



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE
E RECURSOS HÍDRICOS**

**LIMIARES DE AQUECIMENTO GLOBAL (1,5–4 °C) E
IMPACTOS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E NA
PRODUTIVIDADE DOS PLANTIOS DE EUCALIPTO
BASEADOS EM MODELOS CLIMÁTICOS DO CMIP6**

Flávia Fernanda Azevedo Fagundes

Itajubá, MG, Brasil

2026

**LIMIARES DE AQUECIMENTO GLOBAL (1,5–4 °C) E
IMPACTOS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E NA
PRODUTIVIDADE DOS PLANTIOS DE EUCALIPTO
BASEADOS EM MODELOS CLIMÁTICOS DO CMIP6**

por

Flávia Fernanda Azevedo Fagundes

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração/Linha de pesquisa:

Meio Ambiente e Recursos Hídricos/Clima e Sustentabilidade

Orientadora:

Profa. Dra. Fabrina Bolzan Martins

Coorientador:

Prof. Dr. Roger Rodrigues Torres

Itajubá, MG, Brasil

2026

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE
E RECURSOS HÍDRICOS**

Flávia Fernanda Azevedo Fagundes

**LIMIARES DE AQUECIMENTO GLOBAL (1,5–4 °C) E
IMPACTOS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E NA
PRODUTIVIDADE DOS PLANTIOS DE EUCALIPTO
BASEADOS EM MODELOS CLIMÁTICOS DO CMIP6**

Tese aprovada por banca examinadora em 27 de março de 2026 conferindo à autora o título de **Doutora em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

Banca examinadora:

Prof^a Dra. Fabrina Bolzan Martins (Orientadora)
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Roger Rodrigues Torres (Coorientador)
Universidade Federal de Itajubá

Dr. Benedito Cláudio da Silva
Universidade Federal de Itajubá

Dr. Carlos Pedro Boechat Soares
Universidade Federal de Viçosa

Dra. Cássia Gabriele Dias
Universidade Federal de Itajubá

Dr. Murilo da Costa Ruv Lemes
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

*Aos meus pais Antônio José e Maria Cleusa,
e ao meu irmão Luiz Fernando,*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a Deus, por permitir-me vivenciar momentos como este, reconhecendo de onde parti, aonde cheguei e ciente de que ainda há muito a ser alcançado, bem como por conceder-me força e coragem para enfrentar, com alegria e esperança, cada dia.

Com a conclusão desta tese, encerro um ciclo de dez anos na Universidade Federal de Itajubá. Trago comigo o orgulho e a emoção de ter realizado a graduação e a pós-graduação em uma instituição pública tão renomada e de qualidade. Registro, portanto, meus agradecimentos a essa universidade.

À minha querida orientadora, Professora Dra. Fabrina Bolzan Martins, deixo meu sincero agradecimento pelos anos de orientação e parceria. Desde 2019, seguimos juntas na pesquisa científica, caminho marcado por aprendizado, incentivo e crescimento. Agradeço pelo constante estímulo para que eu alcançasse o meu melhor, pela paciência, apoio, amizade e conselhos. Sem dúvidas, seu apoio e acolhimento foram essenciais, especialmente nos momentos mais desafiadores. Sinto-me extremamente grata e privilegiada por ter tido uma orientadora tão competente, dedicada e comprometida com a formação de seus orientandos.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Roger Rodrigues Torres, agradeço pela coorientação, apoio e profissionalismo demonstrados durante o desenvolvimento desta tese. Considero uma grande sorte poder contar com seus valiosos conhecimentos sobre clima e mudanças climáticas.

À minha banca examinadora, ao Dr. Murilo Ruv Lemes, pelo apoio, amizade, entusiasmo constante e pelas valiosas contribuições ao longo destes anos. Sua disponibilidade, incentivo e olhar atento foram fundamentais para o aprimoramento desta tese. À Dra. Cássia Dias e aos Drs. Benedito Cláudio e Carlos Boechat, por aceitarem o convite para compor esta banca e contribuírem significativamente para a melhoria e o fortalecimento desta tese.

Aos meus amigos de longa data, Ivana Riêra, Mábele Ferreira e Rafael Xavier, pessoas tão especiais com quem sempre pude contar, agradeço pela amizade e pelo carinho ao longo destes anos. A vida é mais leve graças ao apoio e à presença de vocês.

Ao Vitor Hugo Marrafon, colega e amigo, pela disponibilidade e apoio na programação do primeiro capítulo, deixo meu sincero agradecimento.

À minha família, Antônio José, Maria Cleusa, Luiz Fernando e Acássio Marcelo, por serem meu maior alicerce e por serem também vitoriosos em cada uma das minhas conquistas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pelo apoio financeiro concedido ao longo deste trabalho, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro ao projeto APQ 01511-24. Ao Instituto de Recursos Naturais e ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, agradeço pelo apoio que possibilitou a publicação de artigos científicos e a participação em congressos.

Muito obrigada!

RESUMO

FAGUNDES, Flávia Fernanda Azevedo. **Limiars de aquecimento global (1,5–4 °C) e impactos na disponibilidade hídrica e na produtividade dos plantios de eucalipto baseados em modelos climáticos do CMIP6.** 2026. 122 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2026.

As plantações de *Eucalyptus* spp. estão expostas a riscos crescentes em decorrência das mudanças climáticas, especialmente em função da redução da disponibilidade hídrica e das alterações na produtividade. Considerando que os compromissos atuais estabelecidos no Acordo de Paris podem ser insuficientes para limitar o aquecimento global a 1,5 °C e mantê-lo abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, torna-se essencial avaliar os impactos associados a esses limiars, e também em limiars superiores, como 3 °C e 4 °C. Nesse contexto, esta tese foi dividida em dois capítulos, com os seguintes objetivos: i) determinar os padrões espaciais dos quatro limiars de aquecimento global (1,5; 2; 3 e 4 °C) em relação aos níveis pré-industriais; ii) avaliar os impactos desses limiars sobre a evapotranspiração real (ETr), excedente hídrico (EXC), deficiência hídrica (DEF) e a viabilidade das plantações de eucalipto em escala global, utilizando múltiplos modelos climáticos do conjunto *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) (Capítulo I); iii) identificar os padrões espaciais das variáveis-chave relacionadas à produtividade do eucalipto nos quatro limiars de aquecimento global, em relação ao período de controle; e iv) avaliar os impactos desses limiars na produtividade potencial acumulada (PPa) e na produtividade atingível acumulada (PAa) do eucalipto na América do Sul, também com base em modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 (Capítulo II). Para isso foram utilizados dados de modelos climáticos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* e do NEX-GDDP-CMIP6, considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Inicialmente, foram determinados os anos em que cada limiar de aquecimento global foi atingido e, posteriormente, calculou-se a disponibilidade hídrica e as produtividades (potencial e atingível) por meio do Modelo de Zona Agroecológica da *Food and Agriculture Organization* (MZA-FAO) associada a cada limiar. Os resultados indicam aumentos adicionais da temperatura do ar entre +0,5 °C e +3 °C em diversas regiões do globo, que associados a padrões heterogêneos de precipitação anual (entre ±150 mm ano⁻¹), impactam diretamente a disponibilidade hídrica. Observam-se aumentos da evapotranspiração da cultura, ETr e DEF, bem como reduções do EXC, principalmente sobre o Brasil, África do Sul, extremo sul da Europa (Espanha e Portugal), Índia, Tailândia e Austrália. Como consequência, a viabilidade das plantações de eucalipto poderá ser comprometida entre 30% e 89%, dependendo da região. Em relação às produtividades, a PPa apresentou aumentos no sul da América do Sul, variando de +25 m³ ha⁻¹ a +75 m³ ha⁻¹. Em contraste, reduções entre -25 e -75 m³ ha⁻¹, especialmente nos limiars de 3 °C e 4 °C, predominaram em grande parte do Brasil, norte do Paraguai, leste da Bolívia e nas regiões setentrionais do continente. De forma mais acentuada, a PAa apresentou reduções entre -25 e -150 m³ ha⁻¹ e quebra de produtividade de até 80%, sobretudo nos limiars de 3 °C e 4 °C, abrangendo grande parte do Brasil, Argentina, Bolívia, oeste do Peru e o norte do continente. Os resultados dos dois capítulos evidenciam a intensificação das vulnerabilidades das plantações sob limiars mais elevados de aquecimento global e reforçam a necessidade de estratégias de adaptação direcionadas. Destacam-se a seleção de genótipos mais tolerantes ao estresse térmico e hídrico, ajustes nas práticas de manejo silvicultural, como adequação do espaçamento e da densidade de plantio, desbastes e podas mais frequentes, adoção de práticas de conservação da água no solo e diversificação produtiva por meio de sistemas agroflorestais.

Palavras-chave: Acordo de Paris; deficiência hídrica; MZA-FAO; quebra de produtividade.

ABSTRACT

FAGUNDES, Flávia Fernanda Azevedo. **Global warming thresholds (1.5–4 °C) and impacts on water availability and Eucalyptus plantation productivity based on CMIP6 climate models.** 2026. 122 p. Thesis (PhD in Environment and Water Resources) - Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2026.

Eucalyptus spp. plantations face increasing risks as a result of climate change, particularly due to reductions in water availability and changes in productivity. Considering the current commitments established under the Paris Agreement may be insufficient to limit global warming to 1.5 °C and below 2 °C relative to pre-industrial levels either, it becomes essential to assess the impacts associated with these thresholds, as well as with higher thresholds such as 3 °C and 4 °C. In this context, this thesis was divided into two chapters, with the following aims: i) to determine the spatial patterns of four global warming levels (1.5, 2, 3, and 4 °C) relative to pre-industrial period; ii) to assess the impacts of these thresholds on actual evapotranspiration (AE), water surplus (WS), water deficit (WD), and the viability of eucalyptus plantations at the global scale, using multiple climate models from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) dataset (Chapter I); iii) to identify the spatial patterns of key variables related to eucalyptus productivity under the four global warming levels compared to the control period; and iv) to assess the impacts of these thresholds on accumulated potential productivity (APP) and accumulated attainable productivity (AAP) of eucalyptus in South America, also based on NEX-GDDP-CMIP6 climate models (Chapter II). For this purpose, climate model data from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 and the NEX-GDDP-CMIP6 were used, considering the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. Initially, the years in which each global warming threshold was reached were determined, and subsequently, water availability and productivity (potential and attainable) were calculated using the Agroecological Zone Model of the Food and Agriculture Organization (AZM-FAO) associated with each threshold. The results indicate additional increases in air temperature ranging from +0.5 °C to +3 °C across various regions worldwide, associated with heterogeneous patterns of annual precipitation (± 150 mm year⁻¹), directly affecting water availability. Increases in crop evapotranspiration, AE, and WD, as well as reductions in WS, were observed, particularly over Brazil, South Africa, southern Europe (Spain and Portugal), India, Thailand, and Australia. As consequence, the viability of eucalyptus plantations may be compromised by 30% to 89%, depending on the region. Regarding productivity, APP showed increases in southern South America, ranging from +25 to +75 m³ ha⁻¹. In contrast, reductions between -25 and -75 m³ ha⁻¹, especially under the 3 °C and 4 °C warming levels, predominated across much of Brazil, northern Paraguay, eastern Bolivia, and northern regions of the continent. More pronounced reductions were observed for AAP, with decreases ranging from -25 to -150 m³ ha⁻¹ and productivity losses of up to 80%, particularly under the 3 °C and 4 °C, affecting large areas of Brazil, Argentina, Bolivia, western Peru, and the northern part of the continent. The findings of both chapters highlight the intensification of plantation vulnerabilities under higher global warming levels and reinforce the need for targeted adaptation strategies. These include selecting genotypes more tolerant to thermal and water stress, adjusting silvicultural management practices such as optimizing spacing and stocking, more frequent thinning and pruning, adopting soil-water conservation practices, and production diversification through agroforestry systems.

Keywords: Paris Agreement; water deficit; AZM-FAO; yield loss.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1.1 - Área plantada (em milhões de hectares) dos principais produtores mundiais de Eucalyptus. Os dados foram obtidos a partir de múltiplas fontes e estão disponíveis em: <https://zenodo.org/records/13137376> 20
- Figura 1.2 - Representação esquemática das etapas metodológicas para determinar o ano em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C são atingidos. 27
- Figura 1.3 - Representação esquemática das etapas para calcular o balanço hídrico climático (BHC) para obtenção da evapotranspiração real (ET_r, mm mês⁻¹), excedente hídrico (EXC, mm mês⁻¹) e deficiência hídrica (DEF, mm mês⁻¹). CAD = capacidade de água disponível no solo (mm); ET_c = evapotranspiração da cultura (mm mês⁻¹); P = precipitação (mm mês⁻¹); NegAc = perda potencial acumulada de água (mm mês⁻¹); ARM = armazenamento de água no solo (mm mês⁻¹); ALT = armazenamento de água no solo (mm mês⁻¹) entre os períodos *i* e *i-1*; M = soma dos valores mensais positivos de P-ET_c, ou seja, estação chuvosa; N = soma dos valores mensais negativos de P-ET_c, ou seja, estação seca. Os cálculos do BHC são mensais, onde *i* representa cada mês do ano (1 = janeiro, ..., 12 = dezembro). Adaptado de Martins et al. (2022) e Ribeiro et al. (2024). 29
- Figura 1.4 - Ano médio em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (Painel A), 2 °C (Painel B), 3 °C (Painel C) e 4 °C (Painel D) serão atingidos em relação ao período pré-industrial (1850 – 1900), baseado na média do conjunto de todos os modelos de circulação geral e nos dois *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). 32
- Figura 1.5 - Padrão médio do ensemble da mudança de temperatura do ar próximo à superfície (°C) para os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (Painéis A e B), 2 °C (Painéis C e D), 3 °C (Painéis E e F) e 4 °C (Painéis G e H) em relação ao período pré-industrial (1850-1900), nos dois cenários socioeconômicos (SSPs): SSP2-4.5 (Painéis A, C, E e G) e SSP5-8.5 (Painéis B, D, F e H). O número de projeções usadas para calcular a média é indicado no canto inferior esquerdo de cada painel. 34
- Figura 1.6 - Padrão médio do ensemble da mudança de precipitação acumulada anual (mm ano⁻¹) para os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (Painéis A e B), 2 °C (Painéis C e D), 3 °C (Painéis E e F) e 4 °C (Painéis G e H) em relação ao período pré-industrial (1850-1900), nos dois cenários socioeconômicos (SSPs): SSP2-4.5 (Painéis A, C, E e G) e SSP5-8.5 (Painéis B, D, F e H). O número de projeções usadas para calcular a média é indicado no canto inferior esquerdo de cada imagem. 36
- Figura 1.7 - Padrões espaciais dos valores anuais de evapotranspiração da cultura (ET_c, mm ano⁻¹, painéis A, E, J e N), evapotranspiração real (ET_r, mm ano⁻¹, painéis B, F, K e O), excedente hídrico (EXC, mm ano⁻¹, painéis C, G, L e P) e deficiência hídrica (DEF, mm ano⁻¹, painéis D, H, M, Q), considerando as necessidades hídricas do eucalipto, com o *ensemble mean* dos cenários *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) para cada limiar de aquecimento global (1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C). 39
- Figura 1.8 - Anomalias anuais de evapotranspiração da cultura (ET_c, mm ano⁻¹, painéis A, E, J e N), evapotranspiração real (ET_r, mm ano⁻¹, painéis B, F, K e O), excedente hídrico (EXC,

mm ano⁻¹, painéis C, G, L e P) e deficiência hídrica (DEF, mm ano⁻¹, painéis D, H, M, Q), considerando as necessidades hídricas do eucalipto, com o *ensemble mean* dos cenários *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) para cada limiar de aquecimento global (1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C) em relação ao período de controle (CP = 1995-2014). As áreas sombreadas nos painéis D, H, M e Q indicam regiões com DEF ≥ 330 mm ano⁻¹..... 40

Figura 1.9 - Padrões de acoplamento identificados nos limiares de aquecimento global de 1,5 °C (Painel A), 2 °C (Painel B), 3 °C (Painel C) e 4 °C (Painel D) considerando as anomalias nas variáveis precipitação acumulada anual (mm ano⁻¹) e deficiência hídrica (DEF, mm ano⁻¹). 43

CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Localização da área de estudo e área plantada (milhões de hectares) dos principais produtores de eucalipto na América do Sul. Os dados estão disponíveis em: <https://zenodo.org/records/13137376>. 64

Figura 2.2 - Esquema de cálculo do MZA-FAO com indicação (setas tracejadas) dos processos influenciados pelos estresses térmicos (e, f) e hídricos (i, h), setas pretas indicam interação da precipitação (a), radiação solar global (b), CO₂ (c), temperatura (d) e radiação solar global no topo da atmosfera (g). Em que: CAD = capacidade de água disponível (mm), ET_c = evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹), ET_r = evapotranspiração de real (mm mês⁻¹), ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹), i = data de plantio, n = data da colheita (84 meses), Q_o = radiação solar global no topo da atmosfera (MJ m⁻² dia⁻¹), Z_r = comprimento radicular (cm)..... 71

Figura 2.3 - Padrão médio do ensemble da mudança de temperatura mínima (painéis A1 a B4), temperatura média (painéis C1 a D4) do ar próximo a superfície (°C), precipitação anual acumulada (mm ano⁻¹, painéis E1 a F4), umidade relativa do ar (%), painéis G1 a H4) e radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹, painéis I1 a J4) para os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (painéis A1 a J1), 2 °C (painéis A2 a J2), 3 °C (painéis A3 a J3) e 4 °C (painéis B4 a J4) em relação ao período de controle (CP, 1995-2014), nos dois cenários socioeconômicos (SSPs): SSP2-4.5 (painéis A1-A3, C1-C3, E1-E3, G1-G3 e I1-I3) e SSP5-8.5 (painéis B1-B4, D1-D4, F1-F4, H1-H4 e J1-J4). A média foi calculada considerando todos os modelos climáticos que atingiram cada limiar de aquecimento nos dois cenários socioeconômicos (SSPs, 5-8.5 e 2-4.5). O número de modelos climáticos que atingiram cada limiar está no canto inferior esquerdo de cada painel. 76

Figura 2.4 - Padrão médio do ensemble da mudança de evapotranspiração da cultura (ET_c, mm ano⁻¹, painéis A1 a B4), evapotranspiração real (ET_r, mm ano⁻¹, painéis C1 a D4) e deficiência hídrica anual (DEF, mm ano⁻¹, painéis E1 a F4) para os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (painéis A1, B1, C1, D1, E1 e F1), 2 °C (Painéis A2, B2, C2, D2, E2 e F2), 3 °C (Painéis A3, B3, C3, D3, E3 e F3) e 4 °C (Painéis B4, D4, e F4) em relação ao período de controle (CP, 1995-2014), nos dois cenários socioeconômicos (SSPs): SSP2-4.5 (painéis A1-A3, C1-C3 e E1-E3) e SSP5-8.5 (painéis B1-B4, D1-D4 e F1-F4). O *ensemble mean* foi calculado considerando todos os modelos climáticos que atingiram cada limiar de aquecimento nos dois cenários socioeconômicos (SSPs, 5-8.5 e 2-4.5). O número de modelos climáticos que atingiram cada limiar está no canto inferior esquerdo de cada painel. 78

Figura 2.5 - Padrão espacial médio da produtividade potencial acumulada (PPa, m³ ha⁻¹)

(painéis A–E) e da produtividade atingível acumulada (PAa, m³ ha⁻¹) (painéis J–N) para limiares de aquecimento global de 1,5 °C (painéis B e K), 2 °C (painéis C e L), 3 °C (painéis D e M) e 4 °C (painéis E e N). Os painéis F–I e O–R mostram o padrão espacial médio da mudança da PPa e da PAa, respectivamente, para cada limiar em relação ao período de controle (CP, 1995–2014). Todos os valores foram obtidos pelo MZA-FAO para cada limiar de aquecimento, modelo climático do NEX-GDDP-CMIP6 e SSP, sendo posteriormente calculado os valores médios dos modelos climáticos e SSPs que atingiram cada limiar de aquecimento..... 81

Figura 2.6 - Padrão espacial médio da quebra de produtividade (%) para o eucalipto no período em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (painel A), 2 °C (painel B), 3 °C (painel C) e 4 °C (painel D) são atingidos. Todos os valores foram obtidos pelo MZA-FAO para cada limiar de aquecimento, modelo climático do NEX-GDDP-CMIP6 e SSP, sendo posteriormente calculados os valores médios dos modelos climáticos e SSPs que atingiram cada limiar de aquecimento..... 83

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.1 - Lista dos modelos climáticos, resoluções horizontais aproximadas (graus de latitude x longitude) do conjunto de dados do *Coupled Model Intercomparison Project* Fase 6 (CMIP6) utilizados neste estudo..... 24

Tabela 1.2 - Anos central em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C serão atingidos nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Os asteriscos (*) representam que a projeção do modelo não atingiu o limite até 2100. 31

Tabela 1.3 - Proporções de áreas favoráveis e desfavoráveis para o cultivo de *Eucalyptus* (por continentes), em relação ao período de controle (CP = 1995-2014) e limiares de aquecimento global de 1,5°C, 2°C, 3°C e 4°C, considerando a DEF..... 45

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Função de penalização por geada (fgeada), índice de sensibilidade do eucalipto ao estresse hídrico (Ky, adimensional) e índice de mortalidade por estresse hídrico (fDEF, adimensional). 70

Tabela 2.2 - Equações e parametrizações necessárias para calcular a produtividade potencial e atingível do eucalipto pelo modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO). 72

Tabela 2.3 - Principais medidas de adaptação identificadas na literatura para mitigar os impactos dos aumentos dos limiares de aquecimento global nas plantações de eucalipto 89

Tabela 2.4 - Principais espécies e híbridos de eucalipto utilizados nos plantios na América do Sul, com classificação quanto à tolerância à deficiência hídrica e principais doenças e pragas reportadas..... 92

LISTA DE APÊNDICES

CAPÍTULO I

Apêndice 1.1 - Espécies e híbridos de eucalipto mais cultivados nos maiores países produtores de eucalipto e sua tolerância à deficiência hídrica, compilados a partir de múltiplas fontes. ..58

CAPÍTULO II

Apêndice 2.1 - Comparação dos dados de entrada, parâmetros estruturais, interface, representação dos processos dinâmicos (partição de biomassa, fotossíntese bruta, respiração de manutenção e senescência foliar), edáficos e de manejo nos modelos de simulação de eucalipto: Modelo da Zona Agroecológica da *Food and Agriculture Organization* (MZA-FAO), *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) e *Physiological Principles in Predicting Growth* (3-PG)..... 106

Apêndice 2.2 - Quebra de produtividade (QP, %) por país no período de controle (CP, 1995 - 2014) e nos períodos em que os limiares de aquecimento global (1,5 a 4 °C) serão atingidos na América do Sul. 115

Apêndice 2.3 - Ano central em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C serão atingidos no SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Asterisco (*) representa que a projeção do modelo não atingiu o determinado limiar até 2100. 118

Apêndice 2.4 - Porcentagem de área com produtividade atingível acumulada abaixo de 250 m³ ha⁻¹ por país da América do Sul para o período de controle (CP, 1995 - 2014) e para os períodos em que os limiares de aquecimento global (1,5 a 4 °C) serão atingidos. 119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 3-PG – *Physiological Principles in Predicting Growth*
- APSIM – *Agricultural Production Systems Simulator*
- BECCS – Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono
- BHC - balanço hídrico climatológico
- BHS – balanço hídrico do solo
- CAD – Capacidade de água disponível no solo
- CMIP3 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3*
- CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*
- CMIP6 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*
- CO₂ – Dióxido de carbono
- COP21 – 21^a Conferência das Partes
- CP – Período de controle
- CRAS – Capacidade de retenção de água no solo
- DEF – Deficiência hídrica
- ETc – Evapotranspiração da cultura
- ETo – evapotranspiração de referência
- ETP – Evapotranspiração potencial
- ETr – Evapotranspiração real
- EXC – Excedente hídrico
- FAO – *Food and Agriculture Organization*
- GEE – Gases de efeito estufa
- GLDAS-2 – *NASA Global Land Data Assimilation System Version 2*
- Hurs – Umidade relativa do ar
- IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- Kc – Coeficiente de cultura
- Ky – Índice de sensibilidade do eucalipto ao estresse hídrico
- LDAS – *Land Data Assimilation System*
- MZA-FAO – Modelo de Zona Agroecológica da FAO
- NCCS – *NASA Center for Climate Simulation*

NEX-GDDP-CMIP6 – *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*

P – Precipitação acumulada

PA – Produtividade atingível

PAa – Produtividade atingível acumulada

PP – Produtividade potencial

PPa – Produtividade potencial acumulada

ppm – Partes por milhão

RCP – *Representative Concentration Pathways*

Rsds – Radiação solar global

RuBisCo – ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase-oxigenase

SSP – *Shared Socioeconomic Pathways*

Tas – Temperatura média do ar próximo à superfície

Tasmin – Temperatura mínima do ar

Zr – Comprimento radicular do eucalipto

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	16
CAPÍTULO I.....	19
1.1. INTRODUÇÃO	19
1.2. DADOS E MÉTODOS	23
1.2.1. Dados Climáticos	23
1.2.2. Capacidade de retenção de água no solo para eucalipto	25
1.2.3. Determinação dos limiares e padrões espaciais de aquecimento global.....	26
1.2.4. Obtenção das variáveis evapotranspiração real, excedente hídrico e deficiência hídrica para o cultivo de eucalipto.	27
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
1.3.1. Determinação dos diferentes períodos de aquecimento global e análise dos padrões de temperatura e precipitação associados	30
1.3.2. Evapotranspiração real, excedente hídrico e deficiência hídrica sob diferentes limiares de aquecimento global	37
1.4. CONCLUSÃO	49
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICE CAPÍTULO I.....	58
CAPÍTULO II.....	63
2.1. INTRODUÇÃO	63
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	66
2.2.1. Dados climáticos e obtenção dos limiares de aquecimento	66
2.2.2. Dados do solo e obtenção da capacidade de água disponível para eucalipto	68
2.2.3. Breve descrição do modelo de produtividade MZA-FAO adaptado para o eucalipto..	69
2.2.4. Balanço hídrico do solo e evapotranspiração da cultura.....	73
2.2.5. Avaliação dos impactos dos limiares de aquecimento na produtividade do eucalipto .	74
2.3. RESULTADOS	74
2.3.1. Padrões de mudanças nas variáveis de entrada do MZA-FAO sob quatro limiares de aquecimento global	74
2.3.2. Produtividade potencial e atingível nos quatro limiares de aquecimento global.....	79
2.4. DISCUSSÃO	84
2.5. CONCLUSÃO	95
2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
APÊNDICE CAPÍTULO II.....	106
CONCLUSÃO GERAL E RECOMENDAÇÕES.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL.....	122

INTRODUÇÃO GERAL

O gênero *Eucalyptus* é o mais cultivado no setor florestal em nível mundial, com aproximadamente 25 milhões de hectares plantados (Silva; Asiegbu, 2023). Destaca-se por sua alta produtividade, ampla adaptabilidade e versatilidade de uso, sendo capaz de se desenvolver em diferentes condições edafoclimáticas¹ (Martins *et al.*, 2022; Fagundes *et al.*, 2025). Entre 1999 e 2021, a área plantada com eucalipto no mundo aumentou 66% (Researchers; Makers, 2024), apresentando tendência de crescimento contínuo nos próximos anos, impulsionada pela maior demanda por produtos considerados ambientalmente sustentáveis e pela ampliação das aplicações tecnológicas, como as relacionadas à nanocelulose, material de alto valor agregado obtido a partir da celulose (Medeiros *et al.*, 2025).

Entretanto, a sustentabilidade das plantações de eucalipto está fortemente condicionada às condições climáticas, sendo particularmente sensível a alterações nos regimes de temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e radiação solar global (Torres *et al.*, 2021; Fagundes *et al.*, 2025; Xavier *et al.*, 2026), bem como à intensificação de eventos extremos, como ondas de frio e de calor (Freitas *et al.*, 2020). Nesse contexto, tais ameaças tendem a se intensificar no clima futuro, considerando que a temperatura média global da superfície terrestre já aumentou 0,99 °C em comparação ao período pré-industrial (IPCC, 2021). Esse cenário reforça a relevância de iniciativas internacionais, como o Acordo de Paris, que estabelece metas para limitar o aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C, com esforços para restringi-lo a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015).

Dentre os elementos climáticos, o estresse hídrico, seja em períodos prolongados ou em eventos intermitentes de seca, associado a temperaturas extremas ($< 8,5$ °C ou ≥ 40 °C) (Abreu *et al.*, 2022; Florêncio *et al.*, 2022), desencadeia alterações fisiológicas, como redução da fotossíntese, fechamento estomático, diminuição da condutância hidráulica e comprometimento da absorção de água e nutrientes (Florêncio *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023). Essas alterações estão diretamente relacionadas ao desequilíbrio hídrico, estresse térmico e aumento da demanda evaporativa da atmosfera, resultando, conseqüentemente, em modificações morfológicas e anatômicas, redução do crescimento, menor acúmulo de biomassa, e, conseqüentemente, redução da produtividade e aumento da mortalidade das árvores (Bahuguna; Jagadish, 2015; Martins *et al.*, 2022; Xavier *et al.*, 2026).

¹Edafoclimáticas refere-se ao conjunto integrado de condições do solo (edáficas) e condições do clima (climáticas) que atuam simultaneamente sobre o crescimento, desenvolvimento e produtividade de plantas em determinada região.

Embora alguns estudos tenham investigado os impactos das mudanças climáticas sobre o eucalipto, todos baseiam-se em recortes temporais fixos (por exemplo, entre 2041-2060 ou 2061-2100) e em gerações anteriores de modelos climáticos (Baesso *et al.*, 2010; Elli *et al.*, 2020; Carrasco *et al.*, 2022; Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022; Ouyang *et al.*, 2022; Xavier *et al.*, 2026). Essa abordagem, centrada em horizontes temporais arbitrários, dificulta a comparação direta com as metas estabelecidas no Acordo de Paris e limita a identificação dos impactos específicos associados a cada limiar de aquecimento global.

Nesse contexto, a principal inovação desta tese reside na adoção da abordagem baseada em limiares de aquecimento global (1,5; 2; 3 e 4 °C), em substituição a recortes temporais fixos, permitindo avaliar os impactos climáticos de forma diretamente alinhada às metas internacionais de mitigação e distinguir efeitos potencialmente evitáveis daqueles inevitáveis sob diferentes trajetórias de aquecimento (Betts *et al.*, 2018). Adicionalmente, esta tese emprega a geração mais recente de modelos climáticos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*, combinados às projeções de alta resolução do *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*, o que confere maior robustez científica, redução de incertezas associadas a gerações anteriores de modelos e refinamento espacial às análises de disponibilidade hídrica e produtividade do eucalipto.

Diante desse contexto, esta tese propõe uma abordagem metodologicamente inovadora ao integrar limiares de aquecimento global, modelos climáticos de última geração e a avaliação da disponibilidade hídrica para o eucalipto em escala global, bem como da produtividade potencial e atingível em escala regional na América do Sul. Essa estratégia permite conectar metas climáticas internacionais aos impactos climáticos e produtivos no setor florestal, ampliando a compreensão dos efeitos associados a diferentes limiares de aquecimento. A partir dessa abordagem, as seguintes questões norteiam esta pesquisa: i) Quais são os padrões espaciais da temperatura média do ar e da precipitação acumulada nos diferentes limiares de aquecimento global em relação ao período pré-industrial? ii) Como os limiares de aquecimento global podem impactar a disponibilidade hídrica e na viabilidade das plantações de eucalipto? iii) Quais são os padrões espaciais das variáveis-chave relacionadas à produtividade do eucalipto em escala regional na América do Sul? iv) Como os limiares de aquecimento global podem impactar a produtividade potencial e a produtividade atingível do eucalipto em escala regional?

Para responder a essas questões, a tese foi organizada em dois capítulos. O **Capítulo I** teve como objetivos: i) determinar os padrões espaciais de quatro limiares de aquecimento

global (1,5; 2; 3 e 4 °C) em relação aos níveis pré-industriais; e ii) avaliar os impactos desses limiares de aquecimento global sobre a evapotranspiração real, excedente hídrico, deficiência hídrica e a viabilidade das plantações de eucalipto em escala global, utilizando múltiplos modelos climáticos do conjunto NEX-GDDP-CMIP6. Já o **Capítulo II** teve como objetivos: i) identificar os padrões espaciais das variáveis chaves na produtividade do eucalipto nos quatro limiares de aquecimento global (1,5; 2; 3 e 4 °C) em relação ao período de controle; e ii) avaliar os impactos desses limiares de aquecimento global na produtividade potencial acumulada e produtividade atingível acumulada do eucalipto na América do Sul, utilizando múltiplos modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6.

CAPÍTULO I

LIMIARES DE AQUECIMENTO GLOBAL (1,5–4°C) E DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO COM BASE EM MODELOS DO CMIP6 COM ALTA RESOLUÇÃO

(capítulo publicado na *Earth Systems and Environment*, p.1-18, 2025, disponível em <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00916-4>)

1.1. INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* é amplamente cultivado em todo o mundo devido à sua capacidade de prosperar sob diversas condições de solo e clima, bem como ao seu significativo valor econômico. Sua área de cultivo abrange aproximadamente 25 milhões de hectares (ha) em escala global (Martins *et al.*, 2022; Silva; Asiegbu, 2023), com plantações distribuídas em quase 100 países. O eucalipto é utilizado para diversos fins, incluindo a produção de celulose e papel, carvão vegetal, madeira serrada, materiais de construção e aplicações farmacêuticas (Turnbull; Booth, 2002). Além disso, desempenha um importante papel ecológico, ao servir como habitat para diversas espécies da fauna e da flora, incluindo espécies endêmicas que dependem exclusivamente desse ambiente para sua sobrevivência (Silva; Asiegbu, 2023). Recentemente, o eucalipto tem sido considerado uma fonte promissora de biomassa para sistemas de Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS), em razão de sua elevada produtividade e rápido crescimento, características essenciais para atender à demanda substancial de matéria-prima de tecnologias voltadas à geração de emissões negativas (Bacani *et al.*, 2024).

Atualmente, os maiores produtores mundiais de eucalipto são: o Brasil, com aproximadamente 7,6 milhões de hectares (IBÁ, 2023), seguido pela China (~5,5 milhões de hectares) (Xu *et al.*, 2019), Índia (~4,3 milhões de hectares) (Hoogar *et al.*, 2019) e Austrália (~1,6 milhão de hectares) (National Forest Inventory Steering Committee, 2019) (Figura 1.1).

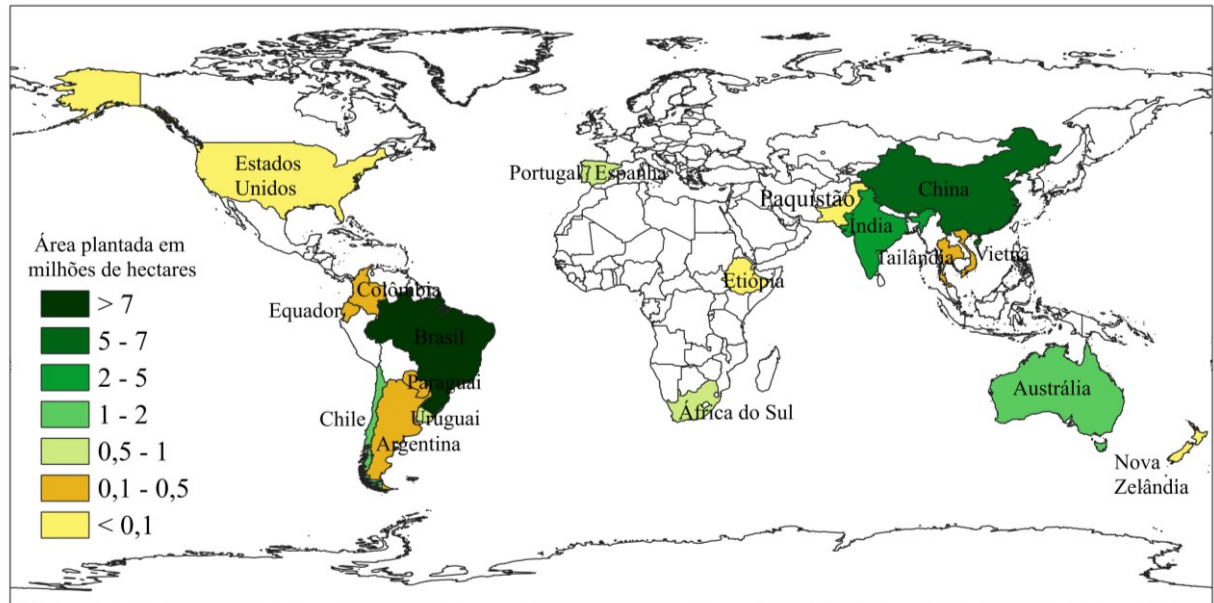


Figura 1.1 - Área plantada (em milhões de hectares) dos principais produtores mundiais de Eucalyptus. Os dados foram obtidos a partir de múltiplas fontes e estão disponíveis em: <https://zenodo.org/records/13137376>

Apesar de sua excepcional taxa de crescimento, vigor e adaptabilidade, mesmo com práticas de manejo aprimoradas e resistência a patógenos, a produtividade do eucalipto permanece altamente suscetível à variabilidade climática (Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022). A escassez hídrica e as flutuações de temperatura além da faixa considerada adequada (entre 8,5 °C e ~40 °C) representam desafios significativos (Florêncio *et al.*, 2022). O estresse hídrico e térmico combinado pode desencadear alterações e anomalias fisiológicas, anatômicas e morfológicas, resultando na redução da produtividade e no aumento da mortalidade das árvores (Bahuguna; Jagadish, 2015; Martins *et al.*, 2022). Essas ameaças tendem a se intensificar no futuro, uma vez que a temperatura média global da superfície já aumentou em média 0,99 °C (com variação de incerteza entre 0,84 a 1,10 °C) em comparação com o período pré-industrial (IPCC, 2021), juntamente com mudanças projetadas nos padrões de precipitação e fluxos de umidade (Almazroui *et al.*, 2020a, 2020b; Penna *et al.*, 2021; Torres *et al.*, 2021; Ruv Lemes *et al.*, 2023a).

Com o objetivo de reduzir riscos e vulnerabilidades aos ecossistemas naturais, a 21ª Conferência das Partes (COP21) resultou no Acordo de Paris, que estabelece a meta de limitar o aquecimento global a 1,5 °C e mantê-lo abaixo de 2,0 °C em relação aos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). Embora não seja possível definir com precisão um limiar exato de ruptura das condições climáticas (Torres *et al.*, 2021), a superação dos limiares de aquecimento global

estabelecidos na COP21, bem como de limiares adicionais mais elevados, como 3 °C e 4 °C, pode causar impactos severos sobre os ecossistemas naturais, a capacidade adaptativa das espécies (Torres *et al.*, 2021; Ayugi *et al.*, 2023) e a sustentabilidade do setor florestal, resultando em perdas financeiras para o mercado global de eucalipto. Nesse contexto, o uso de limiares de aquecimento global em estudos climáticos torna-se essencial, pois permite a avaliação dos impactos de forma comparável e independente de trajetórias específicas de emissão. Ao enquadrar os impactos de acordo com limiares de aquecimento definidos, essa abordagem possibilita a identificação dos impactos associados a cada limiar de aquecimento e a distinção entre mudanças potencialmente evitáveis e inevitáveis, fornecendo evidências científicas fundamentais para embasar tanto políticas de mitigação quanto o planejamento de adaptação em diferentes escalas regionais (Betts *et al.*, 2018; Marengo *et al.*, 2021; Ruv Lemes *et al.*, 2023b).

