--	78,15b	--	--	--	--	--	--	--	--
CAV 90%		--	368,86a	--	--	--	--	--	--	--	--

Onde: FV = Fonte de Variação; GL = Grau de Liberdade; ns = não significativo pelo teste F; * = significativo a 5% pelo teste F; ** = significativo a 1% pelo teste F.

A área foliar total apresentou efeito contrastante entre os regimes hídricos. Em 40% de CAV, houve redução progressiva com o aumento das concentrações de PBZ, enquanto em 90% observou-se um leve aumento até 56,91 mg L⁻¹, seguido por declínio (Figura 7). A redução da AFT sob estresse hídrico e sob ação do PBZ pode estar relacionada à limitação da expansão foliar e à diminuição da superfície transpiratória, como mecanismo de conservação hídrica (CHAVES et al., 2009; SHAKI et al., 2022). Em ambiente hídrico favorável, a resposta positiva a concentrações intermediárias de PBZ pode estar associada a um estímulo moderado à eficiência fisiológica e à redistribuição de assimilados (HÜTSCH et al., 2023).

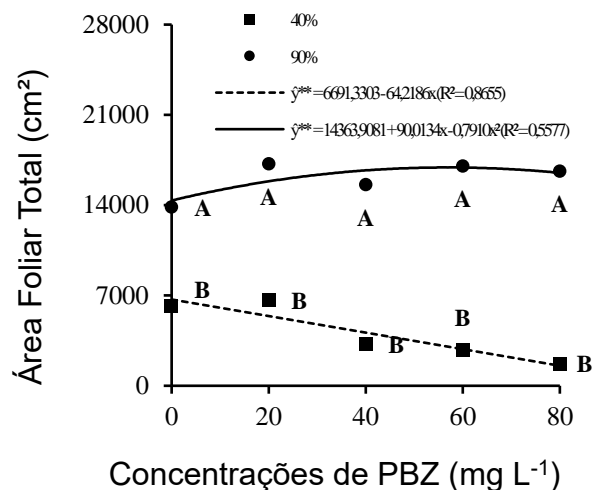


Figura 7 – Área foliar total (AFT, cm²) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) tratadas com PBZ via drench, submetidas na fase pós-transplântio a diferentes capacidades de vaso (40% e 90%).

No sistema radicular, o volume (VOLR), a massa fresca (MFR) e a massa seca (MSR) foram reduzidos com o aumento do PBZ em 40% de CAV. Já em 90%, observou-se aumento de VOLR e MSR até cerca de 57 mg L⁻¹, seguido por nova redução (Figuras 8 e 9). O PBZ pode favorecer a alocação de biomassa para as raízes em condições de boa disponibilidade hídrica, promovendo o desenvolvimento de estruturas de suporte e absorção (SOUMYA et al., 2017; WATSON, 2000). No entanto, em ambiente restrito, o estresse hídrico compromete essa plasticidade morfofisiológica (EZIZ et al., 2017). A redução da MFR, acompanhada da manutenção relativa da MSR, sugere maior lignificação ou aumento da densidade celular, como já descrito por Galvez et al. (2011) em plantas sob estresse.

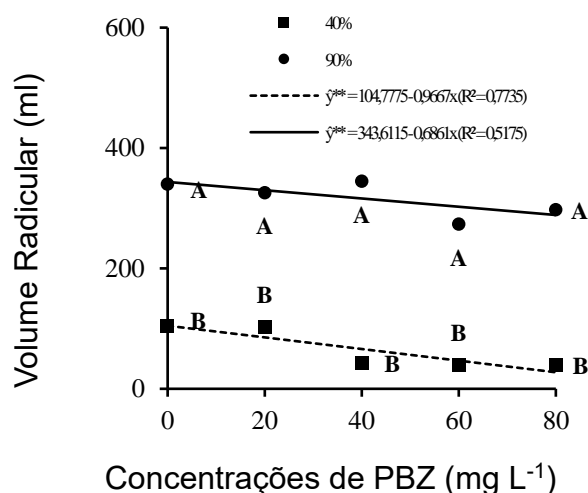


Figura 8 – Volume radicular (VOLR, mL) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) sob aplicação radicular de PBZ e expostas na fase pós-transplântio a CAV de 40% e 90%.

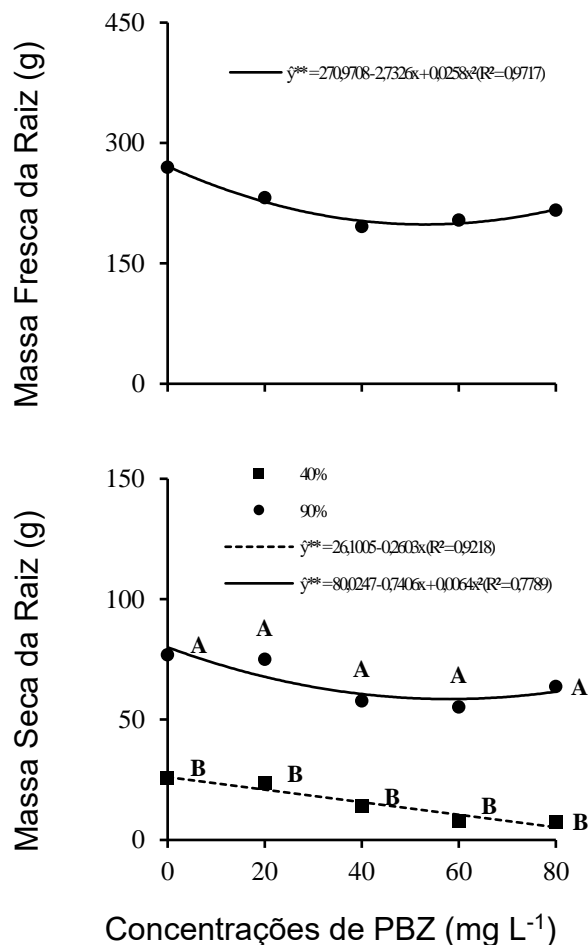


Figura 9 – Massa fresca (MFR, g) e massa seca da raiz (MSR, g) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), obtidas sob aplicação radicular de PBZ e submetidas na fase pós-transplântio a condições diferenciadas de capacidade de vaso (40% e 90%).

As massas fresca e seca das folhas (MFF, MSF) e do caule (MFC, MSC) apresentaram tendência de redução com o aumento das concentrações de PBZ, especialmente em 40% de CAV (Figuras 10 e 11). Em 90%, houve leve incremento em concentrações intermediárias, seguido por queda nas doses mais altas. Esse padrão é coerente com o efeito inibitório do PBZ sobre a parte aérea, via supressão da biossíntese de giberelinas (RADEMACHER, 2015; KAMRAN et al., 2018). A variação da MSC pode estar associada a espessamento da parede celular e deposição de lignina, conferindo maior densidade ao tecido lenhoso, conforme descrito para espécies arbóreas submetidas ao PBZ (HÜTSCH et al., 2023).

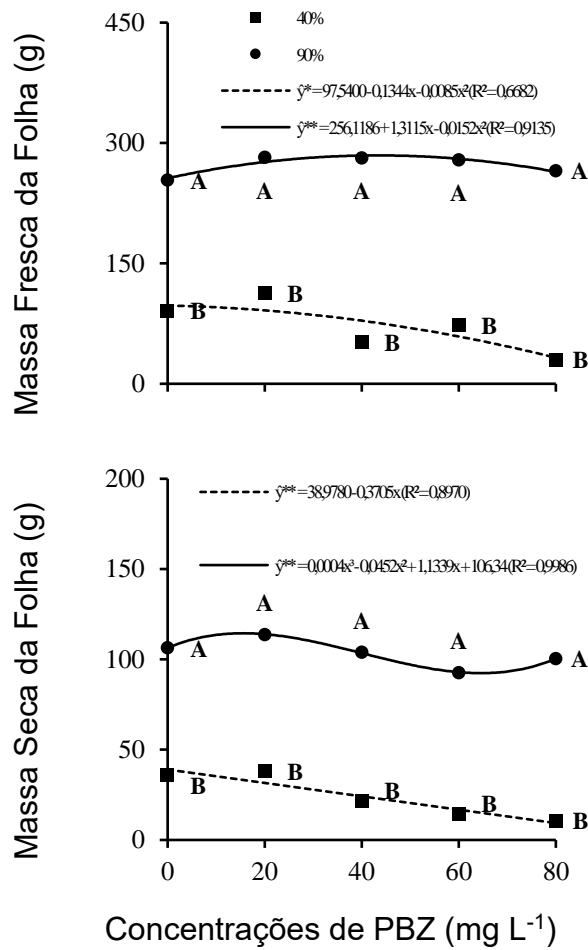
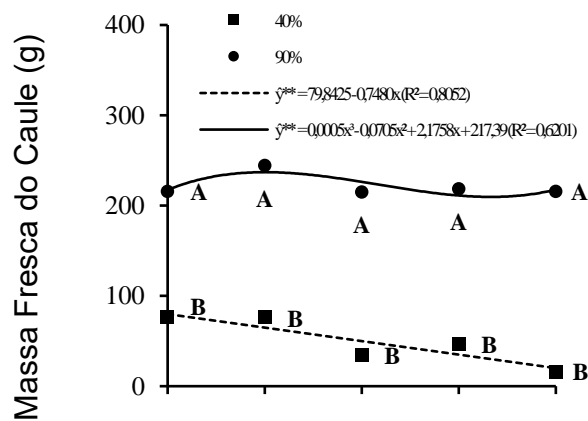


Figura 10 – Massa fresca (MFF, g) e massa seca das folhas (MSF, g) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), em razão das concentrações de PBZ aplicadas ao sistema radicular e das condições de CAV (40% e 90%) na fase pós-transplântio.



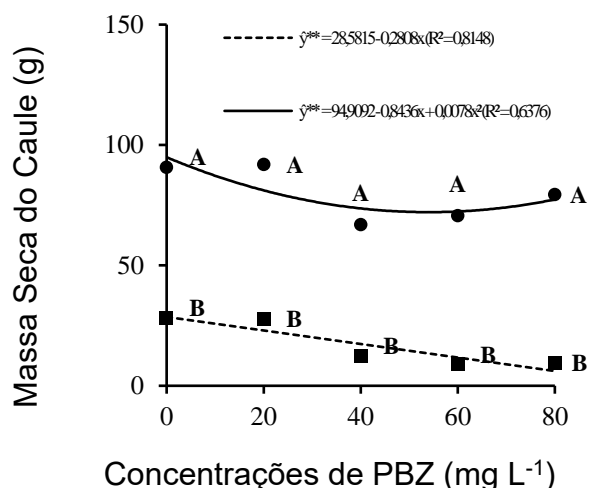
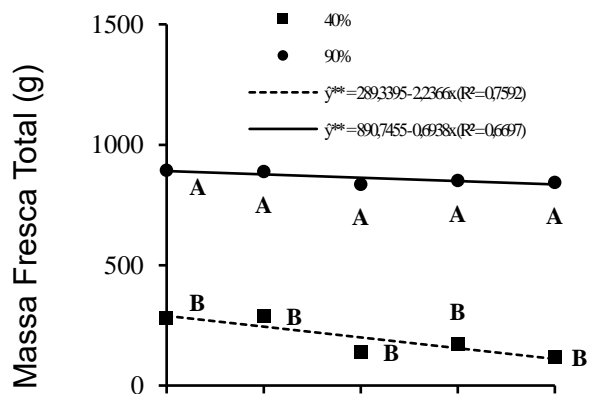


Figura 11 – Massa fresca (MFC, g) e massa seca do caule (MSC, g) em razão das concentrações de PBZ aplicadas no sistema radicular de mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), submetidas na fase pós-transplante a condição de 40% e 90% de capacidade de vaso.

A massa total, fresca (MFT) e seca (MST), diminuiu com o aumento do PBZ, tanto em 40% quanto em 90% de CAV (Figura 12). No entanto, em condição hídrica favorável, a MST apresentou um efeito não linear, com aumento em concentrações intermediárias. Esse padrão pode estar relacionado à redistribuição metabólica de assimilados e ao estímulo à formação de biomassa estrutural, ainda que o crescimento em altura tenha sido inibido (MAHESHWARI et al., 2022).



