



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

**COMPORTAMENTO FENOLÓGICO E MODELAGEM
DO DESENVOLVIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS:
CLIMA ATUAL E FUTURO**

Mábele de Cássia Ferreira

Itajubá, MG, Brasil

2025

COMPORTAMENTO FENOLÓGICO E MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS: CLIMA ATUAL E FUTURO

por

Mábele de Cássia Ferreira

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. Marcel Carvalho Abreu

Itajubá, MG, Brasil

2025

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

MÁBELE DE CÁSSIA FERREIRA

**COMPORTAMENTO FENOLÓGICO E MODELAGEM DO
DESENVOLVIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS:
CLIMA ATUAL E FUTURO**

Tese aprovada por banca examinadora em 04 de abril de 2025 conferindo à autora o título de **Doutora em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FABRINA BOLZAN MARTINS**
Data: 11/04/2025 08:40:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Fabrina Bolzan Martins (Orientadora)
Universidade Federal de Itajubá

Documento assinado digitalmente
 **MARCEL CARVALHO ABREU**
Data: 02/05/2025 16:43:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcel Carvalho Abreu (Coorientador)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Documento assinado digitalmente
 **VANESSA DA FONTOURA CUSTODIO MONTEIRO**
Data: 11/04/2025 17:48:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Vanessa da Fontoura Custodio Monteiro
Universidade Federal de Itajubá

Documento assinado digitalmente
 **CASSIA GABRIELE DIAS**
Data: 11/04/2025 13:02:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Cassia Gabriele Dias
Universidade Federal de Itajubá

Documento assinado digitalmente
 **EVANDRO LUIZ MISSIO**
Data: 02/05/2025 08:14:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Evandro Luiz Missio
Centro Estadual de Diagnóstico e Pesquisa Florestal,
Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul

Documento assinado digitalmente
 **CLEVERSON HENRIQUE DE FREITAS**
Data: 30/04/2025 09:27:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Cleverson Henrique de Freitas
University of Florida

À Deus: meu refúgio, minha força e minha direção.

OFEREÇO

*Ao meu esposo Luiz Gustavo, meus pais José Maurício e Laurelise
e minha irmã Ana Flávia,*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Embora a elaboração desta Tese tenha sido realizada individualmente, ela é resultado direto de uma ampla rede de apoio de instituições e pessoas ao longo de todo o processo. Sem esse suporte, nada disso seria possível, e por isso sou imensamente grata:

À Universidade Federal de Itajubá, pela oportunidade de aprendizado e pelo crescimento pessoal e profissional.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro por meio da bolsa de estudo ID-14029 e projeto APQ 01511-24, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto 306845/2021-0, e ao Instituto de Recursos Naturais (IRN) por fornecer subsídios para os experimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (POSMARH) pelo apoio financeiro que possibilitou minha participação em eventos científicos, onde tive a oportunidade de divulgar parte da minha pesquisa, ampliar meu conhecimento e trocar experiências.

À Professora Dra. Fabrina Bolzan Martins, agradeço pela valiosa orientação, por seu constante incentivo em busca do meu potencial máximo, pela paciência, amizade e sábios conselhos. Seu apoio técnico e, sobretudo, humano, foram fundamentais nos momentos difíceis.

Ao Professor Dr. Marcel Carvalho Abreu, agradeço pela coorientação e suporte para a melhoria da Tese.

Aos membros da banca avaliadora da minha Qualificação de doutorado que contribuíram para a melhoria do projeto da Tese: Professora Dra. Sâmia Regina Garcia Calheiros, Dr. Evandro Luiz Missio e Professor Dr. Marcel Carvalho Abreu.

Aos membros da banca avaliadora da minha defesa de Tese: Professora Dra. Vanessa da Fontoura Custodio Monteiro, Dra. Cássia Gabriele Dias, Dr. Evandro Luiz Missio, Dr. Cleverson Henrique de Freitas e Dr. Marcel Carvalho Abreu, pelas contribuições para melhoria da Tese.

Às instituições que gentilmente forneceram as sementes para a execução dos experimentos: Centro Estadual de Diagnóstico e Pesquisa Florestal da Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), Instituto Refloresta, Departamento de Análise de Sementes da Universidade Federal de Lavras e Departamento de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

Aos viveiros florestais que gentilmente contribuíram com informações sobre suas técnicas de produção de mudas: AMG Reflorestamento, Grupo Dispersores, Instituto Refloresta e APREMAVI - Associação de Preservação do Meio Ambiente e da Vida.

Ao querido amigo Haroldo Costa, agradeço pelo companheirismo, auxílio e orientação durante toda a fase de execução dos experimentos.

À Gabriela Ribeiro, Yumi Segawa e Maria Teresa Alves, pela amizade e colaboração essencial na execução dos experimentos e trabalho com os dados, e ao Yuri Reis, pela ajuda nos cálculos de correção e adubação do solo.

Aos amigos que o POSMARH me presenteou: Flávia Fagundes, Cássia Dias, Rafael Xavier, Ivana Bastos, Vinícius Siqueira, Elaine Faria, Amanda Lisboa, Geovane Miguel, Eduardo Serrano e Débora Teixeira: minha profunda gratidão pela ajuda, pelos momentos de leveza, pelas trocas de conhecimento e pelas valiosas experiências compartilhadas.

À Professora e amiga Dra. Liliana Pasin (sempre presente), pelo inestimável apoio e incentivo desde minha graduação. Será sempre lembrada com muito carinho.

Ao meu esposo Luiz Gustavo, pelo amor, companheirismo, pela compreensão durante o longo período que estive ausente devido ao desenvolvimento deste trabalho, e por sempre acreditar em mim.

Aos meus pais, José Maurício e Laurelise, e à minha irmã, Ana Flávia, pelo amor e carinho incondicionais, pela essencial ajuda na coleta de sementes, e por me proporcionarem um lar acolhedor nesse período.

À toda minha família, em especial tia Anisail e tia Edilene, pelo carinho e incentivo.

Às pessoas que não foram citadas, mas que de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho. Muito obrigada!

*O acreditar é semear hoje, abrir caminhos difíceis
para colher e caminhar com leveza no amanhã.*

(Rudimar Almeida)

RESUMO

FERREIRA, Mábele de Cássia. **Comportamento fenológico e modelagem do desenvolvimento de espécies florestais: clima atual e futuro.** 2025. 243 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2025.

Aumentos de temperatura do ar projetados para ocorrerem ao longo do século XXI emergem como um dos principais fatores limitantes para o desenvolvimento de espécies florestais, especialmente no estágio inicial, quando as plântulas são mais sensíveis à variabilidade térmica. Compreender a fenologia do desenvolvimento inicial dessas espécies é essencial para aprimorar estratégias de resiliência para viveiros florestais e programas de reflorestamento no clima futuro. Esta tese aborda essa questão por meio de cinco objetivos: I) analisar a influência de variáveis meteorológicas e armazenamento sobre a viabilidade das sementes de seis espécies florestais - *Bauhinia forficata* Link, *Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna, *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. e *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith) - por meio da análise de componentes principais (**Capítulo I**); II) adaptar a escala fenológica BBCH para descrever o desenvolvimento inicial para cinco espécies nativas (*B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus*, e *T. roseoalba*) (**Capítulo II**); III) estimar os limiares e o requerimento térmico para o desenvolvimento inicial dessas espécies (**Capítulo III**); IV) calibrar e avaliar o desempenho dos modelos de desenvolvimento Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) em estimar o desenvolvimento inicial das cinco espécies; e V) identificar os impactos dos aumentos da temperatura do ar projetados na duração do desenvolvimento inicial (**Capítulo IV**) e na viabilidade financeira (**Capítulo V**) para a produção de mudas das cinco espécies no viveiro florestal. Para atingir os cinco objetivos, foram realizados testes de emergência nas amostras de sementes utilizadas e conduzidos experimentos a campo ao longo de quatorze datas de semeadura no período de 2022 a 2024 em Itajubá. As sementes das espécies florestais estudadas foram provenientes de múltiplas datas de semeadura e apresentaram padrões distintos de viabilidade em termos de porcentagem de emergência, índice de velocidade de emergência, tempo médio de emergência e velocidade média de emergência. As sementes de *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus*, *T. rosea* e *T. roseoalba* são mais sensíveis ao tempo de armazenamento, com redução da viabilidade proporcional ao aumento do tempo de armazenamento. As condições meteorológicas influenciam a maturação fisiológica e emergência das sementes das espécies estudadas, sendo que amostras provenientes das regiões mais quentes e secas apresentaram melhores índices de emergência. A primeira escala BBCH adaptada para descrever o desenvolvimento inicial das espécies estudadas identificou dois estágios de desenvolvimento principais: 0 (germinação) e 1 (desenvolvimento foliar) e doze subestágios (códigos 00-09 a 110). As espécies atingiram o subestágio 110 (10ª folha visível no caule principal) em ~ 171 a 190 dias, havendo diferenças na duração dos subestágios (00 a 110) em todas as espécies. Os limiares térmicos estimados para as cinco espécies variaram entre 10,6 e 12,6 °C (temperatura base), de 20,3 a 21,5 °C (ótima) e de 41,9 a 43,9 °C (superior). A *C. speciosa* possui menor exigência térmica para se desenvolver durante o estágio inicial (160,5 °C dia folha⁻¹) enquanto a *B. forficata* maior exigência (224,4 °C dia folha⁻¹). Os modelos Filocrono e Wang e Engel estimaram com maior precisão o desenvolvimento inicial em termos do número de folhas (NFA) (erro < 1,5 folhas) comparado a duração do desenvolvimento inicial (DDI) (erro entre 11 a 32 dias). O filocrono foi melhor para descrever o desenvolvimento das espécies *C. speciosa* e *H. chrysotrichus*, e o Wang e Engel foi superior para as *B. forficata*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*. Por fim, para atender o objetivo V, o melhor modelo de desenvolvimento (FIL ou WE) foi alimentado com as saídas de 16 Modelos de Circulação Geral

(MCGs) do *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP) da nova geração do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6). Foram realizadas simulações do desenvolvimento, em termos de NFA e DDI, para o clima atual (CA, 1995-2014) e projeções para três períodos futuros: futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2061-2080) e futuro distante (FD, 2081-2100), em 3 cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). A viabilidade financeira para produção de mudas foi analisada pelo valor presente líquido (VPL) dos custos calculados para o CA, FP, FI e FD (nos 3 SSPs). Apesar dos aumentos projetados na temperatura do ar (entre +1,3 e +4,5 °C) e tendências heterogêneas no desenvolvimento das espécies (-55 a +24 dias), a viabilidade financeira será pouco impactada. A adoção de medidas adaptativas para garantir a qualidade e o vigor das mudas no futuro irá aumentar os custos da produção de mudas de ~ 0,2% a 3,5%.

Palavras-chave: viabilidade de sementes; escala fenológica; limiares térmicos; aparecimento de folhas; modelos de desenvolvimento; mudanças climáticas; viabilidade financeira.

ABSTRACT

FERREIRA, Mábele de Cássia. **Phenological patterns and development modeling of forest species: current and future climates** 2025. 243 p. Thesis (Doctorate in Environment and Water Resources) - Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2025.