Por essas razões, avaliar os riscos climáticos para o eucalipto sob os limiares de aquecimento global definidos na COP21, bem como sob os limiares adicionais de 3 °C e 4 °C, é essencial para o avanço de uma gestão florestal resiliente ao clima e para apoiar a tomada de decisões voltadas à mitigação de vulnerabilidades e perdas econômicas no setor florestal global. Diversos estudos já investigaram as interações entre as mudanças climáticas e o desenvolvimento de plantações de eucalipto em diferentes regiões, destacando potenciais impactos sobre o crescimento, a produtividade e a distribuição espacial (Booth, 2013; Butt *et al.*, 2013; Booth, 2017; Florêncio *et al.*, 2022; Ouyang *et al.*, 2022). Esses estudos fornecem informações valiosas sobre os mecanismos subjacentes à vulnerabilidade das plantações de eucalipto ao aquecimento global. No entanto, a maioria dessas análises concentra-se em recortes temporais futuros, como impactos em meados ou no final do século XXI, em escalas regionais, ou baseia-se em gerações desatualizadas de modelos climáticos, sem considerar os limiares de aquecimento definidos pelo Acordo de Paris, nem limiares adicionais mais extremos, como 3 °C e 4 °C.

Apesar de sua relevância, os estudos que avaliam as implicações dos limiares de aquecimento global do Acordo de Paris sobre o eucalipto ainda são limitados. Até o momento, o único estudo conduzido por Martins *et al.* (2022) analisou padrões climáticos regionais com base em limiares derivados do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Esse estudo pioneiro investigou como o aquecimento global de 1,5 °C e 2 °C afeta a disponibilidade hídrica do eucalipto na América do Sul, revelando que entre 49% e 57% das plantações podem se tornar economicamente inviáveis em decorrência do aumento do estresse hídrico. No entanto,

avaliações abrangentes em escala global utilizando a geração mais recente de modelos climáticos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), bem como suas projeções de alta resolução provenientes do *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6), ainda não foram realizadas. Preencher essa lacuna é particularmente importante para compreender os impactos potenciais do aquecimento global nos limiares de 3 °C e 4 °C.

Os modelos climáticos do CMIP6 fornecem dados climáticos essenciais para análises em escala global, porém ainda apresentam resolução espacial relativamente grosseira (100 km a 250 km) (Samuel *et al.*, 2023). Em contrapartida, os modelos climáticos do conjunto NEX-GDDP-CMIP6 são derivados do CMIP6 e oferecem maior resolução espacial (~25 km), por meio de correção estatística de viés (Thrasher *et al.*, 2022). Essa resolução mais refinada aumenta a precisão das projeções climáticas em escalas locais e regionais, sendo fundamental para o desenvolvimento de estratégias de adaptação regional mais eficazes. Ademais, os modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 permitem uma melhor caracterização das variações climáticas específicas de cada região, possibilitando uma compreensão mais aprofundada dos desafios climáticos locais (Thrasher *et al.*, 2022).

Para avaliar os impactos dos limiares de aquecimento global sobre a disponibilidade hídrica, é necessário, inicialmente, determinar os períodos e os padrões climáticos nos quais esses limiares de aquecimento ocorrem. Uma vez identificados, esses padrões climáticos podem ser aplicados a ferramentas de avaliação da disponibilidade hídrica, como o balanço hídrico climático (BHC) (Martins *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2024). A aplicação dos limiares de aquecimento global derivados dos modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 ao BHC fornece estimativas mais precisas da evapotranspiração real (E_{Tr}), excedente hídrico (EXC) e deficiência hídrica (DEF) (Alves *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2022; Ribeiro *et al.*, 2024).

Diante desses desafios e da escassez de estudos em escala global sobre o eucalipto, este estudo teve como objetivos: i) determinar os padrões espaciais de quatro limiares de aquecimento global (1,5; 2; 3 e 4 °C) em relação aos níveis pré-industriais; e ii) avaliar os impactos desses limiares de aquecimento global sobre a E_{Tr}, EXC, DEF e a viabilidade das plantações de eucalipto em escala global, utilizando múltiplos modelos climáticos do conjunto NEX-GDDP-CMIP6.

1.2. DADOS E MÉTODOS

1.2.1. Dados Climáticos

Foram utilizados dados diários de temperatura média do ar próximo à superfície (T_{as} , °C) e a precipitação acumulada (P , mm dia⁻¹) de 30 modelos climáticos do CMIP6 e NEX-GDDP-CMIP6 (Tabela 1.1). Os dados do CMIP6 são fornecidos pelo *World Climate Research Programme* e disponibilizados pelo *Earth System Grid data* portal em: <https://cordex.org/data-access/esgf/>, e os do NEX-GDDP-CMIP6 são fornecidos pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center* e disponibilizados pelo *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS) em: <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6>.

É importante destacar que o conjunto de dados NEX-GDDP-CMIP6 é gerado por meio da aplicação de técnicas de *downscaling* estatístico diretamente sobre as saídas do CMIP6, o que implica que ambos os conjuntos de dados derivam das mesmas simulações subjacentes de modelos climáticos. Ou seja, o método de correção de viés/desagregação espacial, combinado com o *quantile mapping*, é aplicado para refinar as projeções dos modelos climáticos para uma grade de 0,25° (~25 km). Essa abordagem permite que os modelos climáticos NEX-GDDP-CMIP6 sejam usados para avaliar os impactos das mudanças climáticas em processos sensíveis a gradientes climáticos de escala mais fina e aos efeitos da topografia local nas condições climáticas (Thrasher *et al.*, 2022). Os modelos climáticos do CMIP6 apresentam resoluções horizontais que variam de 1° a 5° em latitude × longitude (Tabela 1.1). Para fins de intercomparação, os dados foram interpolados para uma grade uniforme de 1° × 1° (latitude × longitude), utilizando o esquema conservativo de remapeamento de primeira ordem (Jones, 1999). Em contrapartida, os modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 possuem resolução horizontal de 0,25° × 0,25° (latitude × longitude).

Tabela 1.1 - Lista dos modelos climáticos, resoluções horizontais aproximadas (graus de latitude x longitude) do conjunto de dados do *Coupled Model Intercomparison Project* Fase 6 (CMIP6) utilizados neste estudo.

Modelos climáticos	Rodadas	Resolução horizontal	Centro desenvolvedor
ACCESS-CM2	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	<i>Australian Community Climate and Earth System Simulator (Austrália)</i>
ACCESS-ESM1-5	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	<i>Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (China)</i>
BCC-CSM2-MR	rlilp1fl	1° x 1°	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canadá)</i>
CanESM5	rlilp1fl	5° x 5°	<i>National Center for Atmospheric Research (Estados Unidos)</i>
CESM2	r4ilp1fl	1° x 1°	<i>Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Itália)</i>
CESM2-WACCM	r3ilp1fl	1° x 1°	<i>Centre National de Recherches Meteorologiques (França)</i>
CMCC-ESM2	rlilp1fl	1° x 1°	<i>EC-Earth Consortium (Europa)</i>
CNRM-CM6-1	rlilp1f2	2,5° x 2,5°	<i>Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics (China)</i>
CNRM-ESM2-1	rlilp1f2	2,5° x 2,5°	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Estados Unidos)</i>
EC-Earth3	rlilp1fl	1° x 1°	<i>NASA Goddard Institute for Space Studies (Estados Unidos)</i>
EC-Earth3-Veg-LR	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	<i>Met Office Hadley Centre (Reino Unido)</i>
FGOALS-g3	r3ilp1fl	2,5° x 2,5°	<i>Indian Institute of Tropical Meteorology (Índia)</i>
GFDL-CM4	rlilp1fl	1° x 1°	<i>Institute for Numerical Mathematics (Rússia)</i>
GFDL-ESM4	rlilp1fl	1° x 1°	<i>Institut Pierre-Simon Laplace (França)</i>
GISS-E2-1-G	rlilp1f2	2,5° x 2,5°	<i>Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (Coreia do Sul)</i>
HadGEM3-GC31-LL	rlilp1f3	2,5° x 2,5°	<i>Atmosphere and Ocean Research Institute/ National Institute for Environmental Studies/ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japão)</i>
IITM-ESM	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	<i>Max Planck Institute for Meteorology (Alemanha)</i>
INM-CM4-8	rlilp1fl	1° x 1°	<i>Meteorological Research Institute (Japão)</i>
INM-CM5-0	rlilp1fl	1° x 1°	<i>Nanjing University of Information Science and Technology (China)</i>
IPSL-CM6A-LR	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	<i>Norwegian Climate Centre (Noruega)</i>
KACE-1-0-G	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	
KIOST-ESM	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	
MIROC-ES2L	rlilp1f2	5° x 5°	
MIROC6	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	
MPI-ESM1-2-HR	rlilp1fl	1° x 1°	
MPI-ESM1-2-LR	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	
MRI-ESM2-0	rlilp1fl	1° x 1°	
NESM3	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	
NorESM2-LM	rlilp1fl	2,5° x 2,5°	

Os modelos climáticos do CMIP6 possuem simulações para o período histórico de 1850 a 2014, abrangendo o período pré-industrial (1850–1900), que representa uma influência antropogênica mínima no clima em comparação com qualquer outro período (IPCC, 2021). Os modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 possuem simulações de 1950 a 2014. Ambos os conjuntos de dados possuem projeções de 2015 a 2100. Somente os modelos climáticos do CMIP6 fornecem simulações para o período pré-industrial, essenciais para a determinação dos limiares de aquecimento global. Como os modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 não possuem simulações para o período pré-industrial, um período de controle (CP) de 1995 a 2014 foi definido, alinhando-se com o período de referência padrão utilizado no Sexto Relatório de Avaliação do IPCC e comumente empregado em estudos climáticos (Nikulin *et al.*, 2018; IPCC, 2021). Assim, utilizamos os modelos climáticos CMIP6 para determinar os padrões espaciais de aquecimento (detalhados na seção 1.2.3) e os modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 para analisar os impactos do limiar de aquecimento global na ETr, EXC e DEF, e a viabilidade do cultivo de eucalipto (detalhado na seção 1.2.4).

Nas projeções, ambos os conjuntos de dados dos modelos climáticos incorporam cinco cenários futuros de emissões, integrando as *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) (Riahi *et al.*, 2017), que descrevem diferentes trajetórias de desenvolvimento socioeconômico, com as *Representative Concentration Pathways* (RCPs) (van Vuuren *et al.*, 2011), que representam trajetórias de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Neste estudo, foram utilizados dois cenários de SSP: SSP2-4.5 e SSP5-8.5. O SSP2-4.5 é um cenário intermediário no qual as emissões se estabilizam, levando a um forçamento radiativo de 4,5 W m⁻² até 2100 (Riahi *et al.*, 2017). O SSP5-8.5 é um cenário de altas emissões caracterizadas pela resiliência sustentada em combustíveis fósseis, resultando em um forçamento radiativo de 8,5 W m⁻² até 2100 (Riahi *et al.*, 2017).

1.2.2. Capacidade de retenção de água no solo para eucalipto

Os dados de capacidade de retenção de água no solo (CRAS, mm cm⁻¹) foram derivados de dados de textura do solo fornecidos pelo *NASA Global Land Data Assimilation System Version 2* (GLDAS-2) através do portal do *Land Data Assimilation System* (LDAS) (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/soils>). Este conjunto de dados possui uma resolução horizontal de 0,25° x 0,25° (latitude x longitude) e inclui 12 classes de textura definidas pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), desde areia e argila até matéria orgânica, rocha e outras. Os dados de textura do solo foram agrupados em três grupos principais

para representar valores distintos de CRAS (Abdu *et al.*, 2008; Kadyampakeni; Morgan, 2017; Dias; Sentelhas, 2018; Dias *et al.*, 2024; Ribeiro *et al.*, 2024): i) solo predominantemente argiloso com alta CRAS ($1,50 \text{ mm cm}^{-1}$), ii) solo predominantemente franco com média CRAS ($1,00 \text{ mm cm}^{-1}$) e iii) solo predominantemente arenoso com baixa CRAS ($0,60 \text{ mm cm}^{-1}$).

1.2.3. Determinação dos limiares e padrões espaciais de aquecimento global

Como os modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 não cobrem todo o globo e não possuem simulações pré-industriais (1850-1900), os modelos climáticos do CMIP6 foram usados para determinar os anos de aquecimento. Posteriormente, os anos encontrados para cada modelo climático CMIP6 foram diretamente relacionados aos modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6, seguindo a metodologia recomendada por Maúre *et al.* (2018), Chen e Ford (2021) e Samuel *et al.* (2023).

Os limiares de aquecimento global são definidos como o ano central de um período suficientemente longo em que a temperatura média global atinge anomalias pré-definidas (1,5, 2, 3 e 4 °C) em relação ao período pré-industrial. Para determinar esse ano central, seguimos as etapas metodológicas descritas por Torres *et al.* (2021) e Samuel *et al.* (2023) para cada modelo climático do CMIP6 e SSP. O processo envolveu várias etapas: primeiro, os valores médios anuais da temperatura do ar foram calculados para todo o período (1850 a 2100). Em segundo lugar, a temperatura média climatológica para o período pré-industrial (1850-1900) foi calculada e uma série de anomalias foi obtida subtraindo-se o valor anual de cada modelo climático de sua climatologia pré-industrial correspondente. Um filtro de média móvel centrada de 21 anos foi aplicado na série de anomalias para remover a variabilidade climática de curto prazo, gerando séries suavizadas de anomalias anuais de 1860 a 2090. Em seguida, uma média espacial global usando a série de anomalias anuais suavizadas foi calculada (Figura 1.2). Finalmente, os limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C foram identificados, bem como o ano limite de aquecimento.

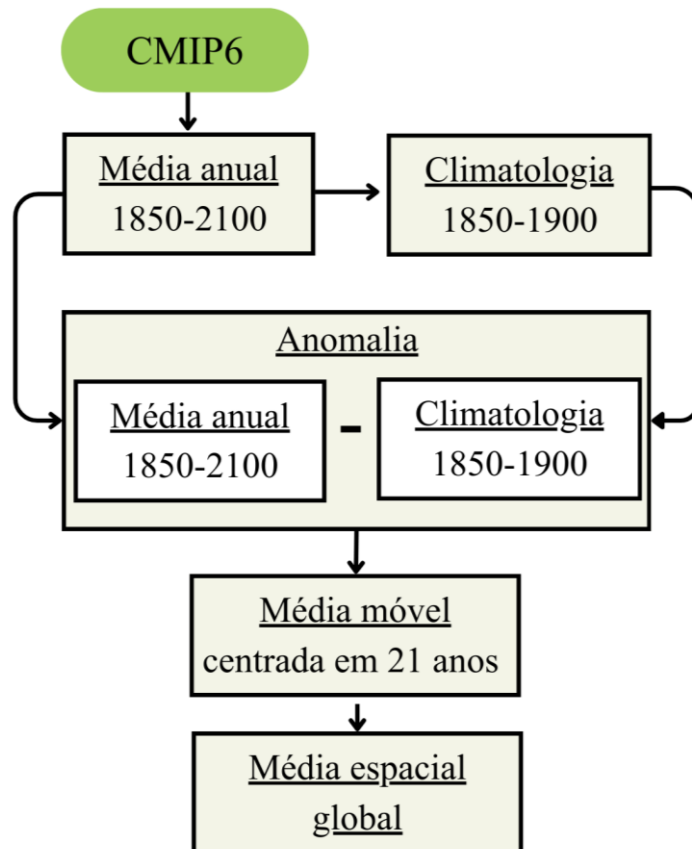


Figura 1.2 - Representação esquemática das etapas metodológicas para determinar o ano em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C são atingidos.

Para a análise espacial, a média de todas as projeções disponíveis em cada SSP foi calculada usando a série de anomalia anual suavizada para cada modelo climático em seu respectivo ano de limiar de aquecimento. Finalmente, a média do conjunto foi calculada para os dois SSPs (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Os padrões de precipitação também foram analisados, pois essa variável é essencial para a obtenção dos valores de ETr, EXC e DEF e para avaliar a viabilidade do cultivo de eucalipto em escala global. A mesma metodologia descrita acima foi aplicada, exceto pela etapa de cálculo da média global, que é desnecessária para a precipitação (Torres *et al.*, 2021).

1.2.4. Obtenção das variáveis evapotranspiração real, excedente hídrico e deficiência hídrica para o cultivo de eucalipto.

Para sintetizar os resultados e reduzir as incertezas associadas à variabilidade interna dos modelos climáticos e dos dois cenários SSP, as variáveis ETr, EXC e DEF foram calculadas considerando a média do conjunto dos SSPs (2-4.5 e 5-8.5) e dos modelos climáticos que

atingiram cada limiars de aquecimento global (Torres *et al.*, 2021) usando o conjunto de dados NEX-GDDP-CMIP6. Ou seja, ETr, EXC e DEF foram calculadas para i) o período de controle (CP, 1995-2014) e ii) períodos em que as projeções atingiram os quatro limiars de aquecimento global (1,5 °C – 4 °C).

As variáveis ETr, EXC e DEF foram obtidas a partir do BHC calculado usando o método de Thornthwaite e Mather (1955 e 1957) adaptado por Dourado-Neto *et al.* (2010). O método requer como dados de entrada as médias mensais climatológicas de Tas (°C), P (mm mês⁻¹) e evapotranspiração da cultura (ETc, mm mês⁻¹), que por sua vez é estimada usando a Tas, calculadas para os períodos CP e aqueles em que as projeções atingiram os limiars de aquecimento global, além da capacidade de água disponível no solo (CAD, mm). A CAD foi obtida pelo produto entre o comprimento radicular efetivo do eucalipto (330 cm) pela CRAS (detalhada na seção 1.2.2). O valor de 330 cm foi obtido a partir dos achados de Freitas *et al.* (2020) considerando a média do comprimento radicular ao longo da rotação da cultura (desde o plantio à colheita com ~7 anos). Assim, os valores de CAD adotados foram 495 mm (solos predominantemente argilosos), 330 mm (solos predominantemente francos) e 198 mm (solos predominantemente arenosos).

O método BHC foi selecionado por três razões principais: i) embora relativamente simples, fornece estimativas consistentes de ETr, EXC e DEF em escala mensal (Dourado-Neto *et al.*, 2010; Alves *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2022); ii) representa de forma confiável o armazenamento de água no solo em climas áridos, semiáridos e úmidos, incluindo regiões com múltiplas estações secas por ano; e iii) requer apenas temperatura e precipitação como variáveis de entrada, que estão consistentemente disponíveis nos 30 modelos climáticos e SSPs utilizados neste estudo. As etapas para obtenção de ETr, EXC e DEF são mostradas na Figura 1.3 e detalhadas em Alves *et al.* (2020) e Dourado-Neto *et al.* (2010).

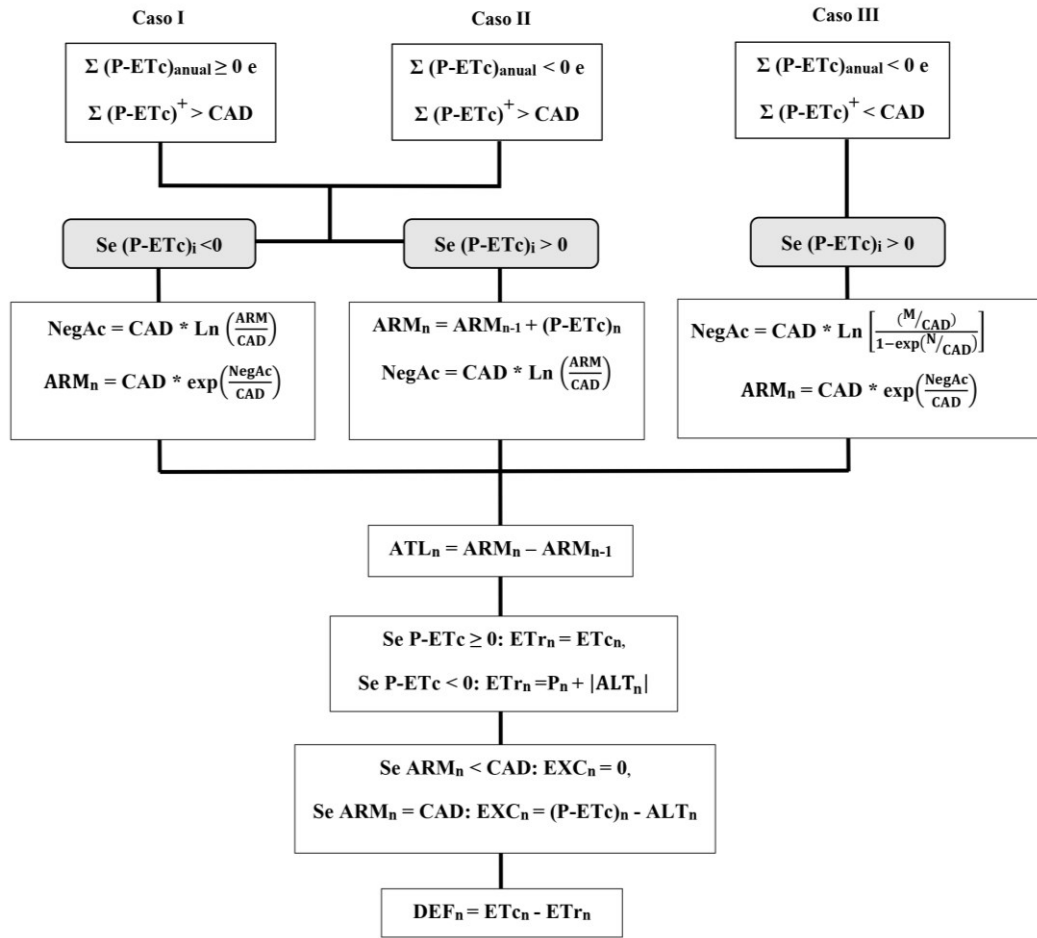


Figura 1.3 - Representação esquemática das etapas para calcular o balanço hídrico climático (BHC) para obtenção da evapotranspiração real (ETr , mm mês⁻¹), excedente hídrico (EXC , mm mês⁻¹) e deficiência hídrica (DEF , mm mês⁻¹). CAD = capacidade de água disponível no solo (mm); ETc = evapotranspiração da cultura (mm mês⁻¹); P = precipitação (mm mês⁻¹); $NegAc$ = perda potencial acumulada de água (mm mês⁻¹); ARM = armazenamento de água no solo (mm mês⁻¹); ALT = armazenamento de água no solo (mm mês⁻¹) entre os períodos i e $i-1$; M = soma dos valores mensais positivos de $P-ETc$, ou seja, estação chuvosa; N = soma dos valores mensais negativos de $P-ETc$, ou seja, estação seca. Os cálculos do BHC são mensais, onde i representa cada mês do ano (1 = janeiro, ..., 12 = dezembro). Adaptado de Martins *et al.* (2022) e Ribeiro *et al.* (2024).

A ETc mensal foi obtida multiplicando-se a evapotranspiração potencial (ETP , mm mês⁻¹) pelo coeficiente de cultura (Kc , adimensional). A ETP foi estimada por uma versão modificada do método de Thornthwaite (1948) proposta por Willmott *et al.* (1985), que incorpora ajustes para a temperatura média mensal do ar ($\geq 26,5$ °C), fotoperíodo e duração do mês (Martins *et*

al., 2022; Ribeiro *et al.*, 2024). Apesar de se basear exclusivamente na temperatura do ar, esse método fornece estimativas confiáveis de ETP em escala mensal e em longas séries temporais (Oudin *et al.*, 2005; Martins *et al.*, 2022), e foi utilizado por Alves *et al.* (2020), Martins *et al.* (2022) e Ribeiro *et al.* (2024) para obter ETr, EXC e DEF em climas futuros. O valor Kc do eucalipto foi definido como 1,15, seguindo as recomendações de Allen *et al.* (1998) e Freitas *et al.* (2020).

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1. Determinação dos diferentes períodos de aquecimento global e análise dos padrões de temperatura e precipitação associados

A Tabela 1.2 apresenta o ano projetado por cada modelo climático (e SSP) do CMIP6 para atingir os limiares de aquecimento global. Em média, o limiar de aquecimento global de 1,5 °C é projetado para 2028 (2031), 2 °C para 2041 (2051), 3 °C para 2063 (2072) e 4 °C para 2072 (2084) sob o SSP5-8.5 (SSP2-4.5).

Em média, o SSP5-8.5 projeta limiares de aquecimento mais cedo, o que é um padrão esperado devido ao seu maior forçamento radiativo e concentrações de gases de efeito estufa (GEE). O SSP5-8.5 é caracterizado por aumentos mais severos nas emissões de GEE e na temperatura ao longo do século XXI; em contraste, o SSP2-4.5 descreve uma trajetória em que as emissões e a temperatura aumentam até ~2050, seguidas de estabilização (Riahi *et al.*, 2017). Padrões semelhantes, com aquecimento mais antecipado em cenários de maiores emissões, também foram observados por Karmalkar e Bradley (2017) para os Estados Unidos, Yaduvanshi *et al.* (2019) para a Índia, ambos utilizando modelos climáticos do CMIP5, e por Zhang *et al.* (2021) para a China, com base em modelos do CMIP6.

Vale ressaltar que, sob o cenário SSP2-4.5, apenas o modelo CanESM5 atinge o limiar de aquecimento de 4 °C (em 2084). Isso reflete sua alta sensibilidade climática, que projeta taxas de aquecimento mais fortes sob condições idênticas de forçamento externo em comparação com outros modelos (Swart *et al.*, 2019).

Tabela 1.2 - Anos centrais em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C serão atingidos nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Os asteriscos (*) representam que a projeção do modelo não atingiu o limite até 2100.

Modelos do CMIP6	SSP2-4.5				SSP5-8.5			
	1,5 °C	2 °C	3 °C	4 °C	1,5 °C	2 °C	3 °C	4 °C
ACCESS-CM2	2027	2040	2069	*	2025	2037	2055	2070
ACCESS-ESM1-5	2030	2046	*	*	2028	2039	2061	2079
BCC-CSM2-MR	2037	2059	*	*	2032	2044	2066	*
CanESM5	2013	2024	2050	2084	2012	2023	2041	2055
CESM2	2029	2043	2080	*	2024	2036	2055	2072
CESM2-WACCM	2026	2041	2080	*	2022	2037	2056	2072
CMCC-ESM2	2030	2041	2065	*	2029	2039	2055	2070
CNRM-CM6-1	2030	2048	2084	*	2028	2041	2058	2072
CNRM-ESM2-1	2038	2056	2090	*	2033	2046	2065	2079
EC-Earth3	2023	2045	2086	*	2025	2036	2058	2074
EC-Earth3-Veg-LR	2028	2050	*	*	2029	2042	2062	2076
FGOALS-g3	2026	2068	*	*	2024	2045	2072	*
GFDL-CM4	2031	2049	*	*	2029	2041	2059	2079
GFDL-ESM4	2044	2070	*	*	2038	2052	2075	*
GISS-E2-1-G	2022	2032	2082	*	2021	2030	2057	2078
HadGEM3-GC31-LL	2020	2033	2062	*	2020	2030	2048	2063
IITM-ESM	2034	2059	*	*	2035	2047	2075	*
INM-CM4-8	2034	2062	*	*	2030	2045	2069	*
INM-CM5-0	2036	2071	*	*	2030	2045	2073	*
IPSL-CM6A-LR	2018	2034	2064	*	2018	2034	2050	2066
KACE-1-0-G	2013	2024	2050	*	2014	2024	2043	2063
KIOST-ESM	2020	2039	*	*	2016	2037	2063	*
MIROC-ES2L	2046	2073	*	*	2040	2053	2076	*
MIROC6	2042	2064	*	*	2035	2048	2071	*
MPI-ESM1-2-HR	2038	2064	*	*	2033	2049	2074	*
MPI-ESM1-2-LR	2036	2057	*	*	2034	2049	2071	*
MRI-ESM2-0	2029	2047	*	*	2025	2037	2063	2082
NESM3	2024	2043	*	*	2021	2034	2054	2072
NorESM2-LM	2052	2081	*	*	2041	2055	2077	*
NorESM2-MM	2047	2078	*	*	2040	2054	2077	*
Total de modelos que atingiram o limiar de aquecimento global	30	30	12	1	30	30	30	17
Média	2031	2051	2072	2084	2028	2041	2063	2072
Desvio padrão (±)	10	15	14	-	8	8	10	7

A Figura 1.4 mostra o *ensemble mean* do ano médio em que cada limiares de aquecimento global será atingido em relação ao período pré-industrial, baseado na média dos dois cenários SSPs. O aquecimento ocorrerá antecipadamente no Hemisfério Norte, principalmente nas latitudes > +60° dos continentes Americano, Europeu e Asiático, com destaque para regiões

como Alasca, norte do Canadá, Groenlândia, Noruega, Suécia, Finlândia e Rússia. Isso pode ser explicado pela maior extensão de área coberta por terra (ou gelo) no Hemisfério Norte. Ou seja, o continente possui menor capacidade térmica, aquecendo/resfriando mais rápido que o oceano e, portanto, favorecendo o aquecimento mais antecipado comparado ao Hemisfério Sul. Além disso, a maior presença de gelo e neve intensifica o feedback positivo gelo-albedo, no qual a redução de gelo expõe superfícies mais escuras, aumentando a absorção de radiação solar e contribuindo para o acúmulo adicional de calor nas áreas expostas (Overland *et al.*, 2013; Sledd; L'ecuyer, 2021).

Por outro lado, as regiões que atingirão os limiares de aquecimento global mais tardiamente estão localizadas nas baixas (entre 0° e ±30°) e médias latitudes (entre -30° e -60°), com destaque para o sul da América do Sul (sul do Chile, grande parte da Argentina e Uruguai), porção central do continente Africano (República Democrática do Congo e Madagascar), sul do continente Asiático (Índia, sul da China, Tailândia e Indonésia), e partes da Oceania, como Papua-Nova Guiné, costa sul da Austrália e Nova Zelândia (Figura 1.4).

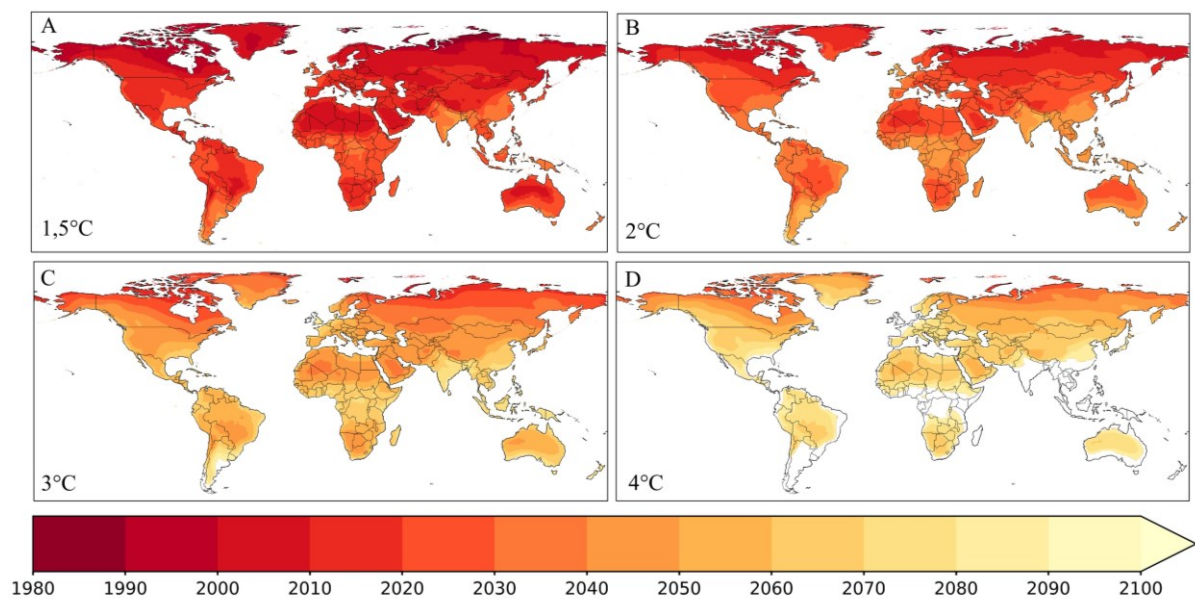


Figura 1.4 - Ano médio em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (Painel A), 2 °C (Painel B), 3 °C (Painel C) e 4 °C (Painel D) serão atingidos em relação ao período pré-industrial (1850 – 1900), baseado na média do conjunto de todos os modelos climáticos e nos dois *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

A análise da variação da temperatura anual no globo revela um padrão semelhante entre os limiares de aquecimento global (Figura 1.5). Nos limiares referentes a 1,5 °C e 2 °C, um

aumento de temperatura em relação à média global de $\sim +0,5$ °C é observado no Brasil, Estados Unidos, porções norte e sul do continente Africano, englobando o Deserto do Saara e países como Namíbia, Botsuana e África do Sul, grande porção que se estende do sudoeste a nordeste do continente Asiático (como Arábia Saudita, China e uma vasta área da Rússia), e em pequenas áreas específicas na Oceania, mais especificamente sobre a Austrália. Além disso, no limiar de aquecimento de 2 °C alguns locais como o norte da África (em uma faixa da Mauritânia a Níger), na Ásia em uma faixa da Arábia Saudita ao oeste da China e no sul da Rússia, o aumento adicional chega a +1°C.

Nos limiares de aquecimento global de 3 °C e 4 °C, aumentos de +2 °C a +3 °C são observados sobre o norte do Hemisfério Norte, principalmente no Alasca, Canadá, Groenlândia, e uma vasta área no norte da Rússia (Figura 1.5 A, B, C e D). Nestas regiões (e principalmente $> +60^\circ$), as temperaturas poderão superar 6 °C acima do nível pré-industrial.

As regiões em que os limiares de aquecimento global podem ocorrer antecipadamente (como Alasca, Canadá, Groenlândia, Rússia, norte da China, Arábia Saudita, região do Deserto do Saara, África do Sul, Brasil e Austrália – em ordem de aquecimento), coincidem com as regiões onde mudanças mais pronunciadas nos padrões de temperatura já foram identificadas em estudos anteriores usando projeções dos modelos climáticos do CMIP3, CMIP5 e CMIP6 (IPCC, 2007, 2014, 2022; Torres; Marengo, 2013; Shi *et al.*, 2018; Almazroui *et al.*, 2020a, 2020b, 2021; Li *et al.*, 2021; Ortega *et al.*, 2021; Torres *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). Além disso, estudos anteriores apontam que grande parte do Brasil, Paraguai, Bolívia, Colômbia, Peru e Venezuela irão aquecer mais e mais rápido que o Uruguai, Argentina e sul do Chile (Torres *et al.*, 2021). Da mesma forma, o norte da China (Shi *et al.*, 2018) e o nordeste dos Estados Unidos (Karmalkar; Bradley, 2017) aquecerão mais rapidamente do que as suas regiões do sul.

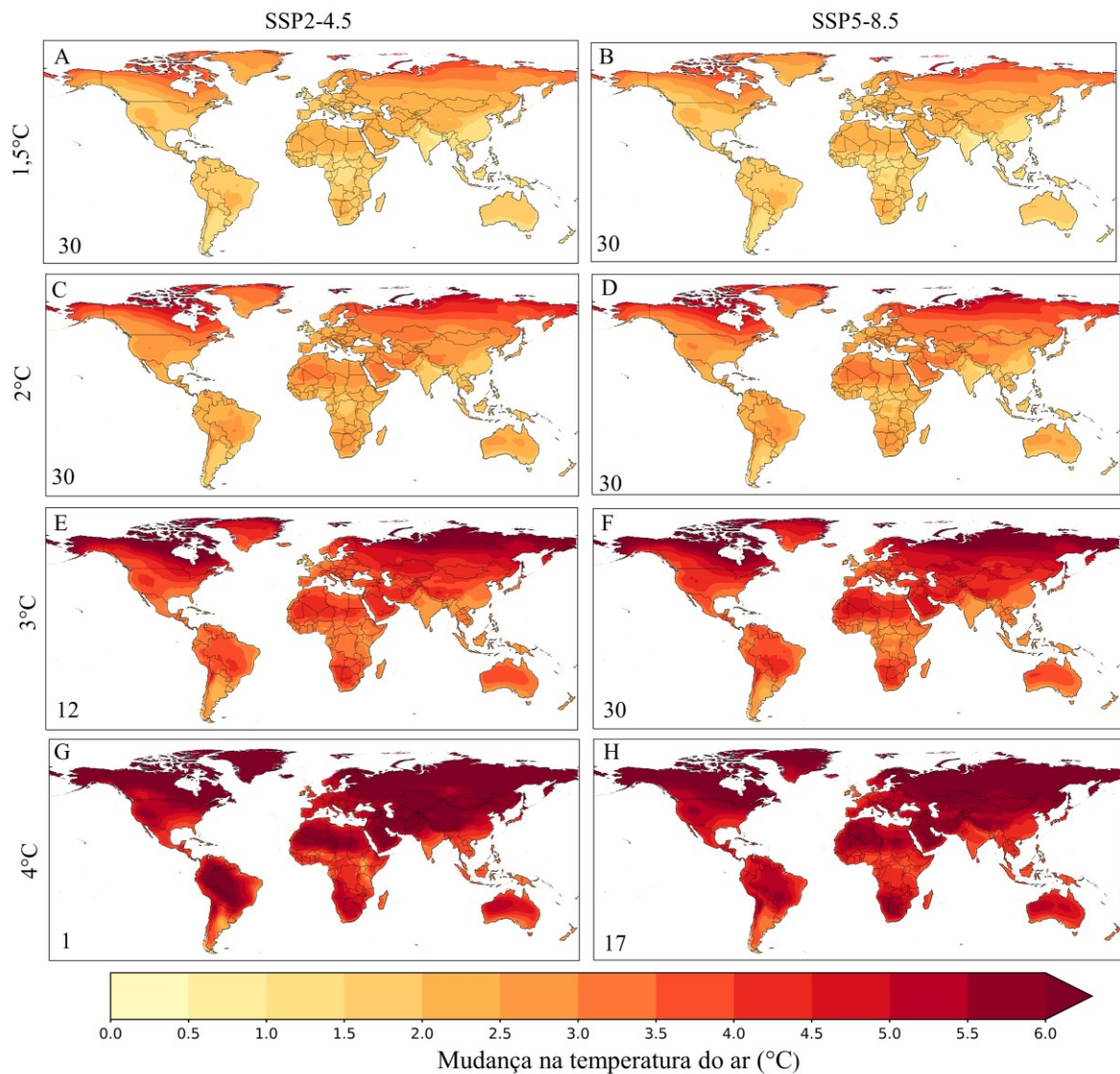


Figura 1.5 - Padrão médio do *ensemble* da mudança de temperatura do ar próximo à superfície (°C) para os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (Painéis A e B), 2 °C (Painéis C e D), 3 °C (Painéis E e F) e 4 °C (Painéis G e H) em relação ao período pré-industrial (1850-1900), nos dois cenários socioeconômicos (SSPs): SSP2-4.5 (Painéis A, C, E e G) e SSP5-8.5 (Painéis B, D, F e H). O número de projeções usadas para calcular a média é indicado no canto inferior esquerdo de cada painel.

Ao analisar as mudanças anuais de temperatura projetadas em cada cenário do SSP (Figura 1.5), observa-se que, para um determinado limiar de aquecimento global, os padrões espaciais de mudança são bastante semelhantes entre os SSP. Ou seja, os padrões de distribuição espacial de temperatura para limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C são altamente consistentes entre SSP2-4.5 e SSP5-8.5, indicando que a trajetória das emissões e a

magnitude das forçantes radiativas têm pouca influência na caracterização espacial da mudança em cada limiar. No entanto, existe uma divergência ligeira e localizada no limiar de 4 °C entre SSP2-4.5 e SSP5-8.5, principalmente na América do Sul, África Central e sul da Ásia. Isto pode estar relacionado ao menor número de modelos climáticos que atingiram 4 °C nestes cenários (1 no SSP2-4.5 e 17 no SSP5-8.5).