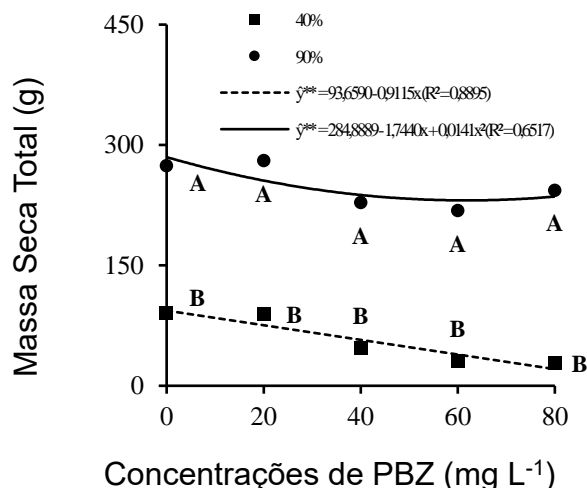


Figura 12 – Massa fresca total (MFT, g) e massa seca total (MST, g) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) sob aplicação radicular de PBZ e cultivo em vasos com 40% e 90% de capacidade de vaso.

A interação entre PBZ e CAV reforça que a resposta morfofisiológica depende do contexto ambiental. Sob estresse hídrico, os efeitos do regulador vegetal são acentuados, limitando a expansão foliar, a formação de ramos e a alocação de biomassa. Em contrapartida, em condições hídricas adequadas, concentrações moderadas de PBZ podem promover equilíbrio entre o controle do crescimento e a manutenção da produtividade. Estratégias de manejo que conciliem o uso do regulador com irrigação adequada podem melhorar a qualidade de mudas e aumentar sua resiliência em campo (FERNÁNDEZ et al., 2006; EL-METWALLY et al., 2022).

4.3. Parâmetros fisiológicos e metabólitos

Os parâmetros fisiológicos e metabólicos das mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) foram influenciados pelas concentrações de Paclobutrazol (PBZ), pela disponibilidade hídrica (CAV) e, em diversas variáveis, pela interação entre esses fatores (Tabelas 3 e 4). Os efeitos observados foram interpretados com base em respostas típicas do metabolismo vegetal sob diferentes regimes hídricos e estímulos hormonais, especialmente em espécies arbóreas.

Tabela 3 – Resumo da análise de variância do índice SPAD em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) tratadas com PBZ no sistema radicular, submetidas a condições de CAV de 40% e 90%, com avaliações aos 0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos.

FV	GL	Quadrados Médios					
		Índice SPAD					
		0 (x 10)	15 (x 10)	30 (x 10)	45 (x 10 ²)	75 (x 10)	90 (x 10)
BL	3	2,39 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,31 ^{ns}
PBZ (A)	4	0,38 ^{ns}	2,95 ^{**}	0,92 ^{ns}	0,20 ^{**}	1,49 ^{ns}	1,11 ^{ns}
CAV (B)	1	2,15 ^{ns}	0,12 ^{ns}	9,52 ^{**}	9,96 ^{**}	3,45 [*]	0,99 ^{ns}
A x B	4	2,29 ^{ns}	1,40 ^{ns}	2,82 ^{**}	0,56 ^{**}	3,19 [*]	0,69 ^{ns}
Resíduo	27	15,83	7,06	4,40	4,84	8,04	4,73
CV (%)		7,47	4,81	3,82	4,23	5,08	4,50
Média							
CAV 40%		54,00a	55,13a	--	--	--	48,78a
CAV 90%		52,53a	55,47a	--	--	--	47,78a

Onde: FV = Fonte de Variação; GL = Grau de Liberdade; ns = não significativo pelo teste F; * = significativo a 5% pelo teste F; ** = significativo a 1% pelo teste F.

Tabela 4 – Resumo da análise de variância dos parâmetros fisiológicos (TRA, Ψ_{w5h} , Ψ_{w12h} , $\Delta\Psi_w$) e metabólitos (AR, AST, amido) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), aos 90 dias após o início do manejo hídrico, em razão da aplicação radicular de PBZ e das condições de CAV (40% e 90%).

FV	GL	Quadrados Médios						
		TRA	Potencial Hídrico Foliar			Carboidratos		
			PH5H	PH12H	$\Delta\Psi_w$	AR	AST	Amido
BL	3	6,24 ^{ns}	0,005 ^{ns}	0,002 ^{ns}	0,008 ^{ns}	5,75*10 ^{-5*}	2,67*10 ^{-5ns}	2,82*10 ^{-5ns}
PBZ (A)	4	410,72 ^{**}	0,031 ^{**}	0,055 [*]	0,100 [*]	1,61*10 ^{-3**}	6,03*10 ^{-3**}	4,08*10 ^{-2**}
CAV (B)	1	613,17 [*]	0,059 ^{**}	0,031 ^{ns}	0,174 [*]	2,66*10 ^{-3**}	8,07*10 ^{-3**}	2,99*10 ^{-1**}
A x B	4	644,59 ^{**}	0,036 ^{**}	0,130 ^{**}	0,044 ^{ns}	3,17*10 ^{-3**}	3,12*10 ^{-4**}	2,86*10 ^{-2**}
Resíduo	27	83,58	0,004	0,017	0,026	1,36*10 ⁻⁵	4,27*10 ⁻⁵	4,78*10 ⁻⁵
CV (%)		11,72	13,44	12,58	28,47	3,25	4,02	3,84
Média								
CAV 40%		--	--	--	0,50b	--	--	--
CAV 90%		--	--	--	0,64a	--	--	--

Onde: FV = Fonte de Variação; GL = Grau de Liberdade; ns = não significativo pelo teste F; * = significativo a 5% pelo teste F; ** = significativo a 1% pelo teste F.

4.3.1. Índice SPAD

O índice SPAD, relacionado tanto à concentração de clorofila quanto ao conteúdo de nitrogênio foliar, foi mais sensível à CAV do que ao PBZ (Tabela 3; Figura 13). O efeito do regulador foi restrito às avaliações intermediárias do experimento.

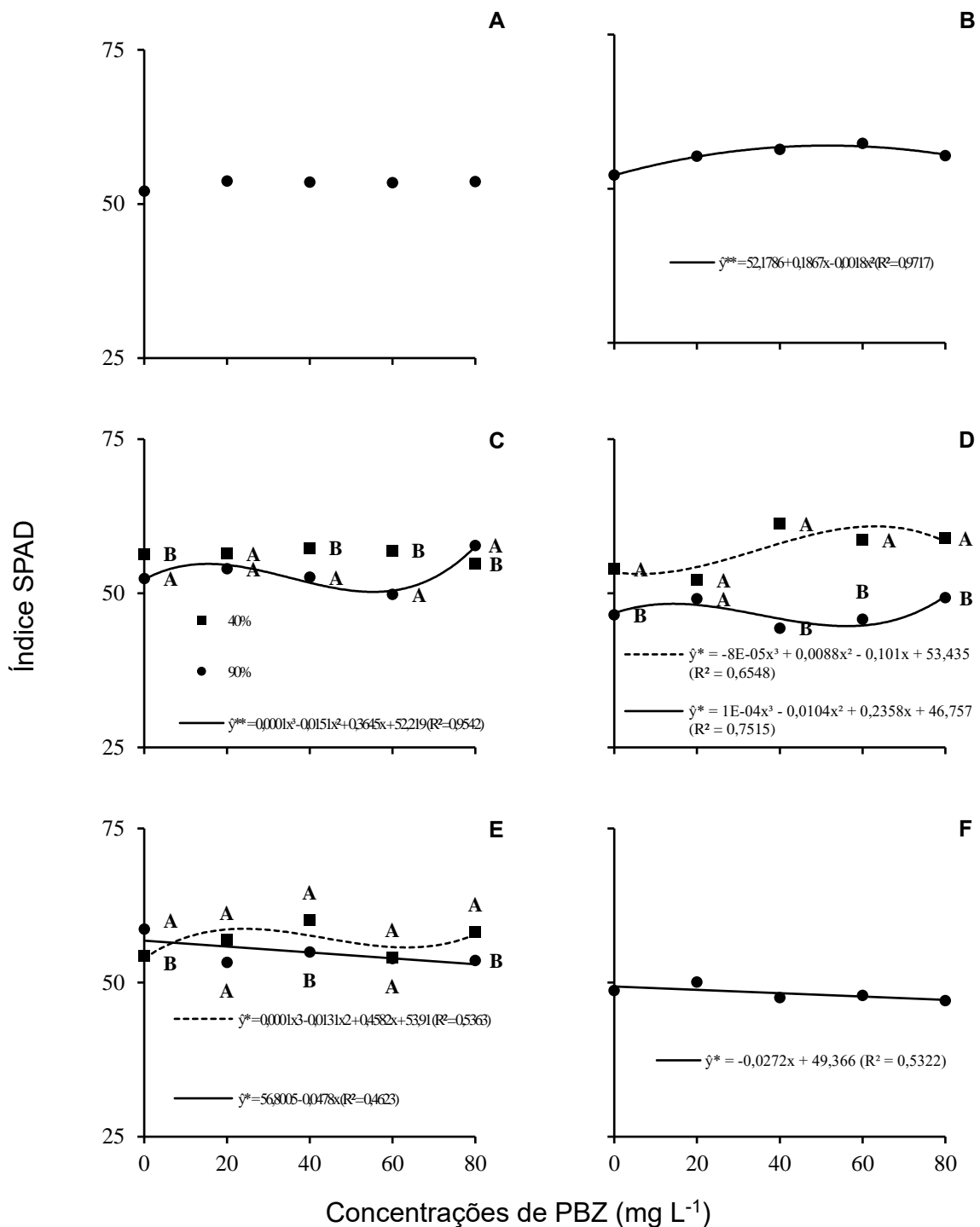


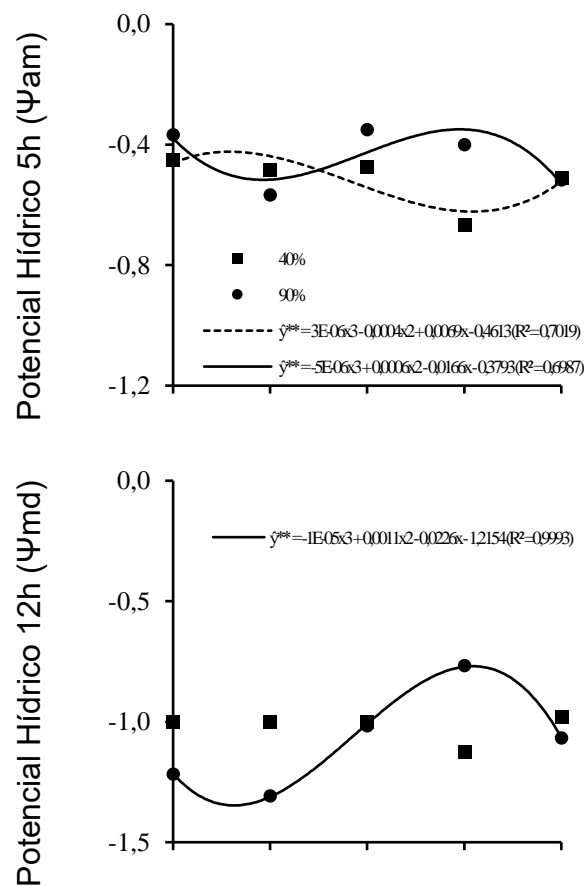
Figura 13 – Índice SPAD ao longo do tempo (0, 15, 30, 45, 75 e 90 dias após a implementação dos regimes hídricos) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%).

Nas concentrações moderadas de PBZ, sob 40% de CAV, observou-se aumento do SPAD. Esse efeito pode ser explicado pela inibição da ação do etileno, hormônio envolvido na senescência e na degradação da clorofila (RADEMACHER, 2000), promovendo maior estabilidade da estrutura fotossintética. Resultados semelhantes foram observados por Jaleel et al. (2007) em *Catharanthus roseus*.

Sob 90% de CAV, nas concentrações mais elevadas de PBZ, houve queda no índice SPAD, sugerindo redistribuição de nitrogênio ou limitação no desenvolvimento foliar, com menor expansão do tecido fotossintético (SHARMA et al., 2023). Essa resposta reforça que o SPAD reflete não apenas o conteúdo de clorofila, mas também a dinâmica do nitrogênio nas folhas, como discutido por Lichtenthaler e Buschmann (2001).

4.3.2. Potencial hídrico foliar (Ψ_w)

O potencial hídrico foliar variou conforme os horários de avaliação (5h e 12h), com valores mais negativos ao meio-dia, como esperado. A diferença entre esses dois momentos ($\Delta\Psi_w$), representando o gradiente entre absorção e transpiração, foi modulada pelas concentrações de PBZ (Tabela 4; Figura 14).