Projected increases in air temperature emerge as the primary constraint for forest species development, particularly during the initial stage when seedlings are most sensitive to thermal variability. Understanding the phenology of the initial development is essential for enhancing resilience strategies in forest nurseries and reforestation programs under future climatic conditions. This thesis addresses this issue through five key aims: I) assess the influence of weather variables and storage duration on seed viability in six forest species—*Bauhinia forficata* Link, *Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna, *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC., and *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith—using principal component analysis (**Chapter I**); II) adapt the BBCH phenological scale to describe the initial development stages of five native species (*B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus*, and *T. roseoalba*) (**Chapter II**); III) estimate the thermal thresholds and requirements for the initial development of these species (**Chapter III**); IV) calibrate and evaluate the performance of the Phyllochron (FIL) and Wang & Engel (WE) models in estimating the initial development; and V) identify the impact of projected air temperature increases on the duration of initial development (**Chapter IV**) and the financial feasibility (**Chapter V**) of seedling production in forest nurseries. To achieve these aims, seedling emergence tests were performed on seed samples, and field experiments were conducted across fourteen sowing dates from 2022 to 2024 in Itajubá, Brazil. The forest species' seeds were sourced from multiple places and exhibited distinct viability patterns regarding emergence percentage, emergence speed index, mean emergence time and mean emergence rate. *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus*, *T. rosea*, and *T. roseoalba* seeds were more sensitive to storage duration, decreasing viability proportionally with increased storage time. Weather conditions influenced the physiological maturation and emergence of the studied species, with samples from warmer and drier regions showing higher emergence indices. The first BBCH scale adapted to describe the initial development of the studied species identified two main development stages: 0 (germination) and 1 (leaf development), along with twelve substages (codes 00-09 to 110). The species reached substage 110 (10th visible leaf on the main stem) in approximately 171 to 190 days, with differences in the duration of substages (00 to 110) observed across all species. Estimated thermal thresholds ranged from 10.6 to 12.6°C (base temperature), 20.3 to 21.5°C (optimum), and 41.9 to 43.9°C (maximum). *C. speciosa* exhibited the lowest thermal requirement for initial development (160.5°C day leaf⁻¹), whereas *B. forficata* had the highest (224.4°C day leaf⁻¹). The Phyllochron and Wang & Engel models estimated leaf number (NFA) with higher accuracy (error < 1.5 leaves) compared to initial development duration (DDI) (error between 11 and 32 days). The Phyllochron model provided better estimates for *C. speciosa* and *H. chrysotrichus* development, while the Wang & Engel model performed better for *B. forficata*, *H. impetiginosus*, and *T. roseoalba*. Lastly, to achieve aim V, the best-performing model (Phyllochron or Wang & Engel) was integrated into 16 General Circulation Models (GCMs) from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6). Simulations of NFA and DDI were performed for the current period (CA, 1995–2014) and projected for three future periods: near future (NF, 2041–2060), intermediate future (FI, 2061–2080), and far future (FD, 2081–2100), under three Shared Socioeconomic Pathways scenarios (SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5). The financial feasibility of seedling production was analyzed based on the net present value (NPV) of calculated costs for CA, NF, IF, and DF (under the three SSPs). Despite projected air temperature increases (+1.3 to +4.5°C) and heterogeneous development responses

(-55 to +24 days), financial feasibility is expected to remain unaffected. Adopting adaptive measures to ensure seedling quality and vigor in the future will increase production costs by ~0.2% to 3.5%.

Keywords: seed viability; phenological scale; thermal threshold; leaf appearance; development models; climate change; financial feasibility.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 - Características gerais, usos (atual e potencial) e distribuição das seis espécies florestais: *B. forficata* (A), *C. speciosa* (B), *H. chrysotrichus* (C), *H. impetiginosus* (D), *T. rosea* (E) e *T. roseoalba* (F) nos biomas brasileiros. Fonte: Os dados de distribuição das espécies florestais foram obtidos de CRIA (2023). As informações sobre as espécies foram obtidas de múltiplas fontes e estão disponíveis em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14648502>.....31

Figura 1.2 - Localização das áreas de coleta das sementes e médias mensais climatológicas para temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$, mínima, média e máxima), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), umidade relativa do ar (%) e precipitação acumulada (mm mês^{-1}) para 1995 a 2014. Os valores médios mensais de temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e precipitação foram calculados usando um conjunto de dados meteorológicos em grade de alta resolução espacial ($0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ latitude/longitude) fornecido por Xavier *et al.* (2016), disponível em <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>.....36

Figura 1.3 – Variação da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$, mínima, média e máxima), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), umidade relativa do ar (%), precipitação acumulada (mm mês^{-1}) e fotoperíodo (horas dia^{-1}) nos locais de coleta das sementes de *Bauhinia forficata* (A, B), *Ceiba speciosa* (C, D), *Handroanthus chrysotrichus* (E, F), *Handroanthus impetiginosus* (G, H), *Tabebuia rosea* (I, J) e *Tabebuia roseoalba* (K, L). Os meses delimitados pelo quadro verde referem-se ao período compreendido entre a data de coleta das sementes e 180 dias anteriores a esta data.....42

Figura 1.4 - Matriz de correlação (A), diagrama de ordenação das componentes principais e contribuição das variáveis (B e C). Nos painéis B e C, a PC1 está disposta no eixo horizontal e a PC2 no eixo vertical. O 1º quadrante representa as componentes positivas (PC1 e PC2), o 2º quadrante as componentes negativas (PC1) e positivas (PC2), o 3º quadrante as componentes negativas (PC1 e PC2) e o 4º quadrante as componentes positivas (PC1) e negativas (PC2). EP – porcentagem de emergência (%); ESI - índice de velocidade de emergência; MTE - tempo médio de emergência (dia); MSE - velocidade média de emergência (dia^{-1}); SST - tempo de armazenamento (dia); Tmin, Tmed e Tmax – temperatura mínima, média e máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); Rs – radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Rh – umidade relativa do ar (%); Pr - precipitação (mm dia^{-1}) e Ph – fotoperíodo (horas).....44

CAPÍTULO II

Figura 2.1 – Biomas brasileiros (IBGE, 2019) (A) e distribuição das cinco espécies florestais nos respectivos biomas (dados disponíveis em CRIA (2023)): *Bauhinia forficata* (B), *Ceiba speciosa* (C), *Handroanthus chrysotrichus* (D), *Handroanthus impetiginosus* (E) e *Tabebuia roseoalba* (F).....58

Figura 2.2 - Localização da área de estudo (A) e médias mensais climatológicas para precipitação acumulada (mm mês⁻¹), temperatura do ar (°C; mínima, média e máxima) (B), radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹) e fotoperíodo (horas) (C) para Itajubá. As médias mensais foram obtidas entre 1985 a 2014 a partir de dados meteorológicos de alta resolução espacial (0,25° x 0,25° latitude/longitude) disponível em <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA> (Xavier *et al.*, 2016).....61

Figura 2.3 - Variação da precipitação acumulada (mm DS⁻¹), temperatura do ar (°C, mínima, média e máxima), radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹) e fotoperíodo médio (horas) para cada data de semeadura (DS) para cinco espécies florestais nativas: (A, B) *Bauhinia forficata*, (C, D) *Ceiba speciosa*, (E, F) *Handroanthus chrysotrichus*, (G, H) *Handroanthus impetiginosus* e (I, J) *Tabebuia roseoalba* dos experimentos conduzidos em Itajubá. As variáveis foram medidas com uma estação meteorológica automática localizada na área experimental.....66

Figura 2.4 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e desenvolvimento foliar da espécie florestal *Bauhinia forficata* (co = cotilédono; eo = eófilo; ep = epicótilo; hp = hipocótilo; me = metáfilo; pr = raiz primária; se = semente; sp = espinhos; sr = raiz secundária).....72

Figura 2.5 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e desenvolvimento foliar da espécie florestal *Ceiba speciosa* (co = cotilédono; eo = eófilo; hp = hipocótilo; me = metáfilo; pk = acúleos; pr = raiz primária; se = semente; sr = raiz secundária).....73

Figura 2.6 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e desenvolvimento foliar da espécie florestal *Handroanthus chrysotrichus* (co = cotilédono; em = embrião; ep = epicótilo; hp = hipocótilo; par eo = par de eófilos; pr = raiz primária; se = semente; sr = raiz secundária; wi = asa; tr = tricomas).....75

Figura 2.7 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e desenvolvimento foliar da espécie florestal *Handroanthus impetiginosus* (co = cotilédono; em = embrião; ep = epicótilo; hp = hipocótilo; me = metáfilos; par eo = par de eófilos; pr = raiz primária; se = semente; sr = raiz secundária; wi = asa).....76

Figura 2.8 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e desenvolvimento foliar da espécie florestal *Tabebuia roseoalba* (co = cotilédono; em = embrião; ep = epicótilo; hp = hipocótilo; par eo = par de eófilos; pr = raiz primária; se = semente; sr = raiz secundária; wi = asa).....78

CAPÍTULO III

Figura 3.1 - Distribuição das espécies florestais estudadas em Minas Gerais e na área de estudo: *Bauhinia forficata* (B), *Ceiba speciosa* (C), *Handroanthus chrysotrichus* (D), *Handroanthus impetiginosus* (E) e *Tabebuia roseoalba* (F). Os dados de distribuição das espécies foram

obtidos de CRIA (2023).....90

Figura 3.2 - Representação esquemática da organização e design dos experimentos realizados a céu aberto, em Itajubá.....92

Figura 3.3 – Duração do estágio de desenvolvimento inicial (dias), variação da temperatura do ar (°C, mínima, média e máxima), precipitação acumulada (mm por data de semeadura), radiação solar global média ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e fotoperíodo médio (horas) em cada data de semeadura (DS) durante a condução dos experimentos em Itajubá. Os painéis correspondem às espécies florestais: *Bauhinia forficata* (A, B), *Ceiba speciosa* (C, D), *Handroanthus chrysotrichus* (E, F), *Handroanthus impetiginosus* (G, H) e *Tabebuia roseoalba* (I, J). Os valores das variáveis meteorológicas referem-se aos valores médios desde a emergência (EM) até o fim do estágio de desenvolvimento inicial (n). As variáveis foram registradas a partir de uma estação meteorológica automática instalada na área experimental.....95

Figura 3.4 – Valores de quadrado médio do erro (QME) obtidos a partir de regressões lineares entre o número de folhas acumuladas no caule principal (NFA) e a soma térmica acumulada (STa), calculados com uma série de valores de temperatura base (variando de 0 °C a 20 °C) para *Bauhinia forficata* (painéis A, B, C, D e E), *Ceiba speciosa* (painéis F, G, H, I e J), *Handroanthus chrysotrichus* (painéis K, L, M, N e O), *Handroanthus impetiginosus* (painéis P, Q, R e S) e *Tabebuia roseoalba* (painéis T, U, V, W e X).....100

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 - Funções de resposta à temperatura usadas no modelo do filocrono (A), dada pela soma térmica, e no modelo de Wang e Engel (B), dada pela função beta, para estimar o número de folhas acumuladas no caule principal. As setas informadas em cada painel representam os limiares térmicos de desenvolvimento inicial.....144

Figura 4.2 - Número de folhas acumuladas (NFA) estimado versus observado pelos modelos Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) para *Bauhinia forficata* (painéis A e B), *Ceiba speciosa* (painéis C e D), *Handroanthus chrysotrichus* (painéis E e F), *Handroanthus impetiginosus* (painéis G e H) e *Tabebuia roseoalba* (painéis I e J). A linha contínua é a linha 1:1.....153

Figura 4.3 - Duração do desenvolvimento inicial (DDI, dias) das DS7 a DS14 para *Bauhinia forficata* (painéis A e B), *Ceiba speciosa* (painéis C e D), *Handroanthus chrysotrichus* (painéis E e F), *Handroanthus impetiginosus* (painéis G e H) e *Tabebuia roseoalba* (painéis I e J). O valor de BIAS foi obtido pela diferença entre a DDI estimada pelos modelos FIL e WE e a observada.....155

Figura 4.4 – Ciclo mensal e anual da temperatura média do ar (Tmed, °C) simulada pelos 16 Modelos de Circulação Geral (MCGs) do conjunto de dados do NEX-GDDP-CMIP6, média do conjunto de modelos (*ensemble mean*) e dados observados disponibilizados por Xavier *et al.* (2016) para o clima atual (1995-2014).....157

Figura 4.5 – Variação temporal da temperatura média do ar simulada para o clima atual (CA = 1995-2014) e projetada para o clima futuro (futuro próximo = 2041-2060; intermediário = 2061-2080; distante = 2081-2100) para Itajubá pelos 16 modelos climáticos em três cenários socioeconômicos: SSP2-4.5 (painel A), SSP3-7.0 (painel C) e SSP5-8.5 (painel E). As linhas em negrito (preto, laranja, marrom e vermelho) representam o *ensemble mean* dos modelos climáticos. As linhas gradiente (cinza, amarelo, laranja e vermelho) representam os dados de cada MCG. Boxplot representa as diferenças entre os períodos futuros (FP, FI e FD) e clima atual (CA) em cada SSP (painel B - SSP2-4.5, painel D - SSP3-7.0 e painel F - SSP5-8.5).....158

