



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA
MADEIRA**

MARYANNA LUIZZA BERNARDO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA RESTRIÇÃO HÍDRICA EM PLANTAS JOVENS DE
Eucalyptus SOB DIFERENTES DÉFICITS DE PRESSÃO DE VAPOR**

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2026

MARYANNA LUIZZA BERNARDO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA RESTRIÇÃO HÍDRICA EM PLANTAS JOVENS DE
Eucalyptus SOB DIFERENTES DÉFICITS DE PRESSÃO DE VAPOR**

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane
Coorientadora: Ma. Aline Besteti Salucci Benevides

JERÔNIMO MONTEIRO - ES

2026

MARYANNA LUIZZA BERNARDO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA RESTRIÇÃO HÍDRICA EM PLANTAS JOVENS DE
Eucalyptus SOB DIFERENTES DÉFICITS DE PRESSÃO DE VAPOR

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovada em 12 de fevereiro de 2026

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Mr. Macello Zatta Péres
Universidade Federal do Espírito Santo
Avaliador

Ma. Lorena Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo
Avaliadora

*“Calmo, sereno e tranquilo
Sinto descanso neste viver
Isto devo a um amigo
E só por Ele eu pude obter
Ele é Jesus, meu amigo
Meu Senhor, o Salvador.”*

- Borges, I. C. (1978).

Dedico esse trabalho a Deus.

AGRADECIMENTOS

Enfim, essa jornada um tanto quanto desafiadora chega ao seu desfecho e jamais conseguiria completar essa etapa sem a ajuda, companhia e encorajamento de inúmeras pessoas pelas quais serei eternamente grata.

Agradeço primeiramente a Deus por ser fonte da minha força e fé, a cada dia o Senhor me constrange por tamanha misericórdia e bondade que certamente eu não mereço, ainda sim, cuida de mim.

Ao meu marido, Ian, por estar sempre ao meu lado, me aconselhando, confortando e me lembrando como a vida pode ser leve. Por ficar acordado comigo enquanto ainda tinha coisas para fazer, por ser compreensivo e amoroso. Você é o amor da minha vida.

Aos meus pais, Berolhe Rubens e Rudinéia, por terem me ensinado a ser uma pessoa íntegra, por terem vivido suas vidas em função de proporcionar melhores condições a mim e meus irmãos, pela fé na minha capacidade. Amo vocês.

Aos meus irmãos, Myllena e Berolhe Filho, pelas risadas, aprendizados, encorajamento, carinho e amor o tempo todo. Viver com vocês me tornou quem sou hoje. Amo vocês. Babies Francisco e Laurinha, meus sobrinhos amados, tornaram minha vida mais doce.

Agradeço ao meu professor e orientado Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane por ter me recebido no Laboratório de Meteorologia e Ecofisiologia Florestal (LMEF) e me permitido perceber que a pesquisa é onde quero seguir com a carreira, por conversas cheias de conhecimento e pela paciência com meus erros.

À minha coorientadora e colega de laboratório, Ma. Aline Besteti Salucci Benevides por ser uma pessoa acolhedora, gentil, por ter me ajudado em cada etapa do trabalho e gasto do seu tempo para me auxiliar. Me inspiro em você como pesquisadora.

Aos meus colegas de laboratório, João Vitor, Lorena, Marcello, Aline 1, Elbya, Barbara, que estiveram comigo durante esse momento, por terem me acolhido não só no LMEF como em suas casas também, por terem me ensinado não só a teoria do trabalho, mas por ensinarem a trabalhar e conviver em equipe, por toda assistência e ajuda que me prestaram em todos os momentos.

Agradeço aos meus amigos Filipe Holtz, Esdras, Bryan, Alehando, Estefany pelas caronas durante a madrugada, pelas inúmeras áreas foliares aos sábados, pelo auxílio nos dias de análises em condições nem um pouco agradáveis.

Ao presbítero Fernando pelas caronas e conversas às 03:00 horas da manhã á caminho de Jerônimo. À minha comunidade da Igreja Presbiteriana de Alegre, por terem me recebido como parte da família.

Agradeço à minhas amigas, que mesmo de longe, sempre me apoiaram Júlia, Miriã e Adryelle. Amo vocês.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pelo ensino gratuito, professores cheios de sabedoria e infraestrutura de qualidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro e bolsa.

RESUMO

O Brasil tem a maior área de cultivo do *Eucalyptus* do mundo, de forma que o setor tem se expandido para regiões de diferentes condições edafoclimáticas. Associado a intensificação de extremos climáticos, como secas severas e aumento da temperatura global, a produtividade final das florestas plantadas é comprometida. A atmosfera também exerce influência sobre a transpiração da planta, intensificando os efeitos do estresse hídrico. À vista disso, o presente trabalho buscou avaliar os efeitos da restrição hídrica em plantas jovens de eucalipto do clone I144 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) submetidas a distintos déficits de pressão de vapor (DPV). O experimento foi conduzido em dois ambientes contrastantes quanto à demanda atmosférica, caracterizados por alta umidade relativa (baixo DPV) e baixa umidade relativa (alto DPV), combinados a dois regimes hídricos do solo: manutenção da umidade próxima à capacidade de campo e suspensão da irrigação até a redução da fotossíntese líquida a valores próximos de zero. A combinação desses fatores resultou em quatro tratamentos: irrigado em ambiente de baixo DPV (T1), não irrigado em ambiente de baixo DPV (T2), irrigado em ambiente de alto DPV (T3) e não irrigado em ambiente de alto DPV (T4). As plantas foram cultivadas sob irrigação por três meses para o estabelecimento vegetativo, submetendo-as, posteriormente, à restrição hídrica nos tratamentos correspondentes. Dentre os parâmetros fisiológicos mensurados em folhas, durante o período experimental, estão a fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s) e concentração interna de CO_2 (C_i), constituindo os parâmetros de trocas gasosas foliares, além de variáveis ecofisiológicas complementares, como a fluorescência da clorofila (Chl), o potencial hídrico das folhas (Ψ) e o *Crop Water Stress Index* (CWSI). Após três dias de estresse hídrico, irrigação foi restabelecida em todos os tratamentos, realizando dois dias de avaliações adicionais para caracterizar a recuperação fisiológica. Os resultados demonstram que durante a fase de crescimento sob irrigação, o consumo hídrico diário das plantas em ambiente de alto DPV foi aproximadamente duas vezes superior ao observado em ambiente de baixo DPV, evidenciando o efeito da demanda evaporativa atmosférica sobre o uso da água. A suspensão da irrigação para os tratamentos sob restrição hídrica promoveu a redução progressiva da condutância estomática, influenciando no decréscimo das taxas de transpiração e fotossíntese. A

realização do experimento permitiu observar que em ambas as demandas atmosféricas, a restrição hídrica limita os processos fisiológicos das plantas e a atmosfera intensifica os efeitos do estresse hídrico, no entanto em ambiente de alto DPV os efeitos do déficit hídrico são ainda mais acentuados.

Palavras-chave: Essência florestal. Demanda atmosférica. Déficit Hídrico. Ecofisiologia.

ABSTRACT

Brazil has the largest area of eucalyptus cultivation in the world, and the sector has expanded into regions with different soil and climate conditions. The final productivity of planted forests is compromised by the intensification of climatic extremes, such as severe droughts and rising global temperatures. The atmosphere exerts a significant influence on plant transpiration, thereby amplifying the impact of water stress. In consideration of the aforementioned factors, the present study sought to evaluate the effects of water restriction on young eucalyptus plants of clone I144 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) subjected to varying vapor pressure deficits (VPD). The experiment was conducted in two contrasting environments in terms of atmospheric demand, characterised by high relative humidity (low VPD) and low relative humidity (high VPD), combined with two soil water regimes: the first regime-maintained moisture close to field capacity and the second regime suspended irrigation until photosynthesis was reduced to values close to zero. The amalgamation of these factors resulted in four distinct treatments: irrigated in a low VPD (T1), non-irrigated in a low VPD (T2), irrigated in a high VPD (T3), and non-irrigated in a high VPD (T4). The plants were cultivated under irrigation for a period of three months to facilitate vegetative establishment. Thereafter, they were subjected to water restriction in the corresponding treatments. The physiological parameters measured in leaves during the experimental period included photosynthetic assimilation (A), transpiration (E), stomatal conductance (g_s), and internal CO_2 concentration (C_i), constituting the parameters of leaf gas exchange. In addition to these parameters, complementary ecophysiological variables were measured, including chlorophyll fluorescence (Chl), leaf water potential (Ψ), and the Crop Water Stress Index (CWSI). Following a period of three days during which the plants were subjected to an absence of water, irrigation was reintroduced in all treatment groups. This was followed by two additional days of evaluations to characterise the physiological recovery of the plants. The findings indicate that during the growth phase under irrigation, the daily water consumption of plants in a high VPD environment was approximately twice that observed in a low VPD environment. This observation underscores the impact of atmospheric evaporative demand on water utilisation. The irrigation was suspended for treatments under water restriction, which resulted in a progressive reduction in stomatal conductance. This, in turn, influenced the decrease in transpiration and photosynthesis rates. The

experiment demonstrated that, under both atmospheric conditions, water restriction limits the physiological processes of plants, and the atmosphere intensifies the effects of water stress; however, in a high VPD environment, the effects of water deficit are even more pronounced.

Keywords: Forest essence. Atmospheric demand. Water Deficit. Ecophysiology.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Localização da área experimental no (a) Espírito Santo, (b) no município de Jerônimo Monteiro, (c) Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, em destaque o Laboratório de Meteorologia e Ecofisiologia Florestal (LMEF).26
- Figura 2 - Período de crescimento inicial de mudas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, de 9 de abril a 14 de maio de 2024, em casa de vegetação climatizada no LMEF, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.27
- Figura 3 - Esquema da distribuição das mudas nas duas casas de vegetação, com o espaçamento de um metro entre plantas e 0,9 m entre linhas.28
- Figura 4 - Linha do tempo do crescimento de plantas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (clone I144) em dois ambientes com demandas atmosféricas contrastantes em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.29
- Figura 5 - Caracterização diária da radiação solar global, temperatura do ar média, umidade relativa do ar média e déficit de pressão de vapor durante o período de crescimento, de 15 de maio a 16 de julho de 2024, em destaque na área branca, e semana da imposição da restrição da irrigação, de 17 de julho a 19 de julho de 2024, em destaque na área cinza, no laboratório de Meteorologia e Ecofisiologia Florestal, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.31
- Figura 6 - Demonstração do delineamento experimental do dia 09 de abril a 19 de julho de 2024, em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.33
- Figura 7 - Análises dos parâmetros do (a) potencial hídrico foliar ao meio-dia, (b) fotografia da temperatura da folha com a câmera termográfica, (c) e (d) condutância estomática utilizando porômetro em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.34
- Figura 8 - Transpiração diária média de plantas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (clone I144) entre 15/05 e 17/07, em dois ambientes com demandas

atmosféricas de alto e baixo DPV, obtida por meio do sistema lisimétrico em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.36

Figura 9 -Transpiração diária média de plantas do clone I144, durante a fase de imposição do estresse hídrico, do dia 17 ao 19 de julho, e período de recuperação, entre 20 e 25 de julho, em dois ambientes de diferentes demandas atmosféricas obtida pelo sistema lisimétrico em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.37

Figura 10 - Dinâmica da redução na porcentagem de água no substrato às 17:00 h para avaliação do impacto da restrição hídrica em plantas jovens do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (clone I144), em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.37

Figura 11 - Potencial hídrico foliar na (a) antemanhã e (b) ao meio-dia, de plantas jovens do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144) durante o período de suspensão da irrigação, do dia 17 ao 19 de julho, e de recuperação, entre 20 e 26 de julho, em dois ambientes de diferentes demandas atmosféricas em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).38

Figura 12 - Valores médios de (a) condutância estomática, (b) taxa de fotossíntese e (c) taxa de transpiração, medido das 08:30 às 09:30, de plantas jovens do clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144), durante o período de suspensão da irrigação, do dia 17 ao 19 de julho, e de recuperação, entre 20 e 26 de julho, em dois ambientes de diferentes demandas atmosféricas em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).40

Figura 13 - Taxa de concentração interna de CO₂ média medido das 08:30 às 09:30, de plantas jovens do clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144), durante o período de suspensão da irrigação, do dia 17 ao 19 de julho, e de recuperação, entre 20 e 26 de julho, em dois ambientes de diferentes demandas

atmosféricas em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).41

Figura 14 - Rendimento quântico (Fv/Fm), às 11:00 h, de plantas jovens do clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144), durante o período de suspensão da irrigação e de recuperação, em dois ambientes de demandas atmosféricas contrastantes em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).42

Figura 15 - Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI) médio, medido às 12:00 h, de plantas jovens do clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144), durante o período de suspensão da irrigação e de recuperação em dois ambientes de demandas atmosféricas contrastantes em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).43

Figura 16 - Massa seca por compartimentos e total de plantas jovens do clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144), aos três de meses de idade, sob dois ambientes de demandas atmosféricas e disponibilidade hídrica contrastantes em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).44

Figura 17 - Aspecto visual de plantas jovens do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (clone I144) tratamentos (a) irrigado sob baixo DPV, (b) não irrigado sob baixo DPV, (c) irrigado sob alto DPV e (d) não irrigado sob alto DPV em 19 de julho de 2024, em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.45

Figura 18 - Aspecto visual de planta jovem do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (clone I144) sob restrição hídrica e alta demanda atmosférica (T4), com (a) e (b) dessecamento das folhas e (c) abscisão foliar completa em 26 de julho de 2024, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Eucalipto e o clone I144 (<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>).....	17
2.2. A água na planta, no solo e na atmosfera	18
2.3. O estresse hídrico e a fisiologia das plantas	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1. Local do estudo, material vegetal e período de crescimento	26
3.2. Delineamento experimental e parâmetros fisiológicos avaliados	32
3.2.1. Potencial hídrico foliar (Ψ_F) e trocas gasosas	33
3.2.2. Fluorescência da clorofila e <i>Crop Water Stress Index</i> (CWSI).....	33
3.2.3. Análise de recuperação e biomassa	34
3.3. Análise estatística	35
4. RESULTADOS	36
5. DISCUSSÃO	46
6. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

O setor de florestas plantadas consolidou-se como um pilar da economia nacional. Com uma taxa de crescimento de 6,3% na última década, a indústria de árvores registrou, em 2024, uma receita bruta de R\$ 240 bilhões, em valores aproximados (IBÁ, 2025). O alto investimento em geração de conhecimento científico e o aprimoramento das técnicas de manejo são um dos principais motivadores para o êxito do mercado florestal. Contudo, o aumento na demanda por produtos de origem florestal tem promovido a ampliação das áreas comerciais de florestas, trazendo consigo novos desafios para o cultivo de árvores, em regiões edafoclimáticas distintas.

Entre os fatores abióticos limitantes, a deficiência hídrica destaca-se como uma das principais restrições ao crescimento vegetal (Elli et al, 2019), tendo em vista que afeta diretamente processos fisiológicos que são fundamentais para a planta, podendo ocasionar não somente a redução do crescimento como, em casos extremos, a sua mortalidade (Chen et al, 2020). Tradicionalmente, os estudos acerca do estresse hídrico em plantas focam unicamente na disponibilidade de água no solo, desconsiderando a influência da demanda evaporativa da atmosfera. No entanto, essa condição meteorológica, frequentemente caracterizada pelo déficit de pressão de vapor (DPV), é um fator ambiental crucial para o crescimento vegetal. (Nadal-Sala et al, 2021).