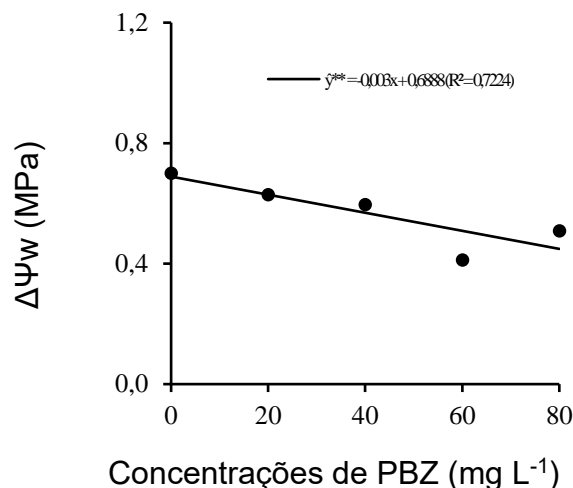


Figura 14 – Potencial hídrico foliar (Ψ_w) às 5h, 12h e a diferença ($\Delta\Psi_w$) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC 144), provenientes de aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e avaliadas aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%).

Com o aumento do PBZ, observou-se uma redução progressiva de $\Delta\Psi_w$, sugerindo menor variação entre absorção e perda de água ao longo do dia. Esse efeito indica menor mobilidade hídrica no xilema, que pode ser atribuída à ocorrência de embolias observadas em tratamentos com PBZ. Tais alterações estruturais afetam a condução da seiva bruta, restringindo o transporte de água mesmo com condutância estomática (G_s) e fotossíntese (A) elevadas.

Esse fenômeno, descrito anteriormente para espécies do gênero *Eucalyptus* (BRODRIBB et al., 2016; TYREE e SPERRY, 1989), pode explicar a desconexão entre as variáveis fisiológicas e o fluxo hídrico, sendo a embolia um dos principais mecanismos de desacoplamento hidráulico sob estresse e aplicação de reguladores vegetais.

4.3.3. Teor relativo de água (TRA)

O teor relativo de água (TRA) variou conforme as concentrações de PBZ e os níveis de CAV, com evidência de interação entre os fatores (Tabela 4; Figura 15). Em 40% de CAV, os maiores valores de TRA foram observados em concentrações intermediárias do regulador. Sob 90%, o aumento do TRA foi mais expressivo em concentrações elevadas.

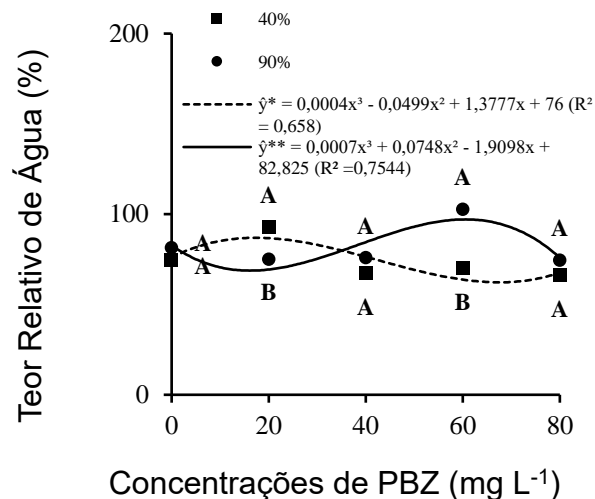


Figura 15 – Teor relativo de água (TRA) das folhas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), avaliado aos 90 dias após o início do manejo hídrico, em razão da aplicação radicular de PBZ e das capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%).

Esse efeito reforça o papel do PBZ como modulador do status hídrico, favorecendo a retenção de água nos tecidos foliares. Embora Gs e A tenham aumentado com PBZ, a elevação do TRA pode ser atribuída a ajustes estruturais nos tecidos, como reorganização do parênquima e aumento da espessura foliar (FERNÁNDEZ et al., 2006; HÜTSCH et al., 2023).

A reorganização anatômica, especialmente do parênquima paliçádico e lacunoso, pode contribuir para maior capacidade de armazenamento e distribuição hídrica, ampliando a resiliência da planta em face do estresse.

4.3.4. Trocas gasosas

As trocas gasosas foram influenciadas pela disponibilidade hídrica e pelas concentrações de PBZ (Tabela 5; Figuras 16A–16D). Em 40% de CAV, observou-se redução em Gs, A e E, reflexo típico da limitação hídrica que afeta tanto a entrada de CO₂ quanto a perda de água pela planta. Por sua vez, Ci foi maior nesse regime, indicando baixa assimilação de carbono mesmo com maior disponibilidade interna, possivelmente devido à menor atividade da carboxilação ou limitações anatômicas da folha (TARIN et al., 2024).

Tabela 5 – Resumo da análise de variância das variáveis de trocas gasosas foliares (*Tleaf*: temperatura foliar; *Ci*: concentração interna de CO₂; *E*: taxa de transpiração; *Gs*: condutância estomática ao vapor d'água; *A*: taxa de assimilação líquida de CO₂; *A/E*: eficiência instantânea do uso da água; *A/Ci*: eficiência de carboxilação) em *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), obtidas a partir de mudas submetidas à *drenching* das raízes em diferentes concentrações de Paclobutrazol (PBZ), submetidas na fase pós-transplântio a condições diferenciadas de capacidade de vaso (CAV: 40% e 90%) e da interação entre os fatores.

FV	GL	Quadrados Médios							
		<i>Tleaf</i>	<i>Gs</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>Ci</i>	<i>AE</i>	<i>Ags</i>	<i>ACi</i>
BL	3	9,90**	0,0009 ^{ns}	0,28*	34,4 ^{ns}	429,0 ^{ns}	288,6 [*]	8561,0 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
PBZ (A)	4	0,44 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,07 ^{ns}	76,9*	862,1*	31,3 ^{ns}	1783,7 ^{ns}	0,001*
CAV (B)	1	0,001 ^{ns}	0,041*	4,47*	2192,6*	32939,0*	59,5 ^{ns}	54399,0 [*]	0,0278*
A x B	4	0,98*	0,001 ^{ns}	0,07 ^{ns}	12,5 ^{ns}	392,1 ^{ns}	51,4 ^{ns}	87,06,0 ^{ns}	0,0002 ^{ns}
Resíduo	27	0,23	0,0006	0,08	19,9	264,6	67,2	10801,0	0,0002
CV (%)		1,7	41,4	35,7	25,6	4,7	53,6	32,5	26,4
Média									
CAV 40%		-	0,028b	0,44b	11,33b	364,2a	21,81a	356,7a	0,028b
CAV 90%		-	0,090a	1,11a	23,51a	315,5b	24,25a	283,0b	0,081a

Onde: FV = Fonte de Variação; GL = Grau de Liberdade; ns = não significativo pelo teste F; * = significativo a 5% pelo teste F; ** = significativo a 1% pelo teste F.

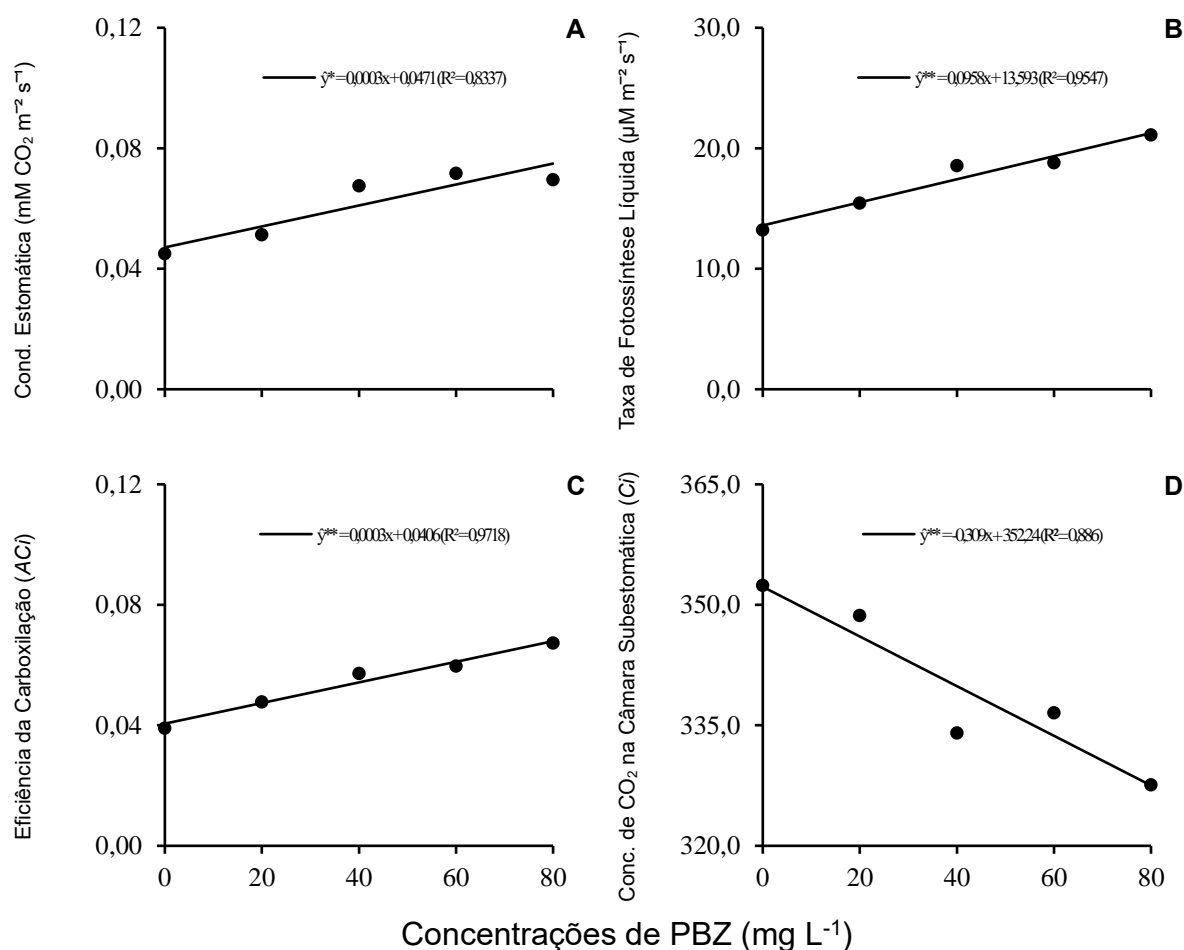


Figura 16 – Trocas gasosas em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) sob aplicação de PBZ e condições diferenciadas de CAV (40% e 90%): A) condutância estomática (*Gs*), B) taxa de fotossíntese líquida (*A*), C) eficiência de carboxilação (*A/Ci*) e D) concentração interna de CO₂ (*Ci*).

Com o aumento do PBZ, Gs, A e A/Ci aumentaram linearmente, enquanto Ci apresentou redução. Esses resultados sugerem melhora na eficiência do uso do carbono, especialmente sob 90% de CAV, em que o ambiente menos estressante potencializou o efeito do regulador. Estudos anteriores mostram que o PBZ pode melhorar a performance fotossintética ao modular a arquitetura foliar e otimizar a atividade de enzimas envolvidas na assimilação de carbono (DESTA e AMARE, 2021).

A eficiência de uso da água (EUA, A/E) não variou entre os regimes hídricos, permanecendo estável. No entanto, a eficiência intrínseca (A/g_s) foi superior em 40% de CAV, indicando que, mesmo sob limitação hídrica, a planta manteve uma boa relação entre assimilação e abertura estomática — um indicativo de ajuste fisiológico adaptativo.

A temperatura foliar (*T*_{leaf}) foi afetada pela interação entre os fatores, com menor temperatura sob 40% de CAV e concentrações intermediárias de PBZ (Figura 17). Embora esse padrão não tenha se correlacionado diretamente com Gs, a formação de aerênquimas lisógenos pode estar envolvida nesse processo. Essas estruturas, descritas por Chen et al. (2023), atuam como dissipadores térmicos, promovendo adaptação ao calor em condições de seca.

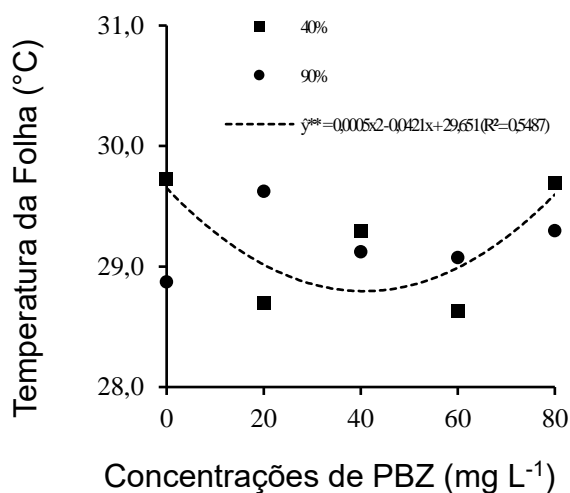


Figura 17 – Temperatura foliar (*T*_{leaf}, °C) aos 90 dias após o início do manejo hídrico (CAV de 40% e 90%) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) submetidas à aplicação radicular de PBZ.