Figura 4.6 - Duração do desenvolvimento inicial (DDI, em dias) ao longo de cada data de semeadura para *Bauhinia forficata* (painéis A, B e C), *Ceiba speciosa* (painéis D, E F), *Handroathus chrysotrichus* (painéis G, H e I), *Handroathus impetiginosus* (painéis J, K e L) e *Tabebuia roseoalba* (painéis M, N e O) simulada para o clima atual (1995 – 2014), e projetada para o futuro próximo (2041-2060), intermediário (2061-2080) e distante (2081- 2100) nos três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). As colunas verticais referem-se ao desvio padrão da DDI dos 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 para FP (preto), FI (cinza claro) e FD (cinza escuro).....165

CAPÍTULO V

Figura 5.1 – Representação esquemática das etapas de cálculo da viabilidade financeira para produzir uma muda de *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* no clima atual (CA, 1995-2014) e futuro próximo (FP, 2041-2060), intermediário (FI, 2061-2080) e distante (FD, 2081-2100) considerando a duração do desenvolvimento inicial (DDI) para cada uma das 12 datas de simulação de semeadura. *VPL = Valor Presente Líquido.....187

Figura 5.2 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Bauhinia forficata* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.....195

Figura 5.3 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Ceiba speciosa* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL

no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.....196

Figura 5.4 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Handroanthus chrysotrichus* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.....197

Figura 5.5 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Handroanthus impetiginosus* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.....198

Figura 5.6 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Tabebuia roseoalba* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.....199

Figura 5.7 – Análise de sensibilidade de cada componente dos investimentos iniciais (recipiente, substrato, fertilizante) e dos custos de operação (energia elétrica, inseticida, fungicida, depreciação e manutenção da máquina de produção dos recipientes biodegradáveis - quando aplicável) no clima atual (1995-2014, painel A), e nos períodos futuros (2041-2100) no cenário socioeconômico intermediário (SSP3-7.0) com redução (painel B) e aumento (painel C) projetado da duração do desenvolvimento inicial (DDI).....201

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.1 - Data, local e formas de coleta, beneficiamento, armazenamento e informações das sementes das espécies florestais usadas neste estudo.....35

Tabela 1.2 - Valores médios das variáveis porcentagem de emergência (EP), índice de velocidade de emergência (ESI), tempo médio de emergência (MTE) e velocidade média de emergência (MSE) das amostras de sementes das seis espécies florestais usadas neste estudo.....39

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Porcentagem de emergência (%), peso médio, tempo de armazenamento e local de coleta das sementes das espécies florestais utilizadas neste estudo e nos testes de emergência preliminares.....60

Tabela 2.2 - Data de semeadura, emergência e final do desenvolvimento inicial das espécies florestais *Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba* de experimentos realizados em Itajubá.....62

Tabela 2.3 - Codificação e descrição adaptadas aos estágios fenológicos de cinco espécies florestais nativas brasileiras (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*) durante o desenvolvimento inicial.....64

Tabela 2.4 - Escala BBCH adaptada e duração média (dias) dos estágios fenológicos para as cinco espécies florestais brasileiras (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*).....68

CAPÍTULO III

Tabela 3.1 - Comparação das médias dos valores de filocrono ($1/a$; °C dia folha⁻¹) e taxa de desenvolvimento (a ; folha °C dia⁻¹) das cinco espécies florestais estudadas ao longo das 14 datas de semeadura.....102

Tabela 3.2 - Valores estimados de temperatura base (T_b ; °C), ótima (T_{ot} ; °C), superior (T_B ; °C) e filocrono (°C dia folha⁻¹) para o desenvolvimento inicial de espécies florestais nativas brasileiras e exóticas cultivadas no Brasil.....106

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 - Data de semeadura, emergência e término do desenvolvimento inicial das espécies

florestais *Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba* do experimento realizado em Itajubá.....142

Tabela 4.2 - Coeficientes ‘a’ (modelo filocrono) e TAFmax (modelo Wang e Engel) calibrados para as cinco espécies florestais nativas, em Itajubá.....148

Tabela 4.3 - Desempenho dos modelos Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) em estimar o número de folhas acumuladas (NFA) para as cinco espécies florestais nativas em Itajubá.....150

Tabela 4.4 - Comparação de médias para a duração da fase de muda (DFM, em dias) para *Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*, considerando as simulações realizadas para o clima atual (CA = 1995-2014) e as projeções para o clima futuro (FP = 2041-2060, FI = 2061-2080 e FD = 2081-2100) para as 14 datas de semeadura simuladas em três cenários socioeconômicos (SSP 2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para Itajubá.....160

CAPÍTULO V

Tabela 5.1 - Descrição, especificação e valor (R\$, em reais) dos itens que compõem os investimentos iniciais e custos de operação para produzir 01 muda das espécies florestais *Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba* em viveiro florestal.....185

Tabela 5.2 - Datas de semeadura (DS), emergência e duração do desenvolvimento inicial (DDI, dias) para as cinco espécies florestais nativas (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*) usadas para simular o Valor Presente Líquido (VPL) no clima atual (CA -1995-2014) e projetar no futuro próximo (FP, 2041-2060), intermediário (FI, 2061-2080) e distante (FD, 2081-2100) nos três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Os valores de DDI referem-se a média (*ensemble mean*) dos valores de DDI simulados e projetados pelos 16 modelos climáticos do NEX-GGDP-CMIP6 (Capítulo IV).....188

Tabela 5.3 - Diferença (em dias) entre a duração do desenvolvimento inicial (DDI) projetada no futuro próximo (FP, 2041-2060), intermediário (FI, 2061-2080) e distante (FD, 2081 - 2100) e a DDI simulada para o clima atual (1995 – 2014) para as espécies florestais estudadas (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*) nos três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5).....191

LISTA DE APÊNDICES

CAPÍTULO III

- Apêndice 3.1** - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Bauhinia forficata*.....117
- Apêndice 3.2** - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Ceiba speciosa*.....118
- Apêndice 3.3** - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Handroanthus chrysotrichus*.....119
- Apêndice 3.4** - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Handroanthus impetiginosus*.....120
- Apêndice 3.5** - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Tabebuia roseoalba*.....121
- Apêndice 3.6** - Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar (mínima, média e máxima) nas 14 épocas de semeadura de *Bauhinia forficata*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.....122
- Apêndice 3.7** - Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar (mínima, média e máxima) nas 14 épocas de semeadura de *Ceiba speciosa*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.....124
- Apêndice 3.8** - Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar (mínima, média e máxima) nas 14 datas de semeadura de *Handroanthus chrysotrichus*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.....126
- Apêndice 3.9** - Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar (mínima, média e máxima) nas 14 datas de semeadura de *Handroanthus impetiginosus*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.....128
- Apêndice 3.10** - Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar

(mínima, média e máxima) nas 14 datas de semeadura de *Tabebuia roseoalba*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.....130

Apêndice 3.11 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta-1) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS12 de *Bauhinia forficata*. Cada painel representa dados de uma única repetição. R^2 ajustado é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.....132

Apêndice 3.12 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta-1) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS12 de *Ceiba speciosa*. Cada painel representa dados de uma única repetição. R^2 ajustado é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.....133

Apêndice 3.13 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta-1) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS12 de *Handroanthus chrysotrichus*. Cada painel representa dados de uma única repetição. R^2 ajustado é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.....134

Apêndice 3.14 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta-1) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS11 de *Handroanthus impetiginosus*. Cada painel representa dados de uma única repetição. R^2 ajustado é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.....135

Apêndice 3.15 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta-1) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS12 de *Tabebuia roseoalba*. Cada painel representa dados de uma única repetição. R^2 ajustado é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.....136

CAPÍTULO IV

Apêndice 4.1 - Variação temporal da duração desenvolvimento inicial (DDI, em dias) simulada para o clima atual (CA = 1995-2014) e projetada para o clima futuro (FP = 2041-2060, FI = 2061-2080 e FD = 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) por 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 para *Bauhinia forficata* (painel A),

Ceiba speciosa (painel B), *Handroanthus chrysotrichus* (painel C), *Handroanthus impetiginosus* (painel D) e *Tabebuia roseoalba* (painel E). As linhas cinza, amarelo, laranja e vermelho mais claras representam a DDI para cada modelo climático e as linhas em negrito preto, laranja, marrom e vermelho representam a média da DDI dos modelos climáticos.....179

Apêndice 4.2 - Valores do teste-F obtidos da ANOVA para as espécies florestais estudadas.....180

CAPÍTULO V

Apêndice 5.1 - Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Bauhinia forficata* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.....210

Apêndice 5.2 - Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Ceiba speciosa* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.....216

Apêndice 5.3 - Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Handroanthus chrysotrichus* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.....222

Apêndice 5.4 - Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Handroanthus impetiginosus* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.....228

Apêndice 5.5 - Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Tabebuia roseoalba* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.....233

LISTA DE ANEXOS

CAPÍTULO IV

Anexo 4.1 - Lista de modelos do NEX-GDDP (CMIP6) utilizados nas simulações e projeções do desenvolvimento inicial das cinco espécies florestais estudadas e seus respectivos centros desenvolvedores.....	181
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a - coeficiente do modelo Filocrono

ANOVA - análise de variância

BBCH - *B*iologische Bundesanstalt, *B*undessortenamt and *C*hemical industry

CA - clima atual

CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais

CMIP - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

CMIP6 - *Coupled Models Intercomparison Project Phase 6*

co - cotilédone

CO₂ - dióxido de carbono

DP - desvio padrão

DS - data de semeadura

EM - data de emergência

em – embrião

eo - eófilo

ep - epicótilo

EP - porcentagem de emergência

ESI - índice de velocidade de emergência

$f(T)$ - função beta de temperatura do ar (modelo Wang e Engel)

FD - futuro distante (2081-2100)

FI - futuro intermediário (2061-2080)

FP - futuro próximo (2041-2060)

H₀ - hipótese nula

H₁ - hipótese alternativa

hp - hipocótilo

HSPs - proteínas de choque térmico

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IUCN - *International Union for Conservation of Nature's*

KMO - índice de Kaiser-Meyer-Olkin

LSD - teste de diferença mínima significativa

MCG - Modelo de Circulação Geral

me - metáfilo

MSE - velocidade média de emergência

MTE - tempo médio de emergência
n - data de término do desenvolvimento inicial
NCCS - *NASA Center for Climate Simulation*
NDA - número do dia do ano
NEX-GDDP - *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*
NF - número de folhas
NFA - número de folhas acumuladas no caule principal
PANCs - plantas alimentícias não convencionais
PC1 - primeira componente principal
PC2 - segunda componente principal
PCA - análise de componentes principais
Ph - fotoperíodo
pk - acúleos
Pr - precipitação acumulada
pr - raiz primária
QME - quadrado médio do erro
r - correlação de Pearson
 R^2 - coeficiente de determinação
 R^2_{ajustado} - coeficiente de determinação ajustado
RCP - *Representative Concentration Pathways*
RENISUS - Relação Nacional de Plantas Medicinais de Interesse ao Sistema Único de Saúde
Rh - umidade relativa do ar
RQME - raiz do quadrado médio do erro
Rs - radiação solar global
RuBisCO - enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase
se - semente
sp - espinhos
sr - raiz secundária
SSP - *Shared Socioeconomic Pathways*
SST - tempo de armazenamento das sementes
ST - soma térmica
STa - soma térmica acumulada
STd - soma térmica diária
TAFmax - coeficiente do modelo Wang e Engel