O cenário descrito anteriormente é agravado pelas mudanças climáticas globais. Desde a Primeira Revolução Industrial, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera tem aumentado progressivamente, intensificando o aquecimento do planeta (Muniz et al., 2022, Alves et al., 2024). Conforme documentado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), o nível de aquecimento da Terra influencia não apenas as temperaturas médias, mas também a frequência e a intensidade de eventos extremos, como secas e ondas de calor (Charrier et al., 2021; IPCC, 2021). Como consequência, a distribuição, produção e conservação das comunidades vegetais são fortemente afetadas (Charrier et al., 2021, Alves et al., 2024). Na planta, a água participa de inúmeros processos fisiológicos e bioquímicos, como no transporte de nutrientes pelo xilema, na expansão celular, na fotossíntese e transpiração, sendo fundamental para sua sobrevivência (Bianchi et al., 2016; Pimenta, 2019; Taiz et al., 2021).

Em sintonia com o progresso da mudança do clima, a disponibilidade de água no solo e na atmosfera tem sofrido alterações drásticas, interferindo no crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas e florestais (Félix et al., 2020). A presença de vapor d'água na atmosfera exerce grande influência na produtividade das plantas e ao associá-lo à temperatura média local é possível obter o déficit de pressão de vapor (DPV). Essa variável indica a capacidade da atmosfera de retirar água da superfície terrestre e, quanto maior seu valor, maior é a força propulsora para a transpiração, independentemente da água disponível no solo (Nadal-Sala et al., 2021). Contudo, em contexto de limitação ao acesso à água, ele induz à redução da transpiração devido ao fechamento dos estômatos, sendo uma estratégia frente a perda de água (Silva et al., 2023, Gonçalves et al., 2024). Segundo Taiz *et al.* (2024), mesmo pequenos desequilíbrios entre a absorção de água pela raiz e a sua perda para a atmosfera podem causar danos à planta, interferindo no funcionamento eficiente de inúmeros processos celulares.

Apesar dos avanços no melhoramento genético, agentes estressores bióticos (pragas e doenças) e, principalmente, abióticos (alterações pluviométricas e térmicas) continuam a comprometer a produtividade final dos plantios (Auer et al., 2017; Masiero et al., 2022). Em contexto de mudanças climáticas, a frequência, distribuição e magnitude desses fatores tendem a se intensificar (Auer et al., 2017). Dessa forma, a expansão para áreas com limitações edafoclimáticas, combinada com os efeitos das alterações do clima, resulta em desafio crítico para a silvicultura (Otto et al., 2015; Binkley et al., 2017; Scolforo et al., 2019; Masiero et al., 2022). Embora exista uma vasta literatura sobre os efeitos do estresse hídrico em plantas, persiste uma lacuna no entendimento da interação entre a restrição hídrica no solo e a demanda atmosférica (DPV) sobre a fisiologia e a produtividade de espécies florestais.

Nesse contexto, o presente estudo objetivou caracterizar os efeitos da restrição hídrica em plantas jovens do clone I144 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) dispostas em dois ambientes com diferentes demandas atmosféricas, buscando compreender a maneira com que o DPV é capaz de influenciar na intensificação do estresse hídrico e identificando o impacto desse estresse nos processos fotossintéticos e fisiológicos das plantas, consequentemente, na sua produtividade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Eucalipto e o clone I144 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*)

Nativo da Austrália e demais ilhas da Oceania, como Papua Nova Guiné e Indonésia, o eucalipto é responsável por cerca de 77% da área total de florestas nativas australianas, o que equivale a aproximadamente 101 milhões de hectares (ABARES, 2023). Segundo o *Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences* (ABARES), os eucaliptos são classificados em três gêneros: *Angophora*, *Corymbia* e *Eucalyptus*, nos quais estão distribuídas, aproximadamente, 800 espécies (ABARES, 2019).

Atualmente o eucalipto é o gênero florestal mais plantado no país. São mais de 8 milhões de hectares, representando cerca de 77% de toda área de floresta plantada no Brasil (IBÁ, 2025). O cultivo dessa espécie para fins comerciais começou no século XX, com o engenheiro agrônomo Edmundo Navarro de Andrade (Ferreira, 2016). Apesar de ser uma planta exótica, o eucalipto se destacou nos primeiros estudos de Navarro, levando à sua ampla distribuição pelo território nacional (Antonangelo; Bacha, 1998; Ferreira, 2016; IBÁ, 2025). Com o crescente interesse das indústrias pelo gênero, os estudos a respeito do *Eucalyptus spp.* avançaram rapidamente. Como resultado desse alto investimento, as florestas de eucalipto brasileiras tornaram-se uma das mais produtivas, com o incremento médio anual (IMA) estimado em 34,4 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ (Masiero et al., 2022; IBÁ, 2025).

Dentre a elevada diversidade do gênero, aproximadamente 20 espécies são utilizadas comercialmente em escala mundial (Embrapa, 2022). Inicialmente destinado à produção de dormentes e lenha, o eucalipto demonstrou potencial para outros usos, de maneira que, a partir do século XX, passou a ser utilizado no setor siderúrgico e no segmento de produtos sólidos com a fabricação de painéis, laminados e móveis (Auer et al., 2017; Valverde et al., 2022). Atualmente, a produção de celulose constitui o principal destino das florestas plantadas no Brasil, seguida pela fabricação de papel, compensados, painéis e pisos (IBÁ, 2025).

O aumento da demanda por insumos advindos da indústria madeireira impulsionou a implantação de florestas comerciais em todo território nacional, concentrando-se principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, que detêm

cerca de 65% dos plantios (Florêncio et al., 2022; IBÁ, 2025). Porém, com a expansão das novas fronteiras agrícolas, regiões anteriormente pouco exploradas passaram a abrigar novos plantios florestais (Florêncio et al., 2022). À vista disso, surgiu a necessidade de desenvolver materiais genéticos capazes de se adaptar à variabilidade regional de clima e solo, além de possuírem alta produtividade e madeira de qualidade (Valadares et al., 2020).

Entre os materiais genéticos desenvolvidos para atender às crescentes áreas de cultivo, destaca-se o híbrido das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, que deu origem a um dos clones comerciais mais plantados no mundo, clone I144 (Stape et al., 2023; Liu et al., 2025). A escolha dessas espécies como genitores para a criação do híbrido não foi ao acaso, desde as primeiras pesquisas de Navarro de Andrade, as espécies *E. grandis* e o *E. urophylla* eram as mais promissoras. (Assis et al., 2016). Amplamente cultivado em regiões tropicais e subtropicais, o *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden é conhecido pelo seu rápido crescimento e alta produtividade (Queiroz et al., 2026). Por outro lado, o *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake possui fibras de excelente qualidade, alta capacidade de adaptar-se a condições adversas, sendo capaz de se estabelecer em solos rasos e de baixa fertilidade e suportar longos períodos na ausência de precipitação (Tordin, 2021; Yin et al., 2025).

A hibridação de espécies com qualidades como as anteriormente mencionadas é de grande magnitude para o setor florestal, pois influencia na idade de corte, na produção e na qualidade da madeira (Brisola; Demarco, 2011). O híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* possui um rápido crescimento, tronco retilíneo, alta resistência mecânica e a estresses (Shen et al., 2023; Liu et al., 2025). Devido a características como a de elevada adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, qualidade da madeira e alta produtividade que consolidaram o clone I144 como de grande relevância para setor florestal (Valadares et al., 2020; Florêncio et al., 2022; Liu et al., 2025).

2.2. A água na planta, no solo e na atmosfera

A água constitui o principal determinante da vida na Terra, sendo fundamental para a manutenção de praticamente todos os processos fisiológicos vegetais e um fator chave na evolução das linhagens do reino *Plantae* (Angelocci, 2002; Gurevitch et al.,

2009; Reichardt; Timm, 2022). As briófitas, ou musgos, formam o primeiro grupo de plantas terrestres. Por serem avasculares, água se move de célula em célula por difusão, condicionando-lhes um pequeno porte e uma alta dependência por locais de muita umidade (Gurevitch et al., 2009; Evert; Eichhorn, 2014). A evolução de estruturas como tecidos vasculares, desenvolvimento de raízes e tecidos lenhosos permitiu que as plantas colonizassem uma ampla gama de ambientes, desde florestas boreais a desertos quentes e áridos (Gurevitch et al., 2009; Matos et al, 2019).

Apesar desse sucesso evolutivo, a distribuição e desenvolvimento das plantas permanece diretamente limitados pela disponibilidade hídrica (Angelocci, 2002; Pimentel, 2004; Reichardt; Timm, 2022). Essa dependência deriva das diversas funções que a água exerce no interior da planta. A água é considerada um solvente universal, ou seja, ela é capaz de dissolver uma ampla diversidade de substâncias, tornando-a, assim, ideal para a ocorrência de processos bioquímicos e o principal meio de transporte de minerais, solutos e demais substâncias (Matos et al, 2019; Kerbauy, 2019).

As pontes de hidrogênio tornam a água uma excelente reguladora térmica para as plantas (Taiz et al., 2021; Marin, 2021). Essa propriedade confere alto calor latente de vaporização, pois a mudança de estado líquido para gasoso exige uma grande quantidade de energia para quebrar essas ligações. A água possui o calor de vaporização mais alto dentre outros líquidos e durante a transpiração de $2,3 \times 10^6$ J/Kg. Ao evaporar, ela consome parte do calor da superfície foliar, promovendo o resfriamento da planta e a protegendo contra danos térmicos (Kerbauy, 2019; Taiz et al, 2021).

Segundo Pimenta (2019), plantas em fase de crescimento, possuem de 80 a 95% de sua massa composta por água, já aquelas com tecidos lenhosos possuem cerca de 35 a 75%. Contudo, apenas uma fração mínima (cerca de 1-2%) é incorporada à biomassa ou utilizada diretamente em reações bioquímicas como a fotossíntese (Taiz et al., 2021; Reichardt; Timm, 2022). Isso acontece, pois a maior parte da água absorvida somente passa pela planta e chega à atmosfera na forma de vapor (Taiz et al., 2021; Reichardt; Timm, 2022). Aproximadamente 98% do fluxo transpiratório é perdido como vapor para a atmosfera durante a abertura estomática necessária à captação de CO_2 , um processo impulsionado pelo gradiente de concentração de vapor d'água entre a folha e o ar (Pacheco et al., 2021). A

manutenção desse fluxo depende do solo, o principal reservatório de água para as plantas (Reichardt; Timm, 2022).

A capacidade de armazenamento hídrico do solo está relacionada com atributos como a textura, estrutura e porosidade (Angelocci, 2002). Solos argilosos retem proporcionalmente mais água (até 40% após saturação) que os arenosos (cerca de 15%) devido à maior superfície específica (Basso; Soares, 2011; Taiz et al. 2021). Mesmo que a física do solo influencie diretamente na retenção e disponibilidade de água para as plantas, demais fatores como a densidade e profundidade das raízes, área foliar e demanda atmosférica impactam no modo em que elas têm acesso à água disponível no solo (Angelocci, 2002).

O vapor d'água é um dos componentes da atmosfera de maior importância para a vida no planeta e sua concentração sofre variações com o espaço e tempo, por isso é chamado de gás variável (Ynoue et al., 2025). Maiores concentrações de vapor d'água são observadas em regiões próximas às superfícies tropicais e quentes, em contrapartida em locais mais frios, como as zonas polares, o ar é mais seco (Marin, 2021).

Entende-se por umidade relativa à razão entre a quantidade de vapor existente na atmosfera, sob uma determinada pressão e temperatura, e a quantidade de vapor de saturação (Ynoue et al., 2025). Essa variável meteorológica influencia diretamente na evapotranspiração da superfície terrestre. A incidência de radiação solar, consequentemente a liberação de energia, sobre a água do solo, rios, lagos e oceanos constantemente é evaporada, além do processo de transpiração dos seres vivos, em especial das comunidades vegetais. Ao conjunto da evaporação da água e da transpiração dá-se nome de evapotranspiração (Marin, 2021).

Essa demanda atmosférica expressa pelo déficit de pressão de vapor determina a força propulsora da evapotranspiração. Em condições de alta umidade relativa do ar (baixo DPV), a evapotranspiração é reduzida, pois o ar próximo à saturação tem menor capacidade de receber vapor (Casaroli et al., 2010). Inversamente, baixa umidade relativa (alto DPV) intensifica o gradiente e, consequentemente, a perda de água (Marin, 2021).

A diferença entre a pressão de saturação do vapor d'água e a pressão real do vapor d'água, para uma determinada temperatura, é denominado de déficit de pressão de vapor (DPV), sendo uma variável de grande influência para o desenvolvimento vegetal (Yuan et al., 2019; Marin, 2021; Wen et al., 2024).

O aumento da temperatura global tem impulsionado a elevação da pressão de saturação do vapor de água da superfície terrestre, entretanto as taxas de pressão real de vapor não têm subido igualmente, intensificando, dessa forma, o déficit de pressão de vapor (Yuan et al., 2019; Grossiord et al., 2020). Em ambientes de maior DPV, as plantas absorvem uma quantidade maior de água afim de liberar vapor d'água para atender a demanda atmosférica. Contudo, a mudança no padrão de precipitação de forma generalizada tem levado a redução na frequência de chuva e aumentando a sua intensidade, dificultando a infiltração e percolação da água no solo, agravando a baixa disponibilidade hídrica em muitas regiões (Horel, 2024).

Confrontadas com esse estresse combinado, as plantas ativam respostas adaptativas que priorizam a conservação hídrica, frequentemente às custas do crescimento (Sulman et al., 2016). De acordo com Wen et al. (2024), o aumento do DPV reduz a condutância estomática e limita a taxa fotossintética, e quando por períodos prolongados, pode favorecer a mortalidade de árvores e incêndios florestais. A longa exposição a altos DPVs podem ocasionar severa inibição do crescimento, redução da produtividade e, em casos extremos, à mortalidade de árvores (Yuan et al., 2019; Wen et al., 2024). Portanto, compreender a interação entre a restrição hídrica no solo e a demanda atmosférica (DPV) é fundamental para prever os impactos das mudanças climáticas na fisiologia e produtividade das florestas plantadas.

2.3. O estresse hídrico e a fisiologia das plantas

O movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera ocorre por fluxo de massa, um processo passivo direcionado por gradientes de potencial hídrico (Ψ) (Taiz et al., 2024; Pimenta, 2019). Esse movimento segue os princípios da segunda lei da termodinâmica, onde moléculas mais energéticas tendem a transferir sua energia para moléculas menos enérgicas, até que todas se encontrem com uma quantidade de energia semelhantes (Alvim, 2021).

O conceito de potencial da água ou potencial hídrico (Ψ), foi criado com base na quantificação de energia livre em um mol de uma substância qualquer, também chamado de potencial químico (Pimenta, 2019, Taiz et al., 2024). Dessa forma, o potencial hídrico pode ser entendido como a diferença entre o potencial químico da água em determinado momento e o potencial da água em seu estado puro, ou seja, padrão, por unidade de volume (Pimenta, 2019, Taiz et al., 2024).