Os padrões espaciais de alteração na precipitação acumulada anual também são semelhantes entre os SSPs (Figura 1.6). No entanto, é possível identificar um aumento na magnitude das anomalias (negativas e positivas) nos limiares de aquecimento global de 3 e 4 °C comparados aos limiares de aquecimento global de 1,5 e 2°C. As anomalias negativas ($< -100 \text{ mm ano}^{-1}$) são observadas principalmente na América do Sul (Brasil, Bolívia, Colômbia e Venezuela), sul da África (Angola, Zâmbia, Zimbábue, Moçambique, Namíbia, Botsuana, África do Sul e Madagascar), no sul da Europa (Portugal e Espanha) e Oceania (Austrália). Reduções menos intensas na precipitação são projetadas para alguns países no sul da Europa (sul da França, Itália, Grécia, Albânia, Macedônia do Norte, Montenegro, Bulgária e Turquia) e pequenas partes da Ásia (Cambodja, Tailândia, Laos, e sul da China). As anomalias positivas ($> +150 \text{ mm ano}^{-1}$) também são intensificadas nos limiares de aquecimento global de 3 e 4 °C, principalmente na América do Norte (Canadá, porção leste dos Estados Unidos, Alasca), grande parte da Europa (principalmente na Noruega, Suécia e norte da Finlândia), Ásia (Indonésia, Índia, Bangladesh, sudoeste da China e norte da Rússia), Oceania (Papua-Nova Guiné) e porção central da África (República Democrática do Congo, Tanzânia, Burundi, Ruanda, Uganda, Gabão, Camarões, Nigéria, República Centro-Africana, Sudão do Sul e sudoeste da Etiópia).

No limiar de aquecimento de 4 °C no SSP2-4.5, o padrão e a magnitude de mudanças são muito mais pronunciados, devido ao número limitado de modelos (somente o CanESM5) (Tabela 1.2) atingir esse limiar.

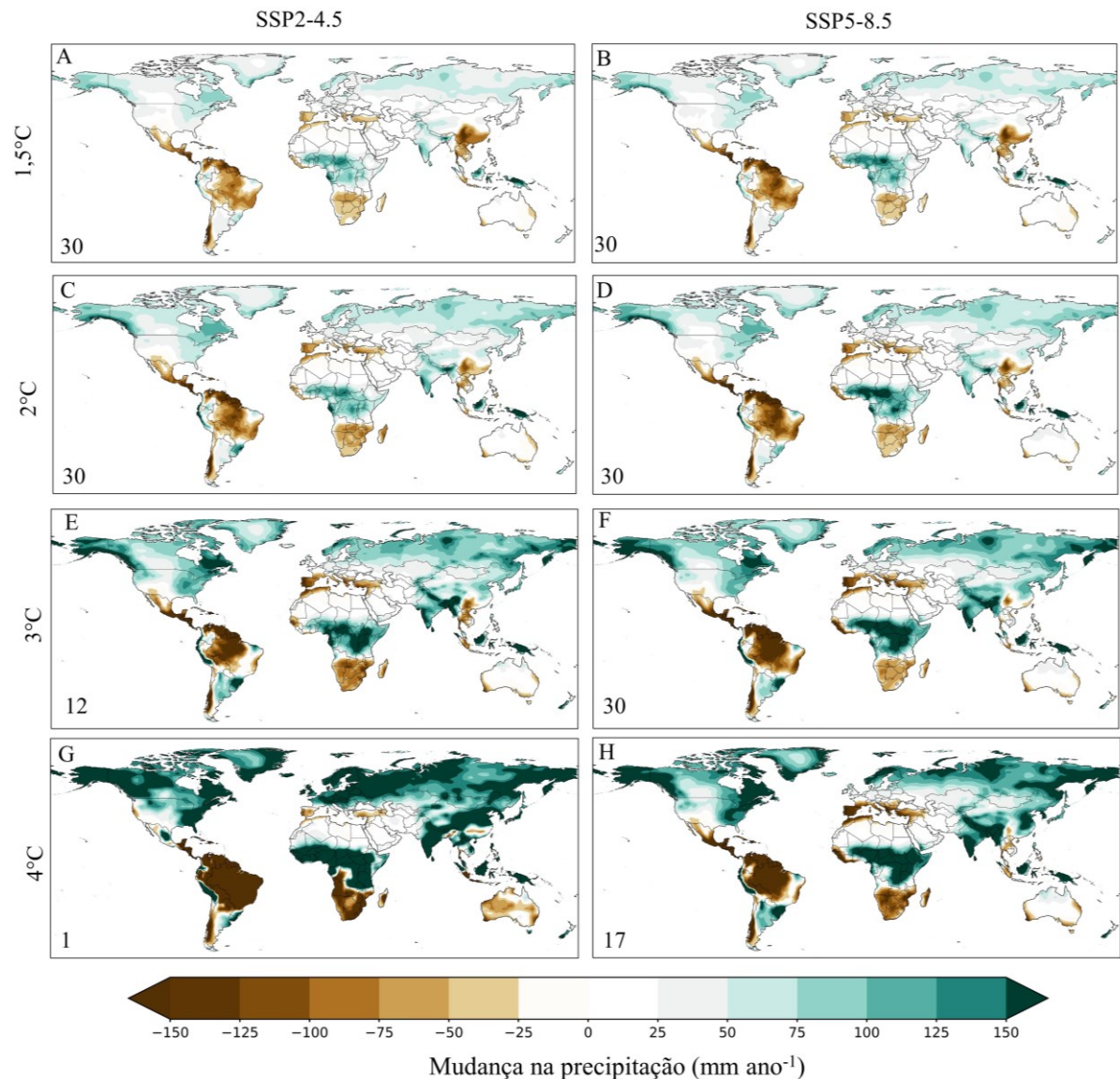


Figura 1.6 - Padrão médio do *ensemble* da mudança de precipitação acumulada anual (mm ano^{-1}) para os limiares de aquecimento global de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Painéis A e B), $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Painéis C e D), $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Painéis E e F) e $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Painéis G e H) em relação ao período pré-industrial (1850-1900), nos dois cenários socioeconômicos (SSPs): SSP2-4.5 (Painéis A, C, E e G) e SSP5-8.5 (Painéis B, D, F e H). O número de projeções usadas para calcular a média é indicado no canto inferior esquerdo de cada imagem.

Aumentos de temperatura em relação à média global de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ combinados com mudanças heterogêneas (redução e aumento) nos padrões de precipitação podem alterar as variáveis ETr, EXC e DEF, e comprometer à segurança florestal em todo globo, em especial nas áreas onde há maior área plantada de eucalipto como no Brasil, China, Índia e Austrália (Figura 1.1).

1.3.2. Evapotranspiração real, excedente hídrico e deficiência hídrica sob diferentes limiares de aquecimento global

Para as variáveis ETr, EXC e DEF, realizamos uma análise integrada utilizando os valores médios de SSP2-4.5 e SSP5-8.5, em vez de avaliar os cenários separadamente. O modelo CanESM5 sob SSP2-4.5 a 4 °C limiar de aquecimento foi excluído para minimizar a dependência de um único modelo e para reduzir incertezas.

As Figuras 1.7 e 1.8 retratam as distribuições espaciais anuais dos valores de ETr, EXC, DEF e ETc para eucalipto em quatro limiares de aquecimento global, juntamente com suas anomalias em relação ao CP (1995-2014). Em geral, os padrões espaciais de ETc, ETr e DEF refletem o padrão observado para a temperatura do ar (Figura 1.5), enquanto EXC se alinha aos padrões de precipitação anual (Figura 1.6). Ou seja, em vários locais onde há padrões de aquecimento mais rápidos e intensos, há aumentos na ETc, ETr e DEF, enquanto nos locais onde há padrões de redução da precipitação anual, há diminuições do EXC. Tais respostas demonstram que a temperatura do ar é uma variável determinante para as saídas de água para a atmosfera.

Em relação às variáveis ETc e ETr (Figura 1.7), as maiores magnitudes ($> 1800 \text{ mm ano}^{-1}$) ocorrem na zona tropical (entre $-23,5^\circ$ a $+23,5^\circ$). Além disso, as áreas com anomalias positivas de ETc e ETr (entre $\sim +100$ e $+600 \text{ mm ano}^{-1}$) aumentam entre os limiares de aquecimento global de $1,5^\circ\text{C}$ à 4°C (Figura 1.8), principalmente sobre a América do Sul (em grande parte do Brasil e Paraguai, oeste do Peru, Colômbia, Venezuela, Guiana, Guiana Francesa e Suriname), América Central (do Panamá a Guatemala), América do Norte (sul do México), porção central da África (especialmente na República Democrática do Congo, Congo, Gabão, Guiné Equatorial, Camarões e República Centro-Africana) e sul da Ásia (Iêmen, Omã, Índia, Nepal, Bangladesh, Tailândia, Laos, sul da China e Indonésia). Aumentos mais intensos da ETc ($\sim 300 \text{ mm ano}^{-1}$) e inalteráveis de ETr são observados na Oceania, na maior parte da Austrália. Menores aumentos em ambas variáveis ($\sim +100 \text{ mm ano}^{-1}$) são observadas principalmente no limiar de aquecimento de $1,5^\circ\text{C}$, sobre a América do Sul (Brasil, Bolívia, oeste do Peru, Colômbia, Venezuela, Guiana, Guiana Francesa e Suriname), África central (República Democrática do Congo, Congo, Gabão, Guiné Equatorial, Camarões) e no sul da Ásia (Iêmen, Omã, Laos, Tailândia e Cambodja e Indonésia).

Anomalias negativas de ETr (de até -500 mm ano^{-1}) (Figura 1.8), principalmente nos limiares de aquecimento global de 3 e 4°C são observadas em locais pontuais na América do Sul (nordeste da Argentina e Brasil, parte central do Paraguai e norte da Venezuela), sul da

América do Norte (extremo leste do México), sul e oeste da África (África do Sul, sul da Angola, Benin, Togo, Gana, Costa do Marfim, Senegal e noroeste da Argélia), sul da Ásia (região central da Índia) e pequenas porções ao leste da Austrália (Figura 1.8).

Com relação ao EXC, são observados padrões similares entre os limiares de aquecimento global, com valores mais pronunciados nos limiares de aquecimento global de 1,5 °C e 2 °C (entre 300 mm ano⁻¹ e 1000 mm ano⁻¹). Anomalias positivas de menor magnitude (+100 mm ano⁻¹) são observadas em áreas específicas na América do Sul (norte do Brasil, sul e oeste do Peru e oeste do Equador), centro da África (norte da Nigéria, sul de Niger, Etiópia, Quênia), e sul da Ásia (Índia, Nepal, Butão e sudoeste da China) (Figura 1.8), enquanto anomalias negativas de maior magnitude (> -500 mm ano⁻¹) são observadas sobre a América do Sul (norte do Brasil, leste e norte do Peru, leste do Equador, Colômbia, Venezuela e Guiana Francesa), e América Central (em uma faixa desde o Panamá até a Guatemala) (Figura 1.8C a 1.8P).

Por fim, valores positivos de DEF são observados na maior parte do globo em todos os limiares de aquecimento global (> 200 mm ano⁻¹) (Figura 1.7), com maiores (menores) magnitudes de anomalias nos limiares de aquecimento global de 3 e 4 °C (1,5 e 2°C) (Figura 1.8), principalmente na zona tropical (entre -23,5° e +23,5°).

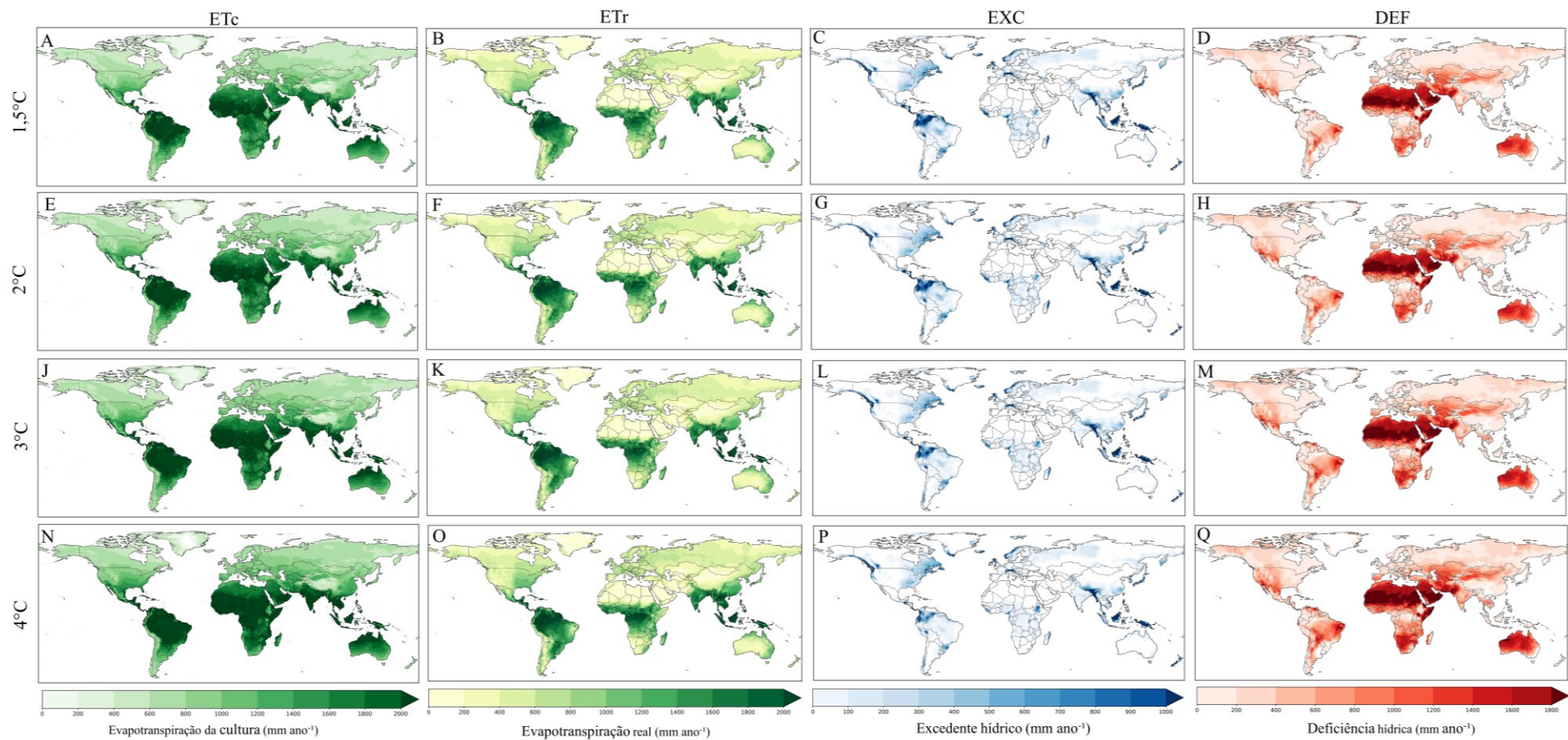


Figura 1.7 - Padrões espaciais dos valores anuais de evapotranspiração da cultura (ETc, mm ano⁻¹, painéis A, E, J e N), evapotranspiração real (ETr, mm ano⁻¹, painéis B, F, K e O), excedente hídrico (EXC, mm ano⁻¹, painéis C, G, L e P) e deficiência hídrica (DEF, mm ano⁻¹, painéis D, H, M, Q), considerando as necessidades hídricas do eucalipto, com o *ensemble mean* dos cenários *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) para cada limiar de aquecimento global (1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C).

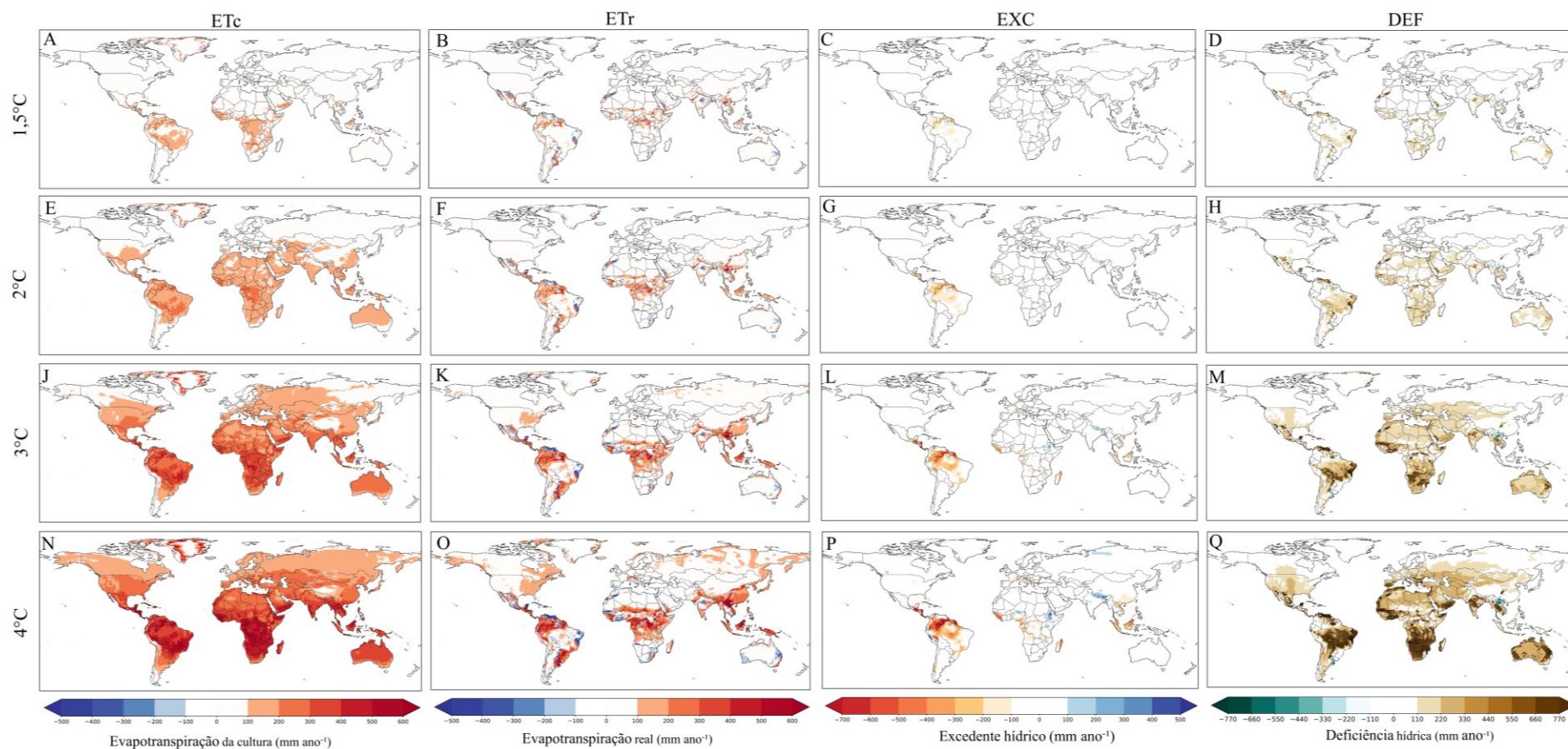


Figura 1.8 - Anomalias anuais de evapotranspiração da cultura (ETc, mm ano⁻¹, painéis A, E, J e N), evapotranspiração real (ETr, mm ano⁻¹, painéis B, F, K e O), excedente hídrico (EXC, mm ano⁻¹, painéis C, G, L e P) e deficiência hídrica (DEF, mm ano⁻¹, painéis D, H, M, Q), considerando as necessidades hídricas do eucalipto, com o *ensemble mean* dos cenários *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) para cada limiar de aquecimento global (1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C) em relação ao período de controle (CP = 1995-2014). As áreas sombreadas nos painéis D, H, M e Q indicam regiões com DEF ≥ 330 mm ano⁻¹.

De forma geral, há um aumento das áreas com DEF entre $+110 \text{ mm ano}^{-1}$ (limiar de aquecimento de $1,5^\circ\text{C}$) até $> +770 \text{ mm ano}^{-1}$ (limiar de aquecimento de 4°C) (Figura 1.7). As maiores anomalias positivas de DEF (entre $+330$ a $+770 \text{ mm ano}^{-1}$) são observadas sobre a América do Sul, principalmente no Brasil, Bolívia, Paraguai e Venezuela, em áreas pontuais no México, oeste da África ocidental (em uma faixa costeira que se estende do Benin a ao norte da Argélia), centro-sul da África (sul da República democrática do Congo, Tanzânia, Angola, Zâmbia, Malawi, Namíbia, Botsuana, Zimbábue, Moçambique, África do Sul e oeste de Madagascar), sul da Europa, principalmente em Portugal e Espanha, sudeste da Ásia (sul da Arábia Saudita, Iêmen, Omã, Índia e Tailândia), e no leste e o oeste da Austrália (Figura 1.8Q). Notavelmente, as áreas com maiores valores positivos de DEF coincidem com regiões em que há maior área plantada com eucalipto. Em contrapartida, pequenas áreas poderão experimentar anomalias negativas de DEF nos quatro limiares ($> -220 \text{ mm ano}^{-1}$), como no extremo sul da América do Sul (leste da Argentina e extremo oeste do Uruguai) e pequenas porções no extremo sul da Ásia (sul da China, Myanmar, Laos, Vietnã) (Figura 8Q).

Ao analisar conjuntamente as variáveis ETr, EXC e DEF e os padrões de mudança da temperatura e precipitação, é possível observar cinco padrões de acoplamento nos quatro limiares de aquecimento global, os quais são intensificados nos limiares de aquecimento global de 3 e 4°C (Figura 1.9). O primeiro padrão ocorre em locais com os maiores aumentos de DEF ($> +330 \text{ mm ano}^{-1}$), incluindo porção central da América do Sul, como regiões norte, centro-oeste e nordeste do Brasil, Bolívia, e Venezuela, sul do México, porções leste e sul da África, extremo sul da Europa, como Espanha, Portugal, Itália, e a faixa de países que se estende desde Áustria até a Turquia e na Oceania, na costa leste e oeste da Austrália) (Figura 1.9D). Esse padrão é explicado pela redução intensa da precipitação (entre -100 a -150 mm ano^{-1}) (Figura 1.6), EXC (entre ~ -100 a -600 mm ano^{-1}) e ETr (entre ~ -100 a -500 mm ano^{-1}), e aumentos na temperatura entre 2°C (limiar de aquecimento de $1,5^\circ\text{C}$) até 5°C (limiar de aquecimento de 4°C) (Figura 1.4), e ETc (entre $+100$ a $+500 \text{ mm ano}^{-1}$) (Figura 1.8).

O segundo padrão envolve localidades (sul da América do Sul, especialmente no Paraguai e uma faixa que se estende do sudeste ao nordeste do Brasil, África central, englobando oeste e sul da República Democrática do Congo, Tanzânia, e uma faixa que se estende do sul de Mali ao norte de Benin, extremo sul da Ásia, em uma faixa que se estende do sul da Arábia Saudita até o sul de Myanmar, e na Austrália) que apresentam aumento da DEF ($\sim +330 \text{ mm ano}^{-1}$) (Figura 1.9D), sem mudanças significativas na ETr e EXC, mesmo com aumentos na temperatura superiores a $1,5^\circ\text{C}$ (limiar de aquecimento de $1,5^\circ\text{C}$) e $4,5^\circ\text{C}$ (limiar

de aquecimento de 4 °C) (Figura 1.5) e ETc (até 500 mm ano⁻¹), com ligeiro (ou pouco) aumento da precipitação (entre +25 e +125 mm ano⁻¹) (Figura 1.6).

O terceiro padrão é observado na Argentina, norte do Chile, porção sul dos Estados Unidos, norte da África, faixa que se estende do norte da França, à Bielorrússia, porção sul da Ásia, desde a parte central da Arábia Saudita até o norte da China, sudoeste da Rússia e maior parte da Austrália (Figura 1.8), onde são projetados aumentos modestos na DEF (entre ~ +110 a +220 mm ano⁻¹), resultantes de aumentos de temperatura entre 1 °C (limiar de aquecimento de 1,5 °C) a 5 °C (limiar de aquecimento de 4°C) (Figura 1.5), acompanhados de ligeiro ou nenhum aumento na precipitação (entre +25 a +75 mm ano⁻¹) (Figura 1.6), e sem implicações na ETr e EXC.

O quarto padrão refere-se aos locais com pouca ou nenhuma mudança na DEF (sul do Brasil, Uruguai, nordeste dos Estados Unidos e Alasca, Canadá, Groenlândia, norte da Europa, incluindo Irlanda, Reino Unido, Noruega, Suécia, Finlândia, Estônia, Letônia e Lituânia, porção ao norte da Ásia, incluindo a maior parte da Rússia, e regiões centrais da China, Papua-Nova Guiné e Nova Zelândia) (Figura 1.8). Os aumentos na ETc e ETr (entre +100 e +200 mm ano⁻¹) causados pelos aumentos de temperatura entre 1 °C (limiar de aquecimento de 1,5°C) a >6 °C (limiar de aquecimento de 4°C) (Figura 1.5) são compensados pelos aumentos projetados na precipitação de até +150 mm ano⁻¹ (Figura 1.6).

E o quinto padrão abrange locais com redução da DEF (~ -440 mm ano⁻¹), englobando o nordeste da Argentina, sul da China, leste de Myanmar e norte de Laos (Figura 1.9). Nesses locais, o aumento da precipitação (entre +50 a +100 mm ano⁻¹), exceto o sul da China e norte de Laos (Figura 1.6), combinado com menor aumento de temperatura entre 1 °C (limiar de aquecimento de 1,5 °C) a 4 °C (limiar de aquecimento de 4°C) (Figura 1.5), causam pouca ou nenhuma alteração da ETc, ETr (< 500 mm ano⁻¹) (Figura 1.8) e EXC (~ -100 mm ano⁻¹) (Figura 1.8C a 1.8P).

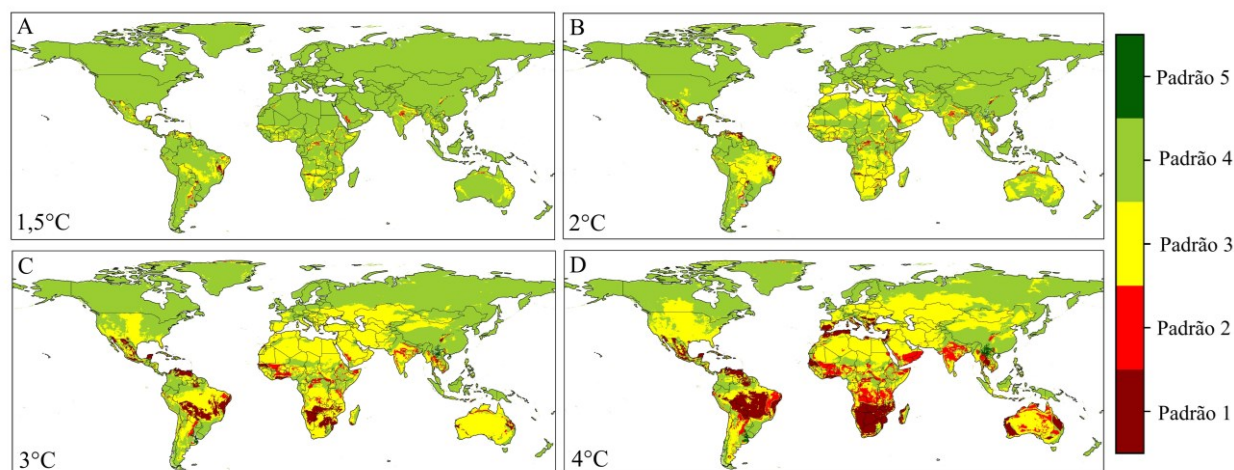


Figura 1.9 - Padrões de acoplamento identificados nos limiares de aquecimento global de 1,5 °C (Painel A), 2 °C (Painel B), 3 °C (Painel C) e 4 °C (Painel D) considerando as anomalias nas variáveis precipitação acumulada anual (mm ano^{-1}) e deficiência hídrica (DEF, mm ano^{-1}).

Ao relacionar os cinco padrões projetados de mudanças na precipitação anual e DEF (Figura 1.8) com a distribuição atual das principais áreas de produção de eucalipto (Figura 1.1) e as principais espécies e híbridos de eucalipto (Apêndice 1.1), emergem diferenças claras na vulnerabilidade. No padrão 1, que abrange o centro-oeste e o nordeste do Brasil, sul da Europa e partes da África e da Austrália, predominam espécies e híbridos de baixa a moderada tolerância, como *E. globulus*, *E. grandis*, *E. nitens*, *E. dunnii*, *E. benthamii* e *E. urophylla* × *E. grandis*, tornando essas regiões particularmente suscetíveis ao aumento da DEF ($> +330 \text{ mm ano}^{-1}$). O padrão 2, que se estende principalmente do sudeste ao nordeste do Brasil e partes da Austrália, coincide com áreas onde genótipos mais tolerantes (*E. tetradonta*, *E. tereticornis*, *E. camaldulensis*, *E. brassiana*, *E. urophylla* × *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* × *E. brassiana*) são cultivados juntamente com genótipos menos tolerantes (*E. saligna*, *E. dunnii*, *E. urophylla* × *E. globulus*). Assim, a vulnerabilidade dessas áreas pode ser considerada intermediária, refletindo essa mistura de genótipos tolerantes e sensíveis. O padrão 3, observado principalmente na Austrália, está associado a aumentos moderados de DEF ($+110\text{--}220 \text{ mm ano}^{-1}$) em áreas onde espécies puras com uma ampla gama de tolerância são cultivadas, desde a mais sensível *E. delegatensis* até as mais tolerantes, como *E. camaldulensis* e *E. tetradonta*.

Os padrões 4 e 5 representam situações menos críticas. O padrão 4, que abrange o sul do Brasil e centro da China, mostra apenas pequenas alterações na DEF, compensando a presença de genótipos menos tolerantes, como *E. urophylla* × *E. globulus*, *E. saligna* e *E. dunnii*. O padrão 5, que cobre o sul da China, mostra até reduções na DEF ($\sim -440 \text{ mm ano}^{-1}$)

em áreas dominadas por genótipos moderadamente tolerantes (*E. urophylla*, *E. grandis*, *E. urophylla* × *E. grandis*), resultando em menor vulnerabilidade.

No geral, esta análise integrada demonstra que as maiores vulnerabilidades estão concentradas em regiões sob os padrões 1 e 2, onde a intensificação da DEF coincide com a predominância de genótipos menos tolerantes, enquanto as regiões sob os padrões 4 e 5 tendem a apresentar maior resiliência devido à DEF mais branda e à presença de genótipos mais tolerantes.

Tais padrões espaciais acoplados indicam que o cultivo de eucalipto poderá ser reduzido ou restrito para fins industriais em muitas áreas do mundo, principalmente naquelas que possuem maior área plantada atualmente (Figura 1.1). Ou seja, países como o Brasil (exceto a região sul), norte da Argentina, Paraguai, Bolívia, Venezuela, faixa do Panamá ao México, faixa que se estende da África do Sul ao sul da República Democrática do Congo, Madagascar, costa oeste da África (desde Benin à Argélia), extremo sul da Europa, incluindo Espanha, Portugal, e uma faixa que se estende da Itália ao sul da Romênia, sul da Ásia, em uma faixa que se estende do sul da Arábia Saudita à Tailândia, e em algumas áreas específicas da Austrália, possuem DEF superior a 330 mm ano⁻¹, que é considerada desfavorável às necessidades hídricas da maioria das espécies comercialmente plantadas (Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022). Em contrapartida, países da América do Sul, como Chile, Peru, Equador, Colômbia, América do Norte (Estados Unidos e Canadá), porção central da África (nordeste da República Democrática do Congo, Sudão do Sul, Etiópia, Somália, Quênia, Uganda), porção centro-norte da Europa, desde norte da França até a Finlândia, e partes da Ásia, incluindo o sul e leste da Índia e China, não sofrerão restrições hídricas, uma vez que a DEF é inferior a 330 mm ano⁻¹.

Áreas desfavoráveis ao cultivo do eucalipto (DEF > 330 mm ano⁻¹) irão aumentar progressivamente quanto maior for o limiar de aquecimento (Tabela 1.3), podendo cobrir ~89% da África, 80% da Oceania, 59% da América do Sul, 42% da Ásia, 33% da América do Norte e 30% da Europa no limiar de aquecimento de 4 °C.

Tabela 1.3 - Proporções de áreas favoráveis e desfavoráveis para o cultivo de Eucalyptus (por continentes), em relação ao período de controle (CP = 1995-2014) e limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C, considerando a deficiência hídrica anual (DEF).

Regiões	Favoráveis		Desfavoráveis	
	%	Km ² (10 ⁴)	%	Km ² (10 ⁴)
Período de controle (CP)				
América do Sul	67,4%	986	32,6%	476
América do Norte	79,6%	2803	20,4%	717
África	23,4%	592	76,6%	1943
Europa	90,8%	1334	9,2%	134
Ásia	68,2%	3490	31,8%	1625
Oceania	29,4%	228	70,6%	546
Aquecimento de 1,5 °C				
América do Sul	60,5%	913	39,5%	595
América do Norte	76,4%	2695	23,6%	831
África	19,8%	502	80,2%	2033
Europa	86,5%	1270	13,5%	199
Ásia	65,9%	3376	34,1%	1744
Oceania	27,3%	211	72,7%	565
Aquecimento de 2 °C				
América do Sul	55,3%	834	44,7%	674
América do Norte	75,0%	2649	25,0%	880
África	17,2%	437	82,8%	2098
Europa	83,3%	1224	16,7%	246
Ásia	34,8%	1782	65,2%	3338
Oceania	26,1%	202	73,9%	574
Aquecimento de 3 °C				
América do Sul	48,3%	729	51,7%	780
América do Norte	71,7%	2517	28,3%	991
África	13,6%	346	86,4%	2190
Europa	77,8%	1143	22,2%	326
Ásia	62,0%	3162	38,0%	1940
Oceania	23,6%	183	76,4%	593
Aquecimento de 4 °C				
América do Sul	40,9%	618	59,1%	891
América do Norte	66,8%	2312	33,2%	1148
África	10,5%	267	89,5%	2269
Europa	70,2%	1032	29,8%	437
Ásia	57,8%	2959	42,2%	2158
Oceania	20,3%	157	79,7%	618

Nossos resultados, utilizando os modelos climáticos do CMIP6, estão em grande parte alinhados com estudos anteriores que empregaram modelos climáticos do CMIP5 para

temperatura e precipitação, incluindo Karmalkar e Bradley (2017) para os Estados Unidos, Shi *et al.* (2018) para a China, Jacob *et al.* (2018) para a Europa, Mba *et al.* (2018) para a África Central e Torres *et al.* (2021) para a América do Sul. No entanto, o uso de modelos climáticos de alta resolução (NEX-GDDP-CMIP6) foi valioso para melhor visualizar os padrões (e anomalias) de ET_c, ET_r, EXC e DEF. Por exemplo, Martins *et al.* (2022), usando modelos climáticos do CMIP5, não conseguiram detectar padrões de redução de DEF no nordeste da Argentina, levando a uma superestimação de áreas desfavoráveis para o cultivo de eucalipto em limiares de aquecimento global de 1,5 °C (49,2%) e 2 °C (56,7%).

Regiões como a porção central da América do Sul (Brasil, Bolívia e Paraguai), sul da África (principalmente a África do Sul), sudoeste da Europa (Portugal e Espanha) e partes da Oceania (principalmente a Austrália) podem atingir os limiares de aquecimento global mais cedo (Figura 1.4), exacerbando anomalias negativas na precipitação, EXC e DEF. Consequentemente, estratégias de mitigação específicas para cada região serão essenciais para minimizar as perdas de eucalipto, uma vez que a produtividade pode diminuir nessas áreas.

Os padrões e anomalias de ET_c, ET_r, EXC e DEF com base nos limiares de aquecimento global mostram que a magnitude dos impactos das mudanças climáticas aumenta sistematicamente à medida que o aquecimento global se intensifica. Os impactos projetados para um limiar de aquecimento de 2 °C são mais severos do que para um limiar de aquecimento de 1,5 °C, com uma tendência crescente semelhante de 3 °C para 4 °C. Para plantações de eucalipto, essas diferenças podem exacerbar o estresse hídrico, afetando negativamente o crescimento e a produtividade em áreas onde a DEF excede 330 mm ano⁻¹. Além disso, cada incremento acima de 1,5 °C resulta em aumentos médios na área global afetada por DEF > 330 mm ano⁻¹ de aproximadamente 7,5%, 10,3% e 15,4% para 2°C, 3 °C e 4 °C, respectivamente (Tabela 1.3). Essas descobertas reforçam a importância de considerar múltiplos limiares de aquecimento global para melhor compreender as vulnerabilidades às quais as plantações de eucalipto podem estar expostas.

O aumento da DEF associado a redução da ET_r resulta em desequilíbrio no metabolismo celular e menor capacidade fotossintética, comprometendo a produtividade dessas plantações (Yang *et al.*, 2023). Dois fatores principais limitam a fotossíntese: i) em condições de estresse hídrico, o fechamento dos estômatos reduz a concentração intercelular de CO₂ que por sua vez não é capaz de suprir a demanda fotossintética (Tombesi *et al.*, 2015; Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022, Yang *et al.*, 2023), e ii) a redução da capacidade fotossintética é causada pelo favorecimento da atividade oxigenase da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase-oxigenase

(RuBisCo) devido a maior solubilidade do O₂ em relação ao CO₂. Ou seja, ocorre o aumento da fotorrespiração em detrimento da fotossíntese (Fagundes *et al.*, 2021; Florêncio *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023).

Embora o eucalipto seja capaz de se adaptar a condições de estresse hídrico intermitente (ABREU *et al.*, 2022), reduzindo a transpiração e a sensibilidade ao déficit de pressão de vapor, essas adaptações podem não compensar totalmente os impactos adversos em regiões com alta DEF ou com DEF em longos períodos (Abreu *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022). Para sobreviver e manter a produtividade, as plantas devem equilibrar a segurança hidráulica (ou seja, forte resistência à embolia) com a eficiência hidráulica (alta condutividade hidráulica). No entanto, em condições de estresse hídrico a alta condutividade hidráulica aumenta o risco de embolia, interrompendo o transporte de água na planta (Chen *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2023).

A resposta do eucalipto à seca seja variável e depende de características genéticas dos genótipos (espécies puras, híbridos ou clones), técnicas de manejo e condições locais (clima e solo). Portanto, a resiliência das plantações no Brasil, Paraguai, África do Sul, Espanha, Portugal, Índia, Tailândia e Austrália dependerá de sua capacidade de adaptação ao aumento da DEF impulsionado pela elevação da temperatura e da ETC. Nessas regiões, a distribuição de espécies e híbridos (Apêndice 1.1) resulta em níveis contrastantes de vulnerabilidade e resiliência. Na América do Sul (Brasil e Paraguai), as plantações combinam genótipos tolerantes à seca (por exemplo, *E. urophylla* × *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*) com outros mais vulneráveis (por exemplo, *E. dunnii*, *E. benthamii*). Na África do Sul, a predominância de espécies altamente tolerantes, como *E. camaldulensis* e *E. tereticornis*, aumenta a resiliência, enquanto no sul da Europa (Portugal e Espanha), a dependência de espécies com tolerância moderada a baixa, especialmente *E. globulus* e *E. nitens*, aumenta a vulnerabilidade. Na Ásia (Índia e China), uma mistura de genótipos com tolerância moderada a alta proporciona resiliência intermediária, enquanto na Austrália, a ampla diversidade de espécies cultivadas oferece maior flexibilidade adaptativa e capacidade de amortecer os impactos da DEF. De modo geral, as regiões dominadas por espécies com tolerância moderada ou baixa estão mais expostas aos riscos climáticos, enquanto aquelas que cultivam genótipos altamente tolerantes ou diversos genótipos demonstram maior resiliência. Isso enfatiza a importância de alinhar a seleção de genótipos às condições locais como uma estratégia adaptativa fundamental.