Tb - temperatura base

TB - temperatura superior

Tmax - temperatura máxima do ar

Tmed - temperatura média do ar

Tmin - temperatura mínima do ar

Tot - temperatura ótima

tr - tricomas

VPL - Valor Presente Líquido

wi - asa

α - coeficiente alfa da função beta de temperatura do ar

B - valor do teste de Bartlett

Δ - Valor do teste Tukey

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	28
CAPÍTULO I.....	30
1.1. INTRODUÇÃO.....	30
1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
1.2.1. Informações das sementes e design experimental.....	34
1.2.2. Variáveis medidas.....	37
1.2.3. Abordagem estatística: análise de componentes principais.....	38
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
1.4. CONCLUSÃO.....	48
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
CAPÍTULO II.....	56
2.1. INTRODUÇÃO.....	56
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	59
2.2.1. Design experimental e descrição dos dados.....	59
2.2.2. Adaptação da escala BBCH para cinco espécies florestais nativas brasileiras.....	64
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
2.3.1. Estágio de desenvolvimento principal 0: germinação.....	68
2.3.2. Estágio de desenvolvimento principal 1: desenvolvimento foliar.....	71
2.3.2.1. <i>Bauhinia forficata</i>	71
2.3.2.2. <i>Ceiba speciosa</i>	73
2.3.2.3. <i>Handroanthus chrysotrichus</i>	74
2.3.2.4. <i>Handroanthus impetiginosus</i>	76
2.3.2.5. <i>Tabebuia roseoalba</i>	77
2.4. CONCLUSÃO.....	81
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
CAPÍTULO III.....	87
3.1. INTRODUÇÃO.....	87
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	91
3.2.1. Dados de desenvolvimento e design experimental.....	91
3.2.2. Temperatura base (Tb).....	92
3.2.3. Temperatura ótima (Tot) e obtenção do requerimento térmico.....	93
3.2.4. Temperatura superior (TB).....	94
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	94
3.4. CONCLUSÃO.....	110
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
APÊNDICES DO CAPÍTULO III.....	117
CAPÍTULO IV.....	137
4.1. INTRODUÇÃO.....	137
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	140
4.2.1. Dados e descrição dos modelos de desenvolvimento.....	141
4.2.2. Calibração e avaliação do desempenho dos modelos FIL e WE.....	144
4.2.3. Identificação dos impactos das projeções de temperatura do ar na duração do	

desenvolvimento inicial.....	146
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	148
4.3.1. Calibração e avaliação do desempenho dos modelos de desenvolvimento inicial.....	148
4.3.2. Validação, simulação e projeções da Tmed e DDI.....	156
4.3.3. Medidas adaptativas para lidar com os impactos das projeções de temperatura no desenvolvimento inicial.....	169
4.4. CONCLUSÃO.....	171
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172
APÊNDICES DO CAPÍTULO IV.....	179
ANEXOS DO CAPÍTULO IV.....	181
CAPÍTULO V.....	182
5.1. INTRODUÇÃO.....	182
5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	183
5.2.1. Cálculo da viabilidade financeira para produzir uma muda.....	183
5.2.2. Avaliação da viabilidade financeira e sensibilidade para produzir uma muda no clima futuro.....	190
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	190
5.4. CONCLUSÃO.....	204
5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	205
APÊNDICES DO CAPÍTULO V.....	210
CONCLUSÃO GERAL.....	239
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL.....	241

INTRODUÇÃO GERAL

Há um consenso da comunidade científica de que os aumentos de temperatura projetados para ocorrer ao longo do século XXI podem trazer ameaças adicionais ao desenvolvimento de espécies florestais (Costa; Streck, 2018; Elli *et al.*, 2020; Fagundes *et al.*, 2021; Reis *et al.*, 2021). No entanto, os impactos específicos dessas projeções sobre espécies florestais ainda são pouco compreendidos, especialmente durante o desenvolvimento inicial das plantas. Esse estágio, considerado o mais sensível do desenvolvimento vegetativo, apresenta menor tolerância às variações térmicas e aos eventos climáticos extremos, tornando essencial a investigação de seus limites fisiológicos (Bahuguna; Jagadish, 2015; Fagundes *et al.*, 2024; Martins *et al.*, 2024).

No contexto das mudanças climáticas, o Brasil assumiu compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, firmado durante a 21ª Conferência das Partes (COP-21), em 2015. Esse acordo estabeleceu como meta limitar o aumento médio global da temperatura a $\leq 2^{\circ}\text{C}$ até o final do século XXI (UNFCCC, 2015). Para alcançar esse objetivo, foram definidas várias estratégias de mitigação voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) provenientes de atividades humanas e ao aumento da captura de carbono atmosférico (Griscom *et al.*, 2017).

Entre as medidas previstas na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil no âmbito do Acordo de Paris, destaca-se a restauração e o reflorestamento de 12 milhões de hectares até 2030 (Brasil, 2017). Essa meta é operacionalizada pelo Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg), principal instrumento da Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa, instituída pelo Decreto nº 8.972, de 23 de janeiro de 2017 (Brasil, 2017). Para assegurar a continuidade dos esforços iniciados em 2017 e fortalecer o compromisso político com essa meta, foi estabelecido um novo marco estratégico para o Planaveg no período de 2025-2028, por meio da Resolução CONAVEG nº 4, de 25 de novembro de 2024 (Brasil, 2024).

O cumprimento dessa meta exige um aumento significativo na produção de mudas de espécies nativas, essenciais para a implementação de projetos de restauração florestal. A restauração é amplamente reconhecida como uma das estratégias mais eficazes e economicamente viáveis para mitigar os impactos da crise climática (Batista *et al.*, 2021). No entanto, apesar da urgência dessa demanda, as pesquisas relacionadas ao processo de produção de mudas ainda são insuficientes para atender a crescente demanda (Alves; Freire, 2017). Diferentemente das espécies cultivadas para fins comerciais, há uma carência significativa de

informações sobre o potencial germinativo, o comportamento fenológico e os limiares térmicos de desenvolvimento das espécies florestais nativas (Fagundes *et al.*, 2021; Reis *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, a realização desta tese justifica-se pela escassez de informações básicas sobre o desenvolvimento de espécies florestais nativas brasileiras em condições de clima atual e pela necessidade urgente de respostas sobre as possíveis alterações no desenvolvimento dessas espécies em condições de clima futuro. As questões abordadas são centradas nas espécies florestais nativas *Bauhinia forficata* Link, *Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna, *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos e *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith, como: I) Quais fatores influenciam a viabilidade das sementes dessas espécies florestais? II) Quais os limiares e exigências térmicas no desenvolvimento inicial de cada espécie? III) Modelos de desenvolvimento como Filocrono e Wang e Engel são capazes de simular adequadamente o desenvolvimento inicial e a duração do desenvolvimento inicial destas espécies nas condições climáticas atuais? IV) Como as projeções de temperatura do ar de modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 podem afetar o desenvolvimento dessas espécies comparados ao clima atual? V) Caso o desenvolvimento e a duração do desenvolvimento inicial sejam afetados, quais as medidas de adaptação mais eficazes? VI) Qual é o impacto financeiro das projeções de aumento da temperatura e medidas de adaptação na produção de mudas dessas espécies nos viveiros florestais?

Para responder a essas questões, esta tese foi organizada em cinco capítulos. O **Capítulo I** teve como objetivo analisar a influência de variáveis meteorológicas e armazenamento sobre a viabilidade das sementes das cinco espécies florestais - e incluindo a espécie exótica *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. - por meio da análise de componentes principais. O **Capítulo II** objetivou adaptar a escala fenológica BBCH para descrever o desenvolvimento inicial das cinco espécies nativas. O **Capítulo III** objetivou estimar os limiares e o requerimento térmico para o desenvolvimento inicial dessas espécies. O **Capítulo IV** objetivou calibrar e avaliar o desempenho dos modelos de desenvolvimento Filocrono e Wang e Engel em estimar o desenvolvimento inicial das cinco espécies, identificar os impactos dos aumentos da temperatura do ar projetados na duração do desenvolvimento inicial e propor medidas adaptativas. E o **Capítulo V** objetivou avaliar a viabilidade financeira da produção de mudas das cinco espécies considerando as medidas de adaptação necessárias ao longo do século XXI, baseada no Valor Presente Líquido (VPL).

CAPÍTULO I

VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E TEMPO DE ARMAZENAMENTO NA VIABILIDADE DE SEMENTES DE ESPÉCIES FLORESTAIS BRASILEIRAS: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA

1.1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o segundo país com a maior extensão de área florestal do mundo, abrigando a maior porção de floresta tropical do planeta (FAO, 2020). Atualmente, a área coberta com florestas abrange aproximadamente 488 milhões de hectares, sendo 98% de espécies nativas e 2% de espécies exóticas (SBF, 2020).

Existem cerca de 7900 espécies florestais nativas distribuídas nos biomas brasileiros - Amazônia, Mata Atlântica, Caatinga, Cerrado, Pampa e Pantanal - (Oliveira *et al.*, 2022; SNIF, 2023; Tormes *et al.*, 2022), as quais são pertencentes a várias famílias botânicas, com destaque para Bignoniaceae Juss., Fabaceae Lindl. e Malvaceae Juss.. Tais famílias apresentam grande diversidade em número de espécies, com particularidades em termos genéticos e reprodutivos. Além disso, incluem espécies florestais representativas para esses biomas, e que possuem grande potencial para uso medicinal, industrial, madeireiro, paisagístico e ornamental (Mattos *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2019). Ao mesmo tempo, possuem inúmeras espécies classificadas pela *International Union for Conservation of Nature's* (IUCN) *Red List* como quase ameaçadas, vulneráveis, em perigo ou criticamente em perigo (IUCN, 2021).

Dentre as diversas espécies florestais pertencentes às famílias acima mencionadas, seis merecem destaque: *Bauhinia forficata* Link, *Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna, *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. e *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith) dada a importância ecológica, econômica, medicinal e industrial. Informações sobre as espécies e suas distribuições nos biomas brasileiros podem ser visualizadas na Figura 1.1.

A



Bauhinia forficata Link

Família: Fabaceae.

Nome comum: pata-de-vaca, bauínia.

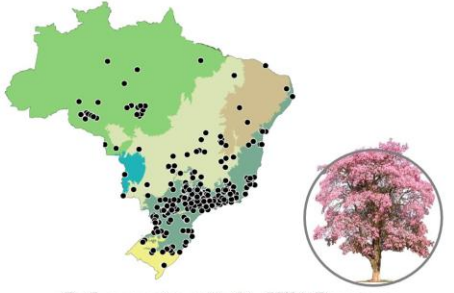
Origem e endemismo: Brasil; não é endêmica do Brasil

Ecologia: pioneira a secundária inicial, heliófila, semicaducifolia, crescimento moderado (atinge 10 m de altura).

Importância ecológica: néctar das flores é alimento para morcegos, principais polinizadores da espécie.

Usos múltiplos: fins medicinais (antidiabéticos), paisagísticos, plantio em áreas degradadas. Madeira de baixa densidade ($0,66 \text{ g.cm}^{-3}$) e durabilidade, é utilizada em obras internas na construção civil.

B



Ceiba speciosa (A.St.-Hil.) Ravenna

Família: Malvaceae.

Nome comum: paineira, paineira-rosa, barriguda.

Origem e endemismo: Brasil; não é endêmica do Brasil.

Ecologia: pioneira, heliófila, caducifolia, crescimento rápido a moderado (atinge 30 m de altura).

Importância ecológica: flores e néctar são alimentos para insetos polinizadores e diversas aves. Sua paina (fibra natural) é utilizada pelos pássaros na construção de ninhos.

Usos múltiplos: fins medicinais (queimaduras, asma e tosse), paisagísticos, plantio em áreas degradadas. Madeira leve ($0,22$ a $0,34 \text{ g.cm}^{-3}$), é utilizada em aeromodelos e flutuadores. A paina é utilizada para enchimento de travesseiros e colchões.

C



Handroanthus chrysotrichus (Mart. ex DC.) Mattos

Família: Bignoniaceae.

Nome comum: ipê-amarelo, ipê-amarelo-cascudo.

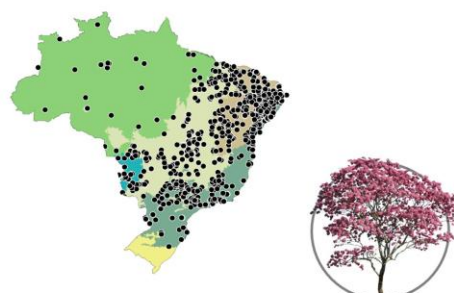
Origem e endemismo: Brasil; não é endêmica do Brasil

Ecologia: secundária tardia, heliófila, caducifolia, crescimento lento (atinge 30 m de altura).