4.3.5. Metabólitos: AR, AST e amido

Os metabólitos avaliados — AR, AST e amido — também foram modulados pelas concentrações de Paclobutrazol (PBZ), pela disponibilidade hídrica (CAV) e pela

interação entre esses fatores (Tabela 4). Essas alterações refletem ajustes no metabolismo energético das mudas de *Eucalyptus urophylla*, com implicações diretas sobre a tolerância ao estresse hídrico.

Os teores de açúcares redutores (AR) apresentaram efeito distinto entre os regimes hídricos. Sob 40% de CAV, observou-se aumento contínuo dos AR com o incremento das concentrações de PBZ. Já sob 90% de CAV, os teores aumentaram até concentrações intermediárias ($\approx 37,8 \text{ mg L}^{-1}$), seguidos de declínio nas maiores concentrações (Figura 18). Esses resultados sugerem que, sob estresse hídrico, o acúmulo de AR atua como mecanismo osmoprotetor, auxiliando na manutenção da homeostase celular e no turgor (CHAVES et al., 2009; LEMOINE et al., 2013). Em condições favoráveis, o acúmulo de AR ocorre de forma regulada e tende a ser revertido com o restabelecimento do balanço metabólico (OLIVEIRA et al., 2013; DESTA e AMARE, 2021).

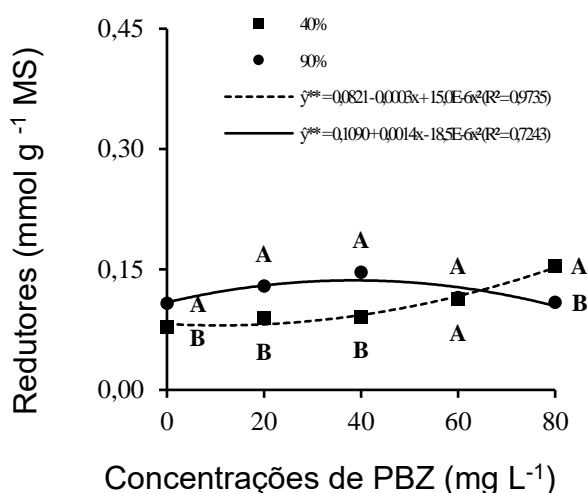


Figura 18 – Teores de açúcares redutores (AR) nas folhas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) submetidas à aplicação de PBZ e cultivadas sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%).

Os teores de açúcares solúveis totais (AST) apresentaram tendência decrescente com o aumento das concentrações de PBZ, independentemente da CAV (Figura 19). Essa redução pode refletir um redirecionamento de assimilados para compostos de maior complexidade estrutural ou para formas de armazenamento menos móveis osmoticamente, como o amido ou compostos fenólicos (ALMEIDA et al., 2016; HAMEED e FAROOQ, 2021). Em situações de estresse, esse efeito pode representar uma estratégia de conservação energética e estrutural da planta.

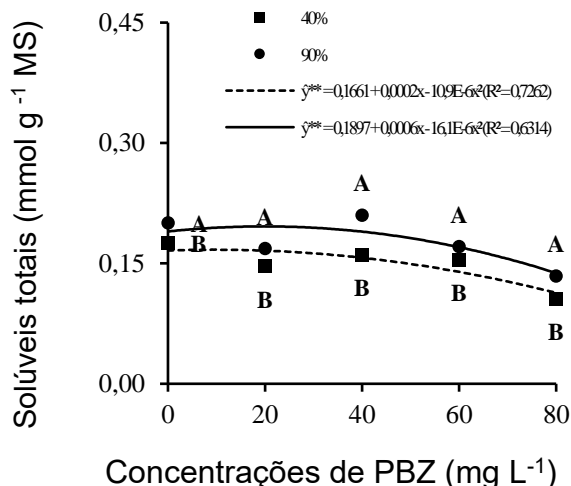


Figura 19 – Teores de açúcares solúveis totais (AST) nas folhas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) em razão das concentrações de PBZ e das condições de disponibilidade hídrica (CAV: 40% e 90%).

O teor de amido apresentou padrão de resposta contrastante entre os tratamentos (Figura 20). Sob 90% de CAV, o amido foi reduzido com o aumento de PBZ, indicando mobilização da reserva para suprir demandas energéticas associadas à fotossíntese, crescimento e adaptação anatômica (FERNÁNDEZ et al., 2006; GALVEZ et al., 2011). Por sua vez, sob 40% de CAV, os teores de amido se mantiveram estáveis, sugerindo uma resposta conservativa, na qual a planta opta por manter suas reservas energéticas em virtude da limitação hídrica, priorizando a sobrevivência em vez do do crescimento (OLIVEIRA et al., 2013; MAHESHWARI et al., 2022).

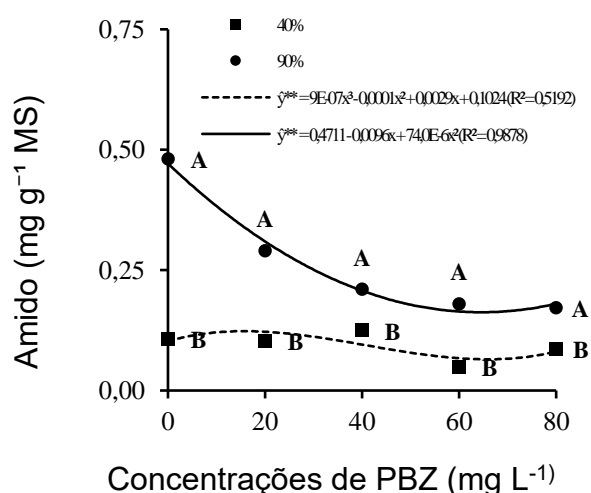


Figura 20 – Teores de amido nas folhas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) em razão das concentrações de PBZ e da CAV (40% e 90%), aos 90 dias após o início do manejo hídrico.

De forma geral, os resultados apontam para efeitos multifacetados do PBZ sobre o metabolismo primário, modulados pela disponibilidade de água. Em ambiente favorável (90% de CAV), o PBZ contribuiu para maior assimilação de carbono, acúmulo regulado de açúcares e mobilização do amido, favorecendo o desempenho fisiológico. Sob 40% de CAV, foram evidenciadas estratégias de tolerância ao estresse, como o acúmulo de açúcares redutores e a manutenção das reservas, visando preservar a integridade celular. Em trabalhos com *Eucalyptus camaldulensis* (NAVARRO et al., 2007) e *Acacia mangium* (SOUZA et al., 2015) foram verificadas respostas similares.

4.4. Alterações anatômicas

As características anatômicas do caule e das raízes de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) foram influenciadas pelas concentrações de Paclobutrazol (PBZ), pela disponibilidade hídrica (CAV) e pela interação entre esses fatores, com exceção da faixa cambial das raízes (Tabela 6). As variáveis anatômicas analisadas incluíram o diâmetro dos vasos do xilema (DIAV), a espessura do tecido xilemático (ESPX), a faixa cambial (FAIC), a densidade de vasos (DENV) e, nas raízes, também a espessura do tecido floemático (ESPF).

Tabela 6 – Resumo da análise de variância das variáveis anatômicas do caule e raiz (DIAV, ESPX, FAIC, DENV e ESPF – apenas raízes) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144), aos 90 dias após o início do manejo hídrico (CAV: 40% e 90%), sob aplicação radicular de PBZ.

FV	GL	Quadrados Médios								
		Caule				Raiz				
		DIAV (x 10)	ESPX (x 10 ⁵)	FAIC (x 10 ³)	DENV (x 10 ²)	DIAV (x 10)	ESPX (x 10 ⁵)	FAIC (x 10 ³)	ESPF (x 10 ⁻⁵)	DENV (x 10 ²)
BL	3	1,6 ^{ns}	0,42*	0,1 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,05*	0,23 ^{ns}
PBZ (A)	4	8,3**	0,99**	2,4**	9,6**	22,4**	4,82**	0,79**	0,42**	0,22**
CAV (B)	1	9,7**	9,61**	0,9*	15,1**	30,1**	0,13 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,81**	0,05 ^{ns}
A x B	4	2,8*	0,92**	4,2**	14,3**	18,3**	0,35**	0,08 ^{ns}	0,33**	0,06**
Resíduo	27	0,9	0,09	0,1	0,52	0,76	0,07	0,09	0,02	0,01
CV (%)		8,01	18,71	15,91	10,46	4,42	10,79	14,08	8,88	9,73
Média										
CAV 40%		--	--	--	--	--	--	70,46a	--	--
CAV 90%		--	--	--	--	--	--	65,05a	--	--

Onde: FV = Fonte de Variação; GL = Grau de Liberdade; ns = não significativo pelo teste F; * = significativo a 5% pelo teste F; ** = significativo a 1% pelo teste F.

4.4.1. Caule

No caule, o PBZ provocou alterações estruturais associadas à segurança hidráulica e à adaptação ao estresse hídrico.

O diâmetro dos vasos (DIAV) foi reduzido progressivamente com o aumento das concentrações de PBZ sob 40% de CAV (Figuras 21A e 22), o que indica uma estratégia de redução da vulnerabilidade à embolia. Vasos mais estreitos são menos propensos à cavitação, característica importante sob déficit hídrico (RODRIGUES et al., 2016; KERET et al., 2024). Sob 90% de CAV, os valores foram mais estáveis, sugerindo menor pressão seletiva por segurança condutiva.

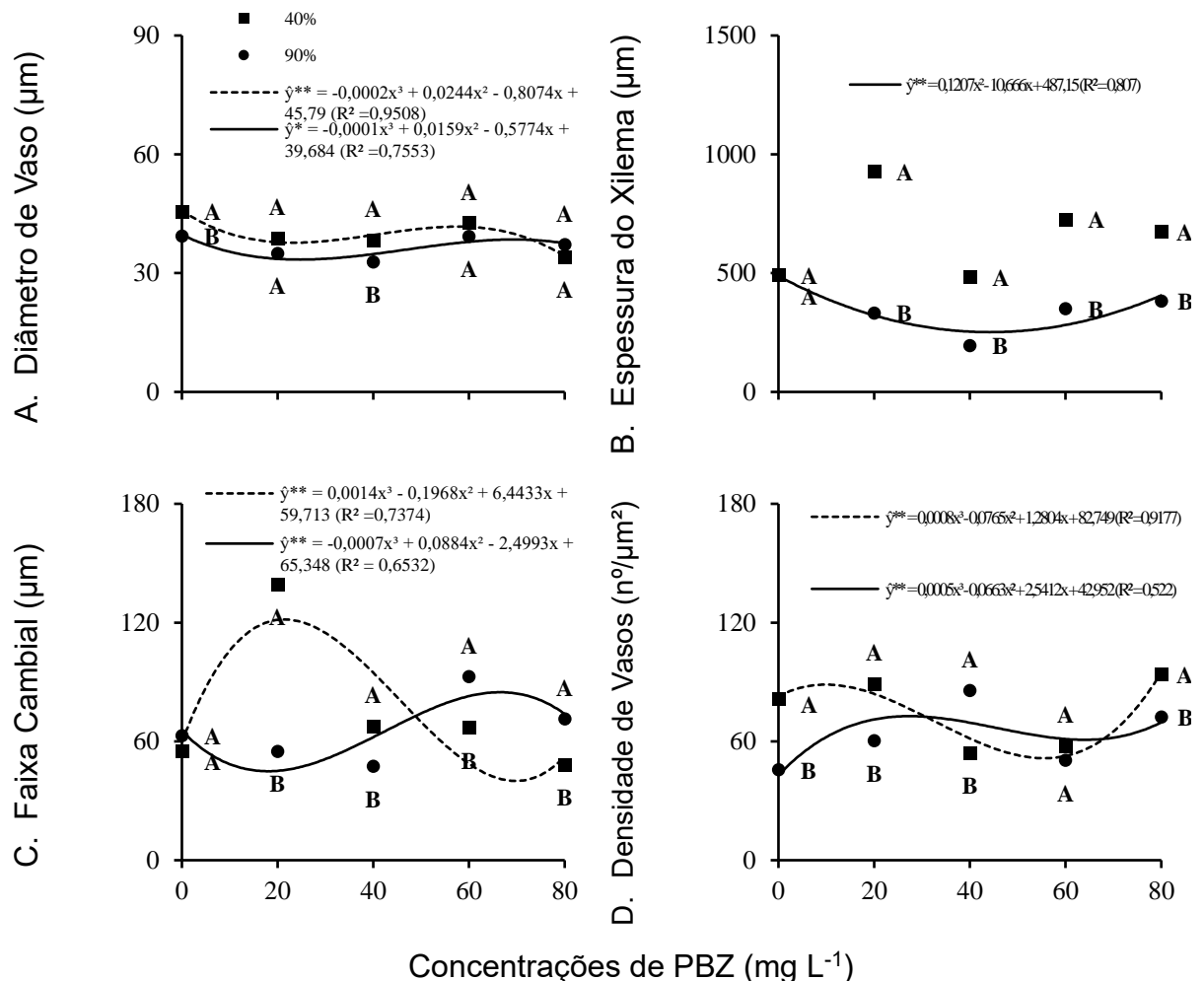


Figura 21 – Variação das variáveis anatômicas do caule (DIAV, ESPX, FAIC e DENV) em *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) tratados com PBZ via radicular e cultivados sob CAV de 40% e 90%.