O impulsionador desse fluxo é a transpiração foliar. A abertura dos estômatos para a captação de CO₂, promove a perda de água atmosfera, tornando o Ψ menor nos espaços intercelulares das folhas. Essa redução do potencial na região apical é responsável por criar uma pressão hidrostática negativa que impulsiona o movimento da água da base ao topo da planta (Taiz et al., 2021). Contudo, também é necessário considerar o estado da solução do solo para ter melhor compreensão do *continuum* solo-planta-atmosfera. Semelhante às células vegetais, quando o solo está cheio de água seu potencial é próximo a zero, porém com a absorção devido a transpiração e a própria evaporação de água do solo, em casos de não reposição, o potencial é reduzido drasticamente (Pimenta, 2019).

O método da câmara de pressão, elaborado por Scholander et al. (1965), quantifica o potencial hídrico ao equilibrar a tensão do xilema por meio de pressão externa, sendo considerado um indicador sensível da condição hídrica da planta e do solo (Alvim, 2021; Taiz et al., 2024). Segundo Pimenta (2019), a quantidade de pressão necessária para essa extração é próxima a tensão do xilema. O potencial hídrico da planta é diretamente influenciado pelas condições nas quais ela está submetida, como o nível de disponibilidade hídrica no solo e a demanda atmosférica, sendo comum os valores reduzirem ao longo do dia mesmo em plantas com livre acesso a água (Alvim, 2021).

À vista disso, quando a absorção radicular não supre a demanda transpiratória, instala-se um déficit hídrico. Conceitua-se déficit hídrico como sendo o período em que a demanda de água pela planta é maior do que aquela disponível no solo, sendo a redução do potencial o primeiro efeito da insuficiência hídrica, desencadeando uma cascata de ajustes fisiológicos para a conservação da água (Bianchi et al., 2016; Taiz et al., 2024).

Como visto anteriormente, é na transpiração que a planta perde água, em forma de vapor, para a atmosfera em resposta de um gradiente. Quase 100% da transpiração da planta ocorre nas suas folhas devido aos poros ali presentes, chamados de estômatos. Essas estruturas são formadas por duas células especializadas denominadas de células-guarda que, por meio da turgescência, controlam a abertura do complexo estomático (Pimenta, 2019, Taiz et al., 2024). Tendo em vista que as folhas são cobertas por inúmeras camadas de ceras que impedem a saída de água do seu interior, os estômatos são um meio de menor resistência à

difusão, operando sob influência do gradiente de concentração de vapor de água entre a folha e o ar circundante (Pimenta, 2019).

A condutância estomática (g_s) é um parâmetro fisiológico que afere a capacidade máxima de difusão de água através da densidade e abertura dos estômatos (Faralli et al., 2019; Lawson; Matthews, 2020). Essa medida é regulada por fatores internos, como os hormônios, e externos. Assim, em condições de radiação solar e água disponíveis, a condutância é elevada, enquanto sob baixa intensidade luminosa, alta demanda evaporativa ou baixa disponibilidade de água no solo, esses valores são reduzidos (Lawson; Matthews, 2020).

Sob circunstâncias de déficit hídrico, o potencial no espaço intercelular se torna menor do que no interior, levando a água para fora da célula devido ao sentido do gradiente, reduzindo a sua pressão de turgor e consequentemente, a abertura estomática. Esse mecanismo limita imediatamente a perda de água por transpiração (Costa; Marengo, 2007; Pacheco et al., 2021; Taiz et al., 2024), porém também restringe a entrada de CO_2 (Silva et al., 2015; Matos et al., 2021; Taiz et al., 2024).

A fotossíntese consiste no processo pelo qual organismos autótrofos utilizam água e o gás carbônico, sob condições de ampla liberação de energia proveniente da radiação solar, para a síntese de compostos orgânicos (Taiz et al., 2021). Esse processo é dividido em duas etapas: a fase fotoquímica e a fase bioquímica. Ambas ocorrem no interior do cloroplasto, que é composto pelas clorofilas. Taiz et al. (2021) descrevem a luz solar como sendo “uma chuva de fótons de diferentes frequências”, sendo a faixa de frequência absorvida pela clorofila predominantemente nas regiões do azul (próximo de 430 nm) e do vermelho (próximo de 660 nm) dentro do espectro visível.

A fase fotoquímica ocorre na membrana dos tilacoides, onde se localizam os fotossistemas II (P680) e I (P700), responsáveis pela absorção de fótons através do complexo de antenas. A absorção de energia luminosa pelo fotossistema II promove a fotólise da água, resultando na liberação de elétrons, prótons de hidrogênio e oxigênio molecular. (Majerowicz, 2019; Taiz et al., 2021; Taiz et al., 2024).

No fotossistema I ocorre a etapa chamada de fotofosforilação, podendo ser cíclica e acíclica. O produto obtido da fotofosforilação acíclica é, principalmente, a nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato hidrogenado, conhecida como NADPH, enquanto na fase cíclica o maior produto obtido é a síntese de adenosina trifosfato (ATP). Dessa forma, a disponibilidade de água é fundamental para a manutenção do

fluxo de elétrons e para a produção de ATP e NADPH, indispensáveis à fase bioquímica da fotossíntese (Majerowicz, 2019; Taiz et al., 2021; Taiz et al., 2024).

A fase bioquímica é representada pelo ciclo de Calvin–Benson, responsável pela fixação do carbono e síntese de carboidrato (Majerowicz, 2019). Utilizando das moléculas energéticas sintetizadas na fase anterior, é nessa etapa que o gás carbônico atmosférico é fixado e transformado em glicose ($C_6O_{12}H_6$), por meio da catalisação promovida pela enzima Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase, também conhecida como RuBisCo.

Dessa forma, enquanto a água é essencial para a fase fotoquímica, na fase bioquímica o CO_2 é indispensável, pois é por meio dele que a molécula de carboidrato é obtida e ocorre o crescimento vegetativo. Portanto, em condições de déficit hídrico e elevada demanda atmosférica, o fechamento estomático limita a entrada de CO_2 , reduzindo a taxa fotossintética.

A inibição da via fotoquímica leva a um excesso de energia de excitação nas clorofilas. Para evitar danos foto-oxidativos, parte dessa energia é dissipada pela via fotoquímica, pelo calor (dissipação não fotoquímica - NPQ) ou reemitida como fluorescência. Essas vias competem entre si, como a clorofila fica muito instável quando em maior estado energético, ela libera a energia para qualquer processo que ocorra mais rápido.

A fluorescência é o termo dado para a reemissão do fóton recebido pela clorofila *a*. O comprimento de onda da fluorescência está na faixa do vermelho, possuindo um comprimento de onda maior (consequentemente menos energia), pois antes da reemissão do fóton, parte da energia de excitação é convertida em calor. Os estudos que buscam quantificar a fluorescência, na verdade analisam a eficiência quântica potencial máxima do fotossistema II (Ph) através da relação F_v/F_m , em que F_m refere-se à fluorescência máxima no estado adaptado ao escuro e F_v é a diferença entre F_m e F_0 , que é a fluorescência mínima da clorofila *a* no estado adaptado ao escuro (Capelin et al., 2018).

A limitação da assimilação de carbono decorrente do fechamento estomático compromete a fase bioquímica da fotossíntese, reduzindo a utilização da energia fotoquímica e aumentando a dissipação por fluorescência, o que resulta na diminuição da eficiência quântica máxima do fotossistema II. Além disso, o fechamento estomático influencia diretamente a temperatura foliar. Durante a transpiração, a evaporação da água promove o resfriamento da superfície foliar devido ao alto calor

latente da água, porém com os estômatos fechados, a transpiração reduz e a temperatura foliar aumenta (Watt et al., 2024; Jeong et al., 2024). Nesse contexto, o índice de estresse hídrico nas culturas, do inglês *crop water stress index* (CWSI), é um dos parâmetros mais utilizados para avaliar a intensidade do estresse hídrico das plantas através da temperatura da folha (Katimbo et al., 2022; Watt et al., 2024).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Local do estudo, material vegetal e período de crescimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada no Laboratório de Meteorologia e Ecofisiologia Florestal pertencente ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (Figura 1), da Universidade Federal do Espírito Santo (DCFM/CCAUE-UFES). O laboratório está localizado em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil, a 20°47'20" S de latitude e 41°23'42" W de longitude e altitude de 120 m. O clima da região é classificado como Cwa, com inverno seco e verão chuvoso, temperatura e precipitação média anual de 24,1 °C e 1.104 mm, respectivamente (Alvares et al., 2013). O período experimental foi de 9 de abril a 26 de julho de 2024, totalizando 109 dias.

Figura 1 - Localização da área experimental no (a) Espírito Santo, (b) no município de Jerônimo Monteiro, (c) Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, em destaque o Laboratório de Meteorologia e Ecofisiologia Florestal (LMEF).



Fonte: Abreu, R. L. (2006), Incaper (2023); DCFM, modificado pela autora (2026).

Mudas clonais do híbrido entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (I144) foram adquiridas de um viveiro comercial de mudas. Anterior ao transplante das mudas, vasos de polietileno brancos de 60 litros.

Cada vaso foi preenchido com 50 L de substrato comercial, Vivatto® Pro 20, à base de casca de *Pinus* bioestabilizada, vermiculita e carvão vegetal acrescido de 4,0

g dm⁻³ de adubo de liberação controlada com formulação 16-8-12 (+2). Para garantir a padronização da quantidade de substrato nos vasos, foram pesados com auxílio de balança eletrônica. O substrato foi saturado com água e, após 24 horas de drenagem livre, foram transplantadas 16 mudas. Para condução do crescimento vertical, instalou-se um tutor em cada vaso. As mudas permaneceram agrupadas em casa de vegetação para um período de crescimento inicial, durante 35 dias após transplante (DAT), entre 9 de abril e 14 de maio de 2024 (Figura 2).

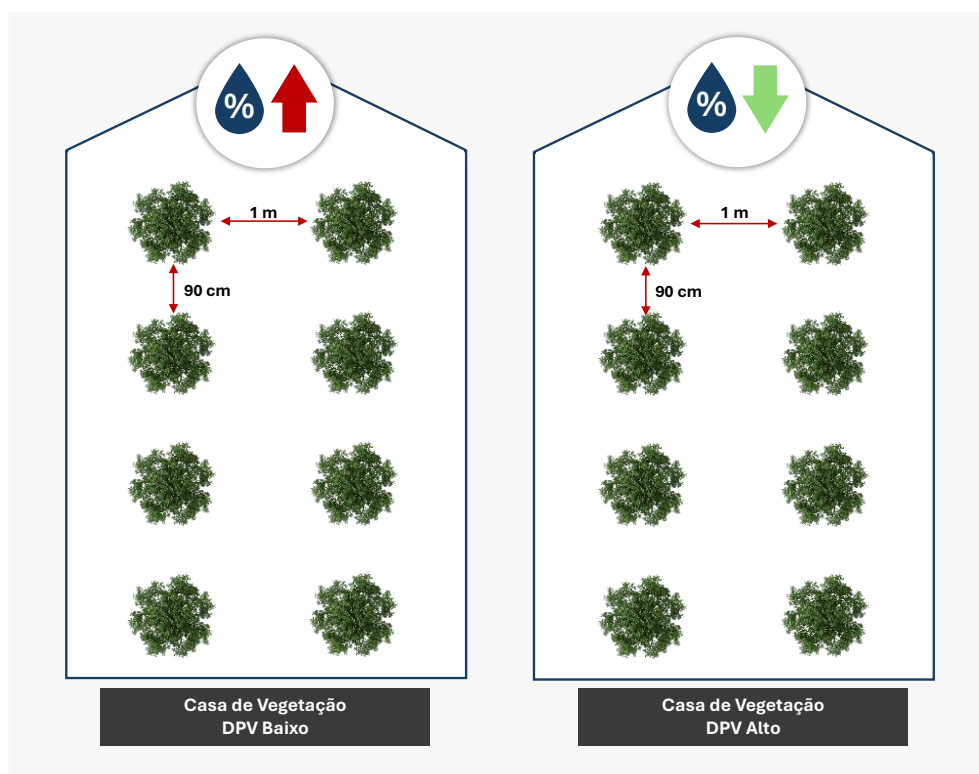
Figura 2 - Período de crescimento inicial de mudas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, de 9 de abril a 14 de maio de 2024, em casa de vegetação climatizada no LMEF, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Oliveira, M. L. B. (2026).

Em 14 de maio, ao final da tarde, as mudas foram distribuídas aleatoriamente em duas casas de vegetação: uma de alta umidade relativa (menor DPV) e outra de menor umidade relativa (maior DPV), totalizando oito plantas por casa (Figura 3). Para determinar a massa correspondente à capacidade de campo do substrato em cada vaso, realizou-se uma irrigação por saturação. No dia seguinte, após o período noturno de drenagem gravitacional completa, os valores dos vasos registrados pelas balanças eletrônicas foram usados como referência.

Figura 3 - Esquema da distribuição das mudas nas duas casas de vegetação, com o espaçamento de um metro entre plantas e 0,9 m entre linhas.



Fonte: Oliveira, M. L. B. (2026).

As plantas foram dispostas sobre balanças eletrônicas do sistema lisimétrico, modelo Prix 2098 (Toledo, São Bernardo do Campo, São Paulo, BR), com capacidade de pesagem de 60 Kg, para o monitoramento contínuo do consumo hídrico, cuja leitura e armazenamento ocorreu a cada 10 minutos. A transpiração diária foi determinada pela diferença de massa registrada às 6:00 e às 17:30 h. Para contabilizar unicamente o uso da água para transpiração, placas de isopor foram postas próximas a superfície de cada vaso, evitando a evaporação de água do substrato. O segundo período de crescimento das plantas durou 9 semanas, de 14 de maio a 16 de julho (Figura 4). Durante a fase de crescimento sob condições controladas, a irrigação foi automatizada e individualizada com base no peso da capacidade de campo. Ao final de cada ciclo diurno, o volume de água transpirado era repostado às 17:30 h, mantendo o substrato próximo a 85% da sua capacidade máxima de retenção de água (CMRA).

Figura 4 - Linha do tempo do crescimento de plantas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (clone I144) em dois ambientes com demandas atmosféricas contrastantes em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.