Importância ecológica: flores e néctar são alimentos para insetos polinizadores, pássaros e pequenos mamíferos.

Usos múltiplos: fins medicinais (casca com substâncias de ação antitumoral e analgésica, atuando também diretamente na síntese do DNA de *Trypanosoma cruzi*, causador da doença de chagas), paisagísticos e para recuperação de áreas degradadas. Madeira de alta densidade ($1,05 \text{ g.cm}^{-3}$), durabilidade e resistência. É usada na construção civil, e em estruturas externas como postes, pontes e cercas.

D



Handroanthus impetiginosus (Mart. ex DC.) Mattos

Família: Bignoniaceae.

Nome comum: ipê-roxo-de-bola, ipê-roxo.

Origem e endemismo: Brasil; não é endêmica do Brasil

Ecologia: secundária, heliófila, caducifolia, crescimento lento a moderado (atinge 35 m de altura).

Importância ecológica: flores e néctar são alimentos para insetos polinizadores, pássaros e pequenos mamíferos.

Usos múltiplos: fins medicinais (casca com substâncias de ação anti-inflamatória, antioxidante, diurética e antissifilítica), paisagísticos e para recuperação de áreas degradadas. Madeira de alta densidade ($0,92$ a $1,08 \text{ g.cm}^{-3}$), durabilidade e resistência. É usada na construção civil, hidráulica, naval e rural.

continua...

...continuação

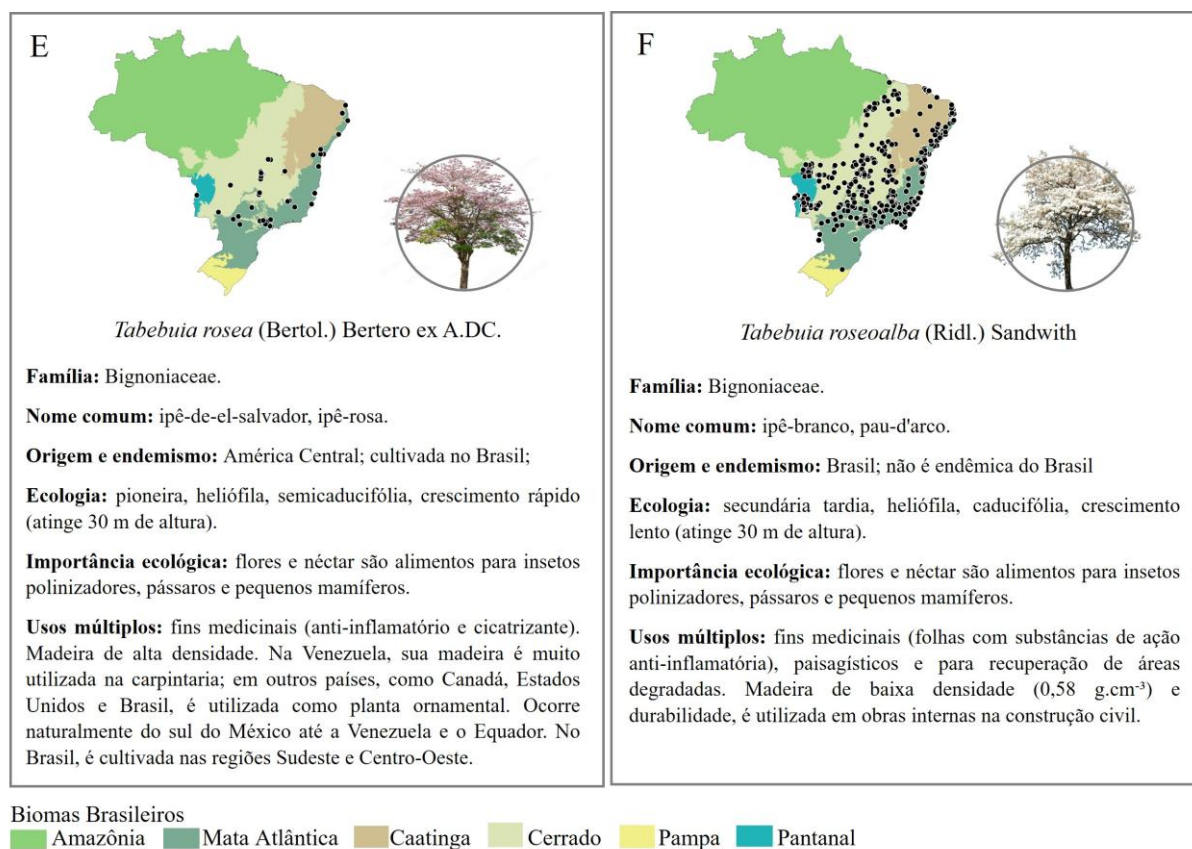


Figura 1.1 - Características gerais, usos (atual e potencial) e distribuição das seis espécies florestais: *B. forficata* (A), *C. speciosa* (B), *H. chrysotrichus* (C), *H. impetiginosus* (D), *T. rosea* (E) e *T. roseoalba* (F) nos biomas brasileiros. Fonte: Os dados de distribuição das espécies florestais foram obtidos de CRIA (2023). As informações sobre as espécies foram obtidas de múltiplas fontes e estão disponíveis em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14648502>.

Exceto *T. rosea* - espécie cultivada no Brasil -, essas espécies florestais ocorrem naturalmente em praticamente todos os biomas brasileiros, especialmente Mata Atlântica e Cerrado, que vem sofrendo severas ameaças de pressões climáticas, antropogênicas e de uso e ocupação do solo (Lima *et al.*, 2024; RAD, 2024; Silva *et al.*, 2019). Além disso, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* são classificadas pela IUCN como quase ameaçada e a *H. chrysotrichus* como vulnerável (IUCN, 2021) devido a exploração insustentável de madeira e declínio significativo de populações. Existem relatos de extração e comércio ilegal dessas espécies no Brasil, e fortes evidências de fraudes em licenças de exploração madeireira (CNCFlora, 2012; Hills, 2021a, 2021b; IUCN, 2021). Além disso, a perda de habitat causada pelos incêndios florestais, expansão de terras agrícolas para monocultura e conversão em pastagens para o gado (RAD, 2024; Silva *et al.*, 2019) têm impulsionado a redução (em área e

número de indivíduos) destas espécies, assim como a *B. forficata*, *C. speciosa* e *H. chrysotrichus*.

Esforços para reduzir tais impactos negativos e atender a demandas crescentes de restauração florestal passa pela produção de mudas em viveiros florestais seguida de plantios em larga escala (Fagundes *et al.*, 2024a; Silva *et al.*, 2017). Por exemplo, para cumprir os compromissos internacionais, o governo brasileiro se comprometeu a apoiar a restauração de 12 milhões de ha até 2030 por meio da Política Nacional de Restauração (Decreto 8972/2017) (Schmidt *et al.*, 2019). No Brasil, a maioria dos programas de restauração de florestas tropicais usa mudas produzidas em viveiros (Souza; Engel, 2018). E nesse sentido, a demanda de mudas para restauração florestal supera a capacidade atual para a produção de mudas de sementes nativas, que varia entre 17 a 29 t ano⁻¹ (Schmidt *et al.*, 2019).

A produção de mudas de espécies florestais é complexa, pois a principal forma de propagação é feita (e recomendada) por sementes (Bezerra *et al.*, 2022; Brockerhoff *et al.*, 2017; Matos *et al.*, 2015). Os desafios compreendem questões práticas relacionadas à indisponibilidade de sementes, períodos reduzidos de dispersão, diferentes síndromes de dispersão de sementes (Lavôr *et al.*, 2023; Martins *et al.*, 2023a), perda de viabilidade das sementes ao longo do tempo (Leão *et al.*, 2015; Martins *et al.*, 2023b), problemas no armazenamento de sementes, como ataque de patógenos ou impurezas dentro dos lotes das sementes (Fagundes *et al.*, 2024a; Leão *et al.*, 2015; Moraes Neto, 2021) e sementes difíceis de germinar (Martins *et al.*, 2023a). Além disso, questões relacionadas à fisiologia das sementes, eficiência de polinizadores, ou fatores genéticos e abióticos podem influenciar a variação anual da produção (Lorenzi, 2016; Moraes Neto, 2021; Parisi *et al.*, 2019) e dificultar a obtenção de semente e a produção de mudas. Ou seja, a produção de mudas de espécies nativas é mais difícil, demorada e mais cara comparada as espécies exóticas ou comerciais (Silva *et al.*, 2017).

Com relação aos fatores abióticos, as variáveis meteorológicas prevaletentes nos momentos de maturação dos frutos ou dispersão das sementes, como temperatura do ar, fotoperíodo, radiação solar e umidade do ar e precipitação, podem influenciar a maturação fisiológica das sementes (Garwood *et al.*, 2023; Medeiros *et al.*, 2023; Pereira *et al.*, 2017; Segrestin *et al.*, 2018) que por sua vez irá interferir na capacidade de germinação e no crescimento das mudas. Por exemplo, maior temperatura do ar e precipitação favorecem o desenvolvimento/maturação dos frutos/sementes de *Sideroxylon obtusifolium* (Roem. & Schult.) T. D. Penn. (Gomes *et al.*, 2008). Para *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bureau ex Verl., o potencial fisiológico das sementes aumenta em temperaturas entre 25 e 30 °C (Medeiros *et al.*,

2023). Cabe ressaltar, que o processo de maturação fisiológica, principalmente em espécies de ipês, pode ocorrer antes da dispersão das sementes, resultando em perda gradativa da viabilidade das sementes ainda dentro do fruto, quando as condições meteorológicas não são adequadas. Por exemplo, a maior porcentagem de germinação da *H. chrysotrichus* (74,5%) foi observada em frutos coletados uma semana antes da dispersão, ou seja, na oitava semana após a abertura dos botões florais (Fonseca *et al.*, 2005).

Apesar de tais dificuldades, a produção de mudas de espécies florestais a partir de sementes deve ser parte integrante de projetos de restauração florestal, uma vez que garante maior diversidade genética, plasticidade para as populações futuras e sustentação do funcionamento ecossistêmico das florestas restauradas (Silva *et al.*, 2017). Portanto, estudos que proporcionem uma maior compreensão sobre como as condições meteorológicas influenciam a qualidade e viabilidade das sementes dessas espécies são necessários, principalmente nos períodos de maturação e dispersão das sementes. Informações dessa natureza são valiosas, pois permitem aos viveiristas otimizar a produção, garantindo maior qualidade das mudas e sobrevivência no campo. Estudos dessa natureza são escassos, e os poucos realizados em espécies florestais brasileiras se limitam em avaliar a viabilidade das sementes por meio de testes de germinação *in vitro* ou em câmaras de crescimento (Medeiros *et al.*, 2023; Sasaya *et al.*, 2020; Stockman *et al.*, 2007). Diante dessa lacuna, este estudo buscou analisar a influência das variáveis meteorológicas e o tempo de armazenamento sobre a viabilidade das sementes das espécies florestais *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus*, *T. rosea* e *T. roseoalba* em condições mais próximas das condições reais de campo, representando uma abordagem inovadora e de grande relevância prática.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. Informações das sementes e design experimental

As sementes utilizadas neste estudo foram gentilmente cedidas por instituições públicas e empresas privadas de seis localidades brasileiras. Ou seja, as sementes foram provenientes de múltiplas localidades, coletadas em diferentes períodos de dispersão e de diferentes matrizes (isoladas e agrupadas) (Tabela 1.1 e Figura 1.2), cobrindo uma ampla gama de gradiente geográfico, condições meteorológicas e genéticas.

Tabela 1.1 - Data, local e formas de coleta, beneficiamento, armazenamento e informações das sementes das espécies florestais usadas neste estudo.