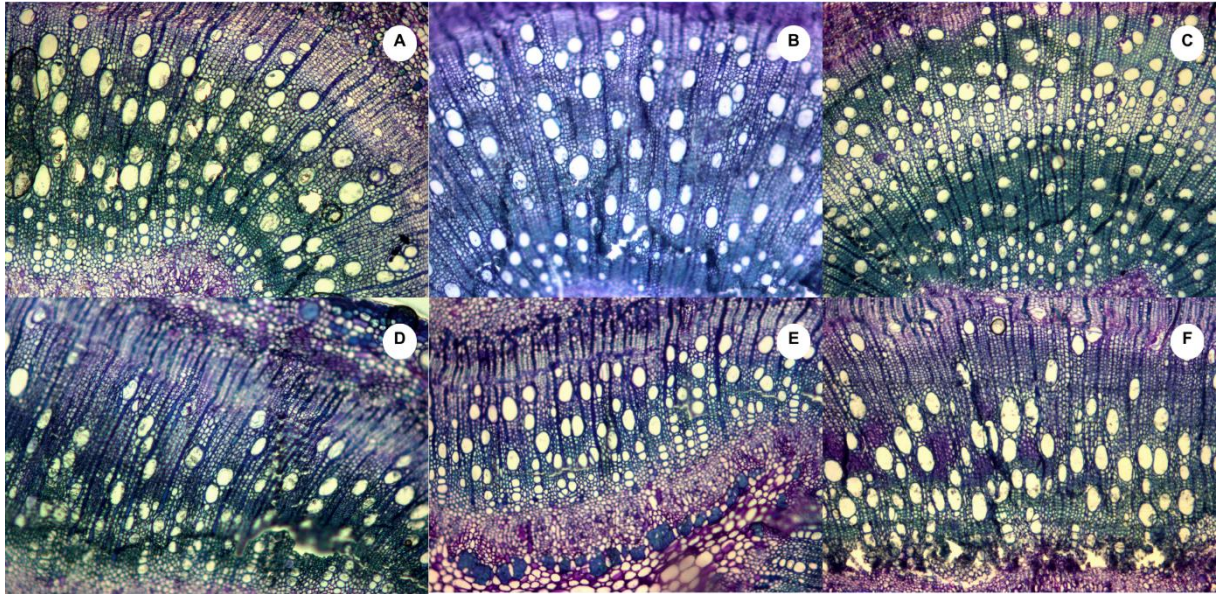


Figura 22 – Imagens histológicas do xilema do caule de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC 144), aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, obtidas a partir de mudas submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%). Tratamentos: A) Testemunha 40%; B) 40 mg L⁻¹ 40%; C) 80 mg L⁻¹ 40%; D) Testemunha 90%; E) 40 mg L⁻¹ 90%; F) 80 mg L⁻¹ 90%. Tamanho das imagens: 200 µm.

A espessura do tecido xilemático (ESPX) aumentou significativamente sob 40% de CAV, com destaque para as concentrações intermediárias de PBZ (Figura 21B e 22). Esse espessamento é compatível com a deposição de lignina e reforço da parede celular, proporcionando maior resistência mecânica e estabilidade hidráulica (PAL et al., 2016). Sob boa disponibilidade hídrica (90%), no entanto, a espessura foi inferior à testemunha em quase todas as concentrações.

A faixa cambial (FAIC) apresentou padrão oscilatório (Figura 21C). Sob 40% de CAV, houve ampliação com 20 mg L⁻¹ e redução posterior, indicando estímulo inicial à atividade meristemática mesmo sob estresse. Em 90%, observou-se redução até 40 mg L⁻¹, seguida de discreta recuperação. A atuação do PBZ na modulação cambial está ligada à inibição das giberelinas, favorecendo diferenciações vasculares adaptativas (ALONI, 2013; TEIXEIRA et al., 2019).

A densidade de vasos (DENV) do caule foi sensível à interação entre PBZ e CAV (Figura 21D e 22). Em 40%, observou-se aumento inicial com 20 mg L⁻¹, redução intermediária e recuperação em concentrações mais elevadas. Já em 90%, o padrão foi de elevação até 40 mg L⁻¹, com queda e nova retomada posterior. Esse efeito pode refletir uma reorganização da arquitetura vascular para manter a funcionalidade do xilema sob variações ambientais. O aumento do parênquima vascular observado nas análises histológicas pode estar relacionado a esse ajuste, atuando como matriz de

suporte e reserva hídrica temporária (VON ARX et al., 2016; FERNANDEZ et al., 2019).

4.4.2. Raízes

Nas raízes, o efeito anatômico das variáveis seguiu padrões distintos, compatíveis com a função primária de absorção e reserva.

O diâmetro dos vasos (DIAV) aumentou com o PBZ sob 90% de CAV (Figura 23A e 24), sugerindo favorecimento da condutividade em ambiente não limitante. Em contrapartida, sob 40% de CAV, os diâmetros foram menores. Trata-se de estratégia comum em condições de seca para evitar cavitação (CHEN et al., 2023; BRODRIBB et al., 2016).

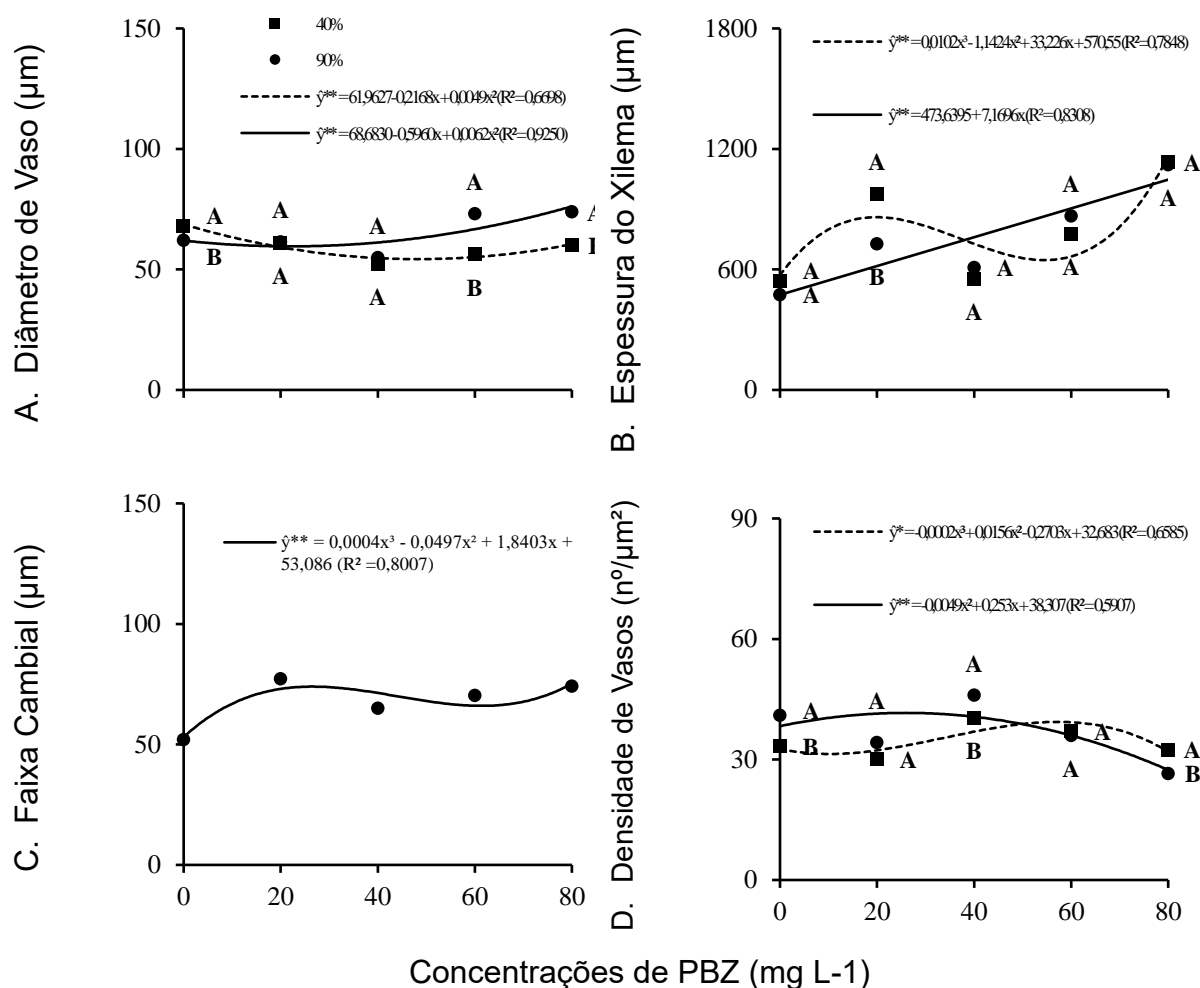


Figura 23 – Variação das variáveis anatômicas das raízes (DIAV, ESPX, FAIC e DENV) de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) sob aplicação de PBZ e condições de CAV de 40% e 90%.

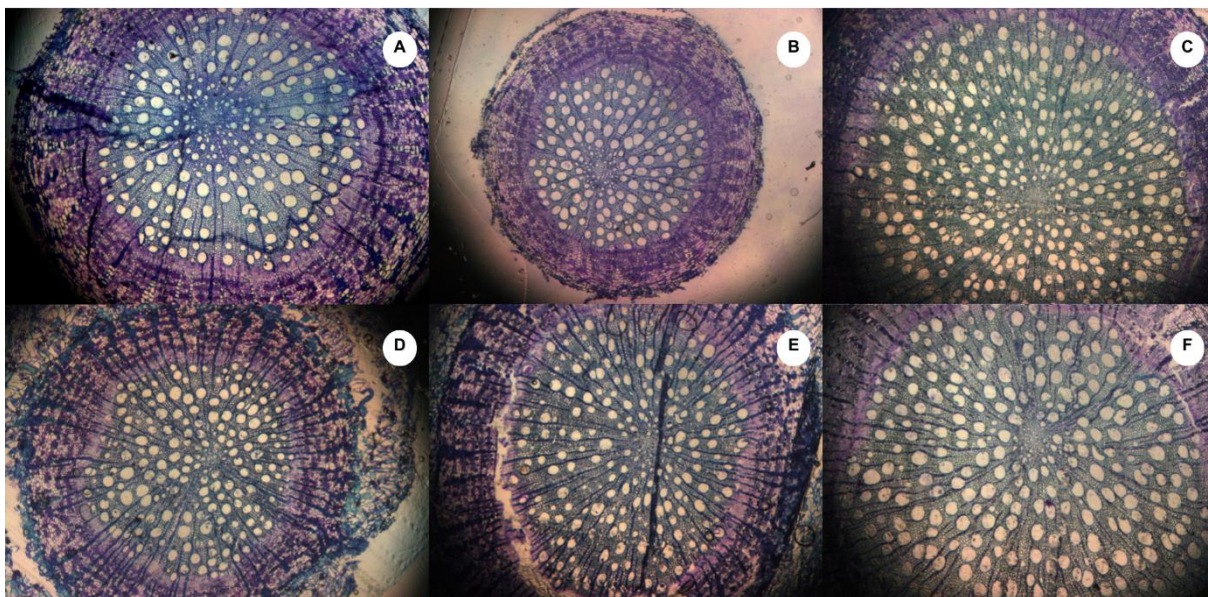


Figura 24 – Imagens histológicas do xilema das raízes de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC 144), aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, obtidas a partir de mudas submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob diferentes capacidades de vaso (CAV: 40% e 90%). Tratamentos: A) Testemunha 40%; B) 40 mg L⁻¹ 40%; C) 80 mg L⁻¹ 40%; D) Testemunha 90%; E) 40 mg L⁻¹ 90%; F) 80 mg L⁻¹ 90%. Tamanho das imagens: 500 µm.

A espessura do tecido xilemático (ESPX) apresentou efeito crescente com o aumento do PBZ em 90%, enquanto sob 40% o espessamento ocorreu apenas em concentrações intermediárias (Figura 23B e 24). O PBZ pode promover esse espessamento por ação direta no meristema vascular, resultando em maior robustez estrutural (DESTA e AMARE, 2021).