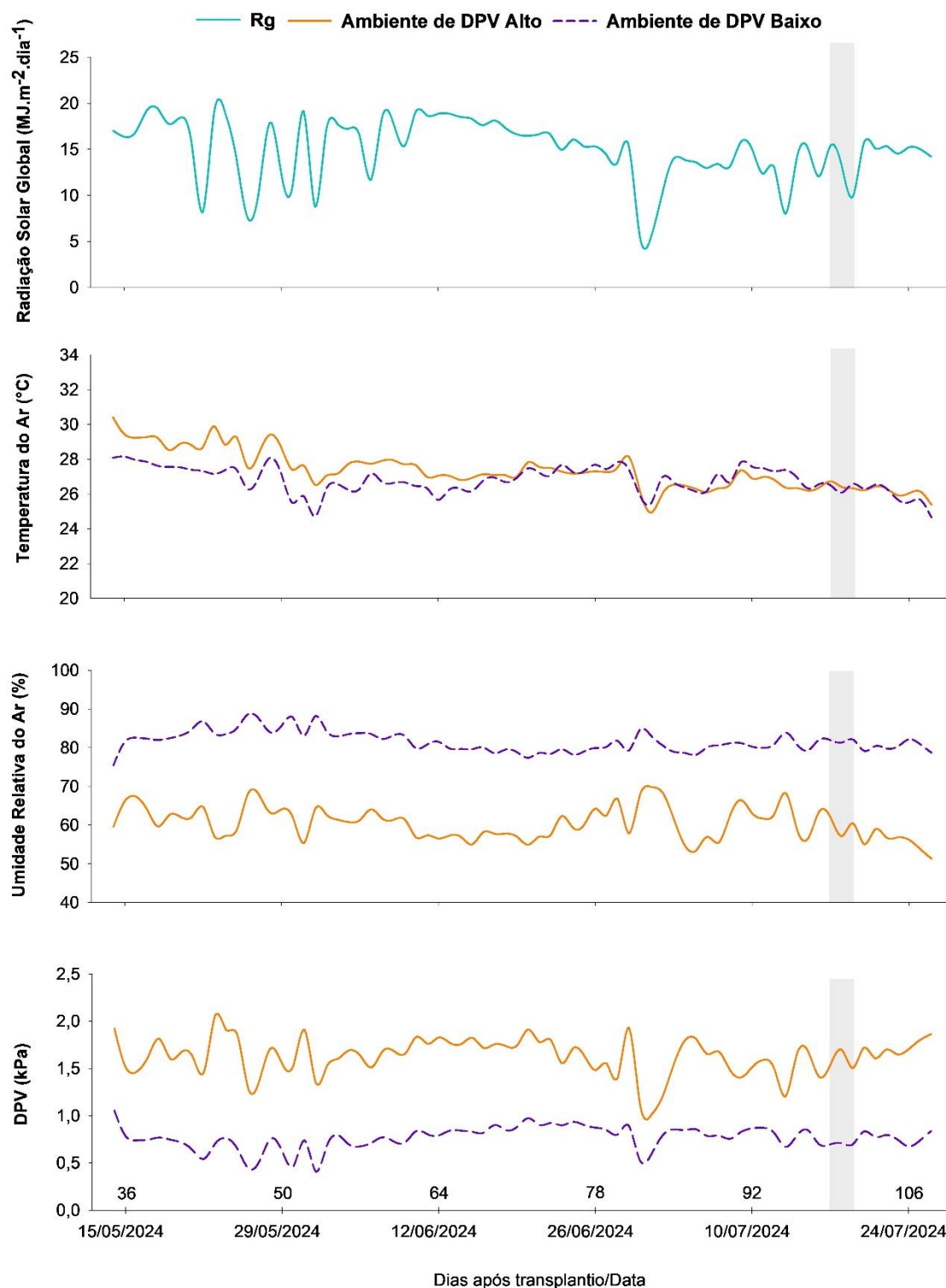


Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados microclimáticos foram monitorados a partir de uma estação meteorológica composta por um datalogger modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) conectado aos sensores de radiação fotossinteticamente ativa (PAR LITE, Kipp e Zonen B.V., Delft, Holanda), radiação solar global (Pyranometer SP – LITE, Kipp & Zonen B.V., Delft, The Netherlands), saldo de radiação (NRLite2, Kipp e Zonen B.V., Delft, Holanda) e temperatura e umidade relativa do ar (modelo CR500, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA). As leituras foram realizadas a cada dez segundos e o armazenamento dos valores médios a cada dez minutos. O déficit de pressão de vapor foi calculado com base na metodologia de Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002).

Durante o todo o período experimental, a temperatura e umidade relativa média foi de 27,7 °C e 62%, para casa de vegetação com DPV de 1,66 kPa (definido como ambiente de maior demanda atmosférica), e 28,4 °C e 81% para a casa com DPV de 0,81 kPa (definido como ambiente de menor demanda atmosférica). Tendo conhecimento que o DPV varia conforme a mudança de temperatura, buscou-se manter temperatura semelhantes entre as casas. A radiação solar global média para as duas casas de vegetação, foi de 14,9 MJ.m⁻².dia⁻¹.

Figura 5 - Caracterização diária da radiação solar global, temperatura do ar média, umidade relativa do ar média e déficit de pressão de vapor durante o período de crescimento, de 15 de maio a 16 de julho de 2024, em destaque na área branca, e semana da imposição da restrição da irrigação, de 17 de julho a 19 de julho de 2024, em destaque na área cinza, no laboratório de Meteorologia e Ecofisiologia Florestal, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

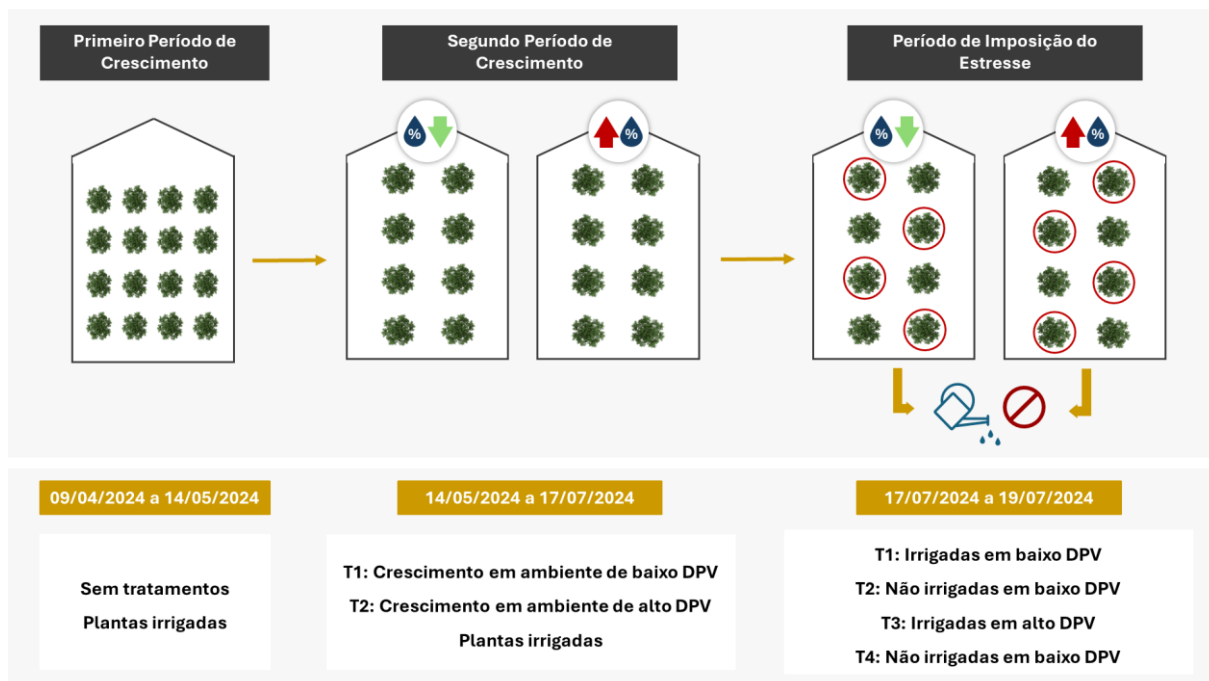
3.2. Delineamento experimental e parâmetros fisiológicos avaliados

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC). A etapa inicial dos tratamentos ocorreu entre 14 de maio a 17 de julho de 2024, constituindo na alocação das mudas do clone híbrido I144 em dois ambientes com demandas atmosféricas contrastantes.

Na segunda etapa do experimento, instituiu-se um esquema fatorial em cada ambiente para a imposição de dois níveis de disponibilidade hídrica: plantas irrigadas (mantendo o nível de água no solo próxima a 85% da capacidade de campo) e plantas sob suspensão da irrigação. O delineamento contou com quatro repetições por tratamento, sendo cada planta considerada uma unidade experimental. Assim, estabeleceram-se quatro tratamentos: irrigadas sob baixo DPV (T1); não irrigadas sob baixo DPV (T2); irrigadas sob alto DPV (T3); e não irrigadas sob alto DPV (T4).

As avaliações fisiológicas foram realizadas de 17 a 19 de julho de 2024, totalizando três dias consecutivos, em folhas saudáveis e completamente expandidas do terço médio superior. A imposição do estresse foi interrompida quando a fotossíntese atingiu valores próximo a zero, buscando evitar danos permanentes. Em 20 de julho a irrigação foi retomada para todos os tratamentos e análises para avaliação da recuperação das plantas foram realizadas nos dias 21 e 25 de julho de 2024 (Figura 6).

Figura 6 - Demonstração do delineamento experimental do dia 09 de abril a 19 de julho de 2024, em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

3.2.1. Potencial hídrico foliar (Ψ_F) e trocas gasosas

Para a avaliação do potencial hídrico foliar, utilizou-se a câmara de pressão de Scholander modelo 1505D-EXP (PMS Instruments Co., Albany, OR, EUA). As medidas foram realizadas no período da antemanhã (*pre-dawn*) e ao meio-dia (*midday*).

Quanto aos parâmetros de trocas gasosas, foram medidos fotossíntese líquida (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração foliar (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e concentração interna de CO_2 (C_i , ppm), usando o *Infra Red Gas Analyser*, ou analisador de gases infravermelho portátil, (IRGA, Li-Cor, modelo LI-6400) entre 09:00 e 10:00 h. Utilizou-se uma intensidade luminosa de $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, concentração externa de 400 ppm de CO_2 e a umidade relativa era alterada conforme os valores registrados nas casas de vegetação.

3.2.2. Fluorescência da clorofila e *Crop Water Stress Index* (CWSI)

Na avaliação da fluorescência da clorofila, o parâmetro utilizado foi a eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m), medida com o auxílio do fluorímetro portátil

FluorPen FP100 (Photon Systems Instruments, Drásov, Czech Republic) às 07:00 e ao meio-dia (12h). Antes da medição, as folhas escolhidas eram adaptadas ao escuro durante 30 minutos e durante a análise, expostas a um pulso saturante de 3.000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz.

Imagens térmicas de cada tratamento foram obtidas através de uma câmera termográfica portátil modelo FLIR T530sc (FLIR Systems, Wilsonville, OR, USA) com resolução de 320 x 240 pixels, entre 12:00 e 13:00 horas (Figura 7). Elas foram utilizadas para a determinação do índice de estresse hídrico da cultura, ou *Crop Water Stress Index* (CWSI), e processadas no software FLIR tools. O cálculo do CWSI seguiu a metodologia de Jones (1999) (Equação 1):

$$CWSI = (T_{leaf} - T_{wet}) \div (T_{dry} - T_{wet}) \quad \text{Equação 1}$$

Onde, T_{leaf} é a temperatura média da folha em condição ambiente, T_{wet} temperatura de uma folha saturada, submersas em água cinco minutos antes da leitura da temperatura, e T_{dry} a temperatura da folha sob condições não transpirante, revestidas com vaselina na parte para fechamento estomático

Figura 7 - Análises dos parâmetros do (a) potencial hídrico foliar ao meio-dia, (b) fotografia da temperatura da folha com a câmera termográfica, (c) e (d) condutância estomática utilizando porômetro em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

3.2.3. Análise de recuperação e biomassa

A irrigação em todos os tratamentos foi retomada às 06:00 h em 20 de julho de 2024, após a realização do potencial hídrico foliar *pre-dawn* para caracterização do

estresse hídrico do dia anterior. Avaliações da capacidade de recuperação das plantas utilizando os parâmetros anteriormente mencionados, ocorreram no dia 21 e 25 de julho de 2024.

A massa seca da parte aérea (MSPA, g planta⁻¹), das raízes (MSR, g planta⁻¹) e massa seca total (MST, g planta⁻¹) foram determinadas após secagem na estufa em 60°C até peso constante.

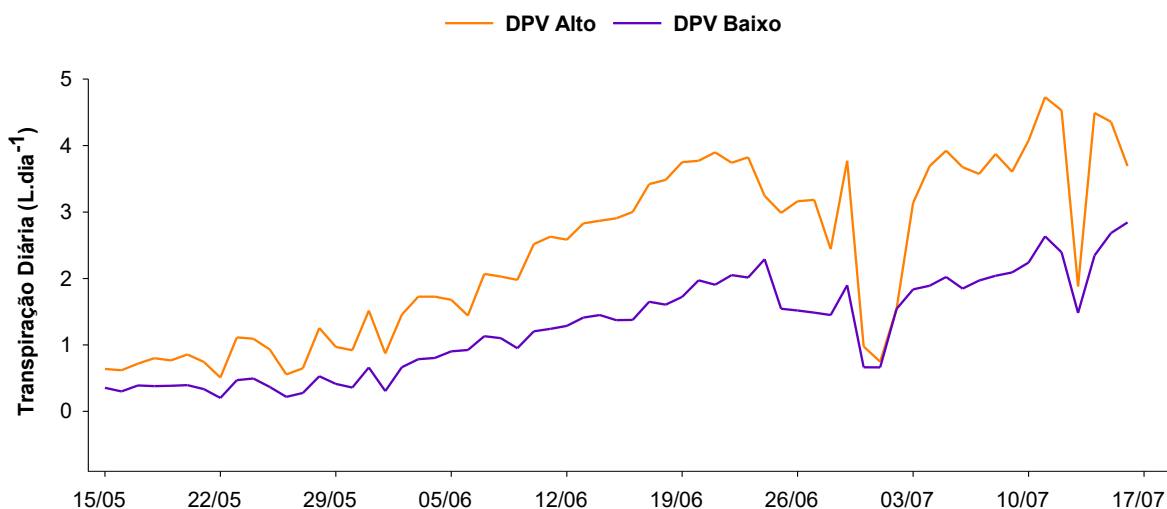
3.3. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e homoscedasticidade (Levene). As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa R Core Team (2023) versão 4.3.2. Atendendo-se às pressuposições da ANOVA, o teste F a 5%, foi aplicado para a verificação de diferenças significativas e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS

Durante a fase de crescimento, as plantas que cresceram sob alto DPV tiveram transpiração 1,7 vezes superiores às aquelas sob baixo DPV (Figura 8). A transpiração mensal média no ambiente de maior demanda atmosférica elevou-se de 0,86 L.dia⁻¹, em maio, para 3,47 L.dia⁻¹, em julho. Por sua vez, no ambiente de baixo DPV, o incremento no consumo foi de cinco vezes, aumentando de 0,38 L.dia⁻¹ para 2,03 L.dia⁻¹. Ao final desse período, o consumo acumulado no tratamento sob alto DPV totalizou 150,15 L, enquanto no ambiente de baixo DPV o volume transpirado foi de 79,72 L.