Amostra		Datas de coleta e tempo de armazenamento ¹	Local de coleta	Armazenamento ^{2,3}	Fornecedor	Peso médio de mil sementes (g) ⁴ , tipo da semente e germinação
<i>Bauhinia forficata</i>	A1	Maio, 2021 333 dias	Santa Maria RS	Câmara fria. Tmed ~ 6 - 9 °C Rh 35 %	Centro Estadual de Diagnóstico e Pesquisa Florestal - Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul	113,0; semente ortodoxa; germinação epígea
	A2	Maio, 2022 205 dias				
<i>Ceiba speciosa</i>	A1	Junho, 2018 1428 dias	Rio das Pedras SP	Câmara fria. Tmed ≤ 10 °C Rh 50 %	Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF)	94,9; semente ortodoxa; germinação epígea
	A2	Agosto, 2021 256 dias	Porto Feliz SP	Câmara fria. Tmed ~ 6 - 7 °C Rh ~ 30 - 50 %	Instituto Refloresta	
<i>Handroanthus chrysotrichus</i>	A1	Outubro, 2021 193 dias	Santa Maria RS	Câmara fria. Tmed ~ 6 - 9 °C Rh 35 %	Centro Estadual de Diagnóstico e Pesquisa Florestal - Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul	10,3; semente ortodoxa; germinação epígea
	A2	Setembro, 2022 312 dias	Itajubá MG	Câmara fria. Tmed ~ 3 - 5 °C Rh ~ 50 %	Coleta em matrizes localizadas no centro urbano	
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	A1	Outubro, 2021 231 dias	Seropédica RJ	Câmara fria. Tmed ≤ 10 °C Rh ~ 50 - 65 %	Instituto de Florestas - Universidade Federal do Rio de Janeiro	104,3; semente ortodoxa; germinação epígea
	A2	Agosto, 2019 1002 dias	Lavras MG	Câmara fria. Tmed ≤ 10 °C Rh ~ 30 – 50 %	Departamento de Engenharia Florestal – Universidade Federal de Lavras	
<i>Tabebuia rosea</i>	A1	Dezembro, 2022 00 dias	Itajubá MG	Semeadura realizada na mesma data da coleta.	Universidade Federal de Itajubá	--- semente ortodoxa; germinação epígea
	A2	Dezembro, 2022 224 dias		Câmara fria. Tmed ~ 3 - 5 °C Rh ~ 50 %		
<i>Tabebuia roseoalba</i>	A1	Outubro, 2019 1156 dias	Seropédica RJ	Câmara fria. Tmed ≤ 10 °C Rh ~ 50 - 65 %	Instituto de Florestas – Universidade Federal do Rio de Janeiro	13,4; semente ortodoxa; germinação epígea
	A2	Outubro, 2021 204 dias	Porto Feliz SP	Câmara fria. Tmed ~ 6 - 7 °C Rh ~ 30 - 50 %	Instituto Refloresta	

¹Tempo de armazenamento das amostras de sementes contabilizado desde a data da coleta até a data em que foram conduzidos os testes de emergência; ²coleta e beneficiamento das sementes: frutos coletados no início da deiscência e secos ao sol; ³após recebimento das amostras, as sementes foram armazenadas em câmara fria (Tmed ~ 3 - 5 °C e Rh ~ 50 %). Tmed = temperatura média do ar (°C); Rh = umidade relativa (%); ⁴Peso médio de mil sementes (Almeida, 2021; Felix *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2007; Maeda; Matthes, 1984; Missio *et al.*, 2021).

Para avaliar a viabilidade das sementes foram realizados testes de emergência em três períodos distintos de avaliação. O primeiro foi instalado em 29/04/2022 (Teste A), o segundo em 21/12/2022 (Teste B) e o terceiro em 01/08/2023 (Teste C), devido à disponibilidade e datas de recebimento das amostras de sementes no local de estudo (Figura 1.2).

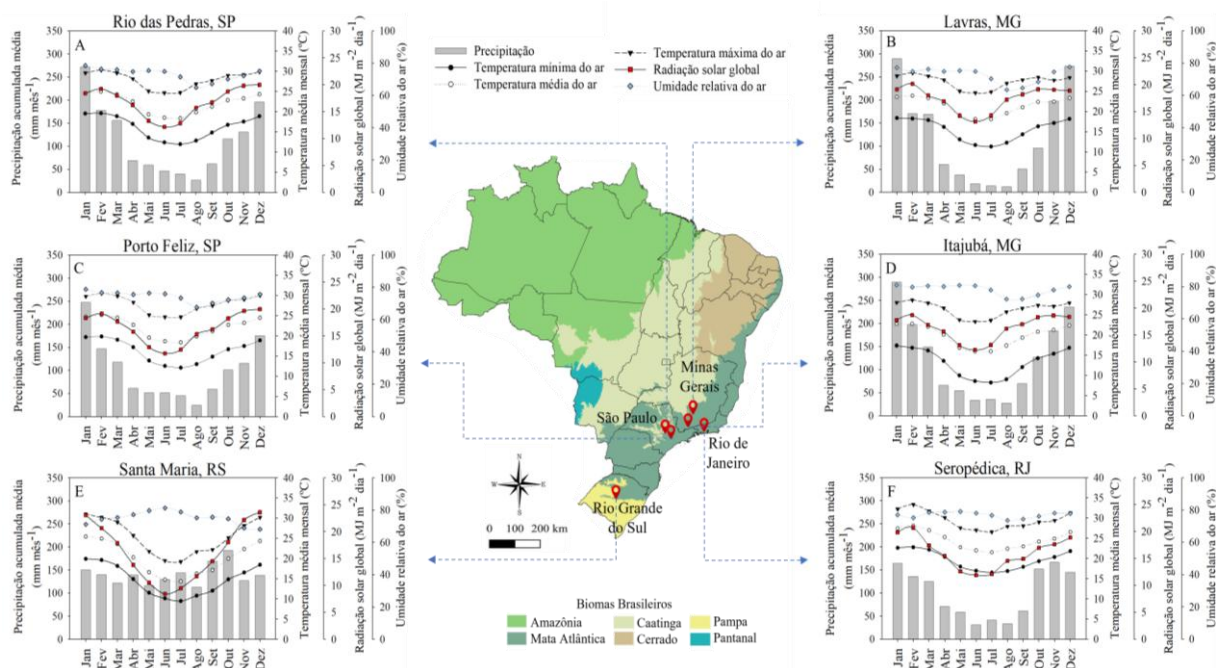


Figura 1.2 - Localização das áreas de coleta das sementes e médias mensais climatológicas para temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$, mínima, média e máxima), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), umidade relativa do ar (%) e precipitação acumulada (mm mês^{-1}) para 1995 a 2014. Os valores médios mensais de temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e precipitação foram calculados usando um conjunto de dados meteorológicos em grade de alta resolução espacial ($0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ latitude/longitude) fornecido por Xavier *et al.* (2016), disponível em <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>.

Os testes foram conduzidos na casa de vegetação do Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá sob o delineamento inteiramente casualizado com sementes de seis espécies florestais (*B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus*, *T. rosea* e *T. roseoalba*) semeadas em quatro tipos de substrato: solo (latossolo vermelho distrófico típico, coletado do horizonte 'A' moderado, em Itajubá-MG), areia, vermiculita e uma mistura (solo, areia e vermiculita em iguais proporções) e três repetições (repetições = bandejas de plástico transparente de dimensões 5 x 15 x 22 cm). Em cada repetição foram semeadas ~10 sementes de cada espécie.

Optamos pelo uso desses substratos pois são comumente utilizados na produção de mudas e em testes de emergência de sementes de espécies florestais (Cetnarski Filho; Carvalho,

2009; Grzybowski *et al.*, 2022; Labre *et al.*, 2022). Em todos os substratos, as sementes foram colocadas em profundidade uniforme de ~1,5 cm.

1.2.2. Variáveis medidas

Foram contabilizadas diariamente o número de plântulas emergidas desde a data de semeadura até a data em que não foi observada nenhuma emergência por, pelo menos, cinco dias consecutivos. A data de emergência foi considerada como o dia em que cada plântula emergiu do substrato e pôde ser vista a olho nu de um ângulo qualquer (Biezu *et al.*, 2017).

A partir do número de plântulas emergidas foram medidas as variáveis: porcentagem de emergência (EP; %), índice de velocidade de emergência (ESI, adimensional), tempo médio de emergência (MTE; dia) e velocidade média de emergência (MSE; dia⁻¹), calculadas por (Cetnarski Filho; Carvalho, 2009; Labouriau, 1983; Maguire, 1992):

$$EP = \left(\frac{N}{100} \right) \cdot 100 \quad (1.1)$$

em que: N = número total de sementes emergidas ao final do teste de emergência.

$$ESI = \sum \left(\frac{n_1}{t_1} + \frac{n_2}{t_2} + \frac{n_3}{t_3} + \dots + \frac{n_i}{t_i} \right) \quad (1.2)$$

$$MTE = \frac{\sum (n_i \cdot t_i)}{\sum N} \quad (1.3)$$

em que: n_i = número de sementes emergidas contabilizadas diariamente; t_i = número de dias consecutivos desde a semeadura à última contagem; N = número total de sementes emergidas contabilizadas no último dia do experimento.

$$MSE = \frac{1}{MTE} \quad (1.4)$$

em que: MTE= tempo médio de emergência, obtido pela equação 1.3.

Todas as variáveis acima mencionadas (equações 1.1 a 1.4) foram submetidas à análise de variância (ANOVA) para checar o melhor substrato para cobertura das sementes ($p \leq 0,05$), seguido de comparação de médias pelo teste Skott-Knott ($p \leq 0,05$). Também foram consideradas as variáveis tempo de armazenamento das sementes (SST; dia⁻¹) (Tabela 1.1), temperatura mínima (Tmin; °C), média (Tmed; °C) e máxima do ar (Tmax; °C), radiação solar global (Rs; MJ m⁻² dia⁻¹), umidade relativa do ar (Rh; %), fotoperíodo (Ph; horas dia⁻¹) e

precipitação acumulada (Pr; mm dia⁻¹). Essas variáveis meteorológicas diárias compreenderam o período de 180 dias anteriores à data da coleta das sementes, visando englobar os estágios de início da floração, frutificação, maturação dos frutos e dispersão das sementes. Os dados de Tmin, Tmed, Tmax, Rs, Rh e Pr foram obtidos de estações meteorológicas automáticas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas próximas aos locais da coleta das sementes (disponível em <https://bdmep.inmet.gov.br/>).

O Ph diário foi obtido pelo algoritmo de Keisling (1982):

$$Ph = \frac{2}{15} \cdot \arccos (\cos \alpha \cdot \sec \varphi \cdot \sec \delta - \tg \varphi \cdot \tg \delta) \quad (1.5)$$

$$\alpha = 90 + B \quad (1.6)$$

$$\delta = \arcsen (0,39779) \cdot \sen \lambda \quad (1.7)$$

$$\lambda = M + 1,916 \cdot \sen M + 0,020 \cdot \sen 2M + 282,565 \quad (1.8)$$

$$M = 0,985600 \cdot NDA - 3,251 \quad (1.9)$$

em que: Ph = fotoperíodo diário (horas); α = ângulo zenital (graus); φ = latitude (graus); δ = declinação solar (graus e décimos); B = ângulo abaixo do plano do horizonte (6°); 0,39779 = seno de 23°27' (23,45°), M = anomalia solar média (graus) e NDA = número do dia do ano (entre 1 e 365/366).

1.2.3. Abordagem estatística: análise de componentes principais (PCA)

Para identificar como as variáveis meteorológicas e a duração de armazenamento são relacionadas com a viabilidade das sementes das espécies florestais, utilizou-se a análise de componentes principais (PCA). A PCA avalia as inter-relações entre um grande número de variáveis, de modo a reduzir linearmente a dimensionalidade de grandes conjuntos de dados, minimizando a perda de informação (Mingoti, 2007). Essa técnica é empregada para reduzir redundâncias, capturando a maior variabilidade dos dados em poucos componentes, que são combinações lineares não correlacionadas entre si, em que se atribuem pesos às variáveis, de acordo com a explicação da variância (Mingoti, 2007).

Para confirmar a adequação da aplicação da PCA ao conjunto de dados, foram utilizados o teste de esfericidade de Bartlett com nível de significância de 5% e o índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). O teste de Bartlett testa a hipótese nula (H0) onde a matriz de correlação é uma

matriz identidade, ou seja, não há correlação significativa entre os dados e não há variância compartilhada suficiente para realizar a PCA ($p \geq 0,05$), versus hipótese alternativa (H1) de que há correlação suficiente entre as variáveis ($p < 0,05$) (Fraga *et al.*, 2021). O índice de KMO é uma medida de correlação entre as variáveis, identificando se a PCA é adequada aos dados. O KMO gera valores entre 0 e 1, e quando $> 0,5$ indica que o uso da PCA é adequado (Fraga *et al.*, 2021; Hair *et al.*, 1995; Mingoti, 2007).