A faixa cambial (FAIC) nas raízes mostrou-se estável em quase todos os tratamentos (Figura 23C), com apenas discreto aumento em 20 mg L⁻¹. Esse resultado aponta menor sensibilidade da raiz à ação do regulador nesse aspecto, o que pode estar relacionado à menor plasticidade do câmbio radicular em comparação ao do caule.

A densidade de vasos (DENV) foi fortemente influenciada pela concentração de PBZ, especialmente sob 40% de CAV, com aumento até 40 mg L⁻¹ e redução posterior (Figura 23D e 24). Em 90%, o pico ocorreu em concentrações mais baixas. A elevação da DENV pode ser entendida como resposta compensatória à limitação hídrica, favorecendo a manutenção da condutividade (KUMAR, 2023). O aumento do parênquima nas raízes tratadas com PBZ pode estar relacionado a essa reorganização, promovendo maior capacidade de retenção hídrica (HÜTSCH et al., 2023).

A espessura do tecido floemático (ESPF) variou com os tratamentos (Figura 25). Sob 40% de CAV, houve aumento até 20 mg L⁻¹, seguido de queda e nova elevação. Sob 90%, o padrão foi crescente (Figura 26). A modulação do floema pelo PBZ pode ser explicada pela redistribuição hormonal promovida pelo regulador, que favorece a diferenciação de elementos crivados e a manutenção do transporte de assimilados sob estresse (ALONI, 2013; MAHESHWARI et al., 2022).

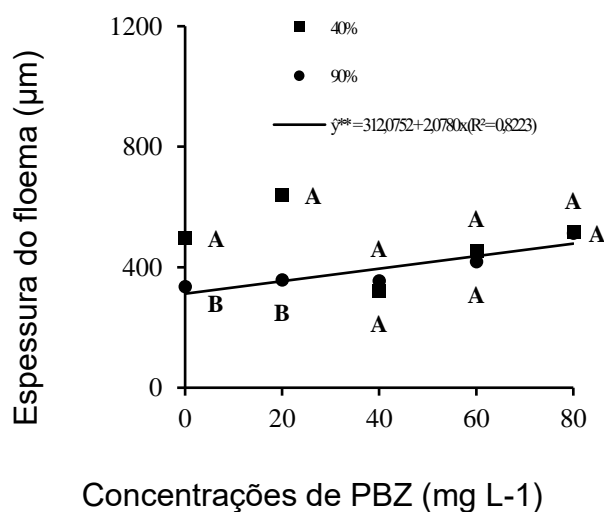


Figura 25 – Espessura do tecido floemático (ESPF, µm) nas raízes de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) submetidas à aplicação de PBZ e a diferentes CAV (40% e 90%).

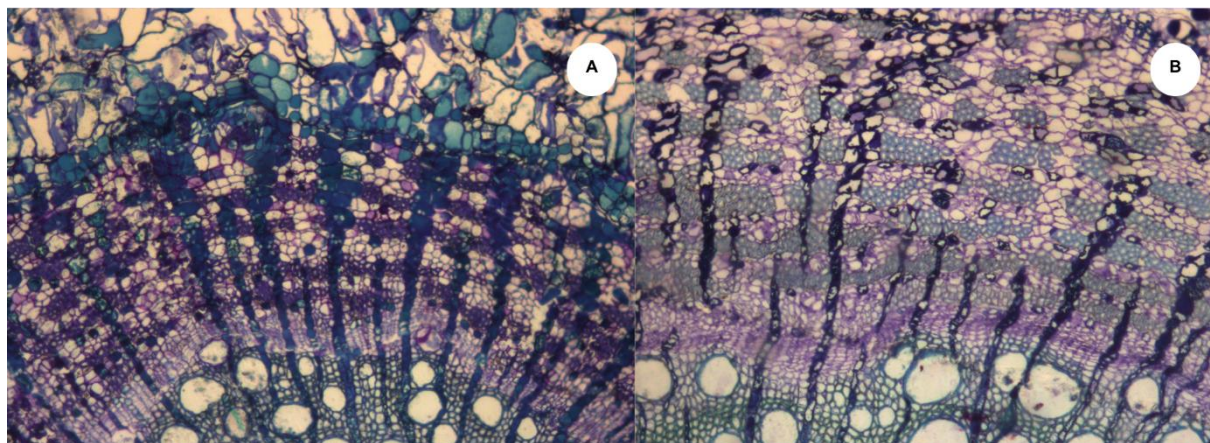


Figura 26 – Imagens histológicas do floema das raízes de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC 144), aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, obtidas a partir de mudas submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob condição de 90% de capacidade de vaso (CAV). Tratamentos: A) Testemunha 90%; B) 80 mg L⁻¹ 90%. Tamanho das imagens: 200 µm.

4.4.3. Conteúdo hídrico e tecidos associados

O conteúdo relativo de água (ÁGUA) apresentou tendência de aumento com a elevação das concentrações de PBZ, especialmente sob 90% de CAV (Figura 27). Em 40 e 80 mg L⁻¹, as diferenças entre os regimes foram mais pronunciadas. Essa resposta pode estar associada ao aumento de tecidos de armazenamento hídrico, como o parênquima e as fibras gelatinosas.

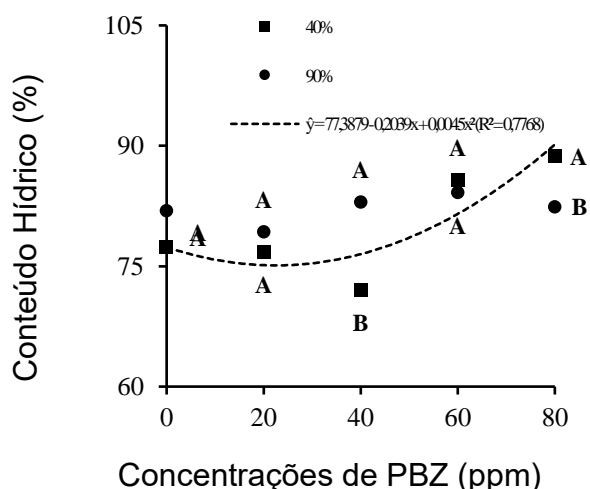


Figura 27 – Conteúdo relativo de água (%) em *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) sob diferentes concentrações de PBZ e regimes hídricos (CAV: 40% e 90%).

Essas estruturas anatômicas, comuns em *Eucalyptus spp.*, desempenham papel fundamental na manutenção do status hídrico sob estresse (VON ARX et al., 2016; FERNANDEZ et al., 2019). O aumento do parênquima vascular permite o acúmulo temporário de água e fotoassimilados, funcionando como reserva funcional. Já as fibras gelatinosas conferem resistência estrutural ao xilema e ajudam a conservar a integridade funcional em situações adversas (Figura 28). A aplicação de PBZ, ao modular a diferenciação desses tecidos, pode contribuir para a plasticidade anatômica necessária à resiliência de *Eucalyptus urophylla* em ambientes de baixa disponibilidade hídrica (PITA-BARBOSA et al., 2023; RADEMACHER, 2016).

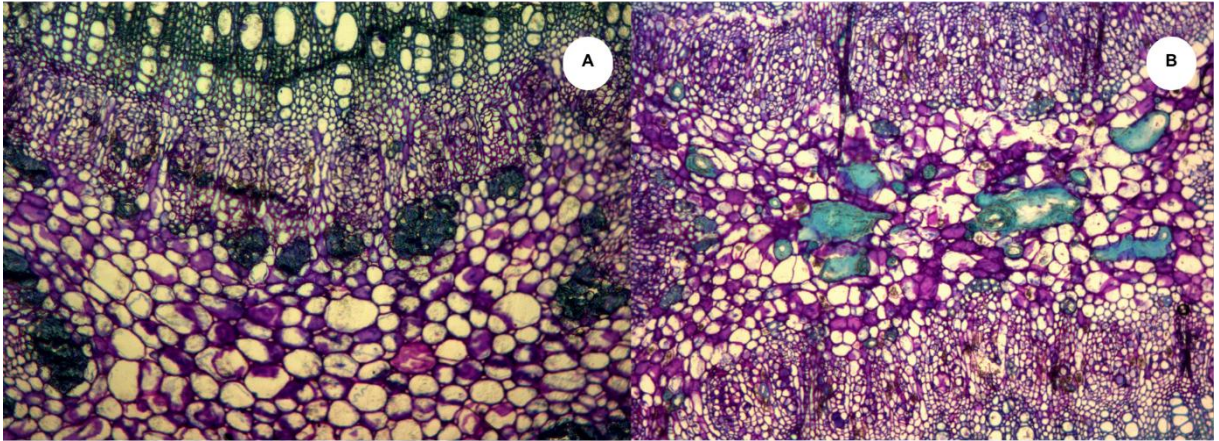


Figura 28 – Imagens histológicas de fibras gelatinosas no caule de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC 144), aos 90 dias após a implementação dos regimes hídricos, obtidas a partir de mudas submetidas à aplicação radicular de paclobutrazol (PBZ) e cultivadas sob condição de 90% de capacidade de vaso (CAV). Tratamentos: A) Testemunha 90%; B) 80 mg L⁻¹ 90%. Tamanho das imagens: 200 µm.

5. CONCLUSÕES

O *drenching* das raízes com Paclobutrazol (PBZ) em mudas de *Eucalyptus urophylla* (AEC 144) modulou a morfofisiologia, anatomia e metabolismo em plantas submetidas a diferentes níveis de disponibilidade hídrica.

Em condição de 90% da capacidade de vaso (CAV), o PBZ promoveu ajustes no crescimento e na anatomia vascular, sem alterações expressivas da biomassa, fotossíntese ou conteúdo hídrico, indicando potencial de uso como ferramenta de manejo em viveiros. Para plantas mantidas sob 40% de CAV, os efeitos inibitórios foram intensificados, com redução no crescimento, nas trocas gasosas e na alocação de biomassa, mesmo diante de mecanismos compensatórios como aumento de parênquima e açúcares redutores.

O manejo com PBZ depende do regime hídrico adotado. Em condições adequadas de irrigação, o regulador pode ser empregado para controle do crescimento sem comprometer a qualidade das mudas. No entanto, em ambientes com restrição hídrica acentuada, sua aplicação deve ser criteriosa, devido à limitação do desempenho fisiológico e produtivo das plantas.

REFERÊNCIAS

ALLAN, R. P.; BARLOW, M.; BYRNE, M. P.; CHERCHI, A.; DOUVILLE, H.; FOWLER, H. J.; GAN, T. Y.; PENDERGRASS, A. G.; ROSENFELD, D.; SWANN, A. L. S.; WILCOX, L. J.; ZOLINA, O. Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1472, p. 49–75, 2020.

ALMEIDA, O. M.; MELO, H. C.; PORTES, T. A. Growth and yield of the common bean in response to combined application of nitrogen and paclobutrazol. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 1, p. 127–132, 2016.

ALONI, R. Role of hormones in controlling vascular differentiation and the mechanism of lateral root initiation. **Planta**, v. 238, n. 5, p. 819–830, 2013.

ANDRADE, E. N. **Manual do Plantador de *Eucalyptus***. São Paulo: Rothschild, 1911, 339 p.

ANDREU-COLL, L. et al. Regulated deficit irrigation perspectives for water efficiency in apricot cultivation: a review. **Agronomy**, v. 14, n. 6, p. 1219, 2024.

ASHOKAN, P. K.; CHANEY, W. R.; PREMACHANDRA, G. S. Soil applied paclobutrazol affects leaf water relations and growth of American elm (*Ulmus americana* L.) seedlings. **Journal of Environmental Horticulture**, v. 19, n. 3, p. 119–122, 1995.

ASHU, A. B.; LEE, S.-II. Assessing climate change effects on water balance in a monsoon watershed. **Water**, v. 12, p. 2564, 2020.

BANINASAB, B.; GHOBADI, C. Influence of paclobutrazol and application methods on high-temperature stress injury in cucumber seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 30, p. 213–219, 2011.

BAROTTO, A. J.; FERNÁNDEZ, M. E.; GYENGE, J.; MEIER, A. M.; MEYRA, A.; MONTEOLIVA, S. First insights into the functional role of vasicentric tracheids and parenchyma in *Eucalyptus* species with solitary vessels: do they contribute to xylem efficiency or safety? **Tree Physiology**, v. 36, p. 1485–1497, 2016.

BARTON, C. V.; MONTAGU, K. D. Effect of spacing and water availability on root: shoot ratio in *Eucalyptus camaldulensis*. **Forest Ecology and Management**, v. 221, n. 1–3, p. 52–62, 2006.

BAWEJA, P.; KUMAR, G. Abiotic stress in plants: an overview. In: SHANKAR, A.; DEVI, R. (Eds.). **Plant Stress Biology: Strategies and Trends**. Singapore: Springer, 2020, p. 1–15.