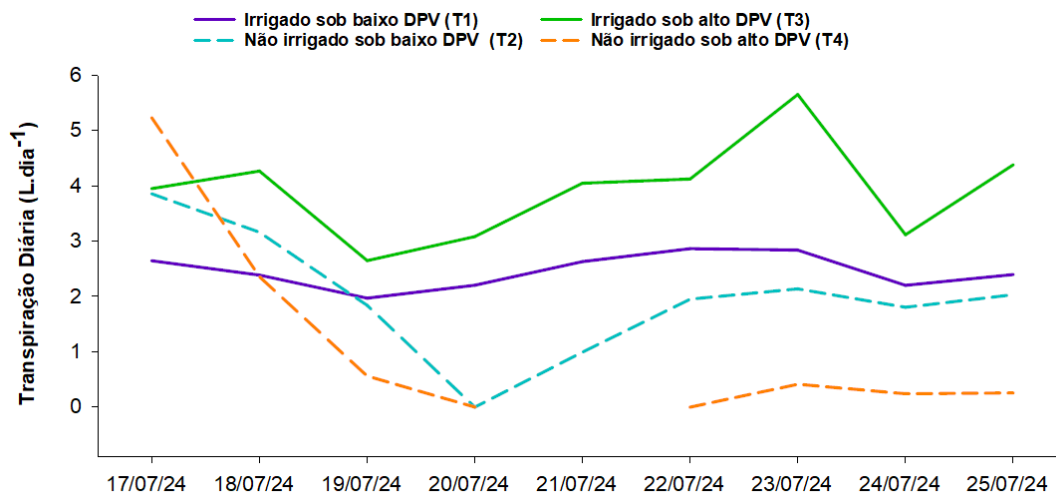
Figura 8 - Transpiração diária média de plantas de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (clone I144) entre 15/05 e 17/07, em dois ambientes com demandas atmosféricas de alto e baixo DPV, obtida por meio do sistema lisimétrico em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A dinâmica da transpiração durante as fases de restrição hídrica e recuperação (Figura 9) revela que os tratamentos irrigados (T1 e T3) mantiveram-se estáveis, enquanto T4 apresentou uma queda acentuada na sua transpiração. O tratamento não irrigado sob baixo DPV (T2) demonstrou maior resiliência inicial, mantendo sua transpiração média em 3,16 L.dia⁻¹. Com a retomada da irrigação em 20/07, não foram registradas taxas de transpiração em T2 e T4 nesta data. Ressalta-se que T4 apresentou abscisão foliar severa, resultando em transpiração nula nos 21 e 22 de julho de 2024.

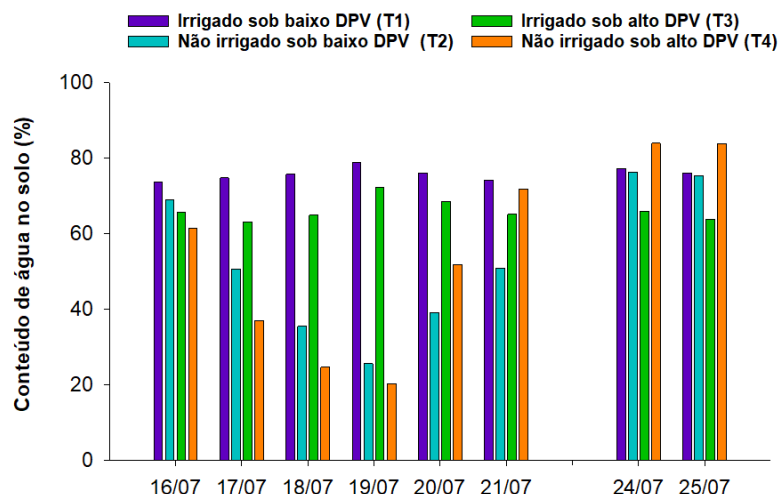
Figura 9 -Transpiração diária média de plantas do clone I144, durante a fase de imposição do estresse hídrico, do dia 17 ao 19 de julho, e período de recuperação, entre 20 e 25 de julho, em dois ambientes de diferentes demandas atmosféricas obtida pelo sistema lisimétrico em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Ao analisar o conteúdo de água no substrato ao final do período diurno (17:00 h), é possível observar que a elevada taxa de transpiração do T4, em 17/07, reduziu a umidade do substrato em 1,6 vezes, atingindo 37% de umidade do solo (Figura 10). No dia de maior estresse hídrico (19/07), o conteúdo de água no substrato de T4 chegou a 20% e T3 a 26%, retornando aos níveis próximos a 70% após a retomada da irrigação.

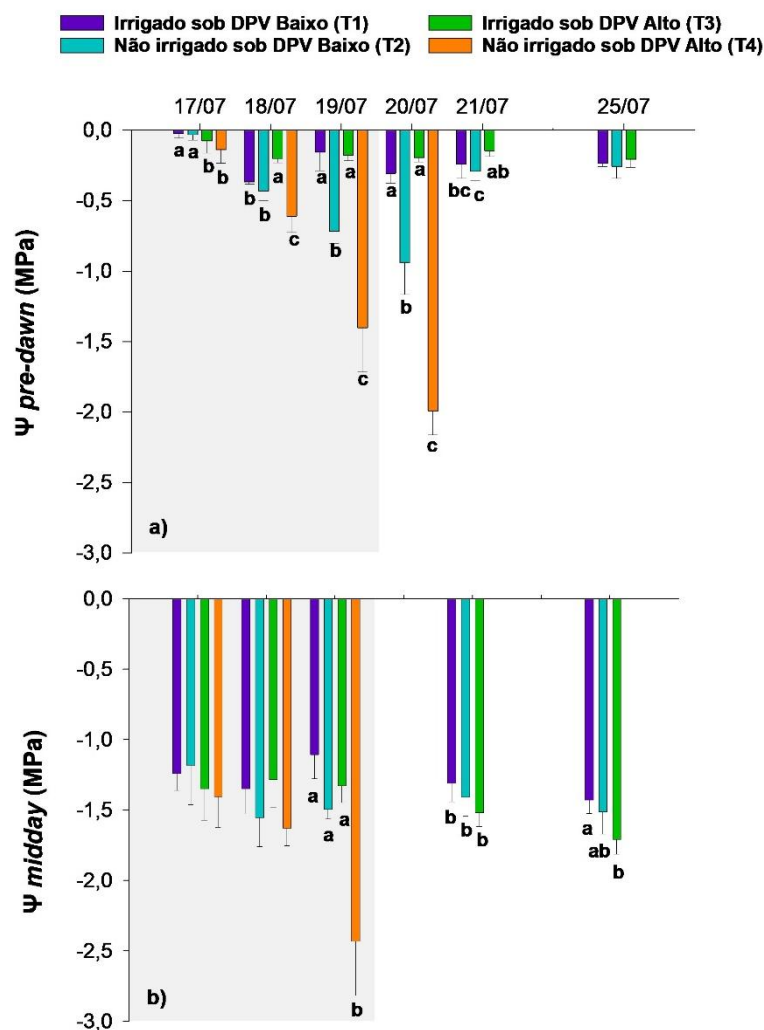
Figura 10 - Dinâmica da redução na porcentagem de água no substrato às 17:00 h para avaliação do impacto da restrição hídrica em plantas jovens do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (clone I144), em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

O potencial hídrico foliar (Ψ) realizado às 04:00 h (*pre-dawn*) em 17/07 mostrou que a disponibilidade hídrica no substrato foi suficiente para restabelecer o equilíbrio hídrico das plantas durante a noite para todos os tratamentos (Figura 11). Em 19/07, T2 e T4 apresentaram menor potencial em relação aos tratamentos irrigados, sendo possível verificar a influência da demanda atmosférica na intensificação do estresse, visto que T4 registrou potencial significativamente inferior ao T2, com médias de -1,4 e -0,71 MPa, respectivamente, em 19/07.

Figura 11 - Potencial hídrico foliar na (a) antemãnhã e (b) ao meio-dia, de plantas jovens do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144) durante o período de suspensão da irrigação, do dia 17 ao 19 de julho, e de recuperação, entre 20 e 26 de julho, em dois ambientes de diferentes demandas atmosféricas em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

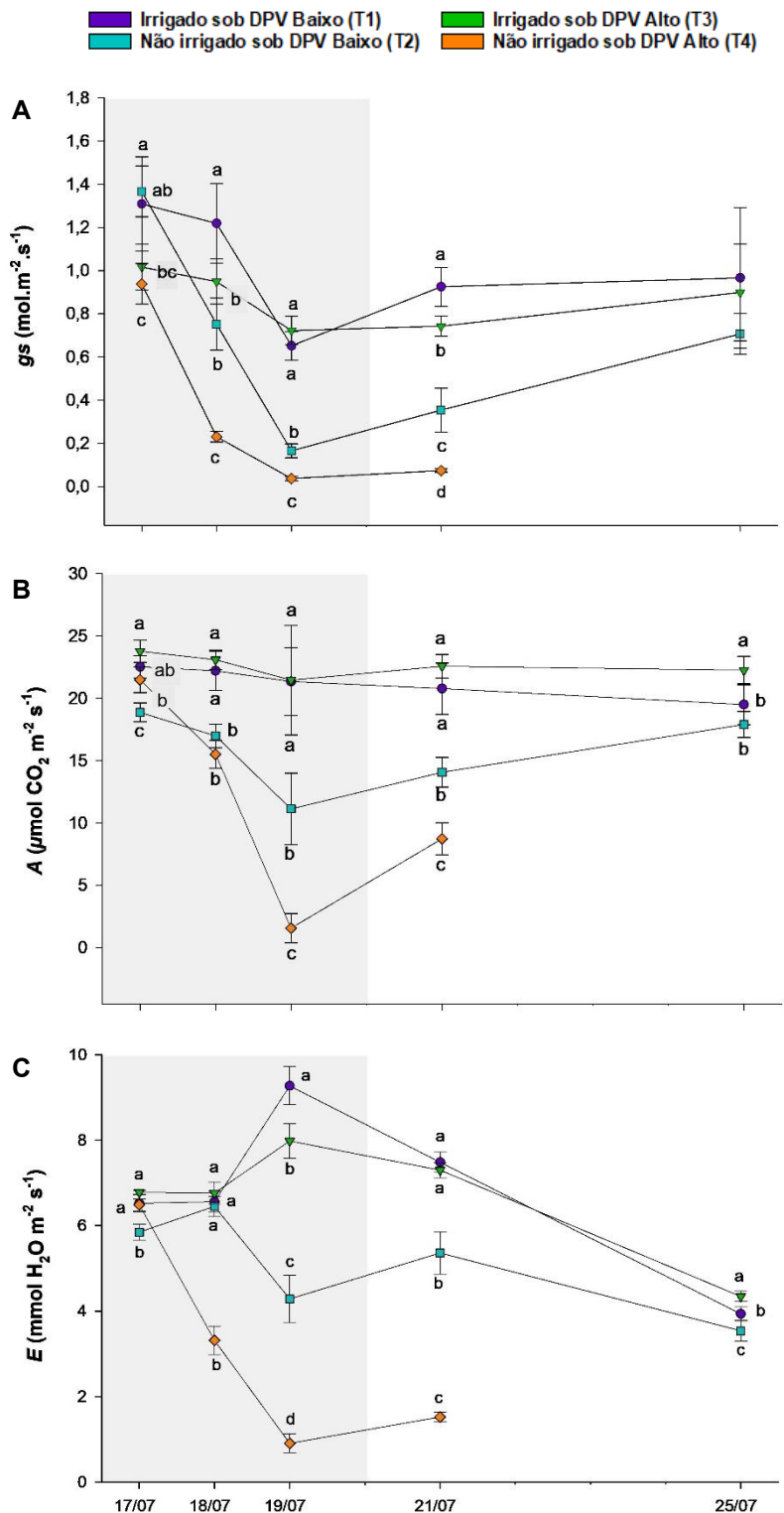
Somente no último dia de restrição hídrica (19/07) observou-se diferença estatística às 12:00 h, com T4 atingindo -2,4 MPa, enquanto T1, T2 e T3 variaram entre -1,11 e -1,49 MPa. No dia seguinte à retomada da irrigação (21/07) e quatro dias após (25/07), verificou-se a recuperação do potencial hídrico nos tratamentos anteriormente não irrigados, indicando a restauração do *status* hídrico no *continuum* solo-planta-atmosfera.

A condutância estomática (*gs*) também foi fortemente afetada pela restrição hídrica, com diferença entre os ambientes desde o primeiro dia (Figura 12). A *gs* de T4 declinou drasticamente, enquanto T2 manteve maior abertura estomática até 18/07, posteriormente reduzindo até a *gs* chegar a $0,16 \text{ mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Para os tratamentos irrigados, a *gs* média no período de estresse (17 a 19/07) foi de $1,06 \text{ mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (T1) e $0,90 \text{ mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (T3).

Durante o período experimental, os tratamentos irrigados mantiveram taxas elevadas de assimilação líquida de CO_2 . Em contraste, T4 apresentou uma queda severa, reduzindo de $21,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para $1,6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no último dia de restrição hídrica (19/07). O tratamento não irrigado sob baixo DPV (T2) também registrou redução na taxa fotossintética, porém de forma mais gradual.

A respeito da taxa de transpiração, os valores em 17/07 foram semelhantes entre os tratamentos. O tratamento T3 manteve sua transpiração devido à alta umidade do solo mesmo sob condições de alta demanda evaporativa, enquanto o tratamento T4 teve *E* reduzida para $0,9 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ após dois dias sem irrigação (19/09). Essa dinâmica não foi observada no T2 que, mesmo sem reservas hídricas no substrato, conseguiu manter sua taxa de transpiração média em $5,1 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

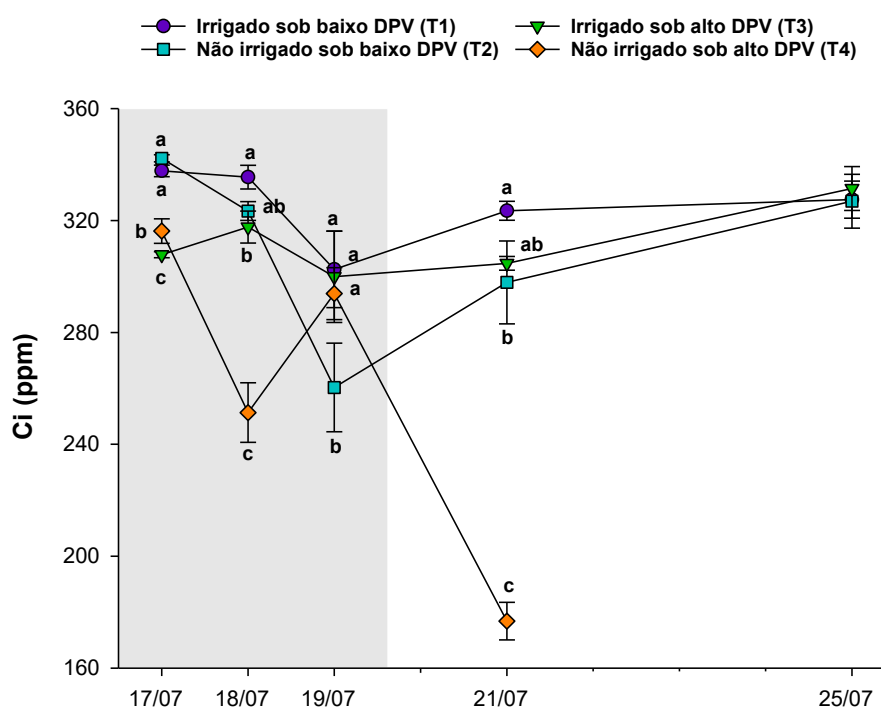
Figura 12 - Valores médios de (a) condutância estomática, (b) taxa de fotossíntese e (c) taxa de transpiração, medido das 08:30 às 09:30, de plantas jovens do clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144), durante o período de suspensão da irrigação, do dia 17 ao 19 de julho, e de recuperação, entre 20 e 26 de julho, em dois ambientes de diferentes demandas atmosféricas em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Os tratamentos conduzidos em ambiente de baixo DPV atingiram maiores taxas de concentração interna de CO₂ (Figura 13). A Ci de T4 reduziu no segundo dia, em resposta ao fechamento estomático, porém em seguida aumentou novamente a taxa de Ci, sinalizando possíveis danos ao aparato fotossintético. O tratamento T2 teve decréscimo gradual na taxa de Ci, atingindo seu valor mínimo em 19/07, com 260,3 ppm, e retornando aos níveis iniciais após a reidratação. Os tratamentos irrigados (T1 e T3) mantiveram estabilidade na Ci com média de 325,4 ppm e 312,3 ppm, respectivamente.