A PCA foi aplicada nos dados médios de EP, ESI, MTE, MSE, Tmin, Tmed, Tmax, Rh, Rs, Ph, e Pr acumulada para o período compreendido entre a data de coleta das sementes e 180 dias anteriores a esta data, e também para o tempo de armazenamento (SST; dias) para cada amostra (Tabela 1.1) e teste de emergência (testes A, B e C). Os autovalores e autovetores para a confecção das componentes principais foram extraídos através da decomposição da matriz de correlação do vetor aleatório das variáveis de interesse (médias de EP, ESI, MTE, MSE, Tmin, Tmed, Tmax, Rh, Rs e Ph). Foram consideradas as duas componentes principais com maior explicação da variância dos dados, totalizando, no mínimo, 60% da variância dos dados originais. Para cada componente principal, foram obtidos os escores de cada amostra de sementes, que representam suas coordenadas no novo sistema de eixos formado pelas componentes principais e refletem a contribuição de cada amostra para a variância explicada pela respectiva componente. Os escores foram obtidos pelo produto dos autovetores correspondentes a cada variável de interesse e o valor da variável de interesse para cada amostra de sementes.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as amostras de sementes coletadas em múltiplos locais do Brasil e em períodos distintos de coleta apresentaram diferentes desempenhos de emergência (EP, ESI, MTE e MSE), inclusive entre diferentes amostras de uma mesma espécie devido a diferentes locais/datas de coleta das sementes (Tabela 1.2). No entanto, o uso de diferentes substratos (solo, areia, vermiculita e mistura) para a cobertura das sementes não diferiram entre si pelo teste Scott-Knott para as quatro variáveis de emergência (EP, ESI, MTE e MSE). Ou seja, nos testes preliminares, o substrato não foi determinante para aumentar a taxa de emergência das sementes das seis espécies florestais nativas.

Tabela 1.2 - Valores médios das variáveis porcentagem de emergência (EP), índice de velocidade de emergência (ESI), tempo médio de emergência (MTE) e velocidade média de emergência (MSE) das amostras de sementes das seis espécies florestais usadas neste estudo.

Espécie - amostra das sementes* (local de coleta)	Variáveis de emergência			
	EP (%)	ESI (adimensional)	MTE (dia)	MSE (dia ⁻¹)
<i>B. forficata</i> - A1 (Santa Maria)	48,33	4,15	15,15	0,07
<i>B. forficata</i> - A2 (Santa Maria)	65,83	6,91	12,38	0,08
<i>C. speciosa</i> - A1 (Rio das Pedras)	60,00	2,80	17,46	0,06
<i>C. speciosa</i> - A2 (Porto Feliz)	71,67	6,28	10,26	0,11
<i>H. chrysotrichus</i> - A1 (Santa Maria)	11,67	1,02	13,68	0,07
<i>H. chrysotrichus</i> - A2 (Itajubá)	10,83	0,88	15,23	0,07
<i>H. impetiginosus</i> - A1 (Seropédica)	53,75	2,25	18,26	0,06
<i>H. impetiginosus</i> - A2 (Lavras)	48,33	1,10	24,07	0,04
<i>T. rosea</i> - A1 (Itajubá)	55,83	5,53	12,70	0,08
<i>T. rosea</i> - A2 (Itajubá)	49,17	3,42	16,95	0,06
<i>T. roseoalba</i> - A1 (Seropédica)	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>T. roseoalba</i> - A2 (Porto Feliz)	70,83	5,32	16,38	0,07

* As amostras de sementes utilizadas foram: Teste A - *B. forficata* A1, *C. speciosa* A1 e A2, *H. chrysotrichus* A1, *H. impetiginosus* A1 e A2, e *T. roseoalba* A2, totalizando 84 repetições (7 amostras de sementes x 4 substratos x 3 repetições). No teste B foram utilizadas as amostras de *B. forficata* A2, *T. rosea* A1 e *T. roseoalba* A1, totalizando 36 repetições (3 amostras de sementes x 4 substratos x 3 repetições) e no teste C foram utilizadas as amostras de *H. chrysotrichus* A2 e *T. rosea* A2, totalizando 24 repetições (2 amostras de sementes x 4 substratos x 3 repetições).

A maioria das amostras das sementes teve EP > 50,0 %, exceto para *B. forficata* A1, *H. chrysotrichus* A1 e A2 e *H. impetiginosus* A2, *T. rosea* A2 e especialmente *T. roseoalba* A1, que apresentou o pior desempenho de emergência, com ESI, EP, MTE e MSE = 0. Cabe ressaltar que as sementes da *T. roseoalba* estavam armazenadas há 1156 dias e, embora as sementes de *T. roseoalba* sejam classificadas como ortodoxas, ou seja, que se mantêm viáveis após dessecação e podem ser armazenadas sob baixas temperaturas por um longo período (Abbade; Takaki, 2014; Menegaes *et al.*, 2024), sua viabilidade é significativamente reduzida a partir de 60 dias de armazenamento, variando conforme condições de temperatura e umidade de armazenamento (Borba Filho; Perez, 2009; Stockman *et al.*, 2007). Estudos indicam que o armazenamento das sementes por períodos superiores a 24 meses compromete negativamente a germinação de sementes de *T. roseoalba* em viveiro (Abbade; Takaki, 2014). Durante a pandemia da Covid-19, as coletas de sementes, principalmente de espécies florestais nativas, foram drasticamente reduzidas, resultando em desafios consideráveis para obter material viável para a produção de mudas, assim como para a realização deste estudo (por exemplo, 1002 dias

para *H. impetiginosus* A2).

A variável ESI também variou entre as amostras. A ESI é utilizada para prever o vigor relativo de amostras, e quanto maior (menor) o valor, mais rápida (lenta) é a taxa de emergência. Os maiores valores de ESI ($> 6,0$) foram obtidos em *B. forficata* A2 e *C. speciosa* A2, e os menores ($< 2,0$) foram obtidos em *H. chrysotrichus* A1 e A2, *H. impetiginosus* A2 e *T. roseoalba* A1. Porém, amostras com a mesma EP podem apresentar valores diferentes de ESI (Ranal; Santana, 2006), ou seja, o tempo e velocidade de emergência podem diferir entre amostras de sementes que apresentaram a mesma EP.

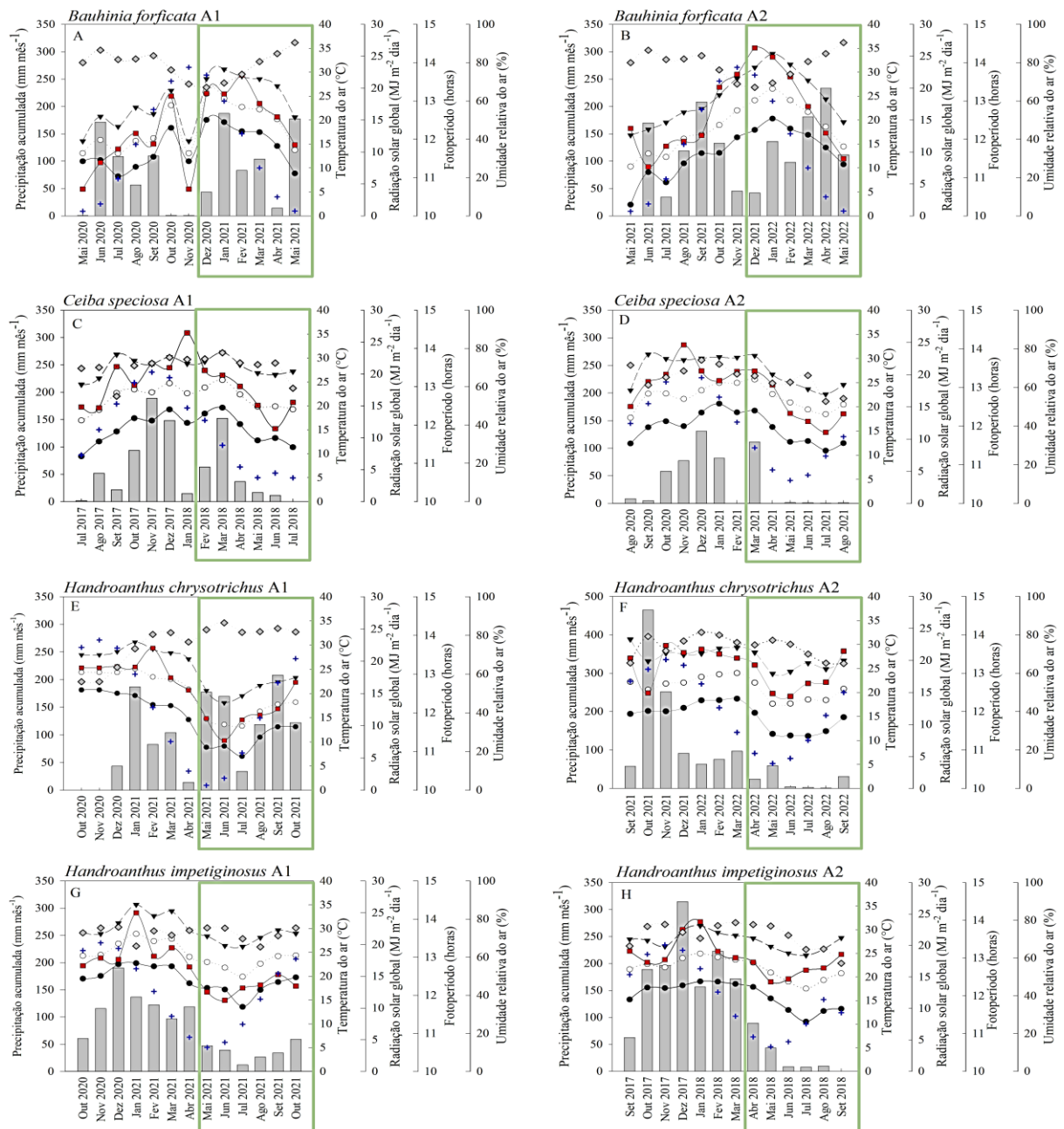
As variáveis MTE e MSE fornecem informações complementares e indicam o tempo médio necessário para que ocorra a máxima emergência das sementes e a rapidez com que as sementes germinam ao longo do tempo. Exceto a *T. roseoalba* A1, todas as demais apresentaram MTE entre 10 e 25 dias e MSE entre 0,04 e 0,1 dia^{-1} . Ambos os valores são compatíveis com os observados em sementes de espécies florestais brasileiras que passam por período de armazenamento em câmara fria. Por exemplo, sementes de *Acca sellowiana* O. Berg armazenadas > 365 dias apresentaram MTE entre 24,9 e 27,7 dias (Donazzolo *et al.*, 2015), e sementes de *Copaifera langsdorffii* Desf. armazenadas durante 120 e 244 dias em câmara fria, apresentaram MSE entre 0,02 e 0,03 dia^{-1} (Pereira *et al.*, 2009).

Os seis locais de coleta das sementes possuem condições meteorológicas (e climáticas) distintas entre si (Figura 1.3). De maneira geral, as maiores amplitudes diárias de temperatura do ar (entre $-0,6$ a $38,5$ $^{\circ}\text{C}$) foram observadas para Santa Maria, onde foram coletadas as sementes de *B. forficata* e *H. chrysotrichus* em 2021. Foram observados valores de R_s entre 1,4 e 32,4 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, R_h entre 25,7 e 99,4 %, P_r entre 0 e 90,8 mm dia^{-1} e P_h entre 10,1 e 13,9 horas dia^{-1} . Tais valores estão coerentes com as médias climatológicas mensais de temperatura, umidade relativa, radiação solar global e precipitação dos respectivos locais onde foram coletadas as sementes (Alves *et al.*, 2020; Fialho; Machado, 2024; Novais; Galvani, 2022; Werlang; Werlang, 2021). Essas diferenças podem interferir na época de dispersão, na quantidade e qualidade das sementes das espécies.