Estratégias iniciais incluem a seleção de genótipos com maior eficiência no uso da água (Apêndice 1.1). Por exemplo, no Brasil e Paraguai, recomenda-se o uso dos híbridos *E. urophylla* × *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* × *E. brassiana*, *C. torelliana* × *C. citriodora*, e das

espécies puras *E. tereticornis*, *E. camaldulensis* e *E. brassiana*. Na China é indicada *E. tereticornis*, na Índia: *E. camaldulensis* e *E. tereticornis*; na Austrália: *E. camaldulensis*, *C. maculata* e *E. tetradonta*, em Portugal, Espanha e África do Sul: *E. camaldulensis* e *E. tereticornis* por serem mais tolerantes à DEF (Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022).

Os resultados deste estudo reforçam a importância da integração de práticas de manejo com medidas para melhorar a qualidade da madeira, como o aumento do espaçamento entre linhas, redução do número de árvores por hectare, aumento da frequência de desbaste ou poda, visando conservar a água do solo por maiores períodos (Gonçalves *et al.*, 2013; Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022). Além disso, prevê-se um aumento na frequência e intensidade de incêndios florestais, especialmente em regiões sazonalmente secas (Canadell *et al.*, 2021), o que representa uma ameaça ainda maior para as plantações de eucalipto. Portanto, reduzir a conectividade das plantações, criando zonas de interrupção, como faixas de vegetação não inflamável ou áreas abertas entre os talhões são essenciais para diminuir a propagação do fogo. Ademais, a implantação de tecnologias avançadas de detecção e supressão de incêndios serão vitais (Hutapea *et al.*, 2023), e a implementação de sistemas de alerta precoce e previsão climática sazonal, integrando ferramentas de avaliação de risco climático em tempo real ao manejo florestal, permite a antecipação e mitigação dos impactos climáticos extremos (Aparecido *et al.*, 2025).

Além disso, a incidência de pragas e patógenos também deverá aumentar sob condições climáticas futuras (Battaglia; Bruce, 2017; Hutapea *et al.*, 2023). Para mitigar esses riscos, é altamente recomendável que os programas de controle biológico de pragas do eucalipto sejam fortalecidos por meio da identificação, coleta e avaliação de potenciais agentes de controle biológico em suas regiões de origem (Mutitu, 2022). Essa abordagem pode minimizar o uso de pesticidas químicos, que são prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, a diversificação dos sistemas de plantio, em vez da dependência de monoculturas, pode reduzir ainda mais a vulnerabilidade do eucalipto a pragas e doenças e aumentar a resiliência das plantações (Mota *et al.*, 2022; Xavier *et al.*, 2026).

Essas abordagens integradas, combinadas com políticas de resiliência climática, apoio financeiro e mecanismos de seguro agrícola, serão cruciais para garantir a sustentabilidade a longo prazo das plantações globais de eucalipto.

1.4. CONCLUSÃO

O aquecimento local ocorre de forma mais intensa e rápida no hemisfério norte, principalmente no Alasca, norte do Canadá, Groenlândia, Noruega, Suécia, Finlândia e Rússia, e posteriormente no sul da América do Sul, África Central, sul da Ásia e partes da Oceania, independentemente dos limiares de aquecimento global e dos SSPs. Aumentos adicionais de temperatura local de +0,5 °C a +3 °C com aquecimento global de 1,5 °C e 2 °C, e de +2 °C a +3 °C com 3 °C e 4 °C, foram observados em quase todas as regiões do mundo.

Em relação à precipitação anual, reduções de até -150 mm ano⁻¹ são projetadas para regiões como o Brasil, sul do Chile, sul da América Central, sul da África, sul da Europa e partes da Austrália. Enquanto isso, aumentos de até +150 mm ano⁻¹ podem ocorrer em regiões como o sul do Brasil, Peru, África Central, Índia, sudoeste da China e latitudes > +60°.

Os padrões espaciais de ETr, EXC e DEF indicam que as plantações globais de eucalipto podem enfrentar desafios severos, que serão exacerbados com aquecimentos globais de 3 °C e 4 °C. Áreas desfavoráveis para o cultivo de eucalipto (DEF > 330 mm ano⁻¹) se expandirão progressivamente com o aumento dos limiares de aquecimento global, cobrindo cerca de 89% da África, 80% da Oceania, 59% da América do Sul, 42% da Ásia, 33% da América do Norte e 30% da Europa (no limiar de aquecimento de 4°C). As regiões com os maiores aumentos em DEF estão localizadas em grande parte do Brasil, África do Sul, Espanha, Portugal, Índia, Tailândia e Austrália. Por outro lado, pequenas regiões no nordeste da Argentina, sul da China, leste de Mianmar e norte do Laos experimentarão reduções em DEF nos quatro limiares de aquecimento global, tornando-as menos vulneráveis.

Estratégias adaptativas devem ser implementadas para mitigar vulnerabilidades futuras, e a segurança das plantações globais de eucalipto dependerá da rapidez com que essas medidas forem aplicadas.

1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, H.; ROBINSON, D.A.; SEYFRIED, M.; JONES, S.B. Geophysical imaging of watershed subsurface patterns and prediction of soil texture and water holding capacity. **Water Resources Research**, v.44, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008WR007043>.

ABREU, M.C.; SOARES, A.A.V.; FREITAS, C.H.; MARTINS, F.B. Transpiration and growth responses by eucalyptus species to progressive soil drying. **Journal of Forest Research**, v.33, p.1–15, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01448-z>.

ALEMAYEHU, A.; MELKA, Y. Small scale eucalyptus cultivation and its socioeconomic impacts in Ethiopia: A review of practices and conditions. **Trees, Forests and People**, v.8, p.100269, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100269>.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, n.56).

ALMAZROUI, M.; ISLAM, M.N.; SAEED, F.; SAEED, S.; ISMAIL, M. Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. **Earth Systems and Environment**, 2020a. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00157-7>.

ALMAZROUI, M.; ISLAM, M.N.; SAEED, F.; SAEED, S.; ISMAIL, M.; EHSAN, M.A.; DIALLO, I.; O'BRIEN, E.; ASHFAQ, M.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; CAVAZOS, T.; CERESO-MOTA, R.; TIPPETT, M.K.; GUTOWSKI, W.J.; ALFARO, E.J.; HIDALGO, H.G.; VICHOT-LLANO, A.; CAMPBELL, J.D.; KAMIL, S.; RASHID, I.U.; SYLLA, M.B.; STEPHENSON, T.; TAYLOR, M.; BARLOW, M. Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. **Earth Systems and Environment**, v.5, p.1–24, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>.

ALMAZROUI, M.; SAEED, F.; SAEED, S.; ISLAM, M.N.; ISMAIL, M.; KLUTSE, N.A.B.; HAROON, M. Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. **Earth Systems and Environment**, v.4, p.455–475, 2020b. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00161-x>.

ALVES, A.M.M.R.; MARTINS, F.B.; REBOITA, M.S. Balanço hídrico climatológico para Itajubá-MG: cenário atual e projeções climáticas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.26, p.712–732, 2020. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.70387>.

APARECIDO, L.E.O.; TORSONI, G.B.; LIMA, R.F.; et al. Redefining *Eucalyptus* cultivation in South America: adaptive strategies under future climate scenarios. **New Forests**, v.56, p.36, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11056-025-10106-9>.

AYUGI, B.O.; CHUNG, E.-S.; ZHU, H.; OGEKA, O.M.; BABOUSHMAIL, H.; ONGOMA, V. Projected changes in extreme climate events over Africa under 1.5 °C, 2.0 °C and 3.0 °C global warming levels based on CMIP6 projections. **Atmospheric Research**, v.292, p.106872, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106872>.

- BACANI, V.M.; SILVA, B.H.M.; SATO, A.A.S.A.; SAMPAIO, B.D.S.; CUNHA, E.R.; VICK, E.P.; OLIVEIRA, V.F.R.; DECCO, H.F. Carbon storage and sequestration in a eucalyptus productive zone in the Brazilian Cerrado, using the Ca-Markov/Random Forest and InVEST models. **Journal of Cleaner Production**, v.444, p.141291, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.141291>.
- BAHUGUNA, R.N.; JAGADISH, K.S.V. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v.111, p.83–90, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.10.007>.
- BATTAGLIA, M.; BRUCE, J. Direct climate change impacts on growth and drought risk in blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantations in Australia. **Australian Forestry**, v.80, p.216–227, 2017. <https://doi.org/10.1080/00049158.2017.1365403>.
- BETTS, R.A.; ALFIERI, L.; BRADSHAW, C.; CÉSAR, J.; FEYEN, L.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GOHAR, L.; KOUTROULIS, A.; LEWIS, K.; MORFOPOULOS, C.; PAPADIMITRIOU, L.; RICHARDSON, K.J.; TSANIS, I.; WYSER, K. Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5 °C and 2 °C global warming with a higher-resolution global climate model. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v.376, p.20160452, 2018. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0452>.
- BOOTH, T.H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, v.301, p.28–34, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>.
- BOOTH, T.H. Impacts of climate change on eucalypt distributions in Australia: an examination of a recent study. **Australian Forestry**, v.80, p.208–215, 2017. <https://doi.org/10.1080/00049158.2017.1365402>.
- BUTT, N.; POLLOCK, L.J.; MCALPINE, C.A. Eucalypts face increasing climate stress. **Ecology and Evolution**, v.3, p.5011–5022, 2013. <https://doi.org/10.1002/ece3.873>.
- CANADELL, J.G.; MEYER, C.P.; COOK, G.D.; DOWDY, A.; BRIGGS, P.R.; KNAUER, J.; PEPLER, A.; HAVERD, V. Multi-decadal increase of forest burned area in Australia is linked to climate change. **Nature Communications**, v.12, p.6921, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27225-4>.
- CHEN, L.; FORD, T.W. Effects of 0.5 °C less global warming on climate extremes in the contiguous United States. **Climate Dynamics**, v.57, p.303–319, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05717-9>.
- 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**, v.468, p.118179, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118179>.
- DIAS, C.G.; MARTINS, F.B.; MARTINS, M.A. Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. **Science of the Total Environment**, v.907, p.167753, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167753>.

DIAS, H.B.; SENTELHAS, P.C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – a multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of the Total Environment**, v.637–638, p.1127–1136, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017>.

DOURADO-NETO, D.; DE JONG VAN LIER, Q.; METSELAAR, K.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agricola**, v.67, p.87–95, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000100013>.

FAGUNDES, F.F.A.; REIS, F.Y.S.; MARTINS, F.B. A model for predicting the initial development of two native forest species under current and future climates. **Environmental and Experimental Botany**, v.192, p.104662, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104662>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>.

FREITAS, C.H.; ELLI, E.F.; SENTELHAS, P.C.; CARNEIRO, R.L.; ALVARES, C.A. Adaptation, calibration and evaluation of a simple agrometeorological model for wood *Eucalyptus* productivity estimation. **European Journal of Forest Research**, v.139, p.759–776, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01283-7>.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.D.; LACLAU, J.-P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v.301, p.6–27, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>.

HOOGAR, R.; MALAKANNAVAR, S.; SUJATHA, H.T. Impact of *Eucalyptus* plantations on groundwater and soil ecosystem in dry regions. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v.8, p.2929–2933, 2019.

HUBBARD, R.M.; CARNEIRO, R.L.; CAMPOE, O.; ALVARES, C.A.; FIGURA, M.A.; MOREIRA, G.G. Contrasting water use of two *Eucalyptus* clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.475, p.118407, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118407>.

HUTAPEA, F.J.; WESTON, C.J.; MENDHAM, D.; VOLKOVA, L. Sustainable management of *Eucalyptus pellita* plantations: A review. **Forest Ecology and Management**, v.537, p.120941, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120941>.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores: Relatório 2023. São Paulo, Brasil, 2023.

IPCC. Climate change 2007: synthesis report. In: PACHAURI, R.K.; REISINGER, A. (eds.). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC**, Geneva, Switzerland, 2007.

IPCC. Climate change 2014: synthesis report. In: PACHAURI, R.K.; MEYER, L.A. (eds.). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC**, Geneva, Switzerland, 2014.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**, Cambridge, 2021.

IPCC. Summary for policymakers. In: PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.C.; POLOCZANSKA, E.S.; MINTENBECK, K.; TIGNOR, M.; ALEGRÍA, A.; CRAIG, M.; LANGSDORF, S.; LÖSCHKE, S.; MÖLLER, V.; OKEM, A.; RAMA, B. (eds.). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**, Cambridge, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>.

JACOB, D.; KOTOVA, L.; TEICHMANN, C.; SOBOLOWSKI, S.P.; VAUTARD, R.; DONNELLY, C.; KOUTROULIS, A.G.; GRILLAKIS, M.G.; TSANIS, I.K.; DAMM, A.; SAKALLI, A.; VAN VLIET, M.T.H. Climate impacts in Europe under +1.5 °C global warming. **Earth's Future**, v.6, p.264–285, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017EF000710>.

JONES, P.W. First- and second-order conservative remapping schemes for grids in spherical coordinates. **Monthly Weather Review**, v.127, p.2204–2210, 1999. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2204>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2204>2.0.CO;2).

KADYAMPAKENI, D.M.; MORGAN, K.T. Irrigation scheduling and soil moisture dynamics influence water uptake by Huanglongbing affected trees. **Scientia Horticulturae**, v.224, p.272–279, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.06.037>.

KARMALKAR, A.V.; BRADLEY, R.S. Consequences of global warming of 1.5 °C and 2 °C for regional temperature and precipitation changes in the contiguous United States. **PLOS ONE**, v.12, p.e0168697, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168697>.

LI, C.; ZWIERS, F.; ZHANG, X.; LI, G.; SUN, Y.; WEHNER, M. Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models. **Journal of Climate**, v.34, p.3441–3460, 2021. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-1013.1>.

MARENGO, J.A.; CAMARINHA, P.I.; ALVES, L.M.; DINIZ, F.; BETTS, R.A. Extreme rainfall and hydro-geo-meteorological disaster risk in 1.5, 2.0 and 4.0 °C global warming scenarios: an analysis for Brazil. **Frontiers in Climate**, v.3, p.610433, 2021. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.610433>.

MARTINS, F.B.; BENASSI, R.B.; TORRES, R.R.; BRITO NETO, F.A. Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on *Eucalyptus* plantations in South America. **Science of the Total Environment**, v.825, p.153820, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>.

MAÚRE, G.; PINTO, I.; NDEBELE-MURISA, M.; MUTHIGE, M.; LENNARD, C.; NIKULIN, G.; DOSIO, A.; MEQUE, A. The southern African climate under 1.5 °C and 2 °C of global warming as simulated by CORDEX regional climate models. **Environmental Research Letters**, v.13, p.065002, 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab190>.

MBA, W.P.; LONGANDJO, G.N.T.; MOUFOUMA-OKIA, W.; BELL, J.P.; JAMES, R.; VONDOU, D.A.; HAENSLER, A.; FOTSO-NGUEMO, T.C.; GUENANG, G.M.; TCHOTCHOU, A.L.D.; KAMSU-TAMO, P.H.; TAKONG, R.R.; NIKULIN, G.; LENNARD, C.; DOSIO, A. Consequences of 1.5 °C and 2 °C global warming levels for temperature and precipitation changes over Central Africa. **Environmental Research Letters**, v.13, p.055011, 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab048>.

MEDEIROS, P.L.; PIMENTA, A.S.; MIRANDA, N.O.; MELO, R.R.; AMORIM, J.S.; AZEVEDO, T.K.B. The myth that *Eucalyptus* trees deplete soil water—a review. **Forests**, v.16, p.423, 2025. <https://doi.org/10.3390/f16030423>.

MOTA, J.D.S.; BARBOSA, L.R.; MARCHIORO, C.A. Suitable areas for invasive insect pests in Brazil and the potential impacts for *Eucalyptus* forestry. **Pest Management Science**, v.78, p.2596–2606, 2022. <https://doi.org/10.1002/ps.6891>.

MUTITU, E. Mitigation measures for invasive insect pests on *Eucalyptus* spp. in East Africa: a review. **African Phytopathology Journal**, v.3, n.1, p.38–46, 2022. <https://doi.org/10.52855/MASH9807>.

NATIONAL FOREST INVENTORY STEERING COMMITTEE. Australia's state of the forests report 2018. Canberra, Australia, 2019.

NIKULIN, G.; LENNARD, C.; DOSIO, A.; KJELLSTRÖM, E.; CHEN, Y.; HÄNSLER, A.; KUPIAINEN, M.; LAPRISE, R.; MARIOTTI, L.; MAULE, C.F. The effects of 1.5 °C and 2 °C global warming on Africa in the CORDEX ensemble. **Environmental Research Letters**, v.13, p.065003, 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab1b1>.

ORTEGA, G.; ARIAS, P.A.; VILLEGAS, J.C.; MARQUET, P.A.; NOBRE, P. Present-day and future climate over Central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v.41, p.6713–6735, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7221>.

LOUDIN, L.; HERVIEU, F.; MICHEL, C.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; ANCTIL, F.; LOUMAGNE, C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. **Journal of Hydrology**, v.303, p.290–306, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.

OUYANG, L.; ARNOLD, R.J.; CHEN, S.; XIE, Y.; HE, S.; LIU, X.; ZHANG, W. Prediction of the suitable distribution of *Eucalyptus grandis* in China and its responses to climate change. **New Forests**, v.53, p.81–99, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09845-2>.

OVERLAND, J.E.; WANG, M.; WALSH, J.E.; STROEVE, J.C. Future Arctic climate changes: adaptation and mitigation time scales. **Earth's Future**, v.1, p.68–74, 2013. <https://doi.org/10.1002/2013EF000162>.

PENNA, A.C.; TORRES, R.R.; GARCIA, S.R.; MARENGO, J.A. Moisture flows on Southeast Brazil: present and future climate. **International Journal of Climatology**, v.41, p.E935–E951, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.6738>.

RIAHI, K.; VAN VUUREN, D.P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B.C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J.C.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HUMPENÖDER, F.; DA SILVA, L.A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J.C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global Environmental Change**, v.42, p.153–168, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

RIBEIRO, A.F.; MARTINS, F.B.; SANTOS, D.F.; TORRES, R.R.; FAGUNDES, F.F.A. Suitable areas for temperate fruit trees in a Brazilian hotspot area: changes driven by new IPCC scenarios. **European Journal of Agronomy**, v.155, p.127110, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127110>.

RUV LEMES, M.; SAMPAIO, G.; FISCH, G.; ALVES, L.M.; MAKSIC, J.; GUATURA, M.; SHIMIZU, M. Impacts of atmospheric CO₂ increase and Amazon deforestation on the regional climate: a water budget modelling study. **International Journal of Climatology**, v.43, p.1497–1513, 2023b. <https://doi.org/10.1002/joc.7929>.

RUV LEMES, M.C.; SAMPAIO, G.; GARCIA-CARRERAS, L.; FISCH, G.; ALVES, L.M.; BASSETT, R.; BISPO, P.D.C. Impacts on South America moisture transport under Amazon deforestation and 2 °C global warming. **Science of the Total Environment**, v.905, p.167407, 2023a. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167407>.

SAMUEL, S.; DOSIO, A.; MPHALE, K.; FAKA, D.N.; WISTON, M. Comparison of multi-model ensembles of global and regional climate model projections for daily characteristics of precipitation over four major river basins in southern Africa. Part II: future changes under 1.5 °C, 2.0 °C and 3.0 °C warming levels. **Atmospheric Research**, v.293, p.106921, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106921>.

SHI, C.; JIANG, Z.-H.; CHEN, W.-L.; LI, L. Changes in temperature extremes over China under 1.5 °C and 2 °C global warming targets. **Advances in Climate Change Research**, v.9, p.120–129, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.11.003>.

SILVA, X.; ASIEGBU, F.O. Eucalyptus fungal diseases. In: **Forest Microbiology**. Academic Press, p.313–337, 2023.

SLEDD, A.; L'ECUYER, T.S. A cloudier picture of ice-albedo feedback in CMIP6 models. **Frontiers in Earth Science**, v.9, 2021. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.769844>.

SWART, N.C.; COLE, J.N.; KHARIN, V.V.; LAZARE, M.; SCINOCCA, J.F.; GILLETT, N.P.; ANSTEY, J.; ARORA, V.; CHRISTIAN, J.R.; HANNA, S.; JIAO, Y.; LEE, W.G.; MAJAESS, F.; SAENKO, O.A.; SEILER, C.; SEINEN, C.; SHAO, A.; SIGMOND, M.; SOLHEIM, L.; VON SALZEN, K.; YANG, D.; WINTER, B. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). **Geoscientific Model Development**, v.12, p.4823–4873, 2019.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p.55–94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology**, Publications in Climatology, v.8, 1955.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. **Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology**, Publications in Climatology, v.10, 1957.

THRASHER, B.; WANG, W.; MICHAELIS, A.; MELTON, F.; LEE, T.; NEMANI, R. NASA global daily downscaled projections, CMIP6. **Scientific Data**, v.9, p.262, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>.

TOMBESI, S.; NARDINI, A.; FRIONI, T.; SOCCOLINI, M.; ZADRA, C.; FARINELLI, D.; PALLIOTTI, A. Stomatal closure is induced by hydraulic signals and maintained by ABA in drought-stressed grapevine. **Scientific Reports**, v.5, p.12449, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep12449>.

TORRES, R.R.; BENASSI, R.B.; MARTINS, F.B.; LAPOLA, D.M. Projected impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on temperature and precipitation patterns in South America. **International Journal of Climatology**, v.42, p.1597–1611, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7322>.

TORRES, R.R.; MARENGO, J.A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v.112, p.253–272, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0718-7>.

TURNBULL, J.W.; BOOTH, T.H. Eucalypts in cultivation: an overview. In: **Eucalyptus**. **CSIRO Publishing**, p.66–88, 2002.

UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. Conference of the Parties, Paris, 2015.

VAN VUUREN, D.P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v.109, p.5–31, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

WILLMOTT, C.J.; ROWE, C.M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v.5, p.589–606, 1985. <https://doi.org/10.1002/joc.3370050602>.

XAVIER, R.G.; FAGUNDES, F.F.A.; DIAS, C.G.; RIBEIRO, A.F.; MARTINS, F.B. Eucalyptus productivity and potential losses at each grid point in Brazil driven by an open-source model coupled with high-resolution CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, in press, 2025.

XU, J.; XIE, S.; HAN, A.; RAO, R.; HUANG, G.; CHEN, X.; JUE, H.; QIAN, L.; XUEYUN, Y.; ZHANG, L. Forest resources in China—the 9th national forest inventory. **National Forestry and Grassland Administration**, Beijing, China, 2019.

YADUVANSHI, A.; ZAROUG, M.; BENDAPUDI, R.; NEW, M. Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on regional rainfall and temperature changes in India. **Environmental Research Communications**, v.1, p.125002, 2019. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab4ee2>.

YANG, L.; KONG, J.; GAO, Y.; CHEN, Z.; LIN, Y.; ZENG, S.; SU, Y.; LI, J.; HE, Q.; QIU, Q. A simulated drier climate reduces growth and alters functional traits of *Eucalyptus* trees: a three-year experiment in South China. **Forest Ecology and Management**, v.549, p.121435, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121435>.

ZHANG, G.; ZENG, G.; YANG, X.; JIANG, Z. Future changes in extreme high temperature over China at 1.5 °C–5 °C global warming based on CMIP6 simulations. **Advances in Atmospheric Sciences**, v.38, p.253–267, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0182-8>.

APÊNDICE CAPÍTULO 1

Apêndice 1.1 - Espécies e híbridos de eucalipto mais cultivados nos maiores países produtores de eucalipto e sua tolerância à deficiência hídrica, compilados a partir de múltiplas fontes.

Continentes	Espécies/Híbridos	Referências	Link	Tolerância à deficiência hídrica	Referências	Link
Brasil	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	Florêncio <i>et al.</i> (2022)	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538	Moderada	Gonçalves <i>et al.</i> (2017); Abreu <i>et al.</i> (2022)	https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415 ; https://doi.org/10.1007/s11676-021-01448-z
	<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>			Alta		
	<i>E. tereticornis</i> x <i>E. brassiana</i>			Alta		
	<i>E. urophylla</i>			Moderada		
	<i>E. tereticornis</i>			Alta		
	<i>E. camaldulensis</i>			Alta		
	<i>C. citriodora</i>			Moderada		
	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415	Moderada		
	<i>E. urophylla</i> x <i>E. globulus</i>			Baixa		
<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	Alta					

continua... 58

...continuação

	<i>E. brassiana</i>			Alta	Gonçalves <i>et al.</i> (2013)	https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030
	<i>E. cloeziana</i>			Baixa		
	<i>C. citriodora</i>			Moderada		
	<i>C. torelliana</i>			Moderada	Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415
	<i>E. grandis</i> × <i>E. pellita</i>			Moderada		
	<i>E. robusta</i>	Gonçalves <i>et al.</i> (2013)	https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030	Moderada	Gonçalves <i>et al.</i> (2013)	https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030
	<i>E. globulus</i>			Moderada		
	<i>E. resinifera</i>			Moderada		
	<i>E. pellita</i>			Moderada		
	<i>E. dunnii</i>			Baixa		
	<i>E. benthamii</i>			Baixa		
	<i>E. grandis</i>	Martins <i>et al.</i> (2008)	https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300037	Moderada	Martins <i>et al.</i> (2008)	https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300037
	<i>E. saligna</i>			Baixa		
China	<i>E. urophylla</i>	Zhang e Wang (2021)	https://doi.org/10.1038/s41598-021-97089-7	Moderada	Abreu <i>et al.</i> (2022)	https://doi.org/10.1007/s11676-021-01448-z
	<i>E. grandis</i>			Moderada	Martins <i>et al.</i> (2008)	https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300037

continua... 59

...continuação

	<i>E. dunnii</i>			Baixa	Gonçalves <i>et al.</i> (2013)	https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030
	<i>E. tereticornis</i>	Mao <i>et al.</i> 2024	https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1443134	Alta	Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415
	<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	Hua <i>et al.</i> (2023)	https://doi.org/10.1007/s11056-022-09959-1	Moderada		
Índia	<i>E. globulus</i>	Bhojvaid <i>et al.</i> (2014)	Eucalypts in India, ENVIS Center of Forestry, India (2014), pp. 139-148	Moderada	Gonçalves <i>et al.</i> (2013)	https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030
	<i>E. grandis</i>			Moderada	Martins <i>et al.</i> (2008)	https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300037
	<i>E. tereticornis</i>			Alta	Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415
	<i>C. citriodora</i>			Moderada		
	<i>E. camaldulensis</i>			Alta		
Austrália	<i>E. camaldulensis</i>	National Forest Inventory Steering Committee, 2019	www.agriculture.gov.au/abares/forestsaustralia/sofr/sofr-2018	Alta	Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415
	<i>E. regnans</i>			*		
	<i>E. obliqua</i>			Moderada	Prtzkow <i>et al.</i> (2020)	https://doi.org/10.3390/f11121371

continua... 60

...continuação

	<i>E. delegatensis</i>			Baixa	Davidson e Reid (1989)	https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1989.tb01423.x
	<i>E. sieberi</i>			*		
	<i>E. pilularis</i>			Moderada	Pook (1985)	https://doi.org/10.1071/BT9850065
	<i>C. maculata</i>			Alta		
	<i>E. marginata</i>			*		
	<i>E. diversicolor</i>			*		
	<i>E. miniata</i>			*		
	<i>E. tetradonta</i>			Alta	Eamus e Prior (1999)	https://doi.org/10.1071/BT98014
	<i>E. globulus</i>			Moderada	Gonçalves <i>et al.</i> (2013)	https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030
Portugal	<i>E. globulus</i>	Barradas <i>et al.</i> (2016)	https://doi.org/10.1007/s10658-016-0910-1	Moderada	Gonçalves <i>et al.</i> (2013)	https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030
	<i>E. camaldulensis</i>	Tomé <i>et al.</i> (2021)	https://doi.org/10.1007/s10342-021-01358-z	Alta	Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415
	<i>E. nitens</i>			Baixa	White <i>et al.</i> (1996)	https://doi.org/10.1093/treephys/16.5.469

continua... 61

...continuação

Espanha	<i>E. globulus</i>	Adame <i>et al.</i> (2022)	https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120104	Moderada	Gonçalves <i>et al.</i> (2013)	
	<i>E. nitens</i>			Baixa	White <i>et al.</i> (1996)	https://doi.org/10.1093/treephys/16.5.469
	<i>E. obliqua</i>			Moderada	Prtzkow <i>et al.</i> (2020)	https://doi.org/10.3390/f11121371
	<i>E. camaldulensis</i>			Alta	Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415
África do Sul	<i>E. camaldulensis</i>	Hirsch <i>et al.</i> (2019)	https://doi.org/10.1080/0035919X.2019.1669732	Alta	Gonçalves <i>et al.</i> (2017)	https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415
	<i>E. tereticornis</i>			Alta		
	<i>E. urophylla x E. grandis</i>			Moderada		
	<i>E. grandis</i>			Moderada	Martins <i>et al.</i> (2008)	https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300037

* Não foram encontradas informações sobre a tolerância dessas espécies à deficiência hídrica.

CAPÍTULO II

IMPACTOS DO AQUECIMENTO GLOBAL (1,5–4 °C) NA PRODUTIVIDADE POTENCIAL E ATINGÍVEL DO EUCALIPTO NA AMÉRICA DO SUL

2.1. INTRODUÇÃO

A intensificação do aquecimento global motivou o estabelecimento do Acordo de Paris, com o objetivo de fortalecer respostas coordenadas da comunidade científica às mudanças climáticas. Esse Acordo busca limitar o aumento da temperatura média global (denominado limiar de aquecimento global) abaixo de 2 °C, em relação aos níveis pré-industriais com esforços adicionais para restringi-lo a 1,5 °C (UNFCCC, 2015). No entanto, evidências recentes indicam que o limiar de 1,5 °C foi ultrapassado em 2024, quando a temperatura média global atingiu ~1,55 °C acima dos níveis pré-industriais (Copernicus, 2024). Embora esse rompimento não caracterize o descumprimento formal da meta de longo prazo, ele sinaliza a aceleração do aquecimento global e a crescente dificuldade de manter a trajetória climática compatível com os objetivos do Acordo de Paris. O não cumprimento dessas metas implica riscos ao sistema climático, incluindo o aumento da frequência, intensidade e duração de eventos extremos, elevação do nível do mar, perda de biodiversidade, insegurança hídrica e alimentar, além de impactos socioeconômicos desproporcionais sobre populações vulneráveis (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018; Torres *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a América do Sul tem sido particularmente afetada por eventos climáticos extremos, incluindo inundações severas, secas prolongadas, ondas de calor e incêndios florestais de grande escala, observados em diferentes regiões do continente nos últimos anos (Marengo *et al.*, 2024; Cortés, 2024; Duarte *et al.*, 2024; Espinoza *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2024; Marengo *et al.*, 2025; Palmeiro-Silva *et al.*, 2025). Esses eventos evidenciam a crescente vulnerabilidade climática regional e resultam em perdas econômicas, degradação de ecossistemas naturais e impactos diretos sobre setores produtivos estratégicos (Marengo *et al.*, 2025).

Entre os setores mais sensíveis a essas mudanças na América do Sul, destaca-se o setor florestal, dada a forte dependência das condições climáticas (Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022). Neste contexto, o *Eucalyptus* spp., atualmente o gênero florestal mais cultivado no mundo (Fagundes *et al.*, 2025a), constitui o principal pilar da silvicultura sul-americana, com área plantada superior a 10 milhões de hectares distribuídos em praticamente todos os países

do continente (Martins *et al.*, 2022). O Brasil concentra a maior área plantada, com ~8,1 milhões de ha (IBÁ, 2025) (Figura 2.1), seguido pelo Chile (~1,02 milhões ha; Gonzalez-Benecke *et al.*, 2021), Uruguai (~0,73 milhões ha; Martins *et al.*, 2022), Argentina (~0,35 milhões ha; Martins *et al.*, 2022) e Paraguai (~0,10 milhões ha; Silva *et al.*, 2020). Além da ampla distribuição territorial, o eucalipto sustenta cadeias produtivas estratégicas na América do Sul, com relevância na geração de empregos, produção de madeira e na inserção do setor florestal regional nos mercados internacionais (IBÁ, 2025).

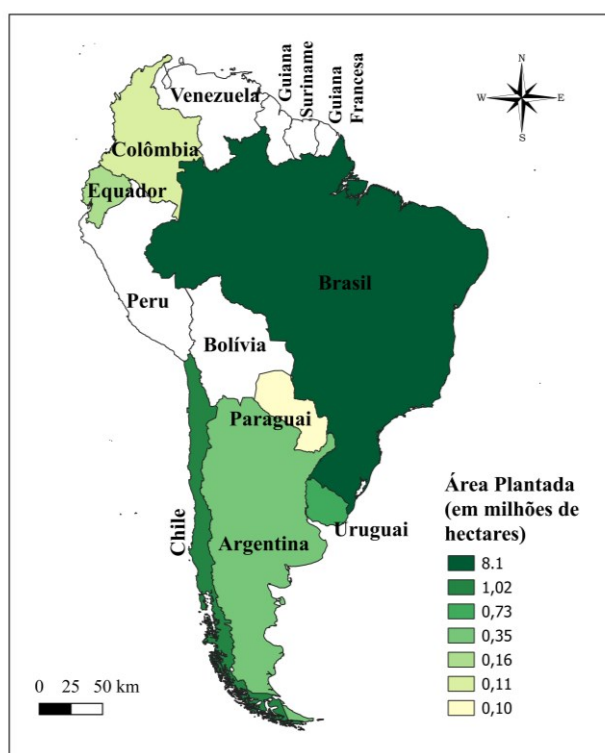


Figura 2.1 - Localização da área de estudo e área plantada (milhões de hectares) dos principais produtores de eucalipto na América do Sul. Os dados estão disponíveis em: <https://zenodo.org/records/13137376>.

Apesar dos avanços nas práticas silviculturais e no melhoramento genético, estudos recentes indicam que o cultivo de eucalipto na América do Sul apresenta crescente vulnerabilidade decorrente da interação entre o aumento de temperatura acima dos limiares fisiologicamente adequados (de 8,5 °C a ~40 °C) (Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022) e a intensificação da deficiência hídrica (Martins *et al.*, 2022; Fagundes *et al.*, 2025a), processo agravado pela expansão dos plantios para ambientes tropicais climaticamente menos favoráveis (Martins *et al.*, 2022). Por exemplo, Fagundes *et al.* (2025a) identificaram o Brasil, Paraguai, Bolívia, Peru e Venezuela como áreas vulneráveis devido ao aumento da deficiência hídrica

acima do limiar máximo para o eucalipto ($> 330 \text{ mm ano}^{-1}$). Tais alterações também favorecem condições ambientais propícias ao aumento da incidência e severidade de pragas e doenças (Mota *et al.*, 2022, 2024), que atuam como estressores indiretos adicionais sobre os sistemas produtivos. Em conjunto, tais alterações podem redefinir a distribuição geográfica e comprometer a produtividade das plantações de eucalipto no continente sul-americano (Butt *et al.*, 2013; Elli *et al.*, 2020a; Ouyang *et al.*, 2022).

Neste contexto, avaliações da vulnerabilidade climática baseadas na produtividade e nos limiares de aquecimento global estabelecidos no Acordo de Paris tornam-se fundamentais para o planejamento e tomada de decisões resilientes ao clima. A abordagem baseada nos limiares de aquecimento global fornece uma métrica padronizada para avaliar impactos climáticos de forma independente das trajetórias de emissões, permitindo distinguir efeitos potencialmente mitigáveis daqueles considerados inevitáveis (Betts *et al.*, 2018; Ruv Lemes *et al.*, 2023; Fagundes *et al.*, 2025a). Apesar de necessários, até o momento, nenhum estudo investigou os impactos dos limiares de aquecimento de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e $2 \text{ }^\circ\text{C}$, assim como limiares adicionais de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $4 \text{ }^\circ\text{C}$, sobre a produtividade do eucalipto, particularmente utilizando modelos climáticos de alta resolução e de última geração, como o *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6).

Para avaliar os impactos dos limiares de aquecimento global sobre a produtividade potencial (PPa) e atingível (PAa) do eucalipto, é necessário, primeiramente, identificar os períodos e padrões climáticos associados a cada limiar, para posteriormente integrá-los a modelos de produtividade florestal (Freitas *et al.*, 2020; Xavier *et al.*, 2026). Os modelos de produtividade diferenciam-se quanto aos dados de entrada, parâmetros estruturais, interface, representação dos processos dinâmicos (tais como partição de biomassa, fotossíntese e respiração), e à forma de incorporação das variáveis climáticas, edáficas e de manejo (Martins *et al.*, 2014; Elli *et al.*, 2019a; 2019b; Freitas *et al.*, 2020; Xavier *et al.*, 2026).

Uma ampla gama de modelos tem sido empregada para simular a produtividade do eucalipto em nível de povoamento ou árvore individual (Doorenbos; Kassam, 1979; Battaglia; Sands, 1997; Landsberg; Waring, 1997; Martins, 2011; Battaglia *et al.*, 2004; Marsden *et al.*, 2013; Holzworth *et al.*, 2014; Freitas *et al.*, 2020). Entre os mais utilizados em estudos climáticos destacam-se o *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM), *Physiological Principles in Predicting Growth* (3-PG) e Modelo de Zona Agroecológica da *Food and Agriculture Organization* (MZA-FAO). Embora os três modelos apresentem estruturas e conjuntos de parâmetros distintos (Apêndice 2.1), o modelo MZA-FAO se destaca por: i)

utilizar variáveis de entrada amplamente disponíveis nos modelos climáticos do conjunto NEX-GDDP-CMIP6; ii) possuir código aberto, permitindo a realização de simulações e projeções de produtividade em qualquer ponto de grade da área de estudo; e iii) apresentar vantagens operacionais em termos de velocidade de execução, estrutura de implementação e flexibilidade do script de gerenciamento (Freitas *et al.*, 2021; Xavier *et al.*, 2026).

Com isso, este estudo busca preencher lacunas de conhecimento ao testar a hipótese de que aumentos progressivos dos limiares de aquecimento global podem amplificar as vulnerabilidades, resultando em impactos heterogêneos de PPa e PAa entre as regiões produtoras de eucalipto na América do Sul. Com base nessa hipótese, os objetivos deste estudo foram: i) identificar os padrões espaciais das variáveis-chave na produtividade do eucalipto nos quatro limiares de aquecimento global (1,5, 2, 3 e 4 °C) em relação ao período de controle; e ii) avaliar os impactos desses limiares de aquecimento global na PPa e PAa do eucalipto na América do Sul, utilizando múltiplos modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Dados climáticos e obtenção dos limiares de aquecimento

Foram utilizados dados diários de temperatura mínima (T_{asmin} , °C) e média (T_{as} , °C) do ar próximo à superfície, precipitação acumulada (P , mm dia⁻¹), umidade relativa do ar (H_{urs} , %) e radiação solar global (R_{sds} , MJ m⁻² dia⁻¹) a partir de um conjunto de simulações para o período controle (CP, 1995-2014) e projeções (2015-2100) de 10 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6: ACCESS-ESM1-5, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1, EC-Earth3-Veg-LR, GFDL-CM4, INM-CM5-0, MIROC6, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 e NorESM2-MM para cada ponto de grade da América do Sul (Figura 2.1). Os modelos climáticos foram selecionados a partir dos achados de Fagundes *et al.* (2025a) por considerar: i) disponibilidade de dados para todas as variáveis, ii) utilizar calendário de 365 dias por ano, iii) atingir o limiar de 1,5 °C a partir de 2025, e iv) apresentar o melhor desempenho dentro das famílias de modelos, conforme avaliações prévias de Almazroui *et al.* (2021), Dias e Reboita (2021) e Ortega *et al.* (2021).