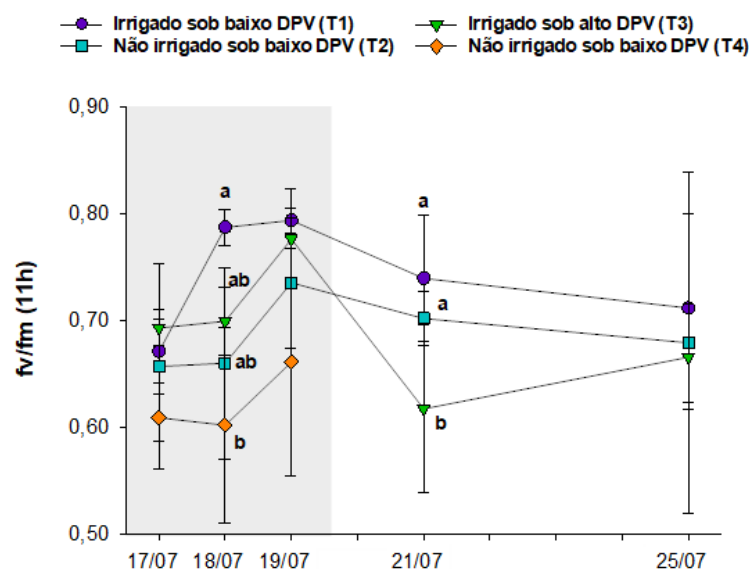
Figura 13 - Taxa de concentração interna de CO₂ média medido das 08:30 às 09:30, de plantas jovens do clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144), durante o período de suspensão da irrigação, do dia 17 ao 19 de julho, e de recuperação, entre 20 e 26 de julho, em dois ambientes de diferentes demandas atmosféricas em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

O rendimento quântico da fluorescência da clorofila foi menor para as análises de 11:00 h, apresentando diferença estatística somente em 18/07, onde T4 obteve Fv/Fm de 0,6 em contraste com T1, que atingiu valores de 0,79 (Figura 14).

Figura 14 - Rendimento quântico (Fv/Fm), às 11:00 h, de plantas jovens do clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144), durante o período de suspensão da irrigação e de recuperação, em dois ambientes de demandas atmosféricas contrastantes em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

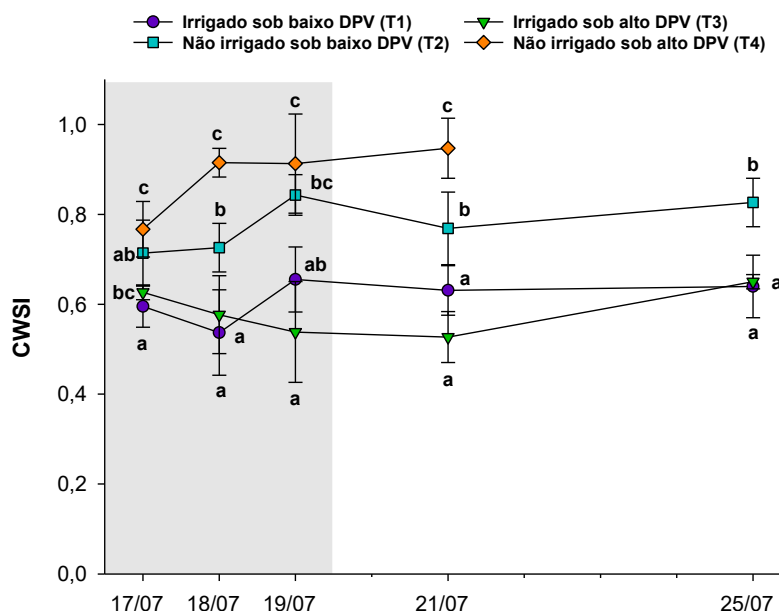


Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Verificou-se, ainda, que o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI), foi superior nos tratamentos não irrigados (T2 e T4), com valores mais expressivos para as plantas mantidas em ambientes de alta demanda (Figura 15). Desde o primeiro dia de análises, o T4 apresentou os maiores índices de CWSI, atingindo o pico de 0,91 em 19/07. O tratamento não irrigado sob baixa DPV (T2) apresentou CWSI médio de 0,76, sendo 12% inferior ao registrado em T4 durante o período de suspensão hídrica.

Com a redução da transpiração, a superfície foliar aumenta a temperatura. Em 18/07, plantas do tratamento T4 registraram temperatura foliar média de 36 °C, enquanto os tratamentos irrigados mantiveram média de 31,6 e 30,8 °C para T3 e T1, respectivamente.

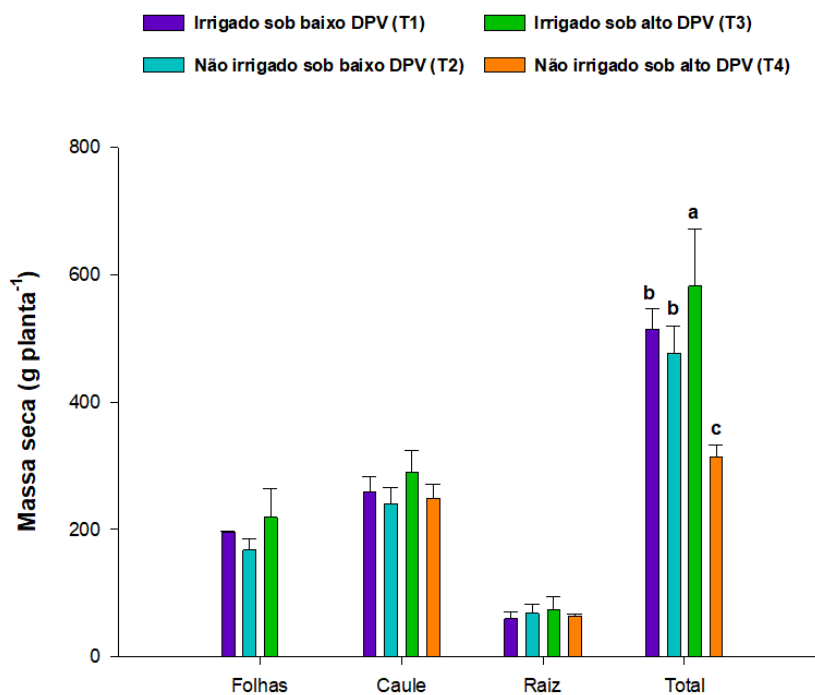
Figura 15 - Índice de Estresse Hídrico da Cultura (CWSI) médio, medido às 12:00 h, de plantas jovens do clone do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (I144), durante o período de suspensão da irrigação e de recuperação em dois ambientes de demandas atmosféricas contrastantes em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A massa seca de cada compartimento (folhas, caules e ramos, raízes) não apresentou diferença estatística entre os tratamentos (Figura 16). A massa seca total do tratamento T3, por sua vez, foi superior ao demais com média de 581,9 g planta⁻¹. O tratamento não irrigado T4 apresentou abscisão foliar após o retorno da irrigação, não sendo possível obter a massa seca das folhas ao final do experimento.

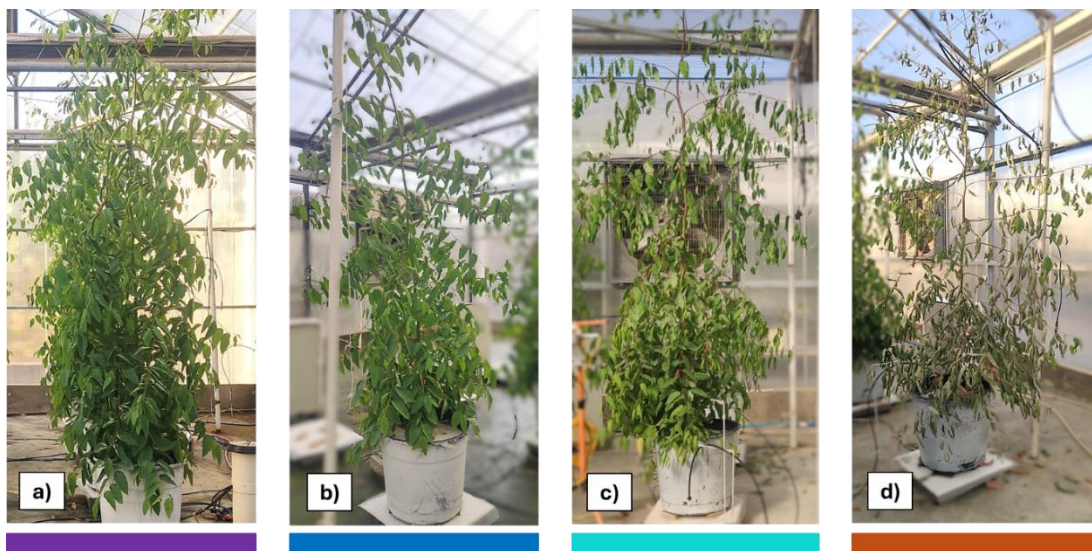
Figura 16 - Massa seca por compartimentos e total de plantas jovens do clone do *híbrido Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* (I144), aos três de meses de idade, sob dois ambientes de demandas atmosféricas e disponibilidade hídrica contrastantes em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Os efeitos visíveis do estresse hídrico e da demanda atmosférica intensificaram-se com o avanço da restrição hídrica (Figura 17). A influência do ambiente torna-se evidente ao comparar os tratamentos conduzidos sob alto DPV (T3 e T4) com os de baixo DPV. Mesmo sob regime de irrigação, o tratamento T3 apresentou sinais de estresse devido a elevada demanda evaporativa, visto que nos horários de máxima irradiância e temperatura, suas folhas exibiram perda temporária de turgidez, sintoma não observado no T1.

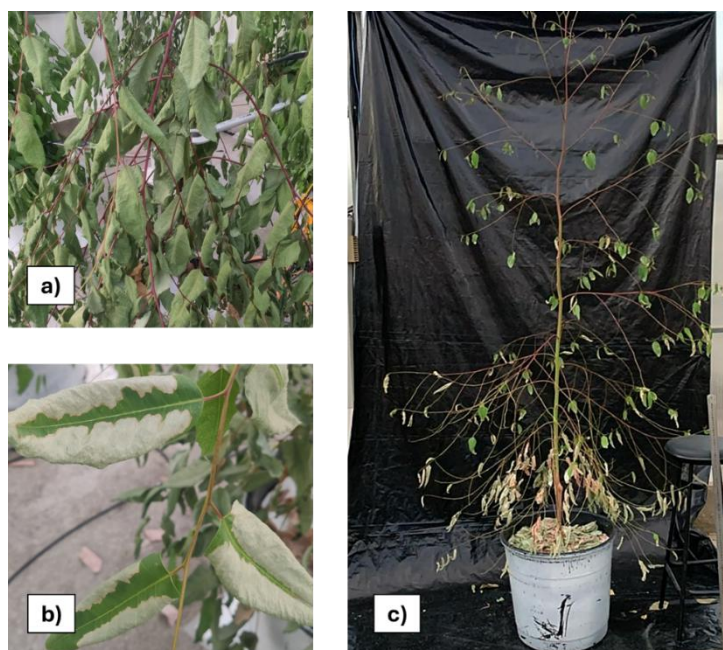
Figura 17 - Aspecto visual de plantas jovens do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (clone I144) tratamentos (a) irrigado sob baixo DPV, (b) não irrigado sob baixo DPV, (c) irrigado sob alto DPV e (d) não irrigado sob alto DPV em 19 de julho de 2024, em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Enquanto T2 não apresentou nenhum sintoma visual do estresse hídrico que estava submetido, em T4 o dano foi severo, com murchamento e dessecamento das folhas, resultando em completa abscisão foliar após o retorno da irrigação (Figura 18).

Figura 18 - Aspecto visual de planta jovem do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (clone I144) sob restrição hídrica e alta demanda atmosférica (T4), com (a) e (b) dessecamento das folhas e (c) abscisão foliar completa em 26 de julho de 2024, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

5. DISCUSSÃO

Quedas na produtividade e no crescimento vegetativo de culturas comerciais têm sido associadas ao aumento do DPV e, em alguns casos, indução à mortalidade de árvores quando associado ao déficit hídrico (López et al., 2021). Além dos efeitos crônicos, as consequências da mudança do DPV em um curto prazo foram observadas nessa pesquisa, sendo ela capaz de interferir nos valores de condutância estomática e taxas líquidas de assimilação de CO₂ (Angelocci, 2002; López et al., 2021; Grossiord et al., 2020).

No presente estudo, durante a fase de crescimento, a progressão ascendente do consumo de água das plantas decorreu do incremento da área foliar e do desenvolvimento vegetativo (Figura 9). Como esperado, a transpiração das plantas acondicionadas em ambiente de maior DPV registraram valores 1,7 superior ao transpirado pelas plantas sob baixo DPV, estando todas sob regime de irrigação. Gibson (2025), ao avaliar o crescimento de plantas do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (clone I144) com 2 meses de idade sob demandas atmosféricas contrastante, observou que o tratamento sob alto DPV obteve transpiração 37,5% maior que aquele sob baixo DPV. A autora ainda constatou, após a imposição da restrição hídrica, a transpiração do tratamento em alto DPV reduziu drasticamente, atingindo valores próximos a zero em dois dias.

A imposição do estresse hídrico revelou a interação crítica entre a disponibilidade de água no solo e a demanda atmosférica. O tratamento não irrigado sob alto DPV (T4) apresentou redução de 89% na taxa de transpiração contrastando com a queda de 52% do tratamento não irrigado sob baixo DPV (T2). Esses resultados evidenciam a influência da demanda evaporativa atmosférica no consumo hídrico. A combinação de baixa umidade relativa e a elevada temperatura do ar aumentam o DPV, consequentemente, a extração de água da superfície foliar pela atmosfera é intensificada por meio do aumento na transpiração, exigindo maior disponibilidade de água no solo para suprir o gradiente hídrico (Barkhordarian et al., 2019; Silva et al., 2023; Gonçalves et al., 2024).

A cascata de distúrbios na fisiologia do vegetal, desencadeada pela restrição hídrica nas plantas, é amplamente difundida em clássicos da literatura. Taiz et al (2024) listam os principais transtornos fisiológicos e bioquímicos causados pelo déficit hídrico, sendo a redução do potencial hídrico (Ψ) o primeiro indicador de estresse na

planta, seguido do fechamento estomático, inibição fotossintética, redução das atividades metabólicas e abscisão foliar.