BEAUCLAIRE, Q.; VANDEN BRANDE, F.; LONGDOZ, B. Key role played by mesophyll conductance in limiting carbon assimilation and transpiration of potato under soil water stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1500624, 2024.

BIELACH, A.; HRTYAN, M.; TOGNETTI, V. B. Plants under stress: involvement of auxin and cytokinin. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 18, n. 7, p. 1427, 2017.

BOUGHALLEB, F.; ABDELLAOUI, R.; HADDED, Z.; NEFFATI, M. Anatomical adaptations of the desert species *Stipa lagascae* against drought stress. **Biologia**, v. 70, p. 1042–1052, 2015.

BROCKERHOFF, E. G.; JACTEL, H.; PARROTTA, J. A.; FERRAZ, S. F. B. Role of Eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 43–50, 2013.

BRODRIBB, T. J.; HOLBROOK, N. M. Stomatal protection against hydraulic failure: a comparison of coexisting ferns and angiosperms. **New Phytologist**, v. 162, n. 3, p. 663–670, 2004.

BRUNNER, I.; HERZOG, C.; DAWES, M. A.; AREND, M.; SPERISEN, C. How tree roots respond to drought. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 547, 2015.

BUTRINOWSKI, R. T.; BUTRINOWSKI, I. T.; DOS SANTOS, E. L.; PICOLOTTO, P. R.; PICOLOTTO, R. A.; SANTOS, R. F. Disponibilidade hídrica no desenvolvimento inicial de mudas de *Eucalyptus grandis* em ambiente protegido. **Acta Iguazu**, v. 2, n. 3, p. 84-93, 2013.

CARLQUIST, S. Vasicentric tracheids as a drought survival mechanism in the woody flora of southern California and similar regions; review of vasicentric tracheids. **Aliso: A Journal of Systematic and Floristic Botany**, v. 11, p. 5, 1985.

CASTAGNERI, D.; REGEV, L.; BOARETTO, E.; CARRER, M. Xylem anatomical traits reveal different strategies of two Mediterranean oaks to cope with drought and warming. **Environmental and Experimental Botany**, v. 133, p. 128–138, 2017.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v. 103, n. 4, p. 551–560, 2009.

CHEN, S. et al. Parallels between drought and flooding: an integrated framework for plant eco-physiological responses to water stress. **Plant-Environment Interactions**, v. 4, n. 4, p. 175–187, 2023.

CHOAT, B.; JANSEN, S.; BRODRIBB, T. J.; COCHARD, H.; DELZON, S.; BHASKAR, R.; BUCCI, S. J.; FEILD, T. S.; GLEASON, S. M.; HACKE, U. G.; JACOBSEN, A. L.; LENS, F.; MAHERALI, H.; VILALTA, J. M.; MAYR, S.; MENCUCCINI, M.; MITCHELL, P. J.; NARDINI, A.; PITTERMANN, J.; PRATT, R. B.; SPERRY, J. S.; WESTOBY, M.; WRIGHT, I. J.; ZANNE, A. E. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. **Nature**, v. 491, n. 7426, p. 752–755, 2012.

COCHARD, H.; LEMOINE, D.; DREYER, E. The effects of acclimation to sunlight on the xylem vulnerability to embolism in *Fagus sylvatica* L. **Plant, Cell and Environment**, v. 22, n. 1, p. 101–108, 1999.

COSTA, J. R. S.; MACIEL, J. L. M.; SILVA, M. R.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; GUILLEMOT, J. O manejo silvicultural não afeta a tolerância à seca de genótipos comerciais de *Eucalyptus spp.* **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, 2023.

CUNHA, D. V. P. **Crescimento inicial de clones de *Eucalyptus urophylla* submetidos à aplicação de paclobutrazol e diferentes regimes hídricos**. Vitória da Conquista – BA: UESB, 2016. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

CUNHA, F. L.; GONÇALVES, A. F. A.; BASÍLIO, J. J. N.; DE SOUZA, C. R.; CAMPOE, O. C. Padrões de fluxo e particionamento de C do clone *Eucalyptus urophylla* em diferentes gradientes climáticos no Brasil. **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, 2023.

DAVIS, T. D.; SANKHLA, N.; WALSER, R. H.; UPADHYAYA, A. Promotion of adventitious root formation on cuttings by paclobutrazol. **HortScience**, v. 20, n. 3, p. 883–884, 1985.

DE ARAÚJO, W. C.; ESQUERRE, K. P. O.; SAHIN, O. Building a system dynamics model to support water management: a case study of the semiarid region in the Brazilian Northeast. **Water**, v. 11, p. 2513, 2019.

DESTA, B.; AMARE, G. Paclobutrazol as a plant growth regulator. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 8, p. 1–15, 2021.

DOMAGALSKA, M. A.; LEYSER, O. Signal integration in the control of shoot branching. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 12, n. 4, p. 211–221, 2011.

DWIVEDI, S. K.; SINGH, V. P.; SINGH, G. P.; ARORA, A. J. A. Y. Combined effect of cytokinin, paclobutrazol and ascorbic acid on nitrogen metabolism and yield of wheat

(*Triticum aestivum* L.) under water deficit stress condition. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 3–4, p. 259–267, 2012.

ELANCHEZHIAN, R.; HARIS, A. A.; KUMAR, S.; SINGH, S. S. Positive impact of paclobutrazol on gas exchange, chlorophyll fluorescence and yield parameters under submergence stress in rice. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 20, p. 111–115, 2015.

EL–METWALLY, I.; GERIES, L.; SAUDY, H. Interactive effect of soil mulching and irrigation regime on yield, irrigation water use efficiency and weeds of trickle–irrigated onion. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 8, p. 1103–1116, 2022.

EZIZ, A.; YAN, Z.; TIAN, D.; HAN, W.; TANG, Z.; FANG, J. Drought effect on plant biomass allocation: a meta-analysis. **Ecology and Evolution**, v. 7, n. 24, p. 11002–11010, 2017.

FAVREAU, B.; DENIS, M.; PLOYET, R.; MOUNET, F.; SILVA, H. P.; FRANCESCHINI, L.; LACLAU, J. P.; LABATE, C.; CARRER, H. Distinct leaf transcriptomic response of water deficient *Eucalyptus grandis* submitted to potassium and sodium fertilization. **PLoS ONE**, v. 14, e0218528, 2019.

FELIPPE, D.; NAVROSKI, M. C.; AGUIAR, N. S.; PEREIRA, M. O.; MORAES, C.; AMARAL, M. Crescimento, sobrevivência e trocas gasosas de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden submetidas a regimes de irrigação e aplicação de hidrogel. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, v. 17, n. 40, p. 11–20, 2020.

FENG, W.; LINDNER, H.; ROBBINS, N. E.; DINNENY, J. R. Growing out of stress: the role of cell- and organ-scale growth control in plant water-stress responses. **The Plant Cell**, v. 28, n. 8, p. 1769–1782, 2016.

FERNÁNDEZ, J. A.; BALENZATEGUI, L.; BANON, S.; FRANCO, J. A. Induction of drought tolerance by paclobutrazol and irrigation deficit in *Phillyrea angustifolia* during the nursery period. **Scientia Horticulturae**, v. 107, n. 3, p. 277–283, 2006.

FLETCHER, R. A.; GILLEY, A.; SANKHLA, N.; DAVIS, T. D. Triazoles as plant growth regulators and stress protectants. **Horticultural Reviews**, v. 24, p. 55–138, 2010.

FLEXAS, J.; SCOFFONI, C.; GAGO, J.; SACK, L. Leaf mesophyll conductance and leaf hydraulic conductance: an introduction to their measurement and coordination. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 13, p. 3965–3981, 2013.

GALVEZ, D. A.; LANDHÄUSSER, S. M.; TYREE, M. T. Root carbon reserve dynamics in aspen seedlings: does simulated drought induce reserve limitation? **Tree Physiology**, v. 31, n. 3, p. 250–257, 2011.

GAZOLA, R. P. D.; BUZETTI, S.; GAZOLA, R. N.; CASTILHO, R. M. M.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; CELESTRINO, T. S. Nitrogen fertilization and glyphosate doses as growth regulators in Esmeralda grass. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 12, p. 930–936, 2019.

GILGEN, A. K.; BUCHMANN, N. Response of temperate grasslands at different altitudes to simulated summer drought differed but scaled with annual precipitation. **Biogeosciences**, v. 6, n. 11, p. 2525–2539, 2009.

HAASE, K.; RÄTSCH, G. The morphology and anatomy of tree roots and their aeration strategies. In: JUNK, W. J. (Ed.). **Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management**. Dordrecht: Springer, 2011, p. 141–161.

HACKE, U. G.; SPERRY, J. S. Functional and ecological xylem anatomy. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 4, n. 2, p. 97–115, 2001.

HACKE, U. G.; SPERRY, J. S.; POCKMAN, W. T.; DAVIS, S. D.; MCCULLOH, K. A. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. **Oecologia**, v. 126, p. 457–461, 2001.

HAGHIGHI, A. T.; ZAKI, N. A.; ROSSI, P. M.; NOORI, R.; HEKMATZADEH, A. A.; SAREMI, H.; KLOVE, B. Unsustainability syndrome – From meteorological to agricultural drought in arid and semi-arid regions. **Water**, v. 12, p. 838, 2020.

HAKAMADA, R. E.; HUBBARD, R. M.; MOREIRA, G. G.; STAPE, J. L.; CAMPOE, O.; FERRAZ, S. F. B. Influence of stand density on growth and water use efficiency in *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 466, p. 118125, 2020.

HAMEED, A.; FAROOQ, T. Triazole-based plant growth-regulating agents: a recent update. In: **Advances in Triazole Chemistry**, p. 169–185, 2021.

HASIBEDER, R.; FUCHSLUEGER, L.; RICHTER, A.; BAHN, M. Summer drought alters carbon allocation to roots and root respiration in mountain grassland. **New Phytologist**, v. 205, n. 3, p. 1117–1127, 2015.

HÜTSCH, B. W.; KEHM, L.; SCHUBERT, S. Does the plant growth regulator paclobutrazol enhance root growth of maize exposed to drought stress during flowering? **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 209, n. 5, p. 673–688, 2023.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual. IBÁ: Brasília, Brasil, 2022. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>>. Acesso em: 19 maio 2025.

JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P.; SANKAR, B.; KISHOREKUMAR, A.; SANKARI, S.; PANNEERSELVAM, R. Paclobutrazol enhances photosynthesis and ajmalicine production in *Catharanthus roseus*. **Process Biochemistry**, v. 42, n. 11, p. 1566–1570, 2007.

JENIK, J. Roots and root systems in tropical trees: morphologic and ecologic aspects. In: **Tropical Trees as Living Systems**, v. 45, p. 250–264, 1978.

JUNGKLANG, J.; SAENGNIL, K.; UTHAIBUTRA, J. Effects of water-deficit stress and paclobutrazol on growth, relative water content, electrolyte leakage, proline content

and some antioxidant changes in *Curcuma alismatifolia* Gagnep. cv. Chiang Mai Pink. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 24, n. 7, p. 1505–1512, 2017.

KAMANGA, R. M.; NDAKIDEMI, P. A. Cultivation of tomato under dehydration and salinity stress: unravelling the physiology and alternative tolerance options. In: HARIS, A. (Ed.). **Tomato – From Cultivation to Processing Technology**. London: IntechOpen, 2022.

KAMRAN, M.; CUI, W.; AHMAD, I.; MENG, X.; ZHANG, X.; SU, W.; CHEN, J.; AHMAD, S.; FAHAD, S.; HAN, Q.; LIU, T. Effect of paclobutrazol, a potential growth regulator on stalk mechanical strength, lignin accumulation and its relation with lodging resistance of maize. **Plant Growth Regulation**, v. 84, p. 317–332, 2018.

KAMRAN, M.; WENNAN, S.; AHMAD, I.; XIANGPING, M.; WENWEN, C.; XUDONG, Z.; SIWEI, M.; KHAN, A.; QINGFANG, H.; TIENING, L. Application of paclobutrazol affect maize grain yield by regulating root morphological and physiological characteristics under a semi-arid region. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 4818, 2018.

KARADEMIR, C.; ERMAN, M.; FAROOQ, M. Potential role of plant growth regulators in administering crucial processes against abiotic stresses. **Frontiers in Agronomy**, v. 3, p. 648694, 2021.

KARLOVA, R.; BOER, D.; HAYES, S.; TESTERINK, C. Root plasticity under abiotic stress. **Plant Physiology**, v. 187, n. 3, p. 1057–1070, 2021.

KERET, R.; DREW, D. M.; HILLS, P. N. Xylem cell sie regulation is a key adaptive response to water deficit in *Eucalyptus grandis*. **Tree Physiology**, v. 44, n. 7, p. tpae068, 2024.