Os dados do NEX-GDDP-CMIP6 são fornecidos pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center* e disponibilizados pelo *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS) em: <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6>. Os modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 são derivados das saídas do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) por meio de uma abordagem de

downscaling estatístico (Thrasher *et al.*, 2022), com alta resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (latitude \times longitude).

Nesse estudo foram considerados dois cenários socioeconômicos compartilhados (do inglês *Shared Socioeconomic Pathways*, SSPs): o SSP2-4.5 (denominado ‘*middle of the road*’) e SSP5-8.5 (denominado ‘*fossil-fueled development*’). O SSP2-4.5 é um cenário intermediário que pressupõe um desenvolvimento socioeconômico no qual as emissões de gases de efeito estufa aumentam até aproximadamente 2050, quando passam a se estabilizar ao longo da segunda metade do século XXI, resultando em um forçamento radiativo de $4,5 \text{ W m}^{-2}$ e concentração de CO_2 de ~ 600 ppm até 2100 (Riahi *et al.*, 2017; Nazarenko *et al.*, 2022). Já o SSP5-8.5 é um cenário pessimista onde se assume que a mitigação será negligenciada, com predomínio de fontes energéticas baseadas em combustíveis fósseis, resultando em um forçamento radiativo de $8,5 \text{ W m}^{-2}$ e uma concentração de CO_2 de ~ 1100 ppm até 2100 (Riahi *et al.*, 2017; Nazarenko *et al.*, 2022).

No Capítulo I foram estabelecidos os períodos de aquecimento de $1,5^\circ\text{C}$ a 4°C em relação aos níveis pré-industriais para todo o globo. Neste estudo, utilizamos os achados do Capítulo I para calcular a produtividade do eucalipto. Assim, a produtividade potencial e atingível (detalhado no item 2.2.3) foram calculadas para dois períodos: i) período de controle (CP, 1995-2014); e ii) períodos em que projeções atingiram os quatro limiares de aquecimento ($1,5^\circ\text{C}$ – 4°C) em cada SSP (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Além disso, no Capítulo I, os limiares de aquecimento global foram identificados utilizando modelos do CMIP6 e associados aos seus correspondentes no conjunto NEX-GDDP-CMIP6, que apresenta maior resolução espacial ($\sim 25 \text{ km}$). Essa abordagem é recomendada por Samuel *et al.* (2023) e Fagundes *et al.* (2025a).

Para identificar os períodos de ocorrência e os respectivos padrões de aquecimento global de $1,5^\circ\text{C}$ a 4°C , em relação ao período pré-industrial (1850-1900), foram realizados a série de passos detalhados no Capítulo I. Primeiro, com os dados diários de temperatura do ar de cada modelo climático (e SSP) foi calculada a temperatura média anual abrangendo o período de 1850 a 2100. Em seguida, a média climatológica para o período pré-industrial (1850-1900) foi calculada para cada modelo climático, e as anomalias de temperatura anual foram obtidas subtraindo o valor anual de cada modelo climático da climatologia pré-industrial calculada para esse mesmo modelo. Para remover a variabilidade climática de curto prazo, foi aplicada uma média móvel centrada em 21 anos à série de anomalias, resultando em uma série de dados suavizados para o período de 1860 a 2090. Por fim, para identificar os anos em que os limiares

de aquecimento de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C foram atingidos, foi calculada uma média espacial global a partir da série de anomalias anuais suavizadas de cada modelo climático e SSP.

Para a análise espacial, foi calculada uma média de todas as projeções disponíveis dentro de cada SSP, a partir da série anual de anomalias suavizadas para cada modelo climático no ano em que atingiu o limiar de aquecimento global considerado, e por fim, foi obtida a média (*ensemble mean*) das projeções para os dois SSPs (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Também foram analisados os padrões para Tasmin, P, Hurs e Rsds por serem variáveis de entrada do modelo MZA-FAO (detalhado no item 2.2.3). Para isso, foi utilizado o mesmo procedimento descrito acima, exceto o cálculo da média global, desnecessário para a Tasmin, P, Hurs e Rsds conforme descrito em Torres *et al.* (2021) e Fagundes *et al.* (2025a).

2.2.2. Dados do solo e obtenção da capacidade de água disponível para eucalipto

A capacidade de retenção de água no solo (CRAS, mm cm⁻¹) foi obtida para cada ponto de grade da área de estudo (Figura 2.1), a partir de dados de textura do solo fornecidos pelo *NASA Global Land Data Assimilation System Version 2* (GLDAS-2), que está disponível no portal *Land Data Assimilation System* (LDAS) (em: <https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/soils>). Os dados de textura possuem resolução horizontal de 0,25° x 0,25° (latitude x longitude), compatível com os modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 e englobam todas as 12 classes de textura definidas pela FAO, além de matéria orgânica, rocha e outros. Por brevidade, todas as classes texturais foram agrupadas em três grupos principais, a fim de representar os diferentes valores de CRAS (Dias *et al.*, 2024; Ribeiro *et al.*, 2024; Fagundes *et al.*, 2025a): i) solo argiloso com alta CRAS (1,50 mm cm⁻¹), ii) solo argilo-arenoso, com média CRAS (1,00 mm cm⁻¹), e iii) solo franco-arenoso com baixa CRAS (0,60 mm cm⁻¹).

A capacidade de água disponível no solo (CAD, mm) para o eucalipto foi obtida para cada ponto de grade a partir do produto da CRAS e do comprimento radicular do eucalipto (Zr, cm). Zr varia ao longo do estágio de desenvolvimento (I = idade, em meses), e foi calculada por Freitas *et al.* (2020):

$$Zr = \begin{cases} 10, & \text{até } I = 1^\circ \text{ mês} \\ 85,264 * \ln(I) + 10, & \text{para } 1 < I \leq 30 \\ 300, & \text{para } 30 < I \leq 84 \end{cases} \quad (2.1)$$

Os dados de CAD foram utilizados para a obtenção das variáveis evapotranspiração real (ETr) e deficiência hídrica (DEF), que por sua vez são obtidas a partir do balanço hídrico do solo (detalhado no item 2.2.4).

2.2.3. Breve descrição do modelo de produtividade MZA-FAO adaptado para o eucalipto

O MZA-FAO é um modelo matemático fisiológico desenvolvido por Doorenbos e Kassam (1979), baseado no modelo teórico de De Wit (1965) para simular a fotossíntese bruta em escala diária, considerando as respostas das plantas às variáveis climáticas e os mecanismos de fixação de carbono (Freitas *et al.*, 2021; Xavier *et al.*, 2026). Neste estudo, usamos a versão do MZA-FAO previamente adaptada, calibrada e validada por Freitas *et al.* (2020) para oito genótipos de eucalipto (*E. urophylla*, *E. grandis* × *E. camaldulensis*, *E. saligna*, *E. grandis*, *E. urophylla* × *E. grandis*, *E. urophylla*, *E. dunnii* e *E. grandis*), amplamente utilizados nos plantios florestais na América do Sul.

No MZA-FAO, a produtividade do eucalipto é obtida em duas etapas: i) calcula-se a produtividade potencial (PP, Kg ha⁻¹ dia⁻¹) em escala diária e a produtividade atingível (PA, Kg ha⁻¹ mês⁻¹) em escala mensal, desde a data de plantio (i= 1) até a data de colheita (n= 84 meses) (Figura 2.2); ii) obtém-se a produtividade potencial acumulada (PPa, m³ ha⁻¹) e a produtividade atingível acumulada (PAac, m³ ha⁻¹) pelo somatório dos valores diários de PP e mensais de PA (de i a n). As duas etapas foram calculadas para o CP (1995 – 2014) e para os períodos em que as projeções atingiram os quatro limiares de aquecimento global (1,5 - 4 °C), considerando cada modelo climático e SSP (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Para cada combinação de limiares de aquecimento global, modelo climático e SSP, foi considerado o ano central de aquecimento e uma janela temporal de ± 10 anos, totalizando séries temporais de 21 anos, que equivalem a 14 rotações de 7 anos cada. Neste estudo, consideramos o ciclo de desenvolvimento do eucalipto de 84 meses (desde o plantio até a colheita) (Freitas *et al.*, 2020; Xavier *et al.*, 2026), fixando a data de plantio (i) em 1º de janeiro de cada ano em cada período (CP e limiares de aquecimento global), modelo climático (10) e SSP (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

A PP foi obtida de forma multiplicativa, conforme (Freitas *et al.*, 2020):

$$PP_i^n = (FB_i * CIAF_i * Cr_i * CC_i) * f_{geada} \quad (2.2)$$

Em que: PP = Produtividade potencial diária (kg ha⁻¹ dia⁻¹); FB = fotossíntese bruta (kg ha⁻¹ dia⁻¹) (Eq. 2.9, Tabela 2.2); CIAF = correção para o índice de área foliar (Eq. 2.16, Tabela 2.2); Cr = correção para a taxa de respiração (adimensional) (Tabela 2.2); CC = correção para o índice de colheita (= 0,69) (Freitas *et al.*, 2020; Xavier *et al.*, 2026); i = data de plantio (fixada em 1º de janeiro em cada ano do CP (1995-2014) e período em que projeções atingiram cada limiares de aquecimento global); n = data de colheita (data que atinge o término do ciclo = 84º

mês), que varia em função do modelo climático e SSP; e f_{geada} = função de penalização por geada (adimensional) (Tabela 2.1), calculada para o período entre $i=1$ e $n=24$ meses.

A PA foi obtida pela penalização da PP mensal em função do estresse hídrico ao longo dos diferentes períodos de rotação, considerando a dinâmica do balanço hídrico do solo. A PA é dada por (Freitas *et al.*, 2020):

$$PA = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[1 - K_y \times \left(1 - \frac{ETr}{ETc} \right) \right]_i \times PP_{mensal} \right\} \times f_{DEF} \quad (2.3)$$

Em que: PA = produtividade atingível ($kg\ ha^{-1}\ mês^{-1}$); K_y = índice de sensibilidade do eucalipto ao estresse hídrico (adimensional) para cada mês de $i = 1$ a $n = 84$ (Tabela 2.1); ETr = evapotranspiração real mensal ($mm\ mês^{-1}$); ETc = evapotranspiração da cultura mensal ($mm\ mês^{-1}$); PP_{mensal} = produtividade potencial mensal ($kg\ ha^{-1}\ mês^{-1}$); i = data de plantio (fixada em 1º de janeiro em cada ano do CP (1995-2014) e período em que projeções atingiram cada limiar de aquecimento global); n = data de colheita (data que atinge o término do ciclo = 84º mês), que varia em função do modelo climático e SSP; f_{DEF} = índice de mortalidade por estresse hídrico (adimensional), obtido através da DEF mensal ($mm\ mês^{-1}$, Tabela 2.1). Os valores de ETc, ETr e DEF mensal foram obtidos a partir do balanço hídrico do solo (detalhado no item 2.2.4).

Tabela 2.1 - Função de penalização por geada (f_{geada} , adimensional), índice de sensibilidade do eucalipto ao estresse hídrico (K_y , adimensional) e índice de mortalidade por estresse hídrico (f_{DEF} , adimensional).

Valores de f_{geada} (adimensional) ¹		Valores de K_y (adimensional) ²		Valores de f_{DEF} (adimensional) ³	
Tasmin (°C)	f_{geada}	Meses	Valores médios de K_y	DEF mensal ($mm\ mês^{-1}$)	f_{DEF}
$0 \leq Tasmin \leq 2$	0,99	1	1,4	$0 \leq DEF\ mensal \leq 100$	1,0
$-2 \leq Tasmin \leq 0$	0,98	10	1,3	$101 \leq DEF\ mensal \leq 150$	0,93
$-3 \leq Tasmin \leq -2$	0,96	30	1,7	$151 \leq DEF\ mensal \leq 200$	0,86
$-4 \leq Tasmin \leq -3$	0,95	60	1,3	$201 \leq DEF\ mensal \leq 250$	0,83
$Tasmin < -4$	0,93	84	1,0	$251 \leq DEF\ mensal \leq 300$	0,76
				$DEF\ mensal > 300$	0,70

Adaptado de Freitas *et al.* (2020) e Xavier *et al.* (2026). Tasmin = temperatura mínima do ar (°C), ¹ f_{geada} = função de penalização por geada (adimensional). ² K_y = foi obtido a partir da média aritmética dos genótipos de eucalipto por Freitas *et al.* (2020). ³ f_{DEF} = índice de mortalidade por estresse hídrico (adimensional) obtido a partir do balanço hídrico do solo (detalhado no item 2.2.4) e DEF = deficiência hídrica.

Por fim, PPa e PAa foram obtidos pelo somatório dos valores de PP e PA, respectivamente, sendo então convertidos em volume por hectare ($m^3\ ha^{-1}$), conforme Freitas

et al. (2020). Neste estudo, consideramos como produtividade o valor total de PPa e PAa em $m^3 ha^{-1}$ acumulado ao longo da rotação de 7 anos.

$$PPa = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(PP/1000)}{\rho_m} \right] \quad (2.6)$$

$$PAa = \sum_{i=1}^{N_{rot}} \left[\frac{(PA/1000)}{\rho_m} \right] \quad (2.7)$$

$$\rho_m = 0,44 + (0,37 - 0,44) \times \exp[-0,693 \times (I/2,26)^{2,99}] \quad (2.8)$$

Em que: PPa = produtividade potencial acumulada ($m^3 ha^{-1}$); PP = produtividade potencial diária ($Kg ha^{-1} dia^{-1}$); ρ_m = densidade da madeira ($t m^{-3}$), que varia ao longo do ciclo de rotação; PAa = produtividade atingível acumulada ($m^3 ha^{-1}$); PA = produtividade atingível calculada em escala mensal ($Kg ha^{-1} mês^{-1}$); I = idade da rotação do eucalipto, expressa em meses, desde o plantio ($i = 1$) até a colheita ($n = 84$), correspondendo ao mês sequencial dentro do ciclo ($I = 1$ correspondendo a janeiro, ..., $I = 84$ correspondendo ao mês de colheita); N = número total de dias desde a data do plantio até a data de colheita, Nrot = número total de meses desde a data do plantio até a data da colheita (84).

O esquema simplificado do modelo MZA-FAO é apresentado na Figura 2.2.

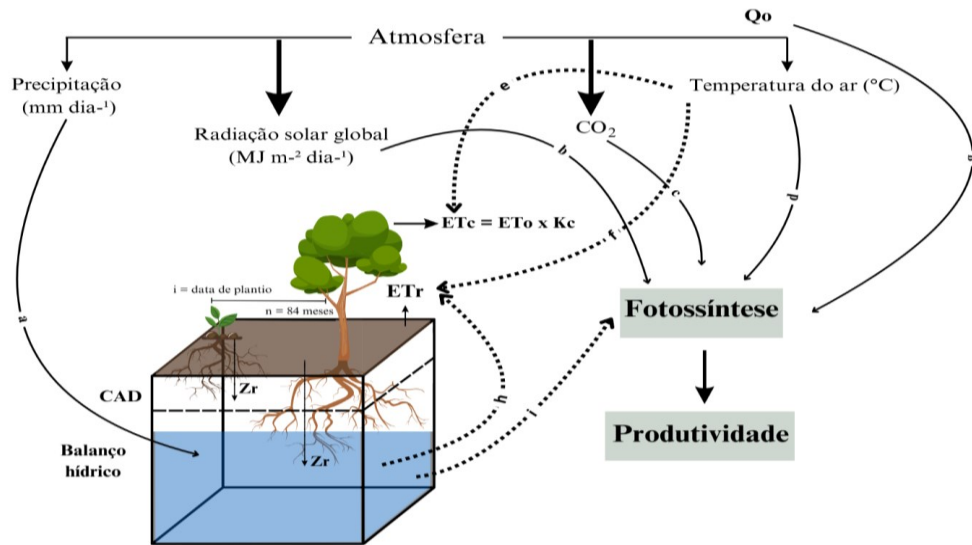


Figura 2.2 - Esquema de cálculo do MZA-FAO com indicação (setas tracejadas) dos processos influenciados pelos estresses térmicos (e, f) e hídricos (i, h), setas pretas indicam interação da precipitação (a), radiação solar global (b), CO_2 (c), temperatura (d) e radiação solar global no topo da atmosfera (g). Em que: CAD = capacidade de água disponível (mm), ET_c = evapotranspiração da cultura ($mm dia^{-1}$), ET_r = evapotranspiração de real ($mm mês^{-1}$), ET_0 = evapotranspiração de referência ($mm dia^{-1}$), i = data de plantio, n = data da colheita (84 meses), Q_o = radiação solar global no topo da atmosfera ($MJ m^{-2} dia^{-1}$), Z_r = comprimento radicular (cm).

Tabela 2.2 - Equações e parametrizações necessárias para calcular a produtividade potencial e atingível do eucalipto pelo modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO).

Variáveis	Condições	Formulas	Variáveis independentes	Equação	Referências
FB		$FB = Fbc + Fbn$	$Fbc = (107,2 + 8,612 Q0) cTc \left(\frac{n}{N}\right)$ $Fbn = (31,7 + 5,239 Q0) cTn \left(1 - \frac{n}{N}\right)$	2.9	Doorenbos e Kassam (1994); Freitas <i>et al.</i> (2020)
Q0		$Q0 = \frac{0,0864}{\pi} 1367 \left(\frac{d}{D}\right)^2 [(H \sin \phi \sin \delta) + (\cos \phi \cos \delta \sin H)]$	$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{DOY - 360}{365}\right)$ $H = \arcsin(-\tan \phi \tan \delta)$ $\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284 + DOY)}{365}\right)$	2.10	Allen <i>et al.</i> (1998)
$\frac{n}{N}$		$\frac{n}{N} = \frac{\left(\frac{Rsds}{Q0}\right) - 0,25}{0,5}$		2.11	Allen <i>et al.</i> (1998)
cTc	Se $16,5^{\circ}\text{C} \leq Tas \leq 37^{\circ}\text{C}$	$cTc = -0,0425 + 0,035 Tas + 0,00325 Tas^2 - 0,000095 Tas^3$		2.12	Doorenbos e Kassam (1994); Freitas <i>et al.</i> (2020)
	Se $Tas < 16,5^{\circ}\text{C}$ ou $Tas > 37^{\circ}\text{C}$	$cTc = -1,085 + 0,07 Tas + 0,0065 Tas^2 - 0,000185 Tas^3$		2.13	
cTn	Se $16,5^{\circ}\text{C} \leq Tas \leq 37^{\circ}\text{C}$	$cTn = -0,583 + 0,014 Tas + 0,0013 Tas^2 - 0,000037 Tas^3$		2.14	Doorenbos e Kassam (1994); Freitas <i>et al.</i> (2020)
	Se $Tas < 16,5^{\circ}\text{C}$ ou $Tas > 37^{\circ}\text{C}$	$cTc = -0,0425 + 0,035 Tas + 0,00325 Tas^2 - 0,000095 Tas^3$		2.15	
Cr	Se $Tas < 20^{\circ}\text{C}$	$Cr = 0,6$		-	Doorenbos e Kassam (1994); Freitas <i>et al.</i> (2020)
	Se $Tas > 20^{\circ}\text{C}$	$Cr = 0,5$		-	
C_{IAF}	Se $IAF \geq 5, C_{IAF} = 1$	$C_{IAF} = 0,0186 + 0,37 IAF - 0,035 IAF^2$		2.16	Doorenbos e Kassam (1994); Freitas <i>et al.</i> (2020)

Em que: FB = fotossíntese bruta ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); Fbc = fotossíntese bruta em períodos com céu claro ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); Fbn = fotossíntese bruta em períodos com céu nublado ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); Q0 = radiação solar global no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); $(d/D)^2$ = distância Terra-Sol (adimensional); ϕ = latitude de cada ponto da grade da área de estudo (graus); δ = declinação solar (graus); H = ângulo horário do nascer do sol (graus); DOY = dia do ano - entre 1 (janeiro 1) a 365 (dezembro 31); n/N = razão de insolação (adimensional); Rsds = radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), obtida para cada modelo climático e SSP no CP (1995-2014) e nos períodos em que projeções atingiram cada limiars de aquecimento global ($1,5^{\circ}\text{C}$, 2°C , 3°C e 4°C) sejam atingidos; cTc e cTn = coeficientes de correção relacionados à eficiência fotossintética em céu claro e nublado, respectivamente ($^{\circ}\text{C}$); Tas = temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$), obtida para cada modelo climático no CP (1995-2014) e nos períodos em que projeções atingiram cada limiar de aquecimento global ($1,5^{\circ}\text{C}$, 2°C , 3°C e 4°C); Cr = correção para a taxa de respiração (adimensional); C_{IAF} = correção para o índice de área foliar (adimensional); e IAF = índice de área foliar. Adaptado de Xavier *et al.* (2026).

2.2.4. Balanço hídrico do solo e evapotranspiração da cultura

O balanço hídrico do solo (BHS) foi obtido pela versão adaptada do método de Thornthwaite e Mather (1955, 1957), adotando as condições iniciais de armazenamento de água no solo definidas por Dourado-Neto *et al.* (2010). Esse método quantifica a ETr e DEF utilizados no cálculo da PA (Eq. 2.3) em diferentes condições climáticas (áridas, semiáridas e úmidas) e em locais com mais de uma estação seca ao longo do ano (Dias *et al.*, 2024; Fagundes *et al.*, 2025a).

O método requer como dados de entrada, em escala mensal, a precipitação (P, mm mês⁻¹), e a evapotranspiração da cultura (ETc, mm mês⁻¹), ambas calculadas para o CP e para os períodos em que as projeções climáticas atingiram cada limiar de aquecimento global (1,5 – 4 °C) nos diferentes cenários (SSPs 2-4.5 e 5-8.5), além da capacidade de água disponível no solo (detalhada no item 2.2.2).

Os valores mensais de P e ETc foram obtidos a partir de dados diários acumulados mensalmente para o CP e para os períodos em que as projeções atingiram cada limiar de aquecimento global (1,5 °C – 4 °C). Aqui, tais valores foram calculados para cada combinação de limiar de aquecimento global, modelo climático e SSP, considerando o ano central de aquecimento e uma janela temporal de ± 10 anos. Os passos detalhados para calcular o BHS podem ser consultados em Dias *et al.* (2024) e Fagundes *et al.* (2025a).

A ETc foi estimada em escala diária a partir do produto entre a evapotranspiração de referência (ETo, mm dia⁻¹) e o coeficiente de cultura (Kc) (Allen *et al.*, 1998; Freitas *et al.*, 2020). A ETo foi calculada pelo método de Turc (Turc, 1961) (Eq. 2.17), devido seu bom desempenho em diversas regiões da América do Sul, especialmente no Brasil (Monteiro *et al.*, 2021) e Colômbia (Triana-Madrid *et al.*, 2023).

$$ETo = (0,3107 * Rsds + 0,65) * \frac{Tas*at}{Tas + 15}, \begin{cases} at = 1 \text{ se Hurs} \geq 50\% \text{ ou} \\ at = 1 + \frac{50-Hurs}{70} \text{ se Hurs} < 50\% \end{cases} \quad (2.17)$$

Em que: ETo = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Rsds = radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹); Tas = temperatura média do ar próxima à superfície (°C); e Hurs = umidade relativa próxima à superfície (%).

Os valores de Kc do eucalipto variam de acordo com o estágio de desenvolvimento, sendo obtidos por (Freitas *et al.*, 2020):

$$Kc = \begin{cases} 0,5, & \text{quando } IAF < 1,5 \\ 0,2011 \times IAF - 0,0075, & \text{quando } IAF \geq 1,5 \end{cases} \quad (2.18)$$

$$IAF = \begin{cases} \frac{6,079071}{(1+(79,9335 \exp(-0,29 \times I)))}, & I < 30 \text{ meses} \\ 0,0006 \times I^2 - 0,1191 \times I + 9,0042, & I \geq 30 \text{ meses} \end{cases} \quad (2.19)$$

Em que: Kc= coeficiente de cultura (adimensional); IAF = índice de área foliar; I = idade (em meses, desde o plantio até a colheita).

2.2.5. Avaliação dos impactos dos limiares de aquecimento na produtividade do eucalipto

Os impactos associados aos limiares de aquecimento global sobre a produtividade do eucalipto foram analisados em três etapas: i) análise das mudanças das variáveis Tasmin, Tas, P, Hurs, Rsds, ETc, ETr e DEF, que são dados de entrada do MZA-FAO, ii) análise do padrão espaço-temporal e das mudanças na produtividade do eucalipto em termos de PPa e PAa, e iii) quantificação da quebra de produtividade (QP, em %). Nas etapas i e ii o termo “mudança” foi definido como a diferença entre os valores projetados para cada limiar de aquecimento (1,5–4 °C) e o período de controle (CP, 1995–2014).

A QP (%) foi calculada por:

$$QP = \left(1 - \frac{PAa}{PPa}\right) * 100 \quad (2.20)$$

Em que: QP = quebra de produtividade (%), PPa = produtividade potencial acumulada (m³ ha⁻¹), PAa = produtividade atingível acumulada (m³ ha⁻¹).

Todas as análises foram realizadas para cada limiar de aquecimento global, modelo climático do NEX-GDDP-CMIP6 e SSP, sendo posteriormente calculado o *ensemble mean* para cada SSP. Além disso, o padrão espacial da PPa e PAa foi analisado de forma integrada, a partir dos valores médios dos modelos climáticos que atingiram cada limiar de aquecimento global, considerando conjuntamente os SSPs, em vez de analisar os cenários individualmente.

2.3. RESULTADOS

2.3.1. Padrões de mudanças nas variáveis de entrada do MZA-FAO sob quatro limiares de aquecimento global

A análise das mudanças projetadas na Tasmin e Tas em relação ao CP mostra que nos limiares de aquecimento global de 1,5 °C e 2 °C (Figura 2.3 A1–D2) há um aumento de +1 °C e +1,5 °C em áreas do Centro-Oeste e Norte do Brasil, centro-norte do Paraguai, grande parte Bolívia, norte do Chile, extremo noroeste da Argentina, nordeste da Colômbia e em uma faixa

que se estende da Venezuela ao Suriname (Figura 2.3 D2), com maior extensão no limiar de 2°C. Tais regiões, porém, nos limiares de 3 °C e 4 °C (Figura 2.3 A3–D4), podem indicar aumentos entre +2,5 °C e +4,5 °C.

Os padrões espaciais de mudanças na P anual, Hurs e Rstds evidenciam um aumento na magnitude das mudanças nos limiares de 3 e 4 °C comparados aos limiares de 1,5 e 2 °C (Figura 2.3 E1 a F4). Ou seja, os padrões de mudanças são similares entre os limiares de aquecimento global, porém mais intensificados no 3°C e 4°C (e SSP5-8.5). Mudanças negativas de P anual ($> -100 \text{ mm ano}^{-1}$) são observadas principalmente na região central do Chile, centro-norte e costa nordeste do Brasil, faixa que se estende do leste da Venezuela à Guiana Francesa. Já mudanças positivas de P anual ($> +125 \text{ mm ano}^{-1}$) são observadas no sul do Brasil, noroeste da Argentina, sul do Paraguai e em uma faixa que se estende do sul do Peru ao oeste do Equador (Figura 2.3 F3 e F4).

Os padrões de mudanças negativas de Hurs ($> -3\%$) são semelhantes aos da P anual e são observados com maior intensidade em grande parte do Brasil (exceto o sul), região central do Chile, leste Bolívia, leste do Peru, leste do Equador, Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa (Figura 2.3 H3 e H4), enquanto as mudanças positivas de Hurs ($> +1\%$) podem ser observadas de forma pontual ao norte da Argentina e oeste do Paraguai no limiar de 3 °C no SSP2-4.5 (Figura 2.3 G3) e na região mais central da Argentina (Figura 2.3 H3 e H4) nos limiares de 3 e 4 °C no SSP5-8.5.

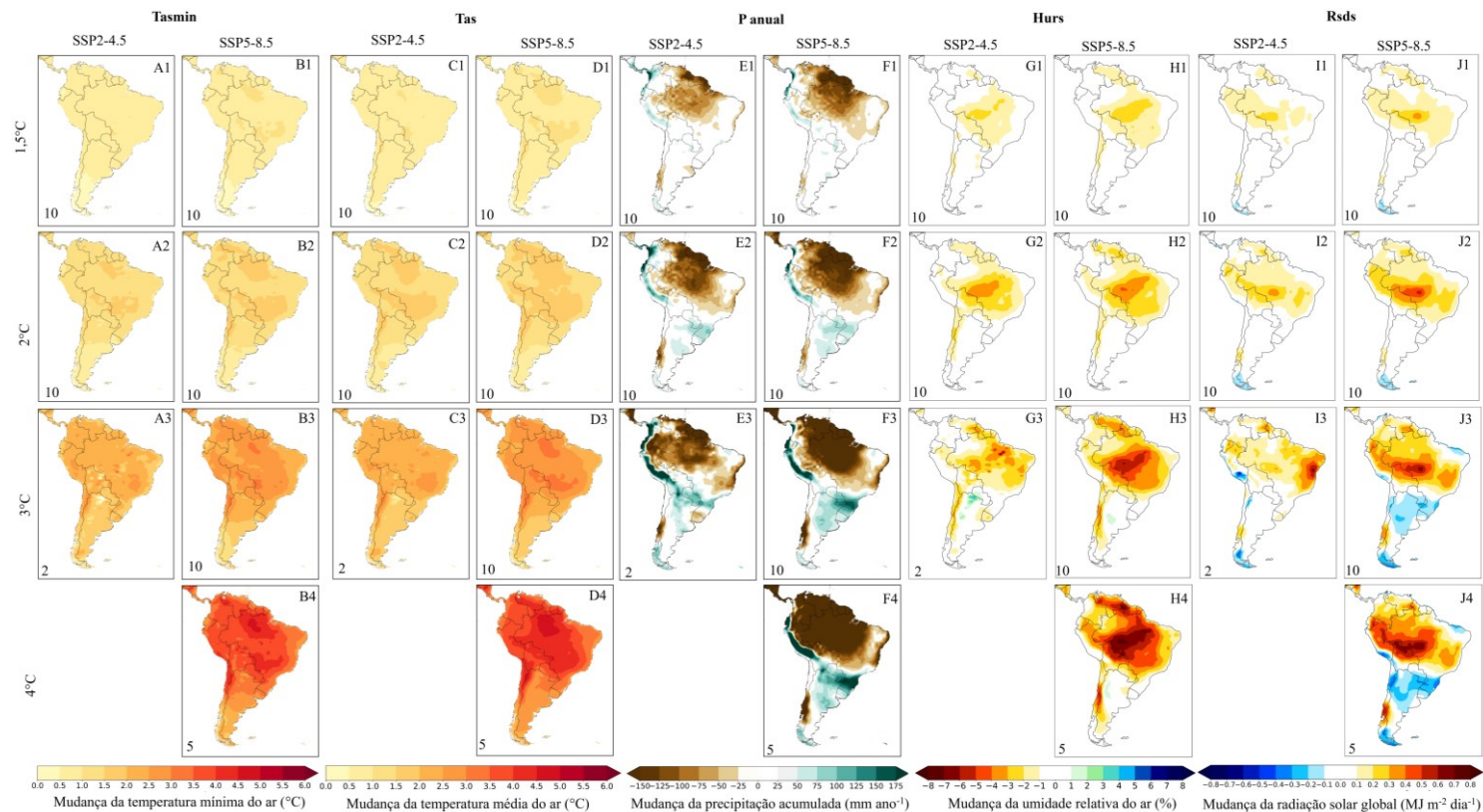


Figura 2.3 - Padrão médio do ensemble da mudança de temperatura mínima (painéis A1 a B4), temperatura média (painéis C1 a D4) do ar próximo a superfície (°C), precipitação anual acumulada (mm ano^{-1} , painéis E1 a F4), umidade relativa do ar (% , painéis G1 a H4) e radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, painéis I1 a J4) para os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (painéis A1 a J1), 2 °C (painéis A2 a J2), 3 °C (painéis A3 a J3) e 4 °C (painéis B4 a J4) em relação ao período de controle (CP, 1995-2014), nos dois cenários socioeconômicos: SSP2-4.5 (painéis A1-A3, C1-C3, E1-E3, G1-G3 e I1-I3) e SSP5-8.5 (painéis B1-B4, D1-D4, F1-F4, H1-H4 e J1-J4). A média foi calculada considerando todos os modelos climáticos que atingiram cada limiar de aquecimento nos dois cenários socioeconômicos (SSPs, 5-8.5 e 2-4.5). O número de modelos climáticos que atingiram cada limiar está no canto inferior esquerdo de cada painel.

Com relação a R_{sds} , também são observados padrões espaciais heterogêneos, com mudanças negativas de R_{sds} (entre $-0,1$ a $-0,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) concentradas sobre o centro-norte e extremo sul da Argentina, Uruguai, sul do Brasil e extremo norte do Nordeste do Brasil, sul do Paraguai, sudoeste do Peru, norte e sul do Chile (Figura 2.3 J4). Mudanças positivas (e mais intensas) de R_{sds} ($> +0,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) são observadas no Brasil (principalmente do centro-norte), porção central do Chile, centro-norte da Bolívia, leste do Peru e Equador (Figura 2.3 J4).

Por fim, as áreas com mudanças positivas de ET_c ($> +200 \text{ mm ano}^{-1}$) aumentam à medida que os limiares de aquecimento global passam de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ para $4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 2.4), abrangendo praticamente toda América do Sul. Somente no limiar de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ em ambos SSPs (2-4.5 e 5-8.5) uma pequena faixa na costa da região Nordeste do Brasil, oeste do Equador, norte da Colômbia e locais pontuais na fronteira entre Colômbia e Venezuela apresentam mudanças na $ET_c < 50 \text{ mm ano}^{-1}$ (Figura 2.4 A1 e B1).

As mudanças positivas de ET_r (entre $+200$ e $+400 \text{ mm ano}^{-1}$) são observadas na região sul e sudeste do Brasil, centro-norte da Argentina, Uruguai e em uma faixa que se estende do sul ao noroeste da Bolívia, Peru, Equador, Colômbia e sul da Venezuela, principalmente nos limiares de aquecimento global de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 2.4 C3, D3 e D4). Em contraste, mudanças negativas de ET_r (entre -200 e -400 mm ano^{-1}), ocorrem principalmente no Brasil (Nordeste, oeste do Centro-Oeste e nordeste do Norte), leste da Bolívia, região central do Chile, extremo norte da Colômbia, norte da Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa (Figura 2.4 D4).

Os aumentos de DEF são mais intensos (em área e magnitude), com valores entre $+300$ e $+675 \text{ mm ano}^{-1}$, principalmente em grande parte do Brasil (exceto a região Sul), sul da Argentina, centro-norte do Chile, Bolívia, norte do Paraguai, sul do Peru, norte da Colômbia e Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa (Figura 2.4 F4). Somente em uma pequena parte no norte da Argentina, sul da Bolívia e uma faixa que se estende do sul do Peru até a costa do Equador (limiar de aquecimento = $3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $4 \text{ }^\circ\text{C}$) apresentam redução de DEF, variando entre -75 e -150 mm ano^{-1} (Figura 2.4 F4).

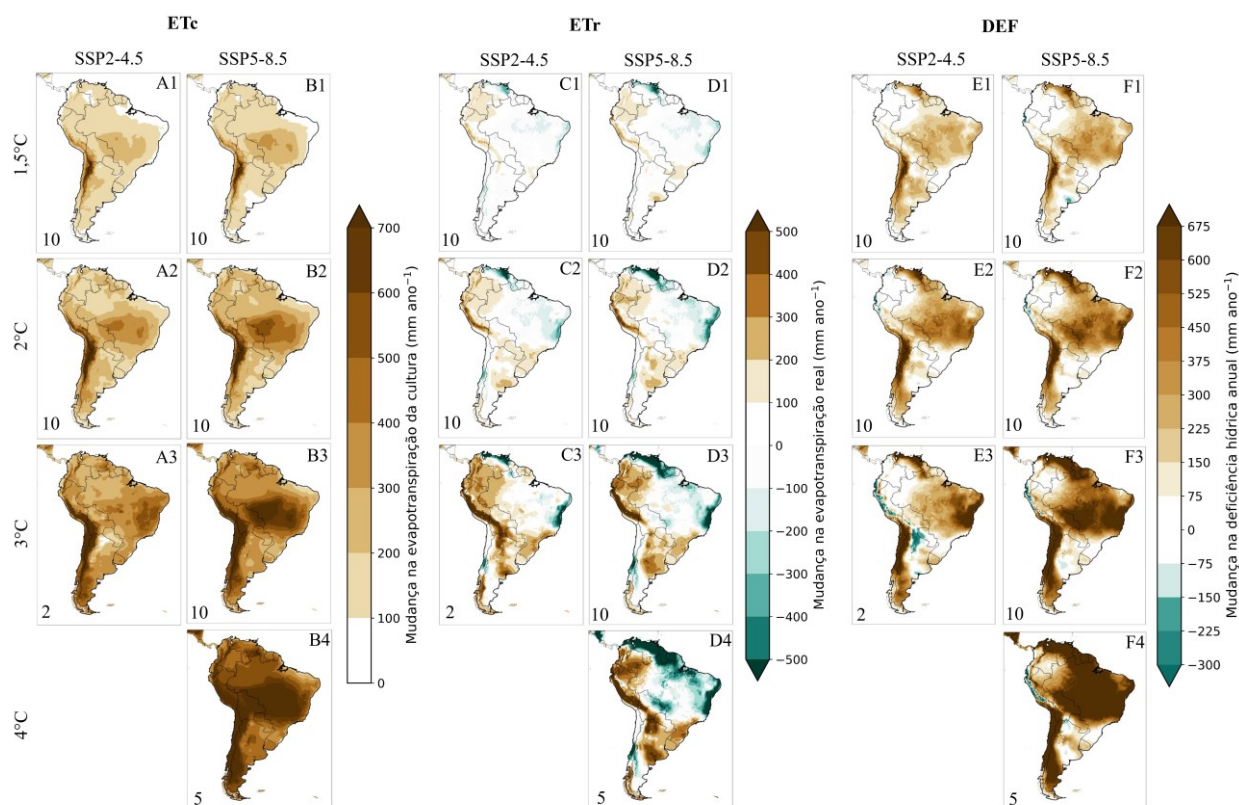


Figura 2.4 - Padrão médio do ensemble da mudança de evapotranspiração da cultura (ETc, mm ano⁻¹, painéis A1 a B4), evapotranspiração real (ETr, mm ano⁻¹, painéis C1 a D4) e deficiência hídrica anual (DEF, mm ano⁻¹, painéis E1 a F4) para os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (painéis A1, B1, C1, D1, E1 e F1), 2 °C (Painéis A2, B2, C2, D2, E2 e F2), 3 °C (Painéis A3, B3, C3, D3, E3 e F3) e 4 °C (Painéis B4, D4 e F4) em relação ao período de controle (CP, 1995-2014), nos dois cenários socioeconômicos: SSP2-4.5 (painéis A1-A3, C1-C3 e E1-E3) e SSP5-8.5 (painéis B1-B4, D1-D4 e F1-F4). O *ensemble mean* foi calculado considerando todos os modelos climáticos que atingiram cada limiar de aquecimento nos dois cenários socioeconômicos (SSPs, 5-8.5 e 2-4.5). O número de modelos climáticos que atingiram cada limiar está no canto inferior esquerdo de cada painel.