O *status* hídrico foliar reflete diretamente a hidratação do solo. Durante a noite, a planta passa pelo processo de reposição de água no caule devido à transpiração quase nula (Sun et al., 2025). Porém, se o conteúdo de água no solo for mínimo, a planta não consegue estabelecer o equilíbrio e passa a atingir potenciais abaixo de -1,5 MPa, que é o indicativo do ponto de murcha permanente (Santos; Schumacher, 2016). Essa afirmação é observada no presente estudo (Figura 11), pois no *pre-dawn*, T4 atingiu Ψ de -2,0 MPa, enquanto T1 registrou valor de -0,3 MPa.

No horário das 11:00 às 15:00 h, o aumento da temperatura do ar eleva a pressão de vapor de saturação (e_s), resultando no maior déficit de pressão de vapor (DPV) do dia, condição que impõe maior demanda evaporativa à planta. Milhomem et al. (2025) também mostram o impacto da demanda evaporativa ao relatar que o potencial foliar ao meio-dia, para três espécies de *Eucalyptus* sob estresse hídrico, foram drasticamente menores quando comparados com aqueles registrados às 04:00 h.

O fechamento estomático é um mecanismo de proteção diante a perda excessiva de água para atmosfera. Dessa forma, o comportamento comum das plantas frente a deficiência hídrica é a redução na g_s na busca de evitar a desidratação (Santos; Schumacher, 2016). Otto et al. (2014), ao implementar um experimento comparando as trocas gasosas de *Eucalyptus* sp. em dois ambientes com DPV diferentes, corroboram com nossos resultados, ao destacar que, a alta demanda atmosférica é um fator limitante para a fotossíntese e abertura estomática.

Esse comportamento foi marcante em nossos dados (Figura 14). Em três dias de estresse hídrico, a g_s de T2 reduziu em oito vezes, enquanto no tratamento não irrigado sob alta demanda (T4) essa redução foi de 25 vezes. Para os tratamentos irrigados, a g_s média no período de estresse (17 a 19/07) foi de 1,06 mol.m⁻².s⁻¹ (T1) e 0,90 mol.m⁻².s⁻¹ (T3). Tais dados confirmam o efeito da demanda atmosférica sobre trocas gasosas mesmo em plantas irrigadas, tornando-se um fator crítico quando associada à escassez de água no solo.

A demanda atmosférica demonstrou ser um fator determinante capaz de impulsionar ou estagnar o fluxo de trocas gasosas nas plantas. O tratamento irrigado sob alto DPV (T3) apresentou uma taxa de transpiração média no período de avaliações de 6,6 mmol H₂O m⁻² s⁻¹, enquanto o tratamento não irrigado sob mesmas

condições (T4) teve a transpiração reduzida abruptamente, de $6,5 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para $0,9 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 12). Essa dinâmica não foi observada no T2 que, mesmo sem reservas hídricas no substrato, conseguiu manter E devido à menor demanda evaporativa do ambiente, demonstrando que uma baixa demanda atmosférica pode amortecer os efeitos imediatos da seca.

Na assimilação de CO_2 , o tratamento irrigado sob alto DPV (T3) foi ligeiramente superior a T1, exibindo uma diferença de $1,4 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sugerindo que, sem restrição hídrica, um DPV moderadamente alto não é limitante. Porém, sob condição de seca, T4 apresentou uma queda de 92% na taxa fotossintética entre em dois dias. O tratamento não irrigado sob baixo DPV (T2) também apresentou redução em A , porém no último dia de estresse manteve a fotossíntese em $11,1 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, com decréscimo de 41%.

Esse comportamento é explicado pelo fechamento estomático pois ele atua restringindo as trocas gasosas entre a planta e a atmosfera, resultando na redução das taxas de fotossíntese e transpiração. Milhomem et al. (2025) confirmam ao registrem que a assimilação de carbono nos três clones de *Eucalyptus* foi afetada pelo fechamento estomático, em resposta ao déficit hídrico, chegando a valores próximos a zero, enquanto as plantas irrigadas de todos os genótipos mantiveram suas taxas fotossintéticas.

A dinâmica da concentração interna de CO_2 (C_i) reflete os danos fotoquímicos. Inicialmente, os valores de C_i em T4 reduziram em 20% sob restrição hídrica, pois com os estômatos fechados, as plantas passaram a consumir gás carbônico interno na busca de manter a eficiência mesmo sob estresse. Porém, no primeiro dia de estresse a concentração interna de CO_2 para o mesmo tratamento registrou aumento de 251,3 para 294 ppm, sugerindo inibição da carboxilação e danos ao aparato fotossintético. Essa dinâmica também foi observada em plantas de *Handroanthus impetiginosus* submetidas à restrição hídrica, onde C_i foi superior para o tratamento não irrigado do que para o irrigado após dois dias de análises (Pessoa et al., 2017).

A eficiência quântica máxima do fotossistema II em ausência de estresse varia entre 0,78 e 0,83 para a maioria das espécies vegetais (Campostrini, 2001; Cruz et al., 2009; Capelin et al., 2018), porém estresses abióticos podem ocasionar perturbações no aparato fotossintético, resultando no declínio da relação F_v/F_m , devido a possível inibição da via fotoquímica (Konrad et al., 2005; Cruz et al., 2009; Capelin et al., 2018). Alterações no funcionamento do fotossistema II foram visíveis no

penúltimo dia de estresse no presente estudo, com redução da razão F_v/F_m para 0,60. Esse resultado é um indicador de que o déficit hídrico foi suficiente para as plantas terem sofrido fotoinibição. Comportamento semelhante foi encontrado por Santos (2023) ao avaliar a vulnerabilidade de três clones de *Eucalyptus* à restrição hídrica, pois observou que o clone I144 apresentou maior dano ao aparato fotossintético após quatro dias sob suspensão na irrigação.

Os altos valores no CWSI validam que as plantas dos tratamentos T2 e T4 estavam sob estresse hídrico, refletindo a redução da transpiração e consequente aumento da temperatura foliar (Reis et al., 2021; Santos, 2023).

Estudos conduzidos com espécies agrônômicas e florestais demonstram que sob déficit hídrico ocorrem mudanças no metabolismo e morfofisiológicas, cuja intensidade e capacidade adaptativa variam em função da espécie e do genótipo. Uma resposta fisiológica imediata e comum à restrição de água é a redução significativa da taxa de fotossíntese, transpiração e condutância estomática (Melo et al., 2022; Alves et al., 2023; Soares et al., 2025).

A redução da área foliar é outro efeito do déficit hídrico observado em plantas como estratégia para manter suprimento hídrico por um período maior, visto que ao perder as folhas, a transpiração é reduzida (Santos; Schumacher, 2016), comportamento observado no tratamento T4. Essa resposta foi confirmada por Benevides (2025) em plantas jovens do clone 144, nas quais o estresse hídrico severo desencadeou a abscisão foliar basal como mecanismo de minimização do impacto hídrico, visando a redução da taxa de transpiração.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a influência do poder evaporativo da atmosfera na intensificação dos efeitos provocados pelo estresse hídrico em plantas do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (clone I144), visto que os distúrbios nos processos fisiológicos àquelas acondicionadas em ambiente de demanda atmosférica elevada foram de maior intensidade e em menor intervalo de tempo. A interação entre indisponibilidade de água no solo somada e alto déficit de pressão de vapor, expuseram as plantas à consecutivas alterações fisiológicas capazes de reduzir a área foliar, principal meio de produção energética, inibindo a produção de biomassa. Isso ressalta a importância de considerar o DPV no zoneamento de risco e no manejo da irrigação para esta cultura, visando a mitigação de perdas produtivas sob condições de seca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, R. L. **Espírito Santo Municípios Jerônimo Monteiro.svg**. 2006. 1 mapa, color. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Espírito_Santo_Municípios_Jerônimo_Monteiro.svg. Acesso em: 7 fev. 2026.
- ALVIM, S. J. T. **Desenvolvimento de solução integrada para auxílio no uso da câmara de pressão de Scholander em medidas de potencial hídrico foliar**. 2021. 162 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.
- ALVES, É. S.; FREIRE, A. L. O.; FRANÇA, D. R. S. F.; FRANÇA, G. M.; FERREIRA, C. D. Trocas gasosas de mudas de pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart.) sob déficit hídrico progressivo e recuperação. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 19, n. 1, p. 46-54, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.22276/acsa.v19i1.1375>. Acesso em: 4 fev. 2026.
- ALVES, F. A. F.; BEZERRA, I. R. S.; LIMA, T. F.; SOUZA, S. M. de; NUNES, A. C.; BRANDÃO, E. J. Impactos de mudanças climáticas para a fisiologia e morfologia vegetal e à sociedade. **Revista Ambientale**, v. 16, n. 1, p. 24–36, 2024.
- ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera**: introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba: ESALQ, 2002.
- ANTONANGELO, A.; BACHA, C. J. C. As fases da silvicultura no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 52, n. 1, p. 207–238, 1998.
- ASSIS, T. F.; ABAD, J. I. M.; AGUIAR, A. M. Melhoramento genético do eucalipto. In: SCHUMACHER, M. V.; VIEIRA, M. (org.). **Silvicultura do eucalipto no Brasil**. Santa Maria: Editora UFSM, 2015. cap. 7, p. 209-242.
- AUER, C. G.; BRITO, G. S.; WREGE, M. S.; SANTOS, A. F. dos. **Influência das mudanças climáticas nas zonas de ocorrência da ferrugem do eucalipto na região Sul do Brasil**. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (Org.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, p. 262–279. 2017.
- AUSTRALIAN BUREAU OF AGRICULTURAL AND RESOURCE ECONOMICS AND SCIENCES. **Australian forest profiles – Eucalypt**. Canberra: Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, 2019.
- AUSTRALIAN GOVERNMENT – DEPARTMENT OF AGRICULTURE, FISHERIES AND FORESTRY. **Australia's State of the Forests Report – Synthesis 2023**. Canberra: Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, 2023.
- BARKHORDARIAN, A.; SAATCHI, S. S.; BEHRANGI, A.; LOIKITH, P. C.; MECHOSO, C. R. A Recent Systematic Increase in Vapor Pressure Deficit over Tropical South America. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 9, p. 15331, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51857-8>. Acesso em: 5 fev. 2026.
- BASSOI, L. H.; SOARES, J. M. Relação solo-água-planta. In: ROCHA, E. M. de M.; DRUMOND, M. A. (Ed.). **Fruticultura irrigada: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 27-35.
- BENEVIDES, A. B. S. **Transpiração e respostas fisiológicas de plantas jovens de Eucalyptus sob diferentes níveis de restrição hídrica**. 2025. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/items/8796123d-d7d3-4447-9b85-3eb512842f5c>. Acesso em: 7 fev. 2026.
- BIANCHI, L.; GERMINO, G. H.; SILVA, M. A. Adaptação das plantas ao déficit hídrico. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 5, n. 4, p. 15-32, out./dez. 2016.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, Í.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271-283, 2017.

BRISOLA, S. H.; DEMARCO, D. Análise anatômica do caule de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* e *E. grandis* x *urophylla*: desenvolvimento da madeira e sua importância para a indústria. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 317-330, set. 2011. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr91/cap04.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2026.

CAMPOSTRINI, E. **Fluorescência da clorofila a: considerações teóricas e aplicações práticas**. Campos dos Goytacazes: **Universidade Estadual do Norte Fluminense**, 2001. 17 p. Disponível em: https://uenf.br/UENF_ARQUIVOS/Downloads/CENTRO_CCTA_1629_1112121492.pdf. Acesso em: 7 fev. 2026.

CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; IRIGOYEN, A. Condições atmosféricas e evapotranspiração de plantas. In: **XIII Reunión Argentina y VI Latinoamericana de Agrometeorología**, Bahía Blanca – Argentina, 20 a 22 out. 2010, p. 1-2, 2010.

CAPELIN, D.; DANELUZZI, G. S.; OLIVEIRA, R. F. de; SILVA, F. B. da; SILVA, A. M. da; MACEDO, F. da C. O.; SILVA, A. R.; QUEIROZ, M. V.; BROETTO, F. Fluorescência da clorofila a: aspectos gerais e protocolo de medida para LI-6400/LI-6400XT. In: BROETTO, F. (org.). **O estresse das plantas cultivadas & protocolos de análise**. Botucatu: FEPAF, 2020. cap. 11, p. 77-84.

CHARRIER, G.; MARTIN-STPAUL, N.; DAMESIN, C.; DELPIERRE, N.; HÄNNINEN, H.; TORRES-RUIZ, J. M.; DAVI, H. Interaction of drought and frost in tree ecophysiology: rethinking the timing of risks. **Annals of Forest Science**, v. 78, n. 40, 2021.

CHEN, X.; ZHAO, P.; OUYANG, L.; ZHU, L.; NI, G.; SCHÄFER, K. V. Whole-plant water hydraulic integrity to predict drought-induced *Eucalyptus urophylla* mortality under drought stress. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 468, p. 118179, 2020.

COELHO FILHO, M. A.; BASSOI, L. H.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; PEREIRA, F. A. de C. Relação solo-planta-atmosfera. In: SOUSA, V. F. de; MARQUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Eds.) **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, cap. 1, p. 27-90, 2011.

COSTA, G. F.; MARENCO, R. A. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 2, p. 229-234, 2007.

CRUZ, M. C. M.; SIQUEIRA, D. L.; SALOMÃO, L. C. C.; CECON, P. R. Fluorescência da clorofila a em folhas de tangerineira 'Ponkan' e limeira ácida 'Tahiti' submetidas ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 896-901, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000300036>. Acesso em: 7 fev. 2026.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; FREITAS, C. H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil – Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 451, p. 117464, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117464>. Acesso em: 3 fev. 2026.

EMBRAPA — Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Eucalipto**. Agência de Informação Tecnológica (Ageitec). Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/eucalipto>. Acesso em: 10 de jan. 2026. Conteúdo atualizado em: 24 jan. 2022.

EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2014. E-book. p.366. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-277-2384-8/>. Acesso em: 19 jan. 2026.

FARALLI, M.; MATTHEWS, J.; LAWSON, T. Exploiting natural variation and genetic manipulation of stomatal conductance for crop improvement. **Current Opinion in Plant Biology**, [s. l.], v. 49, p. 1-7, jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.01.003>. Acesso em: 26 jan. 2026.

FÉLIX, A. S.; NASCIMENTO, J. W. B. do; MELO, D. F.; FURTADO, D. A.; SANTOS, A. M. dos. Análise exploratória dos impactos das mudanças climáticas na produção vegetal no Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 1, p. 397–409, 2020.

FERREIRA, M. A aventura dos eucaliptos. In: SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M. **Silvicultura do eucalipto no Brasil**. 2016. Santa Maria: Editora UFSM, 2016.

FLORENCIO, G. W. L.; MARTINS, F. B.; FAGUNDES, F. F. A. Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 115538, 2022.

FOELKEL, C. E. B. Eucalipto no Brasil: história de pioneirismo. **Visão Agrícola**, São Paulo, n. 4, p. 6-7, jul./dez. 2005.