KUO, C.-C.; GAN, T. Y.; GIZAW, M. Potential impact of climate change on intensity duration frequency curves of central Alberta. **Climatic Change**, v. 130, p. 115–129, 2015.

LAMBERS, H.; OLIVEIRA, R. S. Plant water relations. In: LAMBERS, H. (Ed.). **Plant Physiological Ecology**. Cham: Springer, 2019, p. 187–263.

LEI, Y.; YIN, C.; LI, C. Differences in some morphological, physiological, and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus przewalskii*. **Physiological Plantarum**, v. 127, p. 182–191, 2006.

LI, S.; LI, H.; YANG, J.; GUAN, H.; YAN, Y.; HU, H. Paclobutrazol prevents xylem cavitation by altering pit structure in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* under drought. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 879217, 2022.

LI, S.; ZHAO, X.; ZHU, Y.; SHI, W.; WU, W.; YU, M. Comparative leaf anatomy and photosynthetic characteristics of five *Eucalyptus* species. **Forests**, v. 13, p. 2022, 2022.

LIMA, M. D. R.; BARROS JUNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; FIGUEIREDO, I. C. R.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 4, n. 128, e3302, 2020.

LIU, Y.; ZHANG, X.; ZHOU, H.; WANG, G.; YU, S. Drought stress tolerance and photosynthetic characteristics in two sugarcane cultivars. **Agronomy**, v. 11, p. 1634, 2021.

LLORET, F.; KEPNER, W. G.; SEMPERE, D.; ALFAGEME, S.; FERNÁNDEZ, N. An integrated perspective of plant resilience in drylands: building connections across disciplines and scales. **Journal of Arid Environments**, v. 185, p. 104375, 2021.

LÓPEZ-IBORRA, P. J.; IBÁÑEZ, B. S.; CARRASCO, A. Effects of drought on gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Eucalyptus camaldulensis* seedlings. **Journal of Forestry Research**, v. 30, p. 45–53, 2019.

LU, S.; ZHANG, Y.; GUAN, H.; YANG, J.; YAN, Y.; HU, H. Influence of paclobutrazol on tracheid pit anatomy in *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* under drought stress. **Trees**, v. 36, p. 1459–1471, 2022.

MA, J.; HU, W.; WANG, X.; WU, L.; XU, Z.; XU, Y.; SHEN, X.; ZHANG, Y.; MING, F. *Ectopic* expression of *Jatropha curcas* cytosolic Cu/Zn superoxide dismutase (JcCSD1) in rice enhances drought tolerance and reactive oxygen species scavenging capability. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 53, n. 12, p. 902–910, 2011.

MAGUIRE, A. J.; KOBE, R. K. Drought and shade deplete nonstructural carbohydrate reserves in seedlings of five temperate tree species. **Ecology and Evolution**, v. 5, p. 5711–5721, 2015.

MAHAJAN, S.; TUTEJA, N. Cold, salinity and drought stresses: an overview. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 444, n. 2, p. 139–158, 2005.

MAKKAN, M. S. M.; AMARASINGHE, P. S.; WICKRAMASINGHE, D. D. Leaf anatomical responses of *Pterocarpus marsupium* seedlings under water deficit conditions. **Ceylon Journal of Science**, v. 49, n. 1, p. 41–51, 2020.

MARQUES, C. C.; DE OLIVEIRA CANUTO, D. S.; DA SILVA, A. M.; DE MORAES, M. L. T. Estimativa de cerne em teste de progênies de segunda geração de *Eucalyptus urophylla*. **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, 2023.

MARTINS, L. D.; CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J. P.; LACLAU, J. P. Structure and dynamics of roots in monospecific and mixed plantations with *Eucalyptus* and *Acacia* in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 302, p. 61–70, 2013.

MARTINS, S. C. V.; MÜLLER, C.; LORENZONI, M. P.; BIASI, L. A.; DAMATTA, F. M. Leaf gas exchange and chlorophyll *a* fluorescence of citrus trees in response to different light regimes. **Scientia Horticulturae**, v. 120, n. 1, p. 12–16, 2009.

MAZZAFERA, P. Paclobutrazol induces stress responses in the Brazilian native tree *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*. **Plant Growth Regulation**, v. 59, p. 169–174, 2009.

MELO, J. T.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Efeitos de procedências de *Eucalyptus cloeziana* sobre os teores de nutrientes e de C orgânico em solo de Cerrado. Planaltina-DF: EMBRAPA Cerrados, 2005. 16 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 72).

MEYER, C. L.; MARÉCHAL-DROUARD, L.; DELSENY, M. The plant nucleus and drought stress. In: **Advances in Botanical Research**, v. 57, p. 1–46, 2011.

MILLER, G. L. Effect of watered-in demethylation-inhibitor fungicide and paclobutrazol applications on foliar disease severity and turfgrass quality of creeping bentgrass putting greens. **Crop Protection**, v. 79, p. 64–69, 2016.

MITCHELL, P. J.; O'GRADY, A. P.; TISSUE, D. T.; WHITE, D. A.; ZEIGER, A. D.; LAMBERS, H.; VENEKLAAS, E. J. Growth, gas exchange and stable carbon isotope composition of three *Eucalyptus* species in response to seasonal drought. **Tree Physiology**, v. 28, n. 7, p. 997–1006, 2008.

MOHAMMADI, M. H. S.; ETEMADI, N.; ARAB, M. M.; AALIFAR, M.; ARAB, M.; PESSARAKLI, M. Molecular and physiological responses of Iranian perennial ryegrass as affected by trinexapac ethyl, paclobutrazol and abscisic acid under drought stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 111, p. 129–143, 2017.

MORAES, C. B.; BRIZOLLA, T. F.; TEIXEIRA, L. G.; ZIMBACK, L. Estimativas dos parâmetros genéticos para seleção de árvores de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 219–227, 2014.

MOTT, K. A.; BUCKLEY, T. N.; TAI, X. Theoretical hydraulic model: what is the physiological basis for short-term responses of stomata to humidity? **Plant, Cell & Environment**, v. 40, n. 8, p. 911–922, 2017.

MÜLLER, C.; LORENZONI, M. P.; MARTINS, S. C. V.; DAMATTA, F. M. Does paclobutrazol promote stress tolerance in *Coffea arabica* seedlings? An ecophysiological analysis. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 66, p. 68–76, 2013.

NARDINI, A.; LUBIANA, T.; PINTO, G.; MOSCATELLO, S.; ROCCO, M.; SCARTAZZA, A.; CENTRITTO, M. Drought effects on carbon metabolism in *Quercus ilex* leaves: a comparison of ¹³C labeling and biochemical fractionation techniques. **Tree Physiology**, v. 36, p. 1498–1511, 2016.

NEILSON, J. W.; NELSON, W. M.; GRAHAM, T. B.; WALLENSTEIN, M. D.; FLEMMING, I. C.; BAGULEY, J.; BRADFORD, J. B.; FAY, P. A. Unexpected responses of biological soil crusts to water pulsing in a semi-arid grassland. **Journal of Ecology**, v. 105, n. 5, p. 1421–1431, 2017.

NOBRE, C. A.; SETH, A.; THOMSON, A. M.; COSTA, M. H.; COE, M. T.; PADOVANI, M. M.; CURY, J. A.; SALLAS, J. D.; HOYOS, N. A. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016.

NOVÁK, O.; TARKOWSKI, P.; BRIANTHWAITE, E.; BREWER, P. B.; JONES, B.; JERNSTEDT, J.; ZAZÍMALOVÁ, E.; SÁMANNKOVÁ, L.; LOMAX, T. L. Spatiotemporal pattern of cytokinin biosynthesis and individual cytokinin forms in developing *Arabidopsis* leaves and shoot apical meristem. **Plant Journal**, v. 57, p. 898–912, 2009.

OLIVEIRA, L. A. **Aspectos hidráulicos da tolerância à seca em clones de eucalipto**. Viçosa – MG: UFV, 2020. 86 f. Dissertação (Departamento de Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.

ONGARO, V.; LEYSER, O. Hormonal control of shoot branching. **Journal of experimental botany**, v. 59, n. 1, p. 67-74, 2008.

PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUFFMAN, J. B.; KURZ, W. A.; PHILLIPS, O. L.; JACKSON, R. B.; PACALA, S. W.; MC GUIRE, A. D.; PIAO, S.; RAUTIOLA, O.; SITCH, S.; HAYES, D.; KOWALSKI, A.; NAHLIK, A.; SHVIDENKO, A.; LEVIS, S.; POST, W. M.; ANAV, A.; LUO, Y.; NORDBORG, M.; PAN, Y. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, n. 6045, p. 988–993, 2011.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N.; DÍAZ, S.; GARNIER, E.; LAVOREL, S.; POORTER, H.; JAUREGUIBERRY, P.; BRET-HARTE, M. S.; CORNELISSEN, J. H. C.; LEHSTEDT, D. M.; RAY, P.; REICH, P. B.; FORTUNEL, C.; CASANOVES, F.; VIOLLE, C. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, n. 3, p. 167–234, 2013.

RAMOS, L. J.; SEVERIANO, E. C.; CARDOSO, E. G.; OLIVEIRA, L. A.; RAMOS, M. L. G.; RESENDE, M.; COSTA, M. D. R. Physico-hydric and chemical attributes of soils under forest species in the Brazilian Cerrado. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 113, p. 9–19, 2017.

REFLORA. *Eucalyptus* in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB614473>>. Acesso em: 19 nov. 2023.

RODRIGUES, L. C. A.; CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; MALULEQUE, I. F.; BARBOSA, J. P. R. A. D.; ROSADO, S. C. S. Effects of paclobutrazol on leaf anatomy and gas exchange of *Toona ciliata* clones. **Australian Forestry**, v. 79, n. 4, p. 241–247, 2016.

ROSELI, A. N. M.; AHMAD, M. F. In vitro evaluation of paclobutrazol against selected pathogenic soil fungi. **Journal of Tropical Plant Physiology**, v. 11, n. 2, p. 13–21, 2019.

SANTOS, J. A. dos; MATSUMOTO, S. N.; TRAZZI, P. A.; RAMOS, P. A. S.; OLIVEIRA, L. S. de; CAMPOE, O. C. Morphophysiological changes by mepiquat chloride application in *Eucalyptus* clones. **Trees**, v. 35, n. 1, p. 1–10, 2020.

SANTOS, S. M. S. **Paclobutrazol na rustificação e crescimento vegetativo inicial de dois clones de eucalipto**. Vitória da Conquista – BA: UESB, 2016. 103 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

SANTOS, S. M. S.; MATSUMOTO, S. N.; SILVA, R. A.; OLIVEIRA, L. S.; VIANA, A. E. S. Modulation of the initial growth of *Eucalyptus* clones using paclobutrazol: when smaller is better. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 4, p. 610–616, 2018.

SANTOS FILHO, F. B.; SILVA, T. I.; DIAS, M. G.; ALVES, A. C. L.; GROSSI, J. A. S. Paclobutrazol reduces growth and increases chlorophyll indices and gas exchanges of basil (*Ocimum basilicum*). **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, e262364, 2022.

SILVA, J. A. A. Potencialidades de florestas energéticas de *Eucalyptus* no Polo Gesseiro do Araripe – Pernambuco. **Academia Pernambucana de Ciências Agronômicas**, Recife, v. 5 e 6, p. 301–319, 2008–2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017, 888 p.

TEIXEIRA, E. C.; MATSUMOTO, S. N.; SILVA, D. D. C.; PEREIRA, L. F.; VIANA, A. E. S.; ARANTES, A. D. M. Morfologia de mudas de maracujazeiro amarelo submetidas a restrição de crescimento por triazol. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, p. e020319, 2019.

THOMAS, S. G.; HEDDEN, P. Gibberellin metabolism and signal transduction. **Annual Plant Reviews**, v. 24, p. 147–184, 2018.

VIEIRA, T. A. S.; TRUGILHO, P. F.; CARABINEIRO, S. A. C.; ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; BRANCO-VIEIRA, M. Impact of chemical composition on *Eucalyptus* wood clones for sustainable energy production. **Forests**, v. 14, p. 2240, 2023.

XU, L. J. et al. Paclobutrazol improves leaf carbon-use efficiency by increasing mesophyll conductance rate, while abscisic acid antagonizes this increased rate. **Photosynthetica**, v. 58, n. 3, 2020.

ZANATTO, B. **Aspectos fisiológicos, bioquímicos, morfológicos, anatômicos e condutividade hidráulica associados à tolerância à seca em genótipos de *Eucalyptus spp.*** Jaboticabal – SP: UNESP, 2022. 125 p. Tese (Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias) – Universidade Estadual Paulista.