Os padrões de mudança de precipitação em torno de 30°S (Figura 2.3 E1–F4) estão associados a alterações na circulação de Hadley em condições de aquecimento global (Ruv Lemes *et al.*, 2022). O aumento da temperatura promove a expansão e intensificação dessa circulação, acompanhados por um deslocamento latitudinal das zonas de subsidência em direção aos polos (Freitas; Ambrizzi, 2015). Como consequência, observa-se o fortalecimento da subsidência nas latitudes subtropicais, o que aumenta a estabilidade na coluna de ar, inibe a convecção, reduz a formação de nuvens e, conseqüentemente, diminui a precipitação (Freitas;

Ambrizzi, 2015; Ruv Lemes *et al.*, 2022). Esse processo contribui para a intensificação do cinturão seco subtropical, particularmente em regiões próximas a 30°S.

Como consequência, observa-se um aumento ainda maior da DEF (Figura 2.4 E1–F4), refletindo o agravamento do desequilíbrio entre a oferta hídrica e a demanda atmosférica. Esse aumento exerce forte controle sobre a produtividade florestal, uma vez que a restrição hídrica afeta diretamente processos fisiológicos fundamentais que regulam os fluxos de água e carbono na planta, como condutância estomática, assimilação de carbono e eficiência no uso da água. A redução da condutância estomática, como resposta a DEF, limita a entrada de CO₂ e a fotossíntese, comprometendo o balanço carbono–água e culminando na redução da PAa (Abreu *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022; Xavier *et al.*, 2026).

Os padrões espaciais de mudança da ETc acompanham os padrões de aumento da temperatura (Tasmin e Tas), indicando que a ETc responde predominantemente à intensificação da demanda atmosférica associada ao aquecimento. Por sua vez, a ETr tem correspondência direta com os padrões de P anual e Hurs, com aumento (redução) nessas variáveis associados a aumento (redução) na ETr. Esses resultados indicam que, embora a maior disponibilidade de energia na superfície, em termos de Tasmin, Tas e Rsds, intensifique a demanda evaporativa, a evapotranspiração efetiva, em termos de ETr, é condicionada pela disponibilidade hídrica. Por sua vez, os padrões espaciais de DEF acompanham os padrões positivos de Tasmin, Tas e Rsds e os padrões negativos de P anual e Hurs, refletindo o aumento do estresse hídrico associado à intensificação da demanda evaporativa combinada à redução da disponibilidade de água.

Os padrões de aumento de Tas e ETc, bem como as mudanças heterogêneas de P anual, Hurs, Rsds, ETr e DEF, são consistentes com resultados reportados em estudos anteriores baseados em modelos climáticos globais do CMIP6 e modelos climáticos regionais para a América do Sul (Torres *et al.*, 2021; IPCC, 2022; Douville; Willett, 2023; Fagundes *et al.*, 2025a; Xavier *et al.*, 2026).

Dessa forma, os aumentos de +1 °C a +4,5 °C na Tasmin e Tas ao longo dos 4 limiares de aquecimento global, associados ao aumento da ETc e aos padrões heterogêneos (redução e aumento) na P anual, Hurs, Rsds, ETr e DEF podem alterar a PP e PA do eucalipto e comprometer a segurança florestal em toda área de estudo.

2.3.2. Produtividade potencial e atingível nos quatro limiares de aquecimento global

A Figura 2.5 mostra o padrão espacial da produtividade potencial (PPa) e atingível (PAa) acumulada para o CP (1995–2014) e para os quatro limiares de aquecimento global,

assim como as mudanças entre limiares de aquecimento global e CP. Essas figuras integram a média entre o SSP2-4.5 e SSP5-8.5, em vez de analisar os SSPs separadamente.

No CP, grande parte da América do Sul apresenta valores de PPa $> 600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, sendo que os maiores valores são observados nas regiões nordeste ($700\text{--}800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), sudeste ($600\text{--}700 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e o extremo norte do Brasil ($700\text{--}750 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), Paraguai ($600\text{--}700 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), parte da Bolívia, Peru, Colômbia, Venezuela e Guiana ($650\text{--}750 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), Equador, Suriname e Guiana Francesa ($700 - 750 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) (Figura 2.5A). Somente na porção que se estende do norte do Chile à Patagônia, englobando o centro-sul da Argentina, sul do Brasil e Uruguai apresentam valores de PPa $< 550 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Praticamente não há alteração da PPa com a progressão dos limiares de aquecimento global de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a $4 \text{ }^\circ\text{C}$ para grande parte da América do Sul. Somente em uma faixa que se estende do Chile ao Uruguai e em áreas pontuais do Sul e Sudeste do Brasil, observam-se aumentos entre $+25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (limiar de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$) a $+75 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (limiar de $4 \text{ }^\circ\text{C}$) (Figuras 2.5F–2.5I). Esse comportamento está associado aos aumentos menos intensos de Tasmin e Tas em relação à média global ($+0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ limiar de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+3 \text{ }^\circ\text{C}$ limiar de $4 \text{ }^\circ\text{C}$), combinadas à menor redução da Rsds ($-0,1$ a $-0,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Por outro lado, redução da PPa (entre -25 e $-75 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) é observado em áreas pontuais no Brasil localizadas no oeste do Centro-Oeste, norte do Nordeste e centro-norte do Norte, norte do Paraguai, leste da Bolívia, norte da Colômbia, centro-norte da Venezuela, Guiana e Suriname, principalmente nos limiares de aquecimento global de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figuras 2.5H e 2.5I). Essas reduções estão associadas a maiores aumentos de Tasmin e Tas ($+2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ nos limiares de aquecimento de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $4 \text{ }^\circ\text{C}$), acompanhados por aumentos na Rsds ($+0,2$ a $+0,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, Figura 2.3H4).

Com relação ao PAa, valores economicamente viáveis de PAa no CP (Figura 2.5J) ($>250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, que equivalem a $\sim 35,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), são observados em grande parte da América do Sul, exceto na faixa costeira que se estende do Peru à Argentina e no nordeste do Brasil (Figura 2.5J a 2.5N).

Quando se analisam os padrões de PAa, vale destacar uma mudança distinta nos valores entre os limiares de aquecimento global e CP comparada a PPa. Ou seja, com a progressão dos limiares de aquecimento de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ para $4 \text{ }^\circ\text{C}$, observa-se redução progressiva nos valores de PAa (entre -25 a $-150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) em grande parte da América do Sul, principalmente na porção centro-norte do continente. Os menores valores de PAa ($<250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) são observados sobre o Nordeste do Brasil, Chile, maior parte da Argentina, noroeste do Paraguai, centro-sul da Bolívia, e costa do Peru (Figura 2.5). Do contrário, há um ligeiro aumento da PAa (até 50 m^3

ha⁻¹) em locais pontuais do sul do Brasil ao nordeste da Argentina, sul do Chile, noroeste do Paraguai e em uma faixa da Bolívia à Colômbia (até 125 m³ ha⁻¹), principalmente no limiar de aquecimento de 4 °C (Figura 2.5R).

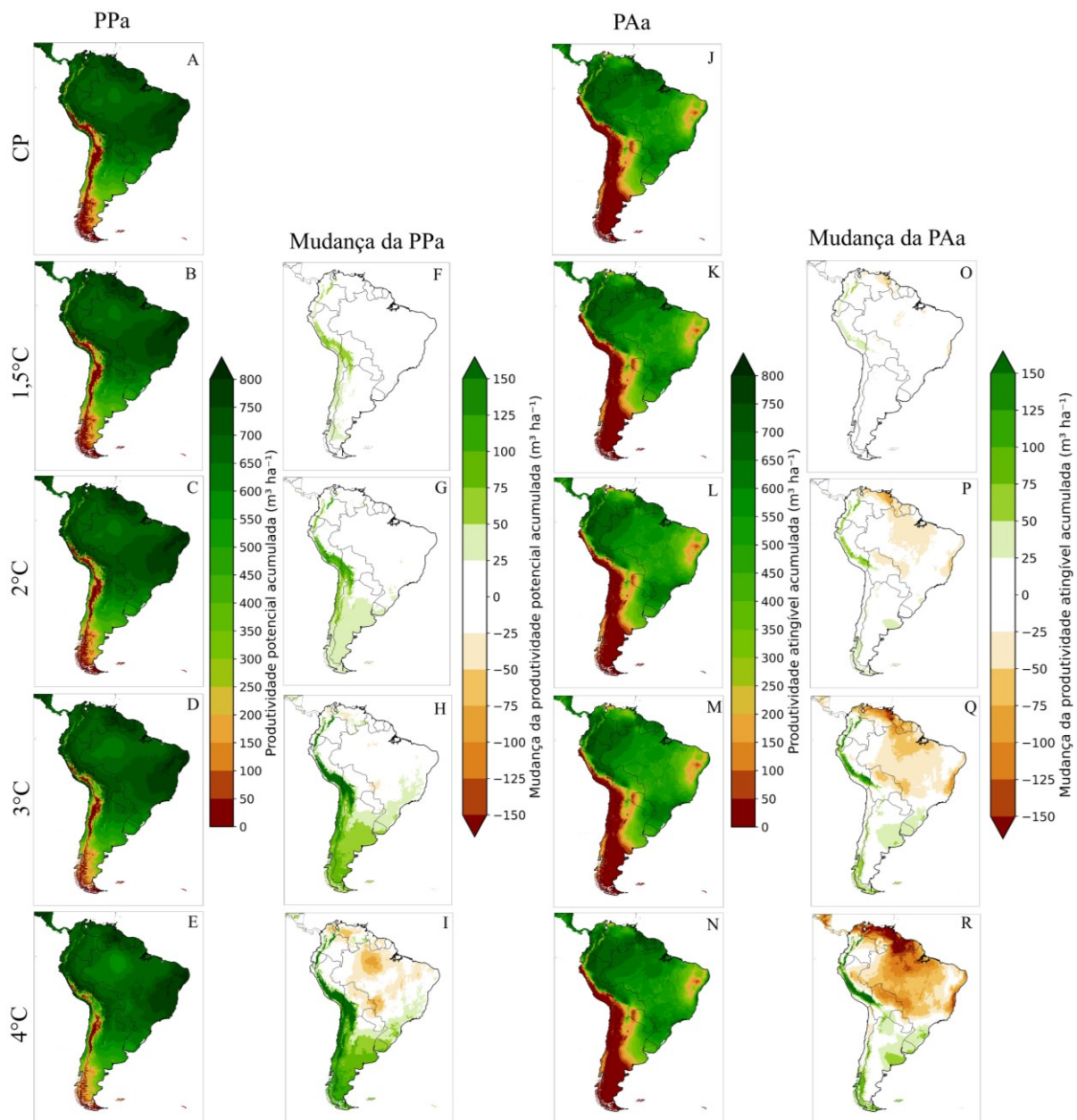


Figura 2.5 - Padrão espacial médio da produtividade potencial acumulada (PPa, m³ ha⁻¹) (painéis A–E) e da produtividade atingível acumulada (PAa, m³ ha⁻¹) (painéis J–N) para limiares de aquecimento global de 1,5 °C (painéis B e K), 2 °C (painéis C e L), 3 °C (painéis D e M) e 4 °C (painéis E e N). Os painéis F–I e O–R mostram o padrão espacial médio da mudança da PPa e da PAa, respectivamente, para cada limiar em relação ao período de controle (CP, 1995–2014). Todos os valores foram obtidos pelo MZA-FAO para cada limiar de aquecimento,

modelo climático do NEX-GDDP-CMIP6 e SSP, sendo posteriormente calculado os valores médios dos modelos climáticos e SSPs que atingiram cada limiar de aquecimento.

Reduções menos intensas de PAa são observadas nos limiares de aquecimento de 1,5 °C e 2 °C, variando entre -25 e -75 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ e mais intensas (em área e magnitude) nos limiares de aquecimento de 3 °C e 4 °C, variando entre -25 e -150 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$. As maiores reduções de PAa (<-75 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) ocorrem na costa leste do Nordeste (faixa da Bahia a Sergipe) e em grande faixa que se estende do Sudeste do Brasil ao norte da Venezuela e oeste da Guiana Francesa (Figura 5R). Essa redução concorda com os padrões combinados de intensificação do aquecimento (Figura 2.3) e aumento da DEF (Figura 2.4), caracterizado por: i) maior aumento de Tas ($+1$ a $+1,5$ °C nos limiares de aquecimento de 1,5 °C e 2 °C a $+2,5$ a $+4,5$ °C nos limiares de aquecimento de 3 °C e 4 °C) ii) aumento da Rsds ($>+0,2$ $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), ETc ($>+200$ mm ano^{-1}) e DEF ($+150$ nos limiares de 1,5 °C e 2 °C a $+675$ mm ano^{-1} nos limiares de 3 °C e 4 °C); e 3) redução da P anual (de -25 a -150 mm ano^{-1}).

A Figura 2.6 mostra a distribuição espacial da quebra de produtividade (QP, em %) sob diferentes limiares de aquecimento (1,5 a 4 °C). De modo geral, com a progressão dos limiares de aquecimento de 1,5 °C para 4°C, a área com $\text{QP}>40\%$ é ligeiramente intensificada no Brasil (Centro-Oeste, Nordeste e nordeste da região Norte), maior parte da Argentina (exceto o nordeste), Chile, centro-norte do Paraguai, maior parte da Bolívia (exceto o norte), uma faixa do sul da costa oeste do Peru ao sudoeste do Equador, extremo norte da Colômbia, maior parte da Venezuela (exceto o sul), Guiana, Suriname e Guiana Francesa (no limiar de aquecimento de 4 °C). Os maiores valores de QP ($>80\%$) são observados em uma faixa contínua que se estende do sul da Argentina ao leste do Peru, englobando o noroeste do Paraguai e sudoeste da Bolívia, Nordeste do Brasil e porção norte da Venezuela. Por outro lado, valores $<20\%$ são observados na região Sul e extremo oeste da região Norte do Brasil, além do Uruguai, sul do Paraguai, leste do Peru e Equador (exceto o sul e sudoeste), Colômbia (exceto o extremo norte) e extremo sul da Venezuela. A intensificação da QP, em área e magnitude, está associada ao aumento da DEF, principalmente nos limiares de aquecimento de 3 °C e 4 °C (Figura 2.4).

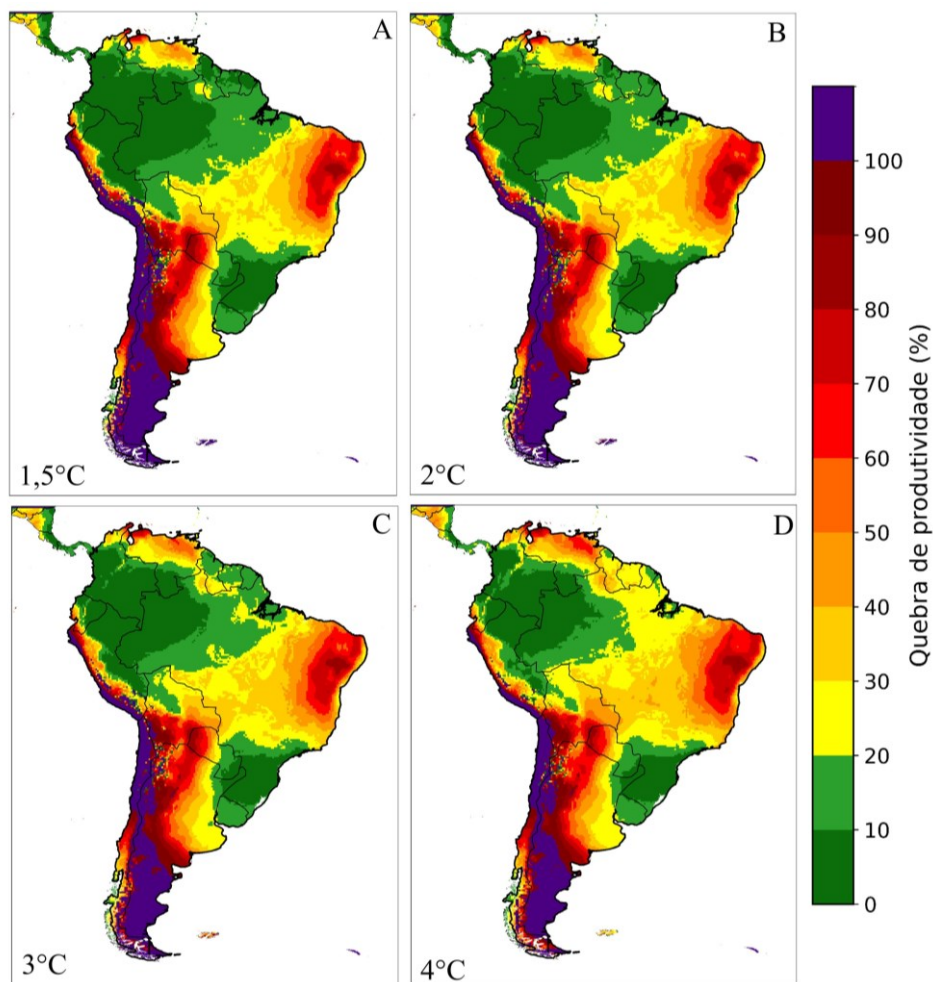


Figura 2.6 - Padrão espacial médio da quebra de produtividade (%) para o eucalipto no período em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C (painel A), 2 °C (painel B), 3 °C (painel C) e 4 °C (painel D) são atingidos. Todos os valores foram obtidos pelo MZA-FAO para cada limiar de aquecimento, modelo climático do NEX-GDDP-CMIP6 e SSP, sendo posteriormente calculados os valores médios dos modelos climáticos e SSPs que atingiram cada limiar de aquecimento.

Esses resultados mostram que, na ausência de esforços para limitar o aquecimento global aos limiares de aquecimento de 1,5 °C ou 2 °C, haverá expansão espacial e intensificação das áreas com QP > 40% em grande parte da América do Sul. Observa-se progressão consistente das áreas à medida que o aquecimento se intensifica. No limiar de aquecimento de 1,5°C, a ocorrência de QP > 40% é mais restrita, concentrando-se principalmente na Chile (60,1%) Bolívia (41,5%) e Venezuela (16,6%) (Apêndice 2.2). Em contraste, no limiar de aquecimento de 4°C, observa-se expansão dessas áreas, com aumentos mais pronunciados no Chile (76,2%) Bolívia (57,6%), Venezuela (72,6%) e Brasil (22,98%).

2.4. DISCUSSÃO

Analisando conjuntamente os padrões espaciais da PPa, PAa e QP, bem como as mudanças em relação ao CP (Figuras 2.5 e 2.6), é possível identificar três resultados: i) padrões similares entre os limiares de aquecimento de 1,5 °C e 2 °C e CP; ii) maior magnitude das diferenças nos limiares de aquecimento de 3 °C e 4 °C; iii) maiores reduções da PPa e PAa em áreas localizadas na porção centro-norte do Brasil (exceto no Sul e extremo sul do Sudeste), centro-leste da Bolívia, centro-norte do Paraguai, leste do Peru, norte da Colômbia, maior parte da Venezuela, Suriname, Guiana e Guiana Francesa.

A semelhança dos padrões entre os limiares de aquecimento de 1,5 °C e 2 °C com o CP é preocupante, pois evidencia que já se observam impactos do aumento da temperatura média global próximo (ou mesmo superior) ao limiar de 1,5 °C, com tendência de rápido avanço em direção a 2 °C. Os achados do IPCC (2021) e de Fagundes *et al.* (2025a) indicam que o limiar de aquecimento de 2 °C deverá ser atingido em ~ 2041, considerando a média dos 30 modelos climáticos do CMIP6, com variações intermodelos (2023–2052) no SSP5-8.5 (Apêndice 2.3). Ou seja, os aumentos de +1 °C e +1,5 °C em relação ao CP já estão em curso, com padrões de redução da PAa alinhados aos padrões espaciais de aumento da temperatura do ar e redução da precipitação, umidade relativa e radiação solar global (Figura 2.3).

Regiões da América do Sul, como Brasil, Paraguai, Bolívia, Colômbia e Venezuela, já foram identificadas como *hotspots* de mudanças climáticas persistentes (Florêncio *et al.*, 2022; Torres *et al.*, 2021; Fagundes *et al.*, 2025a). Essas áreas concentram as maiores reduções da produtividade (PPa e PAa), e apresentam as maiores alterações nas variáveis climáticas (Tasmin, Tas, P anual, Hurs e Rsds) e na disponibilidade hídrica (ETr e DEF) (Figuras 2.3 e 2.4). Ou seja, os impactos na produtividade são amplificados por aumentos regionais de temperatura superiores à média global, variando entre +0,5 °C e +3 °C ao longo dos limiares de aquecimento (Fagundes *et al.*, 2025a), além de mudanças espacialmente heterogêneas (aumento e redução) nos padrões de P anual (Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022; Fagundes *et al.*, 2025a), Hurs (Douveille; Willett, 2023) e Rsds (Xavier *et al.*, 2026).

É importante destacar que, embora a PPa ultrapasse ~550 m³ ha⁻¹ em grande parte da América do Sul, esses valores expressam o potencial produtivo em condições ideais, sem incorporar as restrições impostas pela disponibilidade de água no solo. Assim, ainda que haja potencial para a produção, a PAa será limitada pelo aumento da DEF (> 300 mm ano⁻¹), redução da P anual (até -150 mm ano⁻¹) e Hurs (até 7%), especialmente nos limiares de aquecimento de 3 °C e 4 °C.

O estresse hídrico desencadeia uma cascata de estresses fisiológicos, iniciada pelo fechamento estomático, que aumenta a relação fotorrespiração/fotossíntese e os custos de manutenção celular, além de reduzir a transpiração, eficiência fotossintética, e alterar a síntese da parede celular e das proteínas (Resquim *et al.*, 2020; Abreu *et al.*, 2022; Florêncio *et al.*, 2022). Em condições de estresse hídrico severo e prolongado ($DEF \geq 330 \text{ mm ano}^{-1}$; Fagundes *et al.*, 2025a), são esperadas limitações hidráulicas decorrentes de embolia no xilema, provocando o colapso do sistema vascular (Yang *et al.*, 2023). Consequentemente, as limitações fotossintéticas e hidráulicas reduzem a assimilação líquida de carbono e modificam os padrões de alocação de biomassa, culminando em menor crescimento e produtividade (Nievola *et al.*, 2017; Fagundes *et al.*, 2025b).

Essas respostas justificam as reduções mais pronunciadas de PAa (entre -25 a $-150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e maiores QP ($>40\%$) observadas em grande parte do Brasil (desde o Centro-Oeste ao nordeste do Norte e na faixa litorânea do Nordeste), uma pequena porção ao leste do Paraguai, centro-norte do Chile, centro-leste da Bolívia, extremo norte da Colômbia, maior parte da Venezuela, Suriname, Guiana e Guiana Francesa nos limiares de aquecimento de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Esses achados são consistentes aos reportados por Xavier *et al.* (2026), que projetam reduções da PAa entre $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (SSP3-7.0) e $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (SSP5-8.5) no Brasil até o final do século XXI com modelos climáticos do CMIP6; e Baesso *et al.* (2010), entre $\sim -35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ a $\sim -84 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (entre ~ -5 a $-12 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em partes do Nordeste do Brasil, com base em modelos climáticos do CMIP2, atualmente considerados defasados.

Os aumentos da Tasmin, Tas e Rsds também desencadeiam uma série de reações que produzem um efeito cascata capaz de comprometer a integridade molecular e o desempenho fisiológico. Nos locais com maior aumento (de $+2,5^\circ\text{C}$ no limiar de aquecimento de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $+4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ no limiar de aquecimento de $4 \text{ }^\circ\text{C}$), a exposição gradual ou abrupta a temperaturas elevadas compromete a formação de estruturas moleculares (proteínas e DNA) e supramoleculares (membranas celulares e cromossomos), desequilibra o balanço de carbono das plantas (Ruelland; Zachowski, 2010; Florêncio *et al.*, 2022; Fagundes *et al.*, 2021; 2025b) e eleva os custos de manutenção (Ruelland; Zachowski, 2010; Nievola *et al.*, 2017; Xavier *et al.*, 2026). A produção de madeira de eucalipto diminui cerca de 10% a cada aumento de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (Binkley *et al.*, 2017), visto que temperaturas supra ótimas ($Tas > \sim 38 \text{ }^\circ\text{C}$) (Florêncio *et al.*, 2022) reduzem a eficiência fotossintética ao favorecer a atividade da oxigenase da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase-oxigenase (RuBisCo), devido à maior solubilidade do O_2 em relação ao CO_2 (Ruelland; Zachowski, 2010; Florêncio *et al.*, 2022; Fagundes *et al.*, 2025b). Como

consequência, há redução da assimilação líquida, menor alocação de carbono para o crescimento (Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2022) e redução do incremento volumétrico, refletindo na PAa do eucalipto (Figura 2.5).

Esse padrão explica a elevada QP (>60%) observada no Nordeste do Brasil, Argentina, Chile, noroeste do Paraguai, porção centro-sul da Bolívia, faixa costeira do Peru e norte da Venezuela, onde o plantio de eucalipto pode se tornar economicamente inviável, coincidindo com os valores de PAa entre 100 a 150 m³ ha⁻¹ ($\approx 18 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), considerado baixo para fins industriais (Elli *et al.*, 2020b; Xavier *et al.*, 2026). Além disso, no Brasil e Venezuela, a progressão dos limiares de aquecimento amplia as áreas economicamente inviáveis (PAa $\leq 250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), que aumentam de 1,8% no limiar de aquecimento de 1,5 °C para 5,2% no limiar de aquecimento de 4 °C (Apêndice 2.4).

Somente em locais pontuais no sul do Brasil, Uruguai, nordeste da Argentina, noroeste do Paraguai e sul do Chile (entre 25 a 50 m³ ha⁻¹), e uma pequena faixa que se estende da Bolívia a Colômbia (até 125 m³ ha⁻¹) apresentam aumento da PAa, principalmente nos limiares de aquecimento de 2 a 4°C. Tais respostas estão associadas aos aumentos menos intensos da Tasmin e Tas (entre 0,5 °C limiar de 1,5 °C e 3 °C limiar de 4 °C), redução da Rsds (até -0,2 MJ m⁻² dia⁻¹) e da DEF (< 300 mm ano⁻¹), combinados a aumentos da P anual (até 150 mm ano⁻¹) (exceto o centro-norte do Chile) (Figuras 2.3 e 2.4). Resultados semelhantes foram reportados por Elli *et al.* (2020a), que projetaram aumentos de PAa do eucalipto entre 18 e 65 m³ ha⁻¹ ($\approx 2,7$ e $9,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) ao longo do século XXI em duas localidades no sul do Brasil; e por Carrasco *et al.* (2022) com aumentos entre 39 e 137 m³ ha⁻¹ para o *Eucalyptus globulus* em três locais no Chile, usando modelos e cenários climáticos do CMIP5. Estes estudos foram realizados utilizando modelos de produtividade baseados em processos, como o APSIM (Elli *et al.*, 2020a) e o 3-PG (Carrasco *et al.*, 2022), que exigem parâmetros fisiológicos altamente específicos (e detalhados) para cada espécie (Martins *et al.*, 2014; Freitas *et al.*, 2020; Xavier *et al.*, 2026). Comparações realizadas por Elli *et al.* (2019a) entre APSIM, 3-PG e MZA-FAO destacaram desempenho semelhante na estimativa da PPa e da PAa, confirmando a robustez do MZA-FAO, com coeficientes de determinação entre 0,75 e 0,97 e coeficiente de eficiência do modelo entre 0,55 e 0,81.

Neste estudo usamos o MZA-FAO, que é um modelo matemático-fisiológico, com arquitetura mais enxuta e menor dependência de parâmetros fisiológicos específicos, muitas vezes indisponíveis na literatura (Martins *et al.*, 2014; Freitas *et al.*, 2020). Além disso, o MZA-FAO possui código aberto e estrutura computacional que permite simular/projetar a

produtividade de forma integrada em múltiplas escalas espaço-temporais (Xavier *et al.*, 2026). Diferentemente de modelos como o APSIM e 3-PG, que requerem parametrização detalhada e execução individual para cada ponto de grade, o MZA-FAO possibilita aplicações espaciais de macroescala com maior eficiência computacional. Essas características foram fundamentais para viabilizar as análises climáticas em ~28.500 pontos de grade da América do Sul, e a implementação dos limiares de aquecimento.

Entretanto, os valores de produtividade estimados pelo modelo MZA-FAO podem apresentar tendência à superestimação. Os valores de PAa projetados neste estudo para maior parte da América do Sul, entre 250 a 600 m³ ha⁻¹ que equivalem a 35,7 e 92,8 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, superam aqueles tipicamente observados em plantios comerciais no Brasil. No Rio Grande do Sul, por exemplo, produtividades médias entre 30 - 36 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ são reportadas, na Bahia os valores máximos podem atingir ~ 50 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em condições edafoclimáticas ideais (ABAF, 2022; IBÁ, 2023), e em 22 localidades em Minas Gerais foram reportadas produtividade média de 51,6 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (Freitas, 2018).

Esse comportamento não é exclusivo do modelo MZA-FAO, sendo também reportado em modelos de processos amplamente utilizados, como o 3-PG e o APSIM. Elli *et al.* (2019a) e Freitas *et al.* (2020) evidenciaram discrepâncias entre valores estimados e observados, indicando limitações inerentes à representação dos processos ecofisiológicos e as incertezas associadas às variáveis climáticas de entrada, especialmente P, Hurs e Rsds. Dessa forma, embora os padrões espaciais e as tendências de mudança sejam robustos e consistentes entre cenários, os valores absolutos de PPa e PAa devem ser interpretados com cautela, não sendo recomendados para estimativas diretas de produtividade em campo.

Adicionalmente, alguns estudos projetam aumentos de até 40% na ocorrência de pragas e doenças (Santos *et al.*, 2020), o que pode reduzir ainda mais a PAa do eucalipto e impor um ônus ainda maior no manejo das plantações (Xavier *et al.*, 2026). Os principais agentes de preocupação incluem as manchas foliares causadas por *Cryptosporiopsis eucalypti* Sankaran & B. Sutton, *Cylindrocladium* spp., *Quambalaria eucalypti* (M.J. Wingf., Crous & W.J. Swart) J.A. Simpson e *Necator salmonicolor* (Berk. & Broome) K.H. Larss. (Alfenas *et al.*, 2009) e as pragas vespa-da-galha (*Leptocybe invasa* Fisher & LaSalle) (Alfenas *et al.*, 2009) e a mariposa-da-goma-de-outono (*Mnesampela privata* (Guenée) (Rapley *et al.*, 2004), ambas associadas à redução do volume do tronco.

Por essas razões, limitar o aquecimento global a valores inferiores a 2 °C é crucial para reduzir perdas na produtividade do eucalipto e evitar impactos irreversíveis no setor florestal.

A ultrapassagem desse limiar pode comprometer a segurança da cadeia produtiva do eucalipto, ao intensificar a variabilidade espacial interanual da produtividade, reduzir a previsibilidade dos incrementos volumétricos e a qualidade da madeira ao longo das rotações, elevar custos operacionais (Fagundes *et al.*, 2025b) e ampliar o risco de perdas produtivas em regiões fortemente dependentes da silvicultura. Assim, os achados deste estudo reforçam a urgência de políticas climáticas mais ambiciosas e eficazes, voltadas à redução consistente das emissões de gases de efeito estufa e à contenção do avanço do aquecimento global abaixo de 2°C, assim como a adoção de medidas de adaptação.

Para subsidiar tais medidas frente aos impactos dos limiares de aquecimento sobre a produtividade do eucalipto na América do Sul, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica para identificar as medidas de adaptação mais eficazes propostas na literatura até o momento (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Principais medidas de adaptação identificadas na literatura para mitigar os impactos dos aumentos dos limiares de aquecimento global nas plantações de eucalipto

Categoria	Medida de adaptação	Finalidade técnica	Referências
Adaptação genética	Seleção de genótipos tolerantes ao estresse hídrico e térmico	Reduzir os impactos do estresse hídrico e térmico por meio da seleção de genótipos mais tolerantes, como <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> , <i>E. tereticornis</i> x <i>E. Brassiana</i> , <i>E. tereticornis</i> , <i>E. camaldulensis</i> , <i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i> , <i>E. brassiana</i> , e <i>C. maculata</i> .	Queiroz <i>et al.</i> (2020); Aparecido <i>et al.</i> (2025); Fagundes <i>et al.</i> (2025a)
	Seleção de genótipos resistentes a doenças e pragas (Tabela 2.4)	Mitigar o estresse fitossanitário por meio da seleção de materiais genéticos com maior resistência a patógenos e insetos-praga, como <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> e <i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	Reis <i>et al.</i> (2014)
	Melhoramento de genótipos para tolerância a estresses bióticos e abióticos	Desenvolver cultivares e clones de alto desempenho e maior tolerância a estresses bióticos e abióticos, como GPC 23 (<i>E. grandis</i>), AEC 0144 (<i>E. urophylla</i>), BRS 364 (<i>E. cloeziana</i>), BRS QUARENTA (<i>E. urophylla</i>), BRSCI 9601 Exponent (<i>E. badjensis</i>).	Xavier <i>et al.</i> (2026)
	Eucalipto geneticamente modificado	Investir em pesquisas para aumentar a resistência a pragas, tolerância a herbicidas e garantir a produtividade, como no caso do eucalipto GM da FuturaGene (aprovado pela CTNBio), com 15–25% de aumento da produtividade.	Avisar <i>et al.</i> (2024); May <i>et al.</i> (2024); Xavier <i>et al.</i> (2026)
Práticas silviculturais	Ajustes de espaçamento e densidade de plantio	Reduzir a competição por água e nutrientes, otimizando o uso de recursos sob condições de maior restrição hídrica. Recomenda-se espaçamento de ~3x3 a 4 m e menor densidade (<1.000 árvores ha ⁻¹).	Florêncio <i>et al.</i> (2022); Martins <i>et al.</i> (2022); Xavier <i>et al.</i> (2026)

continua... 89

...continuação

	Operações de desbaste e poda mais frequentes	Regular a densidade do povoamento, otimizar o uso da água e aumentar a produtividade.	Martins <i>et al.</i> (2022); Xavier <i>et al.</i> (2026)
	Uso de cobertura morta (mulching)	Conservar o conteúdo de água no solo em condições de deficiência hídrica, preservar a matéria orgânica e melhorar a capacidade de retenção de água do solo.	Bose <i>et al.</i> (2025)
	Sistemas agroflorestais e diversificação produtiva	Reduzir a vulnerabilidade a eventos climáticos extremos, aumentar a resistência ecológica às pragas e doenças por meio da biodiversidade funcional e da heterogeneidade estrutural, e preservar a capacidade produtiva do sítio ao longo das rotações.	Mota <i>et al.</i> (2022); Fagundes <i>et al.</i> (2025a)
Ferramentas de suporte à decisão	Sistemas de alerta precoce e previsão climática sazonal	Apoiar o manejo adaptativo por meio da integração de sistemas de alerta precoce, modelagem climática sazonal e análise de risco e planejamento operacional, visando aumentar a resiliência produtiva e minimizar perdas associadas a eventos extremos.	Aparecido <i>et al.</i> (2025)
Manejo de Solo e Água	Subsolagem profunda	Aumentar a infiltração e o armazenamento de água no solo e favorecer o aprofundamento radicular (até ~70 cm), elevando a eficiência do uso da água.	Reichert <i>et al.</i> (2021); Xavier <i>et al.</i> (2026)
	Aplicação de gesso agrícola (CaSO ₄ .2H ₂ O)	Melhora a estrutura do solo, reduzir o alumínio trocável e estimular o enraizamento profundo.	Reichert <i>et al.</i> (2023); Xavier <i>et al.</i> (2026)
Ajustes no manejo de viveiros	Melhorar a tolerância e o estabelecimento das mudas sob estresse térmico e hídrico	Aumentar a sobrevivência e o vigor inicial das mudas por meio da aclimatação, rusticidade, sombreamento, aumento da frequência de irrigação e adequação do calendário de plantio.	Florêncio <i>et al.</i> (2022); Martins <i>et al.</i> (2023); Fagundes <i>et al.</i> (2025); Xavier <i>et al.</i> (2026)

Diante das projeções de aumento na ocorrência de pragas e doenças, será fundamental integrar a seleção de genótipos resistentes a agentes bióticos que, ao mesmo tempo possuam tolerância aos estresses térmico e hídrico (Tabela 2.4), aliada ao fortalecimento de sistemas de alerta e programas de manejo integrado com ênfase no controle biológico. Nesse contexto, espécies puras mais suscetíveis deverão ser gradualmente substituídas por híbridos mais tolerantes, como *E. urophylla* × *E. camaldulensis* e *C. torelliana* × *C. citriodora* (Reis *et al.*, 2014) (Tabelas 2.3 e 2.4). Embora diversos outros agentes bióticos estejam associados aos plantios de eucalipto (Tabela 2.4), alguns patógenos e insetos-praga requerem atenção especial devido à severidade dos surtos e potencial ataque/infestação.

Entre as doenças, destacam-se as manchas foliares causadas por *C. eucalypti*, cujo manejo inclui o controle biológico com actinomicetos e bactérias saprófitas Gram-positivas (Himaman *et al.*, 2016). Para *Cylindrocladium* spp., recomenda-se a integração de agentes biológicos, como *Trichoderma* spp., com fungicidas sistêmicos do grupo dos triazóis (epoxiconazol e tebuconazol) ou mistura triazol + estrobilurina (epoxiconazol + piraclostrobina) (Ferreira *et al.*, 2006; Maciel *et al.*, 2012). No caso de *Q. eucalypti*, recomenda-se a aplicação de fungicidas sistêmicos dos mesmos grupos químicos (Ferreira *et al.*, 2008). Para *N. salmonicolor*, agente causal da enfermidade rosada, recomenda-se a combinação do controle biológico com *Trichoderma* spp., aplicação de fungicidas cúpricos ou pasta à base de enxofre e realização de podas durante o período seco, reduzindo a disseminação do patógeno (Pradhanang, 1994; Castro-Toro; Rivillas-Osorio, 2012).

Entre as pragas, destaca-se *L. invasa*, cujo controle pode ser realizado por meio de parasitoides como *Aprostocetus* sp., *Megastigmus* sp. e *Quadrastichus mendeli* (Garlet *et al.*, 2013; Yousuf *et al.*, 2020). Para *M. privata*, o manejo inclui parasitoides de ovos do gênero *Telenomus* sp., parasitoides larvais das famílias Ichneumonidae, Braconidae e Tachinidae, além de predadores naturais, como aranhas e percevejos predadores (Rapley *et al.*, 2004).

Tabela 2.4 - Principais espécies e híbridos de eucalipto utilizados nos plantios na América do Sul, com classificação quanto à tolerância à deficiência hídrica e principais doenças e pragas reportadas.