GIBSON, E. L. **Physiological Responses of Young *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* Plants to Soil Moisture and Vapor Pressure Deficit Variables, And Kaolin Particle Film Application as a Water Stress Mitigator**. 2025. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/server/api/core/bitstreams/45aa0c5e-193c-47cf-9d05-18f606043fde/content>. Acesso em: 7 fev. 2026.

GONCALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B.; CRUSIOL, L. G. T.; SIBALDELLI, R. N. R.; NEUMAIER, N. Déficit de pressão de vapor (DPV) como referência de produtividade em soja – primeira aproximação. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (Embrapa Soja)**, Londrina, p. 1–9, 2024.

GROSSIORD, C.; BUCKLEY, T. N.; CERNUSAK, L. A.; NOVICK, K. A.; POULTER, B.; SIEGWOLF, R. T. W.; SPERRY, J. S.; MCDOWELL, N. G. Plant responses to rising vapor pressure deficit. **New Phytologist**, [s. l.], v. 226, n. 6, p. 1550-1566, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.16485>. Acesso em: 7 fev. 2026.

GUREVITCH, J.; SCHEINER, S. M.; FOX, G. A. **Ecologia vegetal**. Porto Alegre: ArtMed, 2. ed, 2009. E-book. p.60. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536320045/>. Acesso em: 19 jan. 2026.

HOREL, Á. Soil–Plant–Water Systems and Interactions. **Plants**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 358, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13030358>. Acesso em: 24 jan. 2026.

INCAPER. **PROATER 2020 - 2023: Jerônimo Monteiro**. Vitória: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, 2020. 52 p. Disponível em: https://incaper.es.gov.br/media/incaper/proater/municipios/Jeronimo_Monteiro.pdf. Acesso em: 7 fev. 2026.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – Ibá. **Relatório digital. 2025**. Disponível em: https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf. Acesso em: 6 de jan. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis — Summary for Policymakers**. Geneva: IPCC, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 6 de jan. 2026.

JEONG, U.; HAN, S. H.; KIM, D.; KIM, S.; CHEONG, E. J. Exploring the efficient irrigation period for *Larix kaempferi* seedlings in nursery pots in greenhouse conditions using optical measurements. **Forests**, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 1303, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f15081303>. Acesso em: 28 jan. 2026.

JONES, H. G. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 95, n. 3, p. 139-149, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00030-1). Acesso em: 7 fev. 2026.

KATIMBO, A.; RUDNICK, D. R.; DEJONGE, K. C.; LO, T. H.; QIAO, X.; FRANZ, T. E.; NAKABUYE, H. N.; DUAN, J. Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 266, p. 107575, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107575>. Acesso em: 28 jan. 2026.

KERBAUY, Gilberto B. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019. E-book. p.239. ISBN 9788527735612. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788527735612/>. Acesso em: 15 jan. 2026.

KONRAD, M. L. F.; SILVA, J. A. B.; FURLANI, P. R.; MACHADO, E. C. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 3, p. 339-347, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000300004>. Acesso em: 7 fev. 2026.

LAWSON, T.; MATTHEWS, J. Guard cell metabolism and stomatal function. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 71, p. 273-302, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100251>. Acesso em: 26 jan. 2026.

LIU, G.; LUO, J.; LU, W.; HE, H.; LIU, Y.; CHEN, S. From genome to gene expression: the genomic landscape of a hybrid species of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and its divergence from parental species hybrid. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 1458, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07371-3>. Acesso em: 1 fev. 2026.

LOPEZ, J.; WAY, D. A.; SADOK, W. Systemic bias in predicting plant responses to high vapor pressure deficit. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 27, n. 11, p. 2284-2296, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.15548>. Acesso em: 7 fev. 2026.

MAJEROWICZ, N. Fotossíntese. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019. E-book. p. 109-151. ISBN 9788527735612. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788527735612/>. Acesso em: 8 jan. 2026.

MARIN, F. R. **Microclimatologia agrícola**: introdução biofísica da relação planta-atmosfera. Piracicaba: FEALQ, 2021.

MASIERO, M. A.; OLIVEIRA, V. H. D.; SILVA, L. S.; SILVA, E. C.; CORDEIRO, N. K.; ALMEIDA, J. S.; MENECHINI, W.; PINHEIRO, J. F. Aspectos sobre o melhoramento genético do eucalipto no Brasil. In: ZUFFO, A. M.; AGUILERA, J. G. (Orgs.). **Pesquisas Agrárias e Ambientais, Volume XII**. Campo Grande: Pantanal Editora. p. 89-104. 2022.

MATOS, F. S.; BORGES, L. P.; AMARO, C. L.; OLIVEIRA, D. B.; CARMO, M. S.; TORRES JÚNIOR, H. D. **Folha seca**: introdução à fisiologia vegetal. Curitiba: Appris, 2019.

MELO, T. S.; CONCENÇO, G.; PARFITT, J. M. B.; DEUNER, S.; FARIA, L. C.; SILVA, L. B. X.; CAMPOS, A. D. S.; SINNEMANN, C. S. Déficit hídrico e recuperação pós-estresse do metabolismo fisiológico em arroz - evidência do efeito priming. **SAJ Basic Educ Tech Technol**, Rio Branco, v. 9, n. 1, p. 91-107, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/3646>. Acesso em: 7 fev. 2026.

MILHOMEM, S. B. B.; RAMOS, N. S.; GONÇALVES, F. B.; MEDEIROS, G. H.; FERNANDES, H. E.; DOTTO, M. C.; HAKAMADA, R. E.; SIEBENEICHLER, S. C.; ERASMO, E. A. L. Response of *Eucalyptus* Seedlings to Water Stress in a Warm Tropical Region in Brazil. **Forests**, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 1802, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f16121802>. Acesso em: 7 fev. 2026.

MUNIZ, B. R. B.; XAVIER, J. dos A.; KANIESKI, M. R.; CAMPOS, C. G. C.; HENKES, J. A. Impactos das mudanças climáticas nas florestas tropicais. **Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 65–82, 2022.

NADAL-SALA, D.; MEDLYN, B. E.; RUEHR, N. K.; BARTON, C. V. M.; ELLSWORTH, D. S.; GRACIA, C. A.; TISSUE, D. T.; TJOELKER, M. G.; SABATÉ, S. Increasing aridity will not offset CO₂ fertilization in fast-growing eucalypts with access to deep soil water. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 27, n. 11, p. 2431-2444, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.15590>. Acesso em: 2 fev. 2026.

OTTO, F. E. L.; COELHO, C. A. S.; KING, A.; PEREZ, E. C.; WADA, Y.; OLDENBORGH, G. J.; HAARSMA, R.; HAUSTEIN, K.; UHE, P.; AALST, M. V.; ARAVEQUIA, J. A.; ALMEIDA, W.; CULLEN, H. Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in southeast Brazil. In: Explaining Extremes of 2014 from a Climate Perspective. **EXPLAINING EXTREME EVENTS OF 2014**, v. 96, n. 12, p. 3, 2015.

OTTO, M. S. G.; HUBBARD, R. M.; BINKLEY, D.; STAPE, J. L. Dominant clonal *Eucalyptus grandis* x *urophylla* trees use water more efficiently. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 328, p. 117-121, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.022>. Acesso em: 7 fev. 2026.

PACHECO, F. V.; LAZZARINI, L. E. S.; ALVARENGA, I. C. Metabolismo relacionado com a fisiologia dos estômatos. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia-GO: Centro Científico Conhecer, v. 18, n. 36, p. 186, 2021.

PIMENTA, J. A. Relações hídricas. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019. E-book. p. 1. ISBN 9788527735612. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788527735612/>. Acesso em: 8 de jan. 2026.

PELOSO, A. F.; TATAGIBA, S. D.; REIS, E. F.; PEZZOPANE, J. E. M.; AMARAL, J. F. T. Limitações fotossintéticas em folhas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídrico. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 389-399, 2017. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8181>. Acesso em: 7 fev. 2026.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Porto Alegre: Agropecuária, 2002.

PESSOA, J. L.; FREIRE, A. L. O.; COSTA, A. S. Trocas gasosas de plantas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC) Mattos submetidas ao déficit hídrico e posterior reidratação. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 16, n. 3, p. 269-276, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811711632017269>. Acesso em: 7 fev. 2026.

QUEIROZ, R. R. S.; TEODORO, T. B. P.; CAROLINO, A. T.; BITENCOURT, R. O. B.; SAMUELS, R. I. Application Method Determines Effects of *Beauveria bassiana* on *Eucalyptus grandis* Growth and Leaf-Cutting Ant Foraging. **Insects**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 134, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/insects17020134>. Acesso em: 2 fev. 2026.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 4. ed. Barueri: Manole, 2022. E-book. p.10. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786555764680/>. Acesso em: 19 jan. 2026.

REIS, L. A. C.; DE OLIVEIRA, J. A.; DOS SANTOS FARNESE, F.; ROSADO, A. M.; REIS, L. A. C. Chlorophyll fluorescence and water content parameters are good biomarkers for selecting drought tolerant eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 481, n.118682, p. 1-10, 2021.

SANTOS, A. R. dos. **Crescimento, fisiologia e eficiência do uso da água em clones de *Eucalyptus* submetidos ao déficit hídrico e adubação**. 2023. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2023. Disponível em: https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_16991_Tese%20Final%20Aline%20Ramalho%202023.pdf. Acesso em: 7 fev. 2026.

SANTOS, K. F.; SCHUMACHER, M. V. Ecofisiologia e crescimento de *Eucalyptus* em condição de déficit hídrico. **Ecologia e Nutrição Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 2, p. 33-44, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/2316980X21038>. Acesso em: 7 fev. 2026

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; BRADSTREET, E. D.; HEMMINGSEN, E. A. Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science**, [s. l.], v. 148, n. 3668, p. 339-346, 1965.

SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; CAMPOE, O.; STAPE, J. L. Yield pattern of eucalypt clones across tropical Brazil: An approach to clonal grouping. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 30-39, 2019.

SILVA, F. G. da; DUTRA, W. F.; DUTRA, A. F.; OLIVEIRA, I. M. de; FILGUEIRAS, L. M. B.; MELO, A. S. de. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 10, p. 946-952, 2015.

SILVA, R. P. de S.; SANTOS, J. A. dos; CAMPOE, O. C.; GUILLEMOT, J.; SILVA, M. R.; MAIRE LE MAIRE, G. Relação da condutância estomática com o déficit de pressão de vapor de dois clones de *Eucalyptus* em diferentes manejos no período seco e chuvoso. **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, p. 315-319, 2023.

SHEN, C.; LI, L.; OUYANG, L.; SU, M.; GUO, K. *E. urophylla* × *E. grandis* high-quality genome and comparative genomics provide insights on evolution and diversification of eucalyptus. **BMC Genomics**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 223, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12864-023-09318-0>. Acesso em: 7 fev. 2026.

SOARES, E. A. C. C.; GUIMARÃES, E. R.; SILVA, F. S.; COSTA, J. G. J.; SILVA, L. I.; RIBEIRO, M. D.; ABREU, S. C. D.; SOUSA, A. E. D. Crescimento e trocas gasosas de plantas de adubação verde sob estresse hídrico. **Scientia Plena**, Aracaju, v. 21, n. 4, p. 040201, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2025.040201>. Acesso em: 7 fev. 2026.

STAPE, J. L.; ALVARES, C. A.; SIQUEIRA, L. DE.; SOLIMAN, E. P. Rede Experimental G2M2P2: resultados de meia-rotação evidenciam oportunidades de ganhos na produtividade do *Eucalyptus* no Brasil e otimização do seu manejo. **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, 2023.

SULMAN, B. N.; ROMAN, D. T.; YI, K.; WANG, L.; PHILLIPS, R. P.; NOVICK, K. A. High atmospheric demand for water can limit forest carbon uptake and transpiration as severely as dry soil. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 43, n. 18, p. 9682-9691, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016GL069416>. Acesso em: 24 jan. 2026.

SUN, Z.; XU, H.; WANG, S.; LIN, H.; SONG, Q.; LI, Y.; LU, D.; CHEN, Y. Magnitude, Seasonality, and Drivers of Nocturnal Water Use in Three Subtropical and Tropical Plantations in Southern China. **Forests**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 529, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f16030529>. Acesso em: 5 fev. 2026.

VALADARES, G. M.; LANDAU, E. C.; MAIA, N. L. M. Evolução da produção de eucalipto (*Eucalyptus spp.* e outros gêneros, *Myrtaceae*). In: LANDAU, E. C.; SILVA, G. A. da; MOURA, L.; HIRSCH, A.; GUIMARAES, D. P. (Eds.) **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem animal e da silvicultura**. Brasília, DF: Embrapa, v. 3, cap. 44, p. 1435-1500, 2020.

VALVERDE, S. R.; ISBAEX, C.; AMARAL, D.; RIBEIRO, G. B. de D. Cultura e aspectos socioeconômicos do eucalipto. In: RESENDE, R. T.; BORÉM, A.; LEITE, H. G. (Orgs.). **Eucalipto: do plantio à colheita**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. p. 19-33.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; et al. **Fundamentos de fisiologia vegetal**. Porto Alegre: ArtMed, 2021. E-book. p. ii. ISBN 9786581335113. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786581335113/>. Acesso em: 8 de jan. 2026.

TAIZ, L.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A.; et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 7. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2024. E-book. p. 153. ISBN 9786558822127. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786558822127/>. Acesso em: 9 de jan. 2026.

TORDIN, C. Espécie de eucalipto urophylla tem maior plasticidade e produtividade. **Portal Embrapa**, Jaguariúna, 9 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/66939049/especie-de-eucalipto-urophylla-tem-maior-plasticidade-e-produtividade>. Acesso em: 7 fev. 2026.

WATT, M. S.; SILVA, D. de; ESTARIJA, H. J. C.; YORSTON, W.; MASSAM, P. Detecting the short-term effects of water stress on radiata pine physiology using thermal imagery. **Forests**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 28, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f15010028>. Acesso em: 28 jan. 2026.

WEN, R.; QIN, M.; JIANG, P.; YANG, F.; LIU, B.; ZHU, M.; TIAN, Y.; SHANG, B. Vegetation and evapotranspiration responses to increased atmospheric vapor pressure deficit across the global forest. **Atmosphere**, Basel: MDPI, Art. 408, v. 15, n. 4, 2024.

YIN, J.; LI, G.; LU, Z. Early–Late Correlations of Growth Traits of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake Clones over a Rotation. **Plants**, [s. l.], v. 14, n. 24, p. 3725, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants14243725>. Acesso em: 7 fev. 2026.

YNOUE, R. Y.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; et al. **Meteorologia: Noções Básicas**. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. E-book. p.24. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579752643/>. Acesso em: 24 jan. 2026.

YUAN, W.; ZHENG, Y.; PIAO, S.; CIAIS, P.; LOMBARDOZZI, D.; WANG, Y.; RYU, Y.; CHEN, G.; DONG, W.; HU, Z.; JAIN, A. K.; JIANG, C.; KATO, E.; LI, S.; LIENERT, S.; LIU, S.; NABEL, J. E. M. S.; QIN, Z.; QUINE, T.; SITCH, S.; SMITH, W. K.; WANG, F.; WU, C.; XIAO, Z.; YANG, S. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. **Science Advances**, v. 5, n. 8, 2019.