Genótipos (puro e híbrido)	Tolerância a deficiência hídrica*	Doenças e pragas	Referências
Espécies puras			
<i>E. urophylla</i>	Moderada	Manchas foliares causada por: <i>Cylindrocladium</i> spp.; <i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.; <i>Cryptosporiopsis eucalypti</i> Sankaran & B. Sutton; e <i>Quambalaria eucalypti</i> (M.J. Wingf., Crous & W.J. Swart) J.A. Simpson	Alfenas <i>et al.</i> (2009); Souza <i>et al.</i> (2021)
		Gorgulho-do-eucalipto (<i>Gonipterus platensis</i> Marelli e <i>Gonipterus pulverulentus</i> Lea)	
<i>E. tereticornis</i>	Alta	Mancha foliar causada por: <i>Cylindrocladium</i> spp.;	Alfenas <i>et al.</i> (2009); Lemes <i>et al.</i> (2021)
		Vespa-da-galha (<i>Leptocybe invasa</i> Fisher & LaSalle e <i>Ophelimus maskelli</i> (Ashmead));	
		Percevejo-bronzeado (<i>Thaumastocoris peregrinus</i> Carpintero & Dellapé)	
<i>E. camaldulensis</i>	Alta	Manchas foliares causada por: <i>Cylindrocladium</i> spp.; e <i>Cryptosporiopsis eucalypti</i> Sankaran & B. Sutton;	Östrand <i>et al.</i> (2008); Alfenas <i>et al.</i> (2009); Lemes <i>et al.</i> (2021); Souza <i>et al.</i> (2021)
		Vespa-da-galha (<i>Leptocybe invasa</i> Fisher & LaSalle e <i>Ophelimus maskelli</i> (Ashmead));	
		Percevejo-bronzeado (<i>Thaumastocoris peregrinus</i> Carpintero & Dellapé);	
		Mariposa-da-goma-de-outono (<i>Mnesampela privata</i> (Guenée));	
		Gorgulho-do-eucalipto (<i>Gonipterus platensis</i> Marelli e <i>Gonipterus pulverulentus</i> Lea)	
<i>C. citriodora</i>	Moderada	Mancha foliar causada por: <i>Quambalaria eucalypti</i> (M.J. Wingf., Crous & W.J. Swart) J.A. Simpson;	Alfenas <i>et al.</i> (2009);
		Vespa-da-galha (<i>Leptocybe invasa</i> Fisher & LaSalle)	
<i>E. cloeziana</i>	Baixa	Ferrugem (<i>Puccinia psidii</i> Winter); e	Alfenas <i>et al.</i> (2009)
		Mancha foliar causada por: <i>Cylindrocladium</i> spp.	
<i>E. robusta</i>	Moderada	Mancha foliar causada por: <i>Cryptosporiopsis eucalypti</i> Sankaran & B. Sutton	Alfenas <i>et al.</i> (2009)
<i>E. globulus</i>	Moderada	Ferrugem (<i>Puccinia psidii</i> Winter);	Rapley <i>et al.</i> (2004); Östrand <i>et al.</i> (2008); Alfenas <i>et al.</i> (2009); Lemes <i>et al.</i> (2021);
		Mancha foliar causada por: <i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.; <i>Cryptosporiopsis eucalypti</i> Sankaran & B. Sutton e	

...continuação

		<p><i>Quambalaria eucalypti</i> (M.J. Wingf., Crous & W.J. Swart) J.A. Simpson;</p> <p>Vespa-da-galha (<i>Leptocybe invasa</i> Fisher & LaSalle e <i>Ophelimus maskelli</i> (Ashmead));</p> <p>Mariposa-da-goma-de-outono (<i>Mnesampela privata</i> (Guenée));</p> <p>Gorgulho-do-eucalipto (<i>Gonipterus platensis</i> Marelli e <i>Gonipterus pulverulentus</i> Lea)</p>	Souza <i>et al.</i> (2021)
<i>E. pellita</i>	Moderada	Mancha foliar causada por: <i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.	Salla <i>et al.</i> (2016)
<i>E. dunnii</i>	Baixa	<p>Ferrugem (<i>Puccinia psidii</i> Winter);</p> <p>Mancha foliar causada por: <i>Cylindrocladium</i> spp.;</p> <p><i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.;</p> <p>Percevejo-bronzeado (<i>Thaumastocoris peregrinus</i> Carpintero & Dellapé);</p> <p>Mariposa-da-goma-de-outono (<i>Mnesampela privata</i> (Guenée))</p>	Steinbauer (2002); Alfenas <i>et al.</i> (2009)
<i>E. benthamii</i>	Baixa	<p>Ferrugem (<i>Puccinia psidii</i> Winter);</p> <p>Mancha foliar causada por: <i>Cylindrocladium</i> spp.; <i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.;</p> <p>Percevejo-bronzeado (<i>Thaumastocoris peregrinus</i> Carpintero & Dellapé)</p>	Alfenas <i>et al.</i> (2009)
<i>E. grandis</i>	Moderada	<p>Ferrugem (<i>Puccinia psidii</i> Winter);</p> <p>Mancha foliar causada por: <i>Cylindrocladium</i> spp.;</p> <p><i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.;</p> <p><i>Cryptosporiopsis eucalypti</i> Sankaran & B. Sutton; e</p> <p><i>Quambalaria eucalypti</i> (M.J. Wingf., Crous & W.J. Swart) J.A. Simpson;</p> <p>Enfermidade rosada (<i>Necator salmonicolor</i> (Berk. & Broome) K.H. Larss.);</p> <p>Cancro do eucalipto (<i>Chrysoporthe cubensis</i> (Bruner) Gryzenhout & M.J. Wingf.);</p> <p>Vespa-da-galha (<i>Leptocybe invasa</i> Fisher & LaSalle e <i>Ophelimus maskelli</i> (Ashmead));</p> <p>Mariposa-da-goma-de-outono (<i>Mnesampela privata</i> (Guenée));</p> <p>Gorgulho-do-eucalipto (<i>Gonipterus platensis</i> Marelli e <i>Gonipterus pulverulentus</i> Lea)</p>	Old <i>et al.</i> (2003); Östrand <i>et al.</i> (2008); Alfenas <i>et al.</i> (2009); Lemes <i>et al.</i> (2021); Souza <i>et al.</i> (2021)
<i>E. saligna</i>	Baixa	<p>Mancha foliar causada por: <i>Cylindrocladium</i> spp.; <i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.;</p> <p><i>Quambalaria eucalypti</i> (M.J. Wingf., Crous & W.J. Swart) J.A. Simpson;</p> <p>Cancro do eucalipto (<i>Chrysoporthe cubensis</i> (Bruner) Gryzenhout & M.J. Wingf.);</p> <p>Vespa-da-galha (<i>Leptocybe invasa</i> Fisher & LaSalle e <i>Ophelimus maskelli</i> (Ashmead));</p>	Östrand <i>et al.</i> (2008); Alfenas <i>et al.</i> (2009); Lemes <i>et al.</i> (2021); Souza <i>et al.</i> (2021)

...continuação

		Gorgulho-do-eucalipto (<i>Gonipterus platensis</i> Marelli e <i>Gonipterus pulverulentus</i> Lea)	
Híbridos			
<i>E. grandis</i> × <i>E. camaldulensis</i>	Moderada	Enfermidade rosada (<i>Necator salmonicolor</i> (Berk. & Broome) K.H. Larss.); Vespa-da-galha (<i>Leptocybe invasa</i> Fisher & LaSalle e <i>Ophelimus maskelli</i> (Ashmead)); Percevejo-bronzeado (<i>Thaumastocoris peregrinus</i> Carpintero & Dellapé); Mariposa-da-goma-de-outono (<i>Mnesampela privata</i> (Guenée))	Old <i>et al.</i> (2003); Östrand <i>et al.</i> (2008); Alfenas <i>et al.</i> (2009); Lemes <i>et al.</i> (2021)
<i>E. urophylla</i> × <i>E. camaldulensis</i>	Alta	Mancha foliar causada por: <i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.; <i>Cryptosporiopsis eucalypti</i> Sankaran & B. Sutton; e <i>Quambalaria eucalypti</i> (M.J. Wingf., Crous & W.J. Swart) J.A. Simpson	Alfenas <i>et al.</i> (2009)
<i>E. tereticornis</i> × <i>E. brassiana</i>	Alta	-	
<i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	Moderada	Mancha foliar causada por: <i>Cylindrocladium</i> spp.; <i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.; <i>Cryptosporiopsis eucalypti</i> Sankaran & B. Sutton; e <i>Quambalaria eucalypti</i> (M.J. Wingf., Crous & W.J. Swart) J.A. Simpson; Enfermidade rosada (<i>Necator salmonicolor</i> (Berk. & Broome) K.H. Larss.) Vespa-da-galha (<i>Leptocybe invasa</i> Fisher & LaSalle); Percevejo-bronzeado (<i>Thaumastocoris peregrinus</i> Carpintero & Dellapé); Mariposa-da-goma-de-outono (<i>Mnesampela privata</i> (Guenée)); Gorgulho-do-eucalipto (<i>Gonipterus platensis</i> Marelli e <i>Gonipterus pulverulentus</i> Lea)	Old <i>et al.</i> (2003); Östrand <i>et al.</i> (2008); Alfenas <i>et al.</i> (2009); Souza <i>et al.</i> (2021)
<i>E. urophylla</i> × <i>E. globulus</i>	Baixa	Mancha foliar causada por: <i>Teratosphaeria</i> sp. e <i>Mycosphaerella</i> spp.; <i>Cryptosporiopsis eucalypti</i> Sankaran & B. Sutton; e <i>Quambalaria eucalypti</i> (M.J. Wingf., Crous & W.J. Swart) J.A. Simpson	Alfenas <i>et al.</i> (2009)
<i>C. torelliana</i> × <i>C. citriodora</i>	Alta	-	
<i>E. grandis</i> × <i>E. pellita</i>	Moderada	Enfermidade rosada (<i>Necator salmonicolor</i> (Berk. & Broome) K.H. Larss.)	Old <i>et al.</i> (2003)

* Adaptado de Fagundes *et al.* (2025). – Não reportado na literatura.

2.5. CONCLUSÃO

Foram identificados padrões espaciais consistentes de alteração das variáveis climáticas-chave associadas à produtividade do eucalipto na América do Sul sob os quatro limiares de aquecimento global (1,5 °C a 4 °C) em relação ao período de controle (CP, 1995-2014). Foram observados aumentos regionais na temperatura média global (de +1 °C a +4,5 °C), acompanhados por alterações heterogêneas da precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar global e disponibilidade hídrica (ETc, ETr e DEF), resultando em impactos espacialmente diferenciados sobre produtividade do eucalipto.

Reduções na produtividade atingível acumulada (entre -25 e -150 m³ ha⁻¹) e aumentos na quebra de produtividade (>40%) concentram-se nas porções tropicais e centrais da América do Sul, incluindo o Brasil (do Centro-Oeste ao nordeste do Norte e na faixa litorânea do Nordeste), parte do Paraguai, centro-norte do Chile, centro-leste da Bolívia, extremo norte da Colômbia, grande parte da Venezuela, além do Suriname, Guiana e Guiana Francesa. Do contrário, aumentos (entre +25 e +125 m³ ha⁻¹) são observados no sul do Brasil, Uruguai, nordeste da Argentina, noroeste do Paraguai, sul do Chile e uma pequena faixa que se estende da Bolívia à Colômbia, com intensificação progressiva em direção aos limiares de aquecimento de 3 °C e 4 °C.

Limitar o aquecimento global a níveis inferiores a 2 °C é determinante para reduzir perdas produtivas e evitar acentuação das diferenças regionais na produtividade do eucalipto no continente sul americano. Para isso, medidas integradas de adaptação devem ser adotadas, incluindo a seleção de genótipos (espécies puras ou híbridos) mais tolerantes ao estresse térmico e hídrico, ajustes nas práticas de manejo silvicultural, práticas de conservação da água no solo, diversificação produtiva por meio de sistemas agroflorestais e implantação de sistemas de alerta precoce e de manejo integrado de pragas e doenças.

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAF, 2022. Associação Baiana das Empresas de Base Florestal. **Relatório Anual 2022**. Salvador, Brasil.
- ABREU, M. C.; SOARES, A. A. V.; FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B. Transpiration and growth responses by Eucalyptus species to progressive soil drying. **Journal of Forestry Research**, v.33, n.1, p.1-15, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01448-z>.
- ABTEW, W. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida. **Water Resources Bulletin**, v.32, p.465–473, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1996.tb04044.x>.
- ALFENAS, A.C., ZAUZA, E.A.V., MAFIA, R.G., ASSIS, T.F., 2009. *Clonagem e doenças do eucalipto*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 500 p.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, v. 9, p. 300, 1998.
- ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M. N.; RASHID, I. U.; KAMIL, S.; ABID, M. A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M. S.; SÖRENSSON, A. A.; ARIAS, P. A.; ALVES, L. M.; TIPPETT, M. K.; SAEED, S.; HAARSMA, R.; DOBLAS-REYES, F. J.; SAEED, F.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J. A.; EHSAN, M. A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, Á. G.; ALI, M. A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M. B. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v.5, p.155-183, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.
- APARECIDO, L. E. O.; TORSONI, G. B.; LIMA, R. F.; ROLIM, G. S.; MESQUITA, D. Z. Redefining eucalyptus cultivation in South America: adaptive strategies under future climate scenarios. **New Forests**, v.56, p.36, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11056-025-10106-9>.
- AVISAR, D.; MANOELI, A.; DOS SANTOS, A. A.; DA MOTA PORTO, A. C.; DA SILVA ROCHA, C.; ZAUZA, E.; GONZALEZ, E. R.; SOLIMAN, E.; WISNIEWSKI GONSALVES, J. M.; BOMBONATO, L.; GALAN, M. P.; DOMINGUES, M. M.; CANDELARIA, M. C.; MAFIA, R.; GRAÇA, R. N.; AZULAY, S.; LIVNE, S.; DIAS, T. B.; DREZZA, T. R.; SILVA, W. J.; PINHEIRO, A. C. Genetically engineered Eucalyptus expressing pesticidal proteins from *Bacillus thuringiensis* for insect resistance: a risk assessment evaluation perspective. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v.12, p.1322985, 2024. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1322985>.
- BAESSO, R.C.E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M.P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, v.20, p.335-344, 2010. <https://doi.org/10.5902/198050981856>.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P. Modelling site productivity of *Eucalyptus globulus* in response to climatic and site factors. **Functional Plant Biology**, v.24, n.6, p.831-850, 1997.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P.; WHITE, D.; MUMMERY, D. CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. **Forest Ecology and Management**, v.193, n.1-2, p.251-282, 2004.
- BATTISTI, R.; BENDER, F.D.; SENTELHAS, P.C. Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.135,

p.237–247, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2383-y>.

BETTS, R. A.; ALFIERI, L.; BRADSHAW, C.; CÉSAR, J.; FEYEN, L.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GOHAR, L.; KOUTROULIS, A.; LEWIS, K.; MORFOPOULOS, C.; PAPADIMITRIOU, L.; RICHARDSON, K. J.; TSANIS, I.; WYSER, K. Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5 °C and 2 °C global warming with a higher-resolution global climate model. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v.376, p.20160452, 2018. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0452>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>.

BOSE, T.; ROUX, J.; TITSHALL, L.; DOVEY, S. B.; HAMMERBACHER, A. Mulching of post-harvest residues and delayed planting improves fungal biodiversity in South African *Eucalyptus* plantations and enhances plantation productivity. **Applied Soil Ecology**, v.210, p.106091, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106091>.

BUTT, N.; POLLOCK, L. J.; McALPINE, C. A. Eucalypts face increasing climate stress. **Ecology and Evolution**, v.3, n.13, p.5011-5023, 2013. <https://doi.org/10.1002/ece3.873>.

CARRASCO, G.; ALMEIDA, A. C.; FALVEY, M.; OLMEDO, G. F.; TAYLOR, P.; SANTIBAÑEZ, F.; COOPS, N. C. Effects of climate change on forest plantation productivity in Chile. **Global Change Biology**, v.28, p.1–19, 2022. <https://doi.org/10.1111/gcb.16418>.

CASTRO-TORO, A. M.; RIVILLAS-OSORIO, C. A. *Trichoderma* spp.: modos de acción, eficacia y usos en el cultivo de café. Chinchiná, Caldas: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia / Cenicafé, 2012.

COPERNICUS, 2024. *Global Climate Highlights 2024*. Lisboa: Copernicus, 2025. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>. Acesso em: 19 jan. 2026.

CORTÉS, M. E. Floods, wildfires, and other disasters in the context of climate change: prevention from a planetary health perspective. **Medicina**, v.84, n.3, p.548-550, 2024.

DE WIT, C. T. Photosynthesis of leaf canopies. **Agricultural Research Reports**, n. 663, p.1-56, 1965.

DIAS, C. G.; MARTINS, F. B.; MARTINS, M. A. Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. **Science of The Total Environment**, v.907, p.167753, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167753>.

DIAS, C. G.; REBOITA, M. S. Assessment of CMIP6 simulations over Tropical South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.3, p.1282-1295, 2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1282-1295>.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage, Paper 33).

DOURADO-NETO, D.; LIER, Q.de.J.V.; METSELAAR, K. et al. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agricola**, v.67, n.1, p.87-95, 2010.

DOUVILLE, H.; WILLETT, K. M. A drier than expected future, supported by near-surface relative humidity observations. **Science Advances**, v.9, n.30, p.ade6253, 2023. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ade6253>.

DUARTE, E.; RUBILAR, R.; MATUS, F.; GARRIDO-RUIZ, C.; MERINO, C.; SMITH-RAMIREZ, C.; ABURTO, F.; ROJAS, C.; STEHR, A.; DÖRNER, J.; NÁJERA, F.; BARRIENTOS, G.; JOFRÉ, I. Drought and wildfire trends in native forests of south-central Chile in the 21st century. **Fire**, v.7, n.230, p.1-21, 2024. <https://doi.org/10.3390/fire7070230>.

DYE, P.; JACOBS, S.; DREW, D. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve *Eucalyptus* plantation stands in Zululand, South Africa. **Forest Ecology and Management**, v.193, p.197–218, 2004. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2004.01.030>.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; FREITAS, C. H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, v.450, p.117493, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117493>.

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**, v.451, p.117464, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117464>.

ELLI, E.F.; SENTELHAS P.C.; BENDER F.D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.474, p.118365, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118365>.

ELLI, E.F.; SENTELHAS, P.C.; HUTH, N.; CARNEIRO, R.L.; ALVARES, C.A. Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: a process-based modelling approach. **Ecological Indicators**, v.114, p.106325, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106325>.

ESPINOZA, J.C.; JIMENEZ, J. C.; MARENGO, J. A.; SCHONGART, J.; RONCHAIL, J.; LAVADO-CASIMIRO, W.; RIBEIRO, J. V. M. The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. **Scientific Reports**, v.14, n. 8107, p.1-12, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>.

FAGUNDES, F. F. A.; MARTINS, F. B.; AQUILA, G.; SALDANHA, C. W. Forest seedling development of two Brazilian native species under global warming: assessments, adaptation measures, and financial implications. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, p.1-16, 2025b. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaf065>.

FAGUNDES, F. F. A.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R.; MARRAFON, V. H. A. Global warming levels (1.5–4 °C) and water availability for eucalyptus plantations based on high-resolution CMIP6 models. **Earth Systems and Environment**, p.1-18, 2025a. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00916-4>.

FAGUNDES, F.F.A.; REIS, F.Y.S.; MARTINS, F.B. A model for predicting the initial development of two native forest species under current and future climates. **Environmental and Experimental Botany**, v.192, p.104662, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104662>.

FERREIRA, E. M.; ALFENAS, A. C.; MAFFIA, L. A.; MAFIA, R. G. Eficiência de fungicidas sistêmicos para o controle de *Cylindrocladium candelabrum* em eucalipto. **Fitopatologia**

Brasileira, v.31, p.485–491, 2006. <https://doi.org/10.1590/0100-41582006000500006>

FERREIRA, E. M.; ALFENAS, A. C.; MAFFIA, L. A.; MAFIA, R. G.; MOUNTEER, A. H. Effectiveness of systemic fungicides in the control of *Quambalaria eucalypti* and their effects on production of eucalypt mini-cuttings for rooting. **Crop Protection**, v.27, p.161–170, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.05.001>.

FLORÊNCIO, G. W. L.; MARTINS, F. B.; FAGUNDES, F. A. F. Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. **Industrial Crops and Products**, v.188, p.115538, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>.

FREITAS, A. C. V.; AMBRIZZI, T. Recent changes in the annual mean regional Hadley circulation and their impacts on South America. **Advances in Meteorology**, v.2015, p.1-22, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/780205>.

FREITAS, C. H. Adaptação do modelo da zona agroecológica para a estimação do crescimento e produtividade de eucalipto. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-08102018-174547/>. Acesso em: 31 mar. 2026.

FREITAS, C.H.; ELLI, E.F.; SENTELHAS, P.C. On-farm assessment of eucalypt yield gaps—a case study for the producing areas of the state of Minas Gerais, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v.65, n.10, p.1659-1673, 2021.

FREITAS, C.H.; ELLI, E.F.; SENTELHAS, P.C.; CARNEIRO, R.L.; ALVARES, C.A. Adaptation, calibration and evaluation of a simple agrometeorological model for wood Eucalyptus productivity estimation. **European Journal of Forest Research**, v.139, n.5, p.759-776, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01283-7>.

GARLET, J.; COSTA, E. C.; BOSCARDIN, J.; DEPONTI, G.; SHWENGBER, C. R.; MACHADO, L. M. *Leptocybe invasa* em Eucalyptus sp. no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, v.43, p.2175–2177, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013001200009>.

GONZALEZ-BENECKE, C. A.; FERNÁNDEZ, M. P.; ALBAUGH, T. J.; AHUMADA, R.; BOWN, H. E.; GAYOSO, J.; GERDING, V.; MARDONES, O. B.; RODRÍGUEZ, A. R.; RUBILAR, R. General above-stump volume and biomass functions for *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. **Biomass and Bioenergy**, v.155, p.106280, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106280>.

HIMAMAN, W.; THAMCHAIPENET, A.; PATHOM-AREE, W.; DUANGMAL, K. Actinomycetes from Eucalyptus and their biological activities for controlling eucalyptus leaf and shoot blight. **Microbiological Research**, v.188–189, p.42–52, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.04.011>.

HOEGH-GULDBERG, O.; JACOB, D.; BINDI, M.; BROWN, S.; CAMILLONI, I.; DIEDHIU, A.; DJALANTE, R.; EBI, K.; ENGELBRECHT, F.; GUIOT, J.; HIJIOKA, Y.; MEHROTRA, S.; PAYNE, A.; SENEVIRATNE, S. I.; THOMAS, A.; WARREN, R.; ZHOU, G.; ABDUL HALIM, S.; ACHLATIS, M.; ALEXANDER, L. V.; ALLEN, M.; BERRY, P.; BOYER, C.; BYERS, E.; BRILLI, L.; BUCKERIDGE, M.; CHEUNG, W.; CRAIG, M.; ELLIS, N.; EVANS, J.; FISCHER, H.; FRAEDRICH, K.; FUSS, S.; GANASE, A.

GATTUSO, J. P.; GREVE, P.; GUILLÉN BOLAÑOS, T.; HANASAKI, N.; HASEGAWA, T.; HAYES, K.; HIRSCH, A.; JONES, C.; JUNG, T.; KANNINEN, M.; KRINNER, G.; LAWRENCE, D.; LENTON, T.; LEY, D.; LIVERMAN, D.; MAHOWALD, N.; McINNES, K.; MEISSNER, K. J.; MILLAR, R.; MINTENBECK, K.; MITCHELL, D.; MIX, A. C.; NOTZ, D.; NURSE, L.; OKEM, A.; OLSSON, L.; OPPENHEIMER, M.; PAZ, S.; PETERSEN, J.; PETZOLD, J.; PREUSCHMANN, S.; RAHMAN, M. F.; ROGELJ, J.; SCHEUFFELE, H.; SCHLEUSSNER, C.-F.; SCOTT, D.; SÉFÉRIAN, R.; SILLMANN, J.; SINGH, C.; SLADE, R.; STEPHENSON, K.; STEPHENSON, T.; SYLLA, M. B.; TEBBOTH, M.; TSCHAKERT, P.; VAUTARD, R.; WARTENBURGER, R.; WEHNER, M.; WEYER, N. M.; WHYTE, F.; YOHE, G.; ZHANG, X.; ZOUGMORÉ, R. B. Impacts of 1.5 °C global warming on natural and human systems. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Global warming of 1.5 °C**. Geneva: IPCC, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 19 jan. 2026.

HOLZWORTH, D.P.; HUTH, N.I.; DEVOIL, P.G.; ZURCHER, E.J.; HERRMANN, N.I.; MCLEAN, G.; CHENU, K.; van OOSTEROM, E.J.; SNOW, V.; MURPHY, C.; MOORE, A.D.; BROWN, H.; WHISH, J.P.M.; VERRALL, S.; FAINGES, J.; BELL, L.W.; PEAKE, A.S.; POULTON, P.L.; HOCHMAN, Z.; THORBURN, P.J.; GAYDON, D.S.; DALGLIESH, N.P.; RODRIGUEZ, D.; COX, H.; CHAPMAN, S.; DOHERTY, A.; TEIXEIRA, E.; SHARP, J.; CICHOTA, R.; VOGELER, I.; LI, F.Y.; WANG, E.; HAMMER, G.L.; ROBERTSON, M.J.; DIMES, J.P.; WHITBREAD, A.M.; HUNT, J.; REES, H.V.; MCCLELLAND, T.; CARBERRY, P.S.; HARGREAVES, J.N.G.; MACLEOD, N.; MCDONALD, C.; HARSDORF, J.; WEDGWOOD, S.; KEATING, B.A. APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, v.62, p.327-350, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>.

IBÁ, 2025. Indústria brasileira de arvores: **Relatório anual 2025**. São Paulo, Brasil

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

IPCC, 2022. Summary for policymakers. In: PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; POLOCZANSKA, E. S.; MINTENBECK, K.; TIGNOR, M.; ALEGRÍA, A.; CRAIG, M.; LANGSDORF, S.; LÖSCHKE, S.; MÖLLER, V.; OKEM, A. (eds.). Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, p.3-33, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. *CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development*. 1. ed. College Station, Texas: Texas A & M University Press, 1986.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v.95, p.209–228, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1).

LANDSBERG, J. Physiology in forest models: history and the future. *FBMIS*, v.1, p.49–63, 2003.

LEMES, P. G.; NASCIMENTO, D. N.; COSTA, R. F.; MATOS, M. F.; SOARES, I. J. A. *Glycaspis brimblecombei*. In: LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C. (Eds.). *Novo Manual de*

Pragas Florestais Brasileiras. Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, p.824–839, 2021.

LITTLEBOY, M.; SILBURN, D. M.; FREEBAIRN, D. M.; WOODRUFF, D. R.; HAMMER, G. L. *PERFECT: a computer simulation model of productivity, erosion and runoff functions to evaluate conservation techniques*. Queensland Department of Primary Industries Bulletin QB 89005. Indooroopilly, QLD, Australia: Queensland Department of Primary Industries, 1989. 134 p.

MACIEL, C. G.; LAZAROTTO, M.; MEZZOMO, R.; POLETTO, I.; MUNIZ, M. F. B.; LIPPERT, D. B. *Trichoderma* spp. no biocontrole de *Cylindrocladium candelabrum* em mudas de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, v.36, p.833–841, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000500004>.

MARENGO, J. A.; COSTA, M. C.; CUNHA, A. P.; ESPINOZA, J.-C.; JIMENEZ, J. C.; LIBONATI, R.; MIRANDA, V.; TRIGO, I. F.; SIERRA, J. P.; GEIRINHAS, J. L.; RAMOS, A. M.; SKANSI, M.; MOLINA-CARPIO, J.; SALINAS, R. Climatological patterns of heatwaves during winter and spring 2023 and trends for the period 1979–2023 in central South America. **Frontiers in Climate**, v.7, p.1-21, 2025. <https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1529082>.

MARENGO, J. A.; DOLIF, G.; CUARTAS, A.; CAMARINHA, P.; GONÇALVES, D.; LUIZ, R.; SILVA, L.; ALVALA, R. C. S.; SELUCHI, M. E.; MORAES, O. L.; SOARES, W. R.; NOBRE, C. A. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio de 2024. **Mudanças climáticas**, v.38, n.112, p. 203–227, 2024. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.012>.

MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, JP.; CORBEELS, M.; MCMURTRIE, R.E.; STAPE, J.L.; EPRON, D.; MAIRE, G.L. Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of *Eucalyptus* plantation growth on deep tropical soils. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 112-128, 2013.

MARTINS, F. B. Modeling growth at an individual tree level for commercial plantations of eucalyptus. 2011. 159 f. Tese (Doutorado em Manejo Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

MARTINS, F. B.; BENASSI, R. B.; TORRES, R. R.; BRITO NETO, F.A. Impacts of 1.5° C and 2° C global warming on Eucalyptus plantations in South America. **Science of The Total Environment**, v.825, p.153820, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; SILVA, G. F. D. Individual tree growth models for eucalyptus in northern Brazil. **Scientia Agricola**, v.71, p.212-225, 2014.

MAY, M.; HIRSCH, S.; ABRAMSON, M. Transformation of Plantation Forestry Productivity for Climate Change Mitigation and Adaptation. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology**, v. 16, a041670, 2024. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a041670>.

MONTEIRO, A. F. M.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R.; ALMEIDA, V. H. M.; ABREU, M. C.; MATTOS, E. V. Intercomparison and uncertainty assessment of methods for estimating evapotranspiration using a high-resolution gridded weather dataset over Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.146, p.583-597, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03747-1>.

MOTA, J. D. S.; BARBOSA, L. R.; MARCHIORO, C. A. Suitable areas for invasive insect pests in Brazil and the potential impacts for eucalyptus forestry. **Pest Management Science**, v.78, p.2596-2606, 2022. <https://doi.org/10.1002/ps.6891>.

MOTA, J. S.; BARBOSA, L. R.; MARCHIORO, C. A. Climate change impacts the risk of invasion of eucalypt pests in Brazil. **Agricultural and Forest Entomology**, v.26, n.1, p.101-114, 2024. <https://doi.org/10.1111/afe.12599>.

NAZARENKO, L. S.; TAUSNEV, N.; RUSSELL, G. L.; RIND, D.; MILLER, R. L.; SCHMIDT, G. A.; BAUER, S. E.; KELLEY, M.; RUEDY, R.; ACKERMAN, A. S.; ALEINOV, I.; BAUER, M.; BLECK, R.; CANUTO, V.; CESANA, G.; CHENG, Y.; CLUNE, T. L.; COOK, B. I.; CRUZ, C. A.; DEL GENIO, A. D.; ELSAESSER, G. S.; FALUVEGI, G.; KIANG, N. Y.; KIM, D.; LACIS, A. A.; LEBOISSETIER, A.; LEGRANDE, A. N.; LO, K. K.; MARSHALL, J.; MATTHEWS, E. E.; MCDERMID, S.; MEZUMAN, K.; MURRAY, L. T.; OINAS, V.; ORBE, C.; PÉREZ GARCÍA-PANDO, C.; PERLWITZ, J. P.; PUMA, M. J.; ROMANOU, A.; SHINDELL, D. T.; SUN, S.; TSIGARIDIS, K.; TSELI OUDIS, G.; WENG, E.; WU, J.; YAO, M. Future climate change under SSP emission scenarios with GISS-E2.1. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v.14, e2021MS002871, 2022. <https://doi.org/10.1029/2021MS002871>.

NIEVOLA, C. C.; CARVALHO, C. P.; CARVALHO, V.; RODRIGUES, E. Rapid responses of plants to temperature changes. **Temperature**, v.4, p.371-405, 2017. <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1377812>.

OLD, K. M.; DUDZINSKI, M. J.; PONGPANICH, K.; YUAN, Z. Q.; PHAM QUANG, T.; NGUYEN TRAN, N. *Cryptosporiopsis* leaf spot and shoot blight of eucalypts. **Australasian Plant Pathology**, v.31, p.337–344, 2002. <https://doi.org/10.1071/AP02037>.

ORTEGA, G.; ARIAS, P.A.; VILLEGAS, J.C.; MARQUET, P.A.; NOBRE, P. Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v.41, p.6713–6735, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7221>.

ÖSTRAND, F.; WALLIS, I. R.; DAVIES, N. W.; MATSUKI, M.; STEINBAUER, M. J. Causes and consequences of host expansion by *Mnesampela privata*. **Journal of Chemical Ecology**, v.34, p.153–167, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10886-007-9422-y>.

OUYANG, L.; ARNOLD, R. J.; CHEN, S.; XIE, Y.; HE, S.; LIU, X.; ZHANG, W. Prediction of the suitable distribution of *Eucalyptus grandis* in China and its responses to climate change. **New Forests**, v.53, p.81–99, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09845-2>.

PALMEIRO-SILVA, Y.; LLERENA-CAYO, C.; BLANCO-VILLAFUERTE, L.; ROJAS-RUEDA, D.; BORCHERS ARRIAGADA, N.; VELA-CLAVO, Z.; CAMARGO, T. de; RUSTICUCCI, M.; VALDES-VELASQUEZ, A.; HARTINGER, S. M. The 2024 South America ablaze: health impacts and policy imperatives for protecting population health in an era of wildfires. **The Lancet Regional Health – Americas**, v.48, n.101160, p.1-12, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.lana.2025.101160>.

PRADHANANG, P. M. Pink disease (*Corticium salmonicolor*) control in mandarin orange (*Citrus reticulata*) by application of Bordeaux mixture. **Crop Protection**, v.13, p.550–552, 1994. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(94\)90109-0](https://doi.org/10.1016/0261-2194(94)90109-0).

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, v.100, n.2, p. 81–92, 1972.

PROBERT, M. E.; DIMES, J. P.; KEATING, B. A.; DALAL, R. C.; STRONG, W. M. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. **Agricultural Systems**, v.56, p.1–28, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(97\)00028-0](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(97)00028-0).

RAPLEY, L. P.; ALLEN, G. R.; POTTS, B. M. Oviposition by autumn gum moth (*Mnesampela privata*) in relation to *Eucalyptus globulus* defoliation, larval performance and natural enemies. **Agricultural and Forest Entomology**, v.6, p.237–243, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9555.2004.00224.x>.

REICHERT, J. M.; MORALES, B.; LIMA, E. M.; BASTOS, F.; MORALES, C. A. S.; ARAÚJO, E. F. Soil morphological, physical and chemical properties affecting *Eucalyptus* spp. productivity on Entisols and Ultisols. **Soil & Tillage Research**, v.226, p.105563, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105563>.

REICHERT, J. M.; MORALES, C. A. S.; LIMA, E. M.; BASTOS, F.; SAMPIETRO, J. A.; ARAÚJO, E. F.; SRINIVASAN, R. Best tillage practices for early-growth of clonal *Eucalyptus* in soils with distinct granulometry, drainage and profile depth. **Soil & Tillage Research**, v.212, p.105038, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105038>.

REIS, C. A. F.; ASSIS, T. F.; SANTOS, A. M.; PALUDZYSZYN FILHO, E. *Corymbia torelliana*: estado da arte de pesquisas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 50 p.

RESQUIN, F.; DUQUE-LAZO, J.; ACOSTA-MUÑOZ, C.; RACHID-CASNATI, C.; CARRASCO-LETELIER, L.; NAVARRO-CERRILLO, R. M. Modelling current and future potential habitats for plantations of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *E. dunnii* Maiden in Uruguay. **Forests**, v.11, n.948, p. 1–20, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11090948>.

RIAHI, K.; VUUREN, D. P. V.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CAURESMA, J. C.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENODER, F.; DA SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUETI, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMCGARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAYONI, M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v.42, p.153–168, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

RIBEIRO, A. F.; MARTINS, F. B.; SANTOS, D. F.; TORRES, R. R.; FAGUNDES, F. F. A. Suitable areas for temperate fruit trees in a Brazilian hotspot area: changes driven by new IPCC scenarios. **European Journal of Agronomy**, v.155, p.127110, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127110>.

RUELAND, E.; ZACHOWSKI, A. How plants sense temperature. **Environmental and Experimental Botany**, v.69, n.3, p.225-232, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.011>.

RUV LEMES, M.; SAMPAIO, G.; FISCH, G.; ALVES, L. M.; MAKSIC, J.; GUATURA, M.; SHIMIZU, M. Impacts of atmospheric CO₂ increase and Amazon deforestation on the regional climate: A water budget modelling study. **International Journal of Climatology**, v.43, n.3, p.1-17, 2023. <https://doi.org/10.1002/joc.7929>.

SALLA, V. P.; CAMPOS, T. de; BORIN, M. dos S. R.; MAZARO, S. M.; VISMARA, L. de S. Incidência e severidade de doenças em espécies de *Eucalyptus* sp. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.9, n.3, p.79–85, 2016. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V9.N3.09>.

SAMUEL, S.; DOSIO, A.; MPHALE, K.; FAKA, D. N.; WISTON, M. Comparison of multi-model ensembles of global and regional climate model projections for daily characteristics of precipitation over four major river basins in southern Africa. Part II: Future changes under 1.5° C, 2.0° C and 3.0° C warming levels. **Atmospheric Research**, v.293, p.106921, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106921>.

SANTOS, A. P. D.; GOMES, R. L.; FURTADO, E. L.; PASSOS, J. R. D. S. Quantifying losses in productivity by the rust in eucalypt plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.468, n.118170, p.1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118170>.

SILVA, R. C. da; MARENGO, J. A.; LEMES, M. R. V. Analysis of extreme rainfall and landslides in the metropolitan region of the Paraíba do Sul River Valley and North Coast of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.155, p.3927–3949, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04857-2>.

SILVA, X.; ROUX, J.; ASIEGBU, F. O. Diseases of eucalypts in Paraguay and first report of *Teratosphaeria zuluensis* from South America. **Forests**, v.11, n.10, p.1035, 2020. <https://doi.org/10.3390/f11101035>.

SOUZA, N. M.; SOLIMAN, E. P.; RIBEIRO, M. F.; WILCKEN, C. F. *Gonipterus platensis* e *Gonipterus pulverulentus*. In: LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C. (Eds.). *Novo Manual de Pragas Florestais Brasileiras*. Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 840–853, 2021.

STEINBAUER, M. J. Oviposition preference and neonate performance of *Mnesampela privata* in relation to heterophyly in *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus globulus*. **Agricultural and Forest Entomology**, v.4, p.245–253, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1461-9563.2002.00151.x>.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. 1957.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The moisture balance. **Publications in climatology**, v.8, 1955.

THRASHER, B.; WANG, W.; MICHAELIS, A.; MELTON, F.; LEE, T.; NEMANI, R. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. **Scientific data**, v.9, n.1, p.262, 2022.

TORRES, R. R.; BENASSI, R. B.; MARTINS, F. B.; LAPOLA, D. M. Projected impacts of 1.5°C and 2°C global warming on temperature and precipitation patterns in South America.

International Journal of Climatology, v.42, n.3, p.1597-1611, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7322>.

TRIANA-MADRID, J. C.; OCAMPO-MARULANDA, C.; CARVAJAL-ESCOBAR, Y.; TORRES-LÓPEZ, W. A.; TRIANA, J.; CANCHALA, T. Estimation of monthly reference evapotranspiration with scarce information using machine learning in southwestern Colombia. **Meteorológica**, v.48, n.2, p.1-22, 2023. <https://doi.org/10.24215/1850468Xe024>.

TURC, L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. **Annales Agronomiques**, v.12, p.13-49, 1961.

UNFCCC, 2015. Adoption of the Paris Agreement. Conference of the Parties, Paris, France, November 30–December 11

XAVIER, R. G.; FAGUNDES, F. F. A.; DIAS, C. G.; RIBEIRO, A. F.; MARTINS, F. B. Climate change impacts on *Eucalyptus* productivity across Brazil based on high-resolution CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, in press, 2026.

YANG, L.; KONG, J.; GAO, Y.; CHEN, Z.; LIN, Y.; ZENG, S.; SU, Y.; LI, J.; HE, Q.; QIU, Q. A simulated drier climate reduces growth and alters functional traits of *Eucalyptus* trees: a three-year experiment in South China. **Forest Ecology and Management**, v.549, p.121435, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121435>.

YOUSUF, M.; SINGH, S.; IKRAM, M.; KHAN, S. Biological control of eucalyptus gall wasp, *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle (Hymenoptera: Eulophidae) in Punjab, India. **Archives of Agriculture and Environmental Science**, v.5, n.2, p.105–113, 2020. <https://doi.org/10.26832/24566632.2020.050204>.

APÊNDICE CAPÍTULO II

Apêndice 2.1 - Comparação dos dados de entrada, parâmetros estruturais, interface, representação dos processos dinâmicos (partição de biomassa, fotossíntese bruta, respiração de manutenção e senescência foliar), edáficos e de manejo nos modelos de simulação de eucalipto: Modelo da Zona Agroecológica da *Food and Agriculture Organization* (MZA-FAO), *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) e *Physiological Principles in Predicting Growth* (3-PG).

MAZ-FAO	APSIM	3PG
1. Abordagem geral		
O modelo matemático-fisiológico da MAZ-FAO simula a fotossíntese bruta de acordo com o mecanismo de fixação de carbono e a adaptação climática da planta. A produtividade potencial (PP) é simulada considerando as interações entre material genético, radiação solar global, fotoperíodo e temperatura do ar. Posteriormente, a produtividade atingível (PA) é penalizada pelo déficit hídrico em diferentes pontos da curva de crescimento do eucalipto e conforme a intensidade desse déficit.	O modelo APSIM simula a produção diária de biomassa a partir da radiação solar global interceptada e a eficiência de utilização da radiação. A eficiência de utilização da radiação é modulada por fatores edáficos e climáticos, como disponibilidade hídrica, temperatura e fertilidade do solo. A interceptação da radiação solar global é calculada assumindo decréscimo exponencial da luz ao longo do dossel. O modelo também representa explicitamente os estoques de biomassa alocados aos compartimentos de crescimento e aos compartimentos estruturais da planta, permitindo simular de forma dinâmica a partição de carbono entre tecidos metabolicamente ativos e estruturas permanentes ao longo do ciclo de desenvolvimento.	O modelo 3-PG considera a absorção de radiação solar global para estimar a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel. A radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel é convertida em produção primária bruta por meio da eficiência quântica do dossel, a qual é ajustada por modificadores ambientais que representam os efeitos do déficit de pressão de vapor, temperatura do ar, ocorrência de geadas, disponibilidade hídrica no solo, fertilidade do solo e idade do povoamento. De forma geral, a produção primária bruta é obtida pelo produto entre a eficiência máxima teórica do dossel, os modificadores ambientais (temperatura, nutrição, geada e modificador fisiológico) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel estimada segundo a Lei de Beer.
2. Etapa de tempo		
Diário	Diário	Mensal
3. Dados meteorológicos necessários		
Radiação solar global, temperatura mínima e média do ar, precipitação,	Radiação solar global, temperatura máxima e mínima do ar,	Radiação solar global, temperatura máxima e mínima do ar, precipitação,

continua... 106

...continuação

umidade relativa.	precipitação, velocidade do vento, umidade relativa.	déficit de pressão de vapor, número de dias de geada.
-------------------	--	---

4. Dados do solo necessários

Capacidade de água disponível – CAD. A CAD foi obtida a partir da multiplicação entre capacidade de armazenamento de água no solo (CRAS) e do comprimento radicular do eucalipto (Z_r , cm).	Número de camadas do solo e respectivas profundidades; densidade do solo; teor de água ao ar seco; ponto de murcha permanente; capacidade de campo; ponto de saturação; condutividade hidráulica saturada; parâmetros KL (fração da água disponível extraível por dia) e XF (fator de exploração radicular); teor inicial de nitrogênio; carbono orgânico; albedo; número da curva de escoamento superficial em solo descoberto; relação C:N de raízes e solo; pH.	Índice de fertilidade (IF) e modificadores (m_0 , fN_0 e nfN); classe de solo; água disponível máxima e mínima no solo; parâmetros $c\theta$ e $n\theta$, que caracterizam o modificador de crescimento dependente da água no solo ($f\theta$).
---	--	--

5. Evapotranspiração

A evapotranspiração da cultura (ET_c) é calculada pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ET_0) e o coeficiente da cultura (K_c). A ET_0 é estimada a partir dos métodos diários como Penman–Monteith (Allen <i>et al.</i> , 1998), Turc (1961) ou Abtew (1996). O K_c do eucalipto varia em função do estágio de desenvolvimento da cultura e é determinado em função do índice de área foliar (IAF), conforme proposto por Freitas <i>et al.</i> (2020).	A evaporação de referência (ET_0) foi estimada pelo método de Priestley e Taylor (1972), em função da temperatura do ar, radiação solar global, albedo e cobertura da superfície. A evaporação do solo foi estimada com base no modelo de evaporação em dois estágios proposto por Ritchie (1972). Considerou-se que 50% da evaporação da água interceptada pela precipitação ocorre no período noturno. A interceptação é estimada apenas para a precipitação pluvial, por meio de uma equação empírica que relaciona a lâmina precipitada ao índice de área foliar (IAF), não contemplando a interceptação da irrigação. A transpiração potencial é calculada pela abordagem de	A evapotranspiração do povoamento é estimada pela abordagem de Penman–Monteith, parametrizada em nível de dossel, integrando a evaporação do solo e a transpiração da copa e do sub-bosque (Landsberg; Gower, 1997). A condutância da copa em escala de povoamento aumenta linearmente com o índice de área foliar (IAF) até um valor máximo. A precipitação interceptada também é função do IAF, crescendo linearmente até um limite, a partir do qual se torna independente do IAF. A água interceptada evapora posteriormente de acordo com as condições meteorológicas.
--	---	---

...continuação

Penman–Monteith e pode ser reduzida em função da disponibilidade hídrica no solo. A demanda hídrica da planta é determinada pela profundidade efetiva do sistema radicular e pela capacidade de extração de água no perfil do solo.

6. Método de cálculo do balanço hídrico

A abordagem de Thornthwaite e Mather (1955, 1957) é empregada para o balanço hídrico do solo. As entradas do modelo incluem precipitação e/ou irrigação, evapotranspiração da cultura (ETc) e a capacidade de retenção de água no solo (CRAS). A CRAS varia espacialmente ao longo da área cultivada com eucalipto e temporalmente ao longo da rotação, em função do crescimento do sistema radicular. As saídas compreendem as seguintes variáveis: evapotranspiração real (ETr) e deficiência hídrica (DEF). A DEF ocorre quando a ETr é inferior à ETc.	Diferentes camadas de solo são consideradas para descrever a distribuição vertical da umidade do solo. A água disponível em cada camada varia à medida que a frente de extração radicular avança para maiores profundidades. velocidade potencial de avanço da frente de extração define a taxa desse progresso, sendo influenciada pelo teor de água em cada camada do solo. A dinâmica do balanço hídrico no perfil é baseada nas abordagens dos modelos CERES (Jones; Kiniry, 1986) e PERFECT (Littleboy <i>et al.</i> , 1989). O parâmetro “KL” representa a fração da água disponível remanescente em cada camada que pode ser extraída diariamente pelas raízes, considerando os efeitos da condutividade hidráulica do solo e do comprimento radicular sobre a absorção de água.	É utilizado um balanço hídrico do solo de camada única. As variações mensais na água disponível no solo são calculadas pela precipitação mensal e/ou irrigação, menos a soma da precipitação interceptada pela cobertura vegetal, escoamento superficial e evapotranspiração do povoamento.
--	---	---

7. Crescimento das raízes

É adotada uma curva teórica de crescimento potencial do sistema radicular, que atinge seu valor máximo aos 30 meses coincidindo com o máximo índice de área foliar	O crescimento radicular é determinado pela taxa de avanço da frente radicular e pelo comprimento específico da raiz, ambos definidos por parâmetros do modelo. À	O solo é representado como uma única camada homogênea, com profundidade fixa. Assume-se que o sistema radicular tem acesso a toda a água disponível nesse perfil. As taxas
--	--	--

...continuação

(IAF) e permanece constante posteriormente até o final da rotação do eucalipto.	medida que o sistema radicular se aprofunda, as raízes são distribuídas entre as camadas do solo em função da disponibilidade de água e nitrogênio e da demanda da planta por esses recursos. A senescência radicular também é simulada, sendo controlada por uma taxa específica do modelo.	de renovação radicular são consideradas por meio de um parâmetro específico; contudo, a biomassa de raízes não é utilizada para ajustar dinamicamente a profundidade efetiva de enraizamento no modelo. A alocação de carbono às raízes é controlada por parâmetros que estabelecem os limites mínimo e máximo da fração da produção primária líquida destinada a esse compartimento, regulando sua contribuição ao crescimento do sistema radicular ao longo do ciclo.
---	--	---

8. Processos e efeitos fenológicos

Os processos fenológicos não são simulados.	Os processos fenológicos não são simulados. São considerados alterações relacionadas à idade e tamanho da planta na partição de biomassa e características foliares.	Os processos fenológicos não são simulados. São considerados alterações relacionadas à idade e tamanho da planta na partição de biomassa e características foliares.
---	--	--

9. Crescimento da área foliar

O índice de área foliar (IAF) varia ao longo do ciclo de crescimento em função da idade da cultura (I), sendo representado por uma função matemática específica que descreve sua dinâmica desde o plantio até a colheita, com equações distintas para $I < 30$ meses e $I \geq 30$ meses. O IAF atinge seu valor máximo aos 30 meses, apresentando posteriormente uma leve redução até o final do ciclo de rotação do eucalipto.	O índice de área foliar (IAF) é calculado a partir da massa de folhas e da área foliar específica. A massa de folhas depende dos processos de senescência e da partição de biomassa, que varia conforme o desenvolvimento da planta. A área foliar específica é dependente da idade da cultura.	O índice de área foliar (IAF) é determinado a partir da massa de folhas e dos valores de área foliar específica. A partição de biomassa entre folhas e tronco segue uma relação dependente em função do diâmetro do caule à altura do peito. A área foliar específica é definida por uma relação empírica com a idade do povoamento.
--	---	--

10. Partição da biomassa

A partição da biomassa não é simulada. Utiliza-se o coeficiente de colheita ($CC = 0,69$), que representa a relação entre a parte colhida (neste caso, o tronco) e a matéria seca total	A partição de biomassa é distribuída entre folhas, caule, casca, galhos, raiz principal e raízes finas, variando em função do tamanho da planta e da intensidade dos estresses	A biomassa mensal é distribuída entre folhas, tronco, raízes, ramos e casca (sendo ramos e casca estimados conjuntamente). A biomassa destinada às raízes é influenciada pela
---	--	---

...continuação

da árvore no momento da colheita.	hídrico e/ou nutricional. Os diferentes componentes da biomassa estão sujeitos a processos de senescência e abscisão. Em condições de estresse hídrico ou limitação nutricional, observa-se, em geral, aumento da relação raiz: parte aérea.	disponibilidade de nutrientes no solo e pela água disponível. A biomassa do tronco e das folhas é estimada por meio de relações em função do diâmetro à altura do peito (DAP). A partição de biomassa é controlada pela razão entre a alocação para folhas e para o tronco, definida com base no DAP de 2 e 20 cm. As frações mínima e máxima da produção primária líquida destinadas às raízes são parâmetros do modelo, responsáveis por regular o padrão de partição de biomassa ao longo da rotação do eucalipto.
-----------------------------------	--	---

11. Fotossíntese e respiração

A fotossíntese bruta é simulada de acordo com o mecanismo de fixação de carbono e a adaptação climática da planta. Sua estimativa depende da disponibilidade de radiação solar (condições de céu claro ou nublado) e das condições de temperatura. É aplicado um coeficiente de correção relacionado à respiração de manutenção, sendo 0,6 para temperaturas superiores a 20 °C e 0,5 f(N), ao déficit de pressão de vapor para temperaturas inferiores a 20 °C (Tabela 2.3). A partir desses cálculos, é estimada a biomassa seca potencial e, posteriormente, a produtividade é ajustada em função da deficiência hídrica.	A abordagem da eficiência do uso da radiação é utilizada para estimar a produção diária de biomassa, a qual também depende da radiação solar interceptada pelo dossel. A eficiência do uso da radiação máxima é um parâmetro do modelo, sendo reduzida por modificadores de crescimento relacionados à temperatura f(T), ao nitrogênio f(N) e à água no solo f(AS). É aplicada uma função do tipo “mínimo” para selecionar um dos modificadores de crescimento (f(T), f(N) ou f(DPV)) que atuará na penalização da eficiência do uso da radiação. O fator f(AS) é considerado separadamente no processo de penalização. Funções específicas de respiração não são explicitamente representadas.	A produção mensal de biomassa é determinada pela radiação solar interceptada e pela eficiência máxima do dossel, que é um parâmetro do modelo. Essa eficiência é limitada por fatores ambientais, como temperatura, ocorrência de geadas, déficit de pressão de vapor, disponibilidade de água no solo, fertilidade do solo e idade do povoamento. A razão entre produção primária líquida e produção primária bruta é representada por um parâmetro do modelo, que incorpora os efeitos da respiração. O modelo assume que a taxa respiratória é constante
--	---	---

12. Modificador de crescimento por temperatura

...continuação

São utilizados fatores de correção (cT_n e cT_c) para simular o efeito da temperatura na produção de biomassa (Tabela 3). Esses fatores são funções polinomiais e variam de acordo com o mecanismo de fixação de carbono e a adaptação climática da planta.	Os limites da temperatura média diária são utilizados como parâmetros de crescimento que influenciam a eficiência do uso da radiação. A partir desses limites, o fator modificador da fotossíntese em função da temperatura $f(T)$ é calculado por interpolação entre valores mínimos, ótimos e máximos definidos para a cultura. O $f(T)$ aumenta com a elevação da temperatura até atingir a faixa ótima, permanece constante nesse intervalo e, posteriormente, decresce quando a temperatura excede o limite superior.	A função de resposta à temperatura é aplicada diretamente à eficiência quântica do dossel. O modificador de crescimento dependente da temperatura aumenta à medida que a temperatura se eleva até atingir a temperatura ótima e, posteriormente, diminui. As temperaturas basais inferior (T_b), ótima (T_{ot}) e máxima (T_B) de crescimento são os três parâmetros específicos da espécie utilizados nessa função, também conhecidos como temperaturas cardinais.
---	--	---

13. Modificador de crescimento por geada

O crescimento é penalizado de acordo com a severidade das geadas. Isso é representado pela calibração do índice de sensibilidade à geada (f_{geada}) para diferentes faixas de temperaturas mínimas diárias. Os efeitos da geada são atribuíveis a dois fatores: a) redução da fotossíntese bruta em dias de geada e b) taxa de mortalidade. O modificador de crescimento foi aplicado até os dois anos de idade (Tabela 2.2)	O crescimento depende da intensidade das geadas. O fator modificador da fotossíntese em função da geada (f_{geada}) é calculado por interpolação linear com base em limites definidos da temperatura mínima diária. A senescência foliar pode ocorrer em decorrência de dias com ocorrência de geada.	Assume-se que não há fotossíntese em dias com ocorrência de geada (considera-se que os estômatos permanecem fechados). Os números de dias com geada são contabilizados mensalmente, e o crescimento é nulo nesses dias. Esse efeito pode ser ajustado para representar mais de um dia de crescimento nulo por dia de geada, conforme evidências empíricas apropriadas.
---	---	--

14. Modificador de crescimento pela deficiência hídrica

O modelo incorpora dois modificadores de crescimento: índice de sensibilidade do eucalipto ao estresse hídrico (K_y) e o índice de mortalidade por estresse hídrico prolongado (f_{DEF}). O K_y quantifica a redução relativa da produtividade em função da correspondente	O modificador de crescimento por deficiência hídrica (f_{DEF}) é determinado pela relação entre a oferta e a demanda de água no solo. A oferta corresponde à soma da extração potencial de água pelas raízes em cada camada do perfil ocupada pelo sistema radicular,	O modificador de água no solo é calculado a partir da razão entre a água disponível atual e a água disponível máxima no perfil, utilizando os parâmetros SW_{const} e SW_{power} , que variam conforme a textura do solo. Não há índice de mortalidade associado diretamente a
--	---	--

...continuação

redução relativa da evapotranspiração, variando entre materiais genéticos e sendo ajustado em diferentes estágios da curva de crescimento do eucalipto. O f_{DEF} , por sua vez, representa a mortalidade do povoamento em resposta a diferentes classes de deficiência hídrica acumulado no mês anterior, apresentando variação entre genótipos de eucalipto.	enquanto a demanda é calculada pelos módulos específicos de balanço hídrico do modelo. A absorção de água pela planta é simulada por módulo próprio de dinâmica radicular. O modelo também considera mortalidade de plantas em função do estresse hídrico acumulado, com taxa padrão de 2% por dia de estresse, aplicada até 6 meses de idade ou até que a biomassa aérea atinja 6 g planta ⁻¹ . Os parâmetros associados incluem <i>crit_cum_stress</i> , <i>mortality_rate</i> , <i>mortality_age</i> e <i>mortality_size</i> .	deficiência hídrica. A mortalidade do tronco e os processos de auto-desbaste são considerados no modelo, mas não são diretamente controlados pelo estresse hídrico.
--	--	---

15. Modificador de crescimento por déficit de pressão de vapor (DPV)

O modelo não inclui um modificador específico de crescimento associado ao déficit de pressão de vapor (DPV). O DPV é considerado indiretamente no cálculo da evapotranspiração de referência (ET _o), por meio da abordagem de Turc (Turc, 1961).	São utilizados diferentes limites de déficit de pressão de vapor (DPV) como parâmetros do modelo. A partir desses limites, são ajustadas funções do modificador da fotossíntese em função do DPV ($f(DPV)$), considerando o efeito do DPV sobre a eficiência do uso da radiação. É aplicado um fator de ponderação para o DPV diário, baseado nos valores máximo e mínimo de DPV, também definido como parâmetro do modelo. O $f(DPV)$ diminui à medida que o DPV aumenta.	É utilizada uma função exponencial que considera um parâmetro do modelo denominado resposta da condutância do dossel ao DPV e o DPV atual do ambiente. O modificador de crescimento em função do DPV ($f(DPV)$) diminui à medida que o DPV aumenta. O $f(DPV)$ é considerado no cálculo do modificador fisiológico do modelo.
--	--	---

16. Modificador de crescimento por idade

Não existe fator de modificação do crescimento relacionado à idade.	Trata-se de um fator genérico utilizado para representar a redução da produtividade à medida que o povoamento florestal atinge a maturidade. Um parâmetro do modelo ($f(idade)$) é definido para diferentes idades de povoamentos	A redução da condutância estomática e da condutividade hidráulica com o avanço da idade das árvores implica diminuição da fotossíntese, resultando em menor disponibilidade de carbono para manter o índice de área foliar (IAF) alcançado. Assim, o
---	---	--

...continuação

de eucalipto (0, 1, 2, 3, 4 e 80 anos). Como configuração padrão do modelo, esse modificador de crescimento passa a influenciar o crescimento após os quatro anos de idade. modificador dependente da idade simula uma possível redução das propriedades hidráulicas e da produtividade ao longo do tempo. O modificador de idade considera a idade relativa (razão entre a idade atual e a idade máxima atingida pelo povoamento) e o parâmetro n_{idade} (expoente da idade relativa na função $f(idade)$).

17. Modificador de crescimento por [CO₂]

Não há modificador de crescimento por CO ₂ .	Não há modificador de crescimento por CO ₂ .	Considera aumento da eficiência quântica do dossel e redução da condutância estomática em resposta ao incremento da concentração atmosférica de CO ₂
---	---	---

18. Dinâmica da queda de serapilheira

A dinâmica de queda de serapilheira não é simulada pelo modelo.	A senescência dos compartimentos de crescimento é simulada por taxas de decomposição de primeira ordem. O tempo de residência das folhas e as taxas de senescência da parte aérea são parâmetros do modelo. A senescência foliar pode ser influenciada por estresses ambientais, como temperaturas extremas e déficit hídrico. A biomassa da parte aérea é incorporada aos resíduos superficiais do solo.	A queda de serapilheira é simulada por uma função logística dependente da idade. A taxa é menor em povoamentos jovens, aumenta com a idade e torna-se constante após o fechamento do dossel. Fatores ambientais não são considerados. Os parâmetros da função são a taxa máxima de queda, a taxa inicial ($t = 0$) e a idade correspondente ao valor mediano da taxa.
---	---	---

19. Dinâmica do nitrogênio

A dinâmica do nitrogênio não foi simulada.	A demanda de nitrogênio pela planta depende do tamanho dos compartimentos de biomassa e de uma concentração-alvo de nitrogênio para cada compartimento. A partição do nitrogênio absorvido das reservas minerais do solo é determinada	A fertilidade do solo na zona radicular é representada pelo índice de fertilidade (IF), que varia de 0 (baixa fertilidade) a 1 (nutrição não limitante). Esse parâmetro é calibrado com base nas características físicas e químicas do solo. A partir do IF, é calculado o modificador de
--	--	---

pelas forças de demanda, calculadas crescimento dependente da fertilidade a partir dos déficits de nitrogênio (fN_{utr}), que diminui com a redução em cada parte da planta. O da fertilidade. O cálculo de fN_{utr} nitrogênio proveniente da biomassa utiliza os parâmetros fN₀ e fN_n, que senescente é retornado ao solo ou definem, respectivamente, o valor do aos resíduos orgânicos superficiais, modificador quando IF = 0 e a dependendo da origem do material. sensibilidade da função à variação de São especificados valores iniciais de fertilidade. Dye et al. (2004) e carbono orgânico do solo, nitrato e Landsberg (2003) destacam a amônio. A matéria orgânica do solo dificuldade de representar o estado é dividida em dois compartimentos nutricional do solo em termos (“biom” e “hum”). O quantitativos, devido à complexidade compartimento “biom” representa a do ciclo biogeoquímico e à dinâmica fração de rápida decomposição, das raízes no solo. incluindo a biomassa microbiana do solo e seus produtos. O compartimento “hum” corresponde ao restante da matéria orgânica do solo. A temperatura e a umidade do solo em cada camada influenciam a taxa de decomposição. Para mais detalhes, ver Probert *et al.* (1998).

A comparação entre os modelos foi baseada nas documentações dos modelos APSIM (3PG) e (3PG) (<https://www.apsim.info/documentation/>) e (http://3pg.sites.olt.ubc.ca/files/2014/04/3PGpjs_UserManual.pdf). Adaptado de Elli *et al.* (2019a)

Apêndice 2.2 - Quebra de produtividade (QP, %) por país no período de controle (CP, 1995 - 2014) e nos períodos em que os limiares de aquecimento global (1,5 a 4 °C) serão atingidos na América do Sul.

Quebra de produtividade (%)	Argentina	Bolívia	Brasil	Chile	Colômbia	Equador	Guiana	Guiana Francesa	Paraguai	Peru	Suriname	Uruguai	Venezuela
CP (1995 – 2014)													
10	3,4	4,4	30,6	0,7	83,8	60,4	62,7	90,0	22,0	50,9	67,7	18,8	26,4
20	4,2	28,5	23,9	2,9	10,7	12,7	33,5	10,0	19,9	5,1	31,8	80,5	23,4
30	10,2	12,7	18,9	3,5	3,5	5,3	3,7	0	7,9	3,8	0,5	0,7	25,2
40	6,5	13,3	10,7	2,9	0,7	5,3	0	0	6,3	2,9	0	0	14,5
50	6,0	6,5	4,6	2,9	0,3	5,3	0	0	7,4	4,2	0	0	6,9
60	6,6	5,7	3,4	2,9	0,3	3,4	0	0	7,1	3,2	0	0	1,4
70	6,5	8,0	4,3	3,6	0,4	3,4	0	0	8,5	2,3	0	0	1,6
80	8,1	6,9	2,8	4,3	0,1	2,5	0	0	9,2	1,4	0	0	0,7
90	5,4	5,8	0,7	2,7	0	0,9	0	0	10,0	1,2	0	0	0
100	34,7	5,0	0	37,1	0	0,3	0	0	1,8	13,4	0	0	0
Aquecimento de 1,5 °C													
10	3,4	2,0	23,7	1,4	84,0	60,4	42,7	65,4	17,7	49,4	37,0	8,9	23,0
20	3,1	25,7	26,5	3,2	10,7	13,3	45,8	34,6	23,6	5,7	62,5	87,2	21,3
30	10,8	14,5	19,1	2,3	3,4	5,3	11,6	0,0	7,7	4,1	0,5	4,0	24,1
40	6,2	14,1	13,3	3,6	0,8	5,9	0	0	6,1	3,9	0	0	15,0
50	6,3	8,6	5,3	3,6	0,2	5,0	0	0	7,6	4,6	0	0	10,9
60	6,9	5,8	3,6	3,9	0,3	3,7	0	0	7,1	3,2	0	0	3,0

continua... 115

...continuação

70	7,2	8,4	4,6	4,1	0,3	3,4	0	0	9,2	2,3	0	0	1,5
80	8,1	7,3	3,2	4,1	0,3	1,9	0	0	9,0	2,0	0	0	1,2
90	5,9	5,5	0,7	3,1	0	0,9	0	0	10,7	1,3	0	0	0,1
100	35,5	6,1	0	41,2	0	0	0	0	1,3	13,5	0	0	0,0

Aquecimento de 2 °C

10	3,3	1,1	22,2	1,4	82,4	60,7	28,2	15,4	18,2	47,9	0,0	10,3	20,2
20	3,5	23,3	25,6	2,8	11,6	13,9	52,8	84,6	23,2	7,6	94,8	86,1	19,0
30	11,1	16,2	18,5	2,5	3,7	5,6	18,6	0	7,9	4,3	5,2	3,6	23,3
40	6,5	14,5	14,9	4,3	1,1	5,6	0,4	0	6,3	4,4	0	0	16,8
50	6,3	9,2	6,0	4,0	0,3	4,6	0	0	7,8	5,4	0	0	11,8
60	7,0	6,0	3,9	4,1	0,3	3,7	0	0	7,4	3,5	0	0	5,4
70	7,5	8,5	4,5	4,9	0,3	3,4	0	0	9,4	2,7	0	0	1,8
80	8,0	7,8	3,5	4,4	0,3	1,9	0	0	8,7	1,6	0	0	1,3
90	6,0	5,3	0,8	4,3	0	0,6	0	0	10,2	1,6	0	0	0,2
100	35,2	6,6	0	42,7	0	0	0	0	0,9	13,4	0	0	0

Aquecimento de 3 °C

10	2,9	0,5	20,2	0,7	79,9	58,5	3,3	0,9	17,3	47,0	0,0	4,1	17,8
20	3,3	19,6	23,9	1,8	12,9	14,9	51,2	99,1	24,1	8,2	78,1	90,9	13,6
30	11,1	18,7	19,2	3,4	3,5	6,2	38,4	0	8,0	5,1	21,4	5,0	23,7
40	6,9	14,5	16,6	4,9	2,1	7,7	7,1	0	6,1	6,4	0,5	0	15,7
50	6,5	10,2	6,8	5,0	0,6	4,0	0	0	7,2	6,6	0	0	13,3
60	7,2	6,0	4,2	4,8	0,3	4,3	0	0	7,6	3,5	0	0	10,4
70	7,9	8,5	4,4	5,5	0,3	2,8	0	0	10,3	2,0	0	0	2,8
80	8,2	8,1	3,9	6,4	0,4	0,9	0	0	9,4	1,8	0	0	2,1
90	6,6	5,7	0,8	5,2	0,1	0,6	0	0	9,8	2,1	0	0	0,7

continua... 116

...continuação

100	35,2	7,6	0		0	0	0	0	0	12,9	0	0	0
Aquecimento de 4 °C													
10	2,7	0,1	16,1	1,0	69,5	50,8	0,0	0,0	8,9	36,5	0,0	3,7	14,6
20	3,1	9,1	17,0	3,7	18,3	19,8	9,3	37,3	28,6	17,6	0,0	88,4	9,9
30	10,9	23,7	24,1	3,7	6,1	8,7	45,3	62,7	10,9	6,9	86,5	7,9	13,6
40	7,0	12,3	19,8	5,3	3,0	7,1	38,0	0	7,4	8,8	13,5	0	19,7
50	7,0	16,9	8,1	5,4	1,5	4,6	7,4	0	7,2	7,3	0	0	14,8
60	7,4	8,1	4,9	6,1	0,6	5,3	0	0	8,7	3,0	0	0	13,5
70	9,7	8,3	4,3	5,9	0,4	2,5	0	0	11,8	2,4	0	0	10,4
80	6,7	7,6	4,5	6,6	0,2	0,9	0	0	9,6	1,7	0	0	2,4
90	6,6	5,2	1,1	7,0	0,3	0,3	0	0	6,9	2,0	0	0	1,2
100	36,0	8,5	0	45,1	0	0,0	0,0	0	0	12,1	0	0	0

Apêndice 2.3 - Ano central em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C serão atingidos no SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Asterisco (*) representa que a projeção do modelo não atingiu o determinado limiar até 2100.

Modelos climáticos	SSP2-4.5				SSP5-8.5			
	1,5 °C	2 °C	3 °C	4 °C	1,5 °C	2 °C	3 °C	4 °C
ACCESS-ESM1-5	2030	2046	*	*	2028	2039	2061	2079
CMCC-ESM2	2030	2041	2065	*	2029	2039	2055	2070
CNRM-CM6-1	2030	2048	2084	*	2028	2041	2058	2072
EC-Earth3-Veg-LR	2028	2050	*	*	2029	2042	2062	2076
GFDL-CM4	2031	2049	*	*	2029	2041	2059	2079
INM-CM5-0	2036	2071	*	*	2030	2045	2073	*
MIROC6	2042	2064	*	*	2035	2048	2071	*
MPI-ESM1-2-LR	2036	2057	*	*	2034	2049	2071	*
MRI-ESM2-0	2029	2047	*	*	2025	2037	2063	2082
NorESM2-MM	2047	2078	*	*	2040	2054	2077	*

Adaptado de Fagundes *et al.* (2025a)

Apêndice 2.4 - Porcentagem de área com produtividade atingível acumulada abaixo de 250 m³ ha⁻¹ por país da América do Sul para o período de controle (CP, 1995 - 2014) e para os períodos em que os limiares de aquecimento global (1,5 a 4 °C) serão atingidos.

Países	CP	1,5 °C	2 °C	3 °C	4 °C	Mudança			
						1,5 °C - CP	2 °C - CP	3 °C - CP	4 °C - CP
Argentina	70,9	70,5	68,8	67,2	66,0	-0,5	-2,1	-3,8	-5,0
Bolívia	32,0	31,3	30,9	29,9	27,9	-0,7	-1,1	-2,1	-4,2
Brasil	4,2	4,5	5,1	4,7	5,2	0,3	0,9	0,4	0,9
Chile	100	100	100	99,9	99,8	0	0	-0,1	-0,2
Colômbia	1,3	1,4	1,3	1,0	1,0	0,1	0	-0,3	-0,3
Equador	13,7	10,9	8,4	5,5	6,6	-2,8	-5,3	-8,2	-7,1
Guiana	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Guiana	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Francesa									
Paraguai	27,4	27,5	26,5	26,8	26,5	0,2	-0,9	-0,5	-0,9
Peru	38,3	37,3	36,4	33,1	28,2	-1,0	-1,9	-5,2	-10,2
Suriname	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Uruguai	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Venezuela	1,8	1,8	2,2	3,6	2,8	0	0,3	1,7	1,0

CONCLUSÃO GERAL E RECOMENDAÇÕES

Os resultados desta tese evidenciam que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C representam ameaças crescentes à sustentabilidade das plantações de eucalipto, com implicações diretas sobre a disponibilidade hídrica e a produtividade. A abordagem baseada em limiares de aquecimento permitiu alinhar as análises às metas estabelecidas no Acordo de Paris, superando as limitações associadas a recortes temporais fixos tradicionalmente utilizados na literatura.

Em escala global, os resultados do Capítulo I demonstraram que o aumento do aquecimento global está associado ao aumento adicional da temperatura local e às alterações nos padrões de precipitação, promovendo a intensificação da deficiência hídrica (DEF) em áreas produtoras de eucalipto. Observou-se a expansão progressiva de áreas desfavoráveis ao cultivo ($DEF > 330 \text{ mm ano}^{-1}$), particularmente na África, Oceania e América do Sul, atingindo sua maior extensão no limiar de 4 °C. Países como Brasil, África do Sul, Espanha, Portugal, Índia, Tailândia e Austrália destacam-se entre aqueles com maiores aumentos na DEF. Em contrapartida, pequenas áreas na Argentina, China, Mianmar e Laos apresentaram reduções na DEF.

Em escala regional na América do Sul, os resultados do Capítulo II evidenciaram que o avanço dos limiares de aquecimento global altera as variáveis climáticas chaves da produtividade do eucalipto. Como consequência, projetam-se reduções na produtividade atingível acumulada (entre -25 e $-150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e aumentos na quebra de produtividade ($> 40\%$) concentrados nas porções tropicais e centrais do continente. Em contraste, aumentos na produtividade atingível (entre $+25$ e $+125 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) são observados no sul do Uruguai, nordeste da Argentina, noroeste do Paraguai, sul do Chile e em uma faixa localizada entre a Bolívia e a Colômbia, com intensificação progressiva nos limiares mais elevados de aquecimento (3 °C e 4 °C). Esses resultados reforçam o papel do estresse hídrico como principal fator limitante da produtividade florestal sob condições de aquecimento intensificado.

Limitar o aquecimento global a valores inferiores a 2 °C mostra-se determinante para reduzir a expansão de áreas climaticamente desfavoráveis, mitigar perdas produtivas e a ampliação das desigualdades regionais na produtividade do eucalipto na América do Sul. Nesse contexto, tornam-se fundamentais estratégias integradas de adaptação, incluindo a seleção de genótipos mais tolerantes ao estresse térmico e hídrico, ajustes nas práticas de manejo silvicultural, conservação da água no solo, diversificação produtiva por meio de sistemas agroflorestais e fortalecimento de sistemas de monitoramento climático.

Assim, esta tese contribui para o avanço do conhecimento ao integrar ciência climática de última geração com ferramentas de avaliação da disponibilidade hídrica e de modelagem da produtividade florestal, sob a perspectiva de diferentes limiares de aquecimento global, oferecendo subsídios científicos relevantes para o planejamento estratégico e a construção de um setor florestal mais resiliente às mudanças climáticas.

Estudos futuros devem considerar a adoção de ferramentas de balanço hídrico mais complexas, capazes de representar de forma mais realista a dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera, incluindo múltiplas camadas de solo, fluxos verticais de água, absorção radicular dinâmica e funções de pedotransferência. Essa abordagem pode reduzir as incertezas associadas às estimativas de disponibilidade hídrica e aprimorar a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade do eucalipto, uma vez que o déficit hídrico constitui o principal fator limitante à produtividade.

Além disso, recomenda-se a incorporação do efeito de fertilização por CO₂ no modelo MZA-FAO e nos demais modelos, uma vez que o aumento da concentração atmosférica de CO₂ modula os processos fisiológicos-chave. A consideração explícita desse efeito pode resultar em estimativas mais realistas das respostas do eucalipto às mudanças climáticas, especialmente em cenários futuros de aquecimento global.

Por fim, recomenda-se a realização de análises de viabilidade financeira associadas as produtividades simuladas e projetadas, considerando os custos de implantação, manejo e colheita, bem como as possíveis variações de receita decorrentes das mudanças na produtividade. A integração entre modelagem da produtividade e análise financeira pode proporcionar uma avaliação mais abrangente dos impactos dos diferentes limiares de aquecimento global, subsidiando a tomada de decisão e o planejamento estratégico no setor florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL

ABREU, M.C.; SOARES, A.A.V.; FREITAS, C.H.; MARTINS, F.B. Transpiration and growth responses by eucalyptus species to progressive soil drying. **Journal of Forest Research**, v.33, p.1–15, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01448-z>.

BAESSO, R.C.E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M.P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, v. 20, p. 335-344, 2010. <https://doi.org/10.5902/198050981856>

BAHUGUNA, R.N.; JAGADISH, K.S.V. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v.111, p.83–90, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.10.007>.

BETTS, R.A.; ALFIERI, L.; BRADSHAW, C.; CÉSAR, J.; FEYEN, L.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GOHAR, L.; KOUTROULIS, A.; LEWIS, K.; MORFOPOULOS, C.; PAPADIMITRIOU, L.; RICHARDSON, K.J.; TSANIS, I.; WYSER, K. Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5 °C and 2 °C global warming with a higher-resolution global climate model. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v.376, p.20160452, 2018. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0452>.

CARRASCO, G.; ALMEIDA, A. C.; FALVEY, M.; OLMEDO, G. F.; TAYLOR, P.; SANTIBAÑEZ, F.; COOPS, N. C. Effects of climate change on forest plantation productivity in Chile. **Global Change Biology**, v. 28, p. 1–19, 2022. <https://doi.org/10.1111/gcb.16418>

ELLI, E.F.; SENTELHAS P.C.; BENDER F.D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118365, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118365>

FAGUNDES, F. F. A.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R.; MARRAFON, V. H. A. Global warming levels (1.5–4 °C) and water availability for eucalyptus plantations based on high-resolution CMIP6 models. **Earth Systems and Environment**, p.1-18, 2025. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00916-4>

FLORÊNCIO, 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. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>.

FREITAS, C.H.; ELLI, E.F.; SENTELHAS, P.C.; CARNEIRO, R.L.; ALVARES, C.A. Adaptation, calibration and evaluation of a simple agrometeorological model for wood *Eucalyptus* productivity estimation. **European Journal of Forest Research**, v.139, p.759–776, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01283-7>.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**, Cambridge, 2021.

MARTINS, F.B.; BENASSI, R.B.; TORRES, R.R.; BRITO NETO, F.A. Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on *Eucalyptus* plantations in South America. **Science of the Total Environment**, v.825, p.153820, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>.

MEDEIROS, P.L.; PIMENTA, A.S.; MIRANDA, N.O.; MELO, R.R.; AMORIM, J.S.; AZEVEDO, T.K.B. The Myth That Eucalyptus Trees Deplete Soil Water—A Review. **Forests**, v.16, n.3, p.423, 2025. <https://doi.org/10.3390/f16030423>.

OUYANG, L.; ARNOLD, R. J.; CHEN, S.; XIE, Y.; HE, S.; LIU, X.; ZHANG, W. Prediction of the suitable distribution of *Eucalyptus grandis* in China and its responses to climate change. **New Forests**, v. 53, p. 81–99, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09845-2>

RESEARCHERS AND MAKERS. *Pulp Market: Analysis by Demand, Production, Type, End Market, Region, Size, and Trends with Impact of COVID-19 and Forecast up to 2028*. 2024. Avaliado online: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5923044> (Acesso em 25 feb. 2026).

SILVA, X.; ASIEGBU, F.O. Eucalyptus fungal diseases. In: **Forest Microbiology**. Academic Press, p.313–337, 2023.

TORRES, R.R.; BENASSI, R.B.; MARTINS, F.B.; LAPOLA, D.M. Projected impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on temperature and precipitation patterns in South America. **International Journal of Climatology**, v.42, p.1597–1611, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7322>.

UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. Conference of the Parties, Paris, 2015.

XAVIER, R.G.; FAGUNDES, F.F.A.; DIAS, C.G.; RIBEIRO, A.F.; MARTINS, F.B. Eucalyptus productivity and potential losses at each grid point in Brazil driven by an open-source model coupled with high-resolution CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, in press, 2026.

YANG, L.; KONG, J.; GAO, Y.; CHEN, Z.; LIN, Y.; ZENG, S.; SU, Y.; LI, J.; HE, Q.; QIU, Q. A simulated drier climate reduces growth and alters functional traits of *Eucalyptus* trees: a three-year experiment in South China. **Forest Ecology and Management**, v.549, p.121435, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121435>.