Aplicando o teste de esfericidade de Bartlett ($p\text{-valor} < 0,001$) e índice KMO ($= 0,50$) foi possível confirmar a adequação da aplicação da PCA ao conjunto de dados. Ou seja, a PCA permitiu identificar a relação entre as variáveis meteorológicas ($T_{\min}$, T_{med} , $T_{\max}$, R_s , R_h , P_r e P_h) e o SST sobre a viabilidade das sementes (EP, ESI, MTE e MSE) e a importância de tais variáveis na variância total dos dados.

Foram observadas correlações negativas significativas entre as variáveis MSE e MTE

com a Tmin e Tmed, e entre as variáveis EP e ESI com a Rh (Figura 1.4, painel A), indicando que o tempo médio e a velocidade média de emergência das sementes foram maiores em amostras de sementes que maturaram em locais e períodos com menor Tmin e Tmed, enquanto a porcentagem e velocidade de emergência foram maiores em amostras de sementes de locais e períodos com menor umidade relativa do ar.



continua...

...continuação

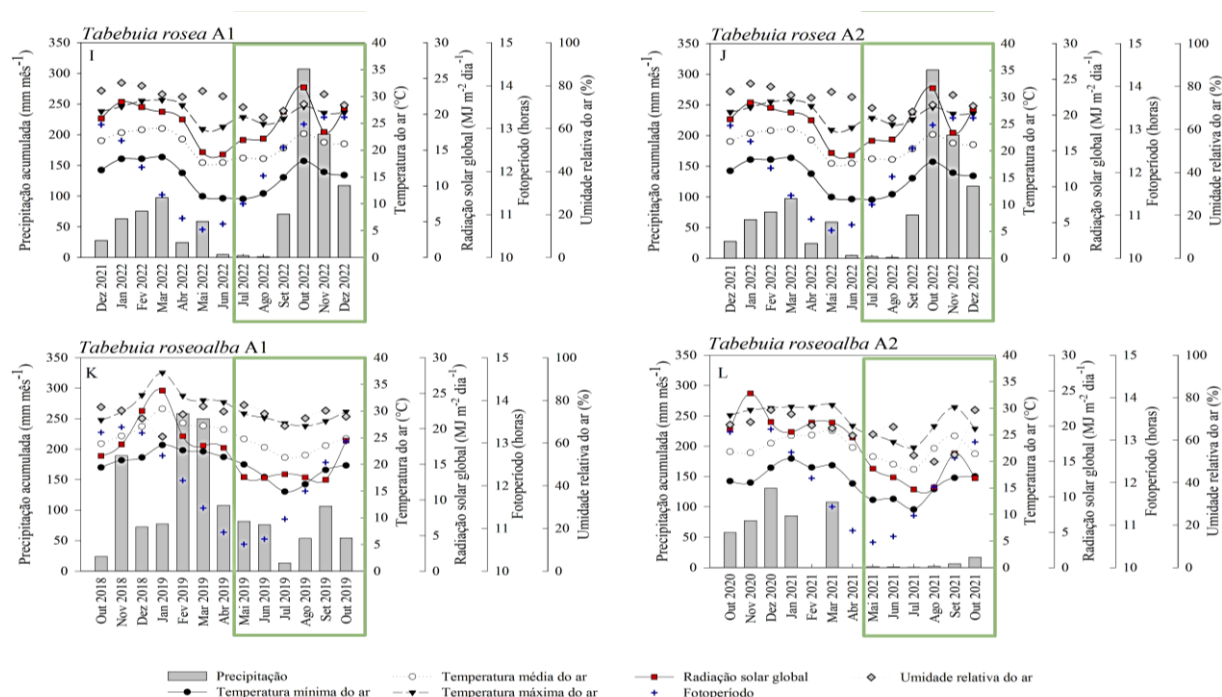


Figura 1.3 – Variação da temperatura do ar (°C, mínima, média e máxima), radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹), umidade relativa do ar (%), precipitação acumulada (mm mês⁻¹) e fotoperíodo (horas dia⁻¹) nos locais de coleta das sementes de *Bauhinia forficata* (A, B), *Ceiba speciosa* (C, D), *Handroanthus chrysotrichus* (E, F), *Handroanthus impetiginosus* (G, H), *Tabebuia rosea* (I, J) e *Tabebuia roseoalba* (K, L). Os meses delimitados pelo quadro verde referem-se ao período compreendido entre a data de coleta das sementes e 180 dias anteriores a esta data.

Ao analisar as variáveis de emergência acopladas, foram observadas correlações positivas e negativas significativas. Especificamente, o MSE apresentou correlação positiva com EP e ESI, indicando que as amostras de sementes com maior (menor) velocidade de emergência apresentaram maior (menor) percentual de emergência. Essa relação é esperada e dependente de cada espécie, uma vez que está intrinsicamente ligada a fatores como composição química, estado de maturação, capacidade de absorção de água e outras propriedades fisiológicas e bioquímicas que influenciam o processo de emergência das sementes (Krzyzanowski *et al.*, 2022). Por outro lado, o SST apresentou correlação negativa com MSE, EP, ESI e MTE, indicando que as amostras de sementes com maior (menor) tempo de armazenamento apresentaram menor (maior) vigor, velocidade e percentual de emergência, e maior (menor) o tempo médio de emergência. Mesmo padrão foi observado no teste de emergência de sementes de *Gallesia integrifolia* (Spreng.) Harms, com a redução das variáveis

EP, ESI e TEM em função do aumento do período de armazenamento (Silva *et al.*, 2023).

As duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2) explicaram aproximadamente 61% da variância total da viabilidade das sementes das espécies florestais nativas nas diferentes amostras. A representação de ambas PCs está na Figura 1.4 (painéis B e C), onde a PC1 está disposta no eixo horizontal e a PC2 no eixo vertical. Setas de sinais iguais (diferentes) indicam contribuições na mesma direção (direção oposta), enquanto a magnitude da contribuição de cada variável é representada pelo módulo e angulação das setas (Figura 1.4, painel B). Setas mais longas indicam que a variável tem maior influência ou possui variabilidade mais bem explicada pelas PCs. Setas curtas indicam que a variável é menos relevante para explicar as variações na PC. A direção das setas indica como cada variável se alinha em relação as PCs. A direção das setas reflete a correlação entre as variáveis, onde setas apontando na mesma direção indicam correlação positiva, enquanto setas em direção oposta indicam correlação negativa.

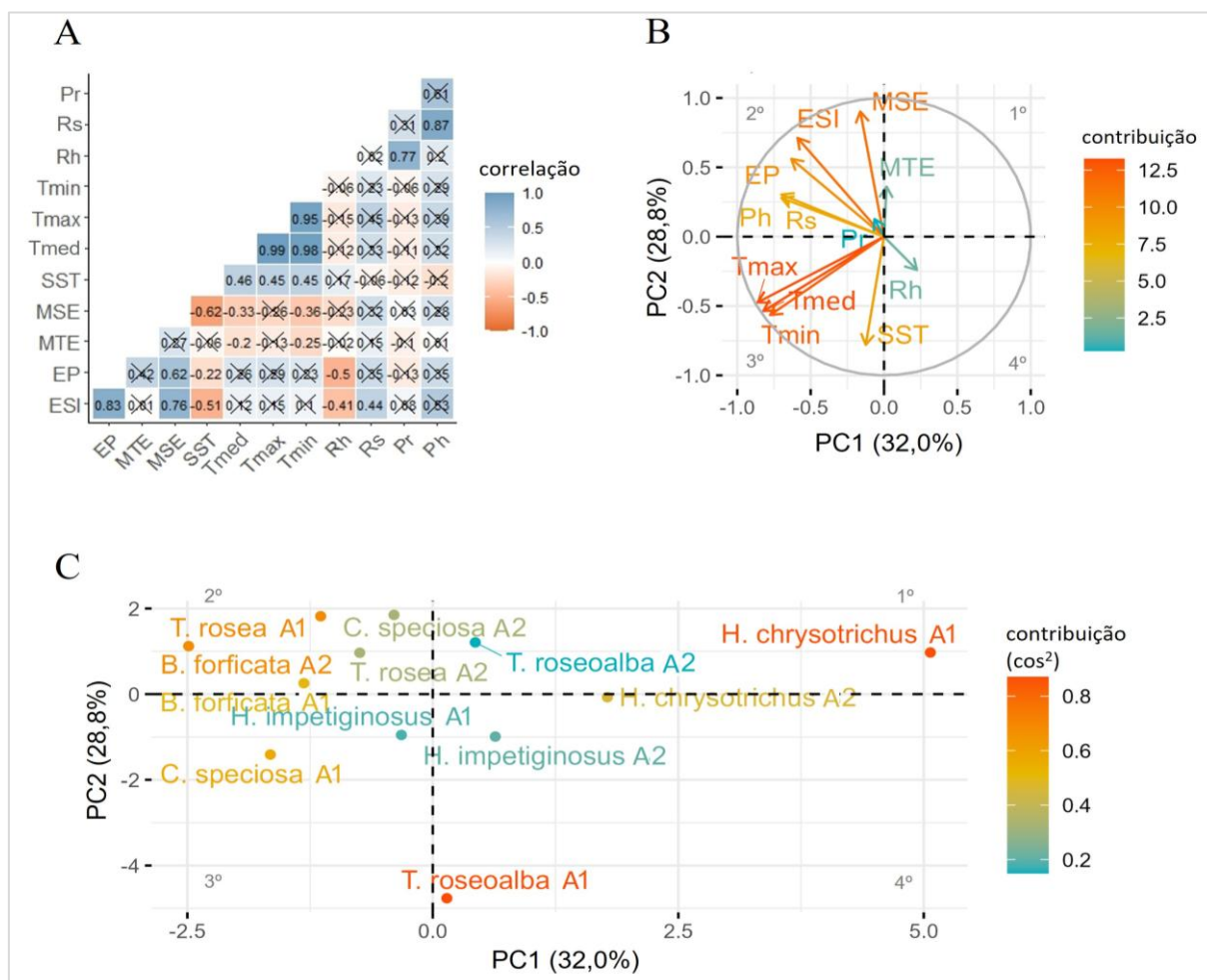


Figura 1.4 - Matriz de correlação (A), diagrama de ordenação das componentes principais e contribuição das variáveis (B e C). Nos painéis B e C, a PC1 está disposta no eixo horizontal e a PC2 no eixo vertical. O 1º quadrante representa as componentes positivas (PC1 e PC2), o 2º

quadrante as componentes negativas (PC1) e positivas (PC2), o 3º quadrante as componentes negativas (PC1 e PC2) e o 4º quadrante as componentes positivas (PC1) e negativas (PC2). EP – porcentagem de emergência (%); ESI - índice de velocidade de emergência; MTE - tempo médio de emergência (dia); MSE - velocidade média de emergência (dia^{-1}); SST - tempo de armazenamento (dia); Tmin, Tmed e Tmax – temperatura mínima, média e máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); Rs – radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); Rh – umidade relativa do ar (%); Pr - precipitação (mm dia^{-1}) e Ph – fotoperíodo (horas).

Na PC1, as variáveis com maior relevância (seta mais longa) e contribuições na mesma direção foram EP, ESI, Ph, Rs, Tmin, Tmed e Tmax (Figura 1.4 painel B, 2º e 3º quadrantes). Na direção oposta, a variável mais relevante foi a Rh (Figura 1.4 painel B, 4º quadrante). Portanto, a PC1 representa uma relação entre as variáveis EP, ESI, Ph, Rs, Tmax, Tmed e Tmin (autovetores negativos na PC1) com a Rh (autovetor positivo na PC1). As variáveis MSE, MTE, SST e Pr não apresentaram contribuição expressiva na PC1, apresentando menores autovetores. As amostras de sementes com os escores mais negativos, ou seja, com os novos valores dessas amostras no sistema de eixos definidos pelos componentes principais, como de *B. forficata* A1, *B. forficata* A2, *C. speciosa* A1 e *T. rosea* A1 (Figura 1.4, painel C), apresentaram, de maneira geral, bom desempenho (melhores índices) para as variáveis de emergência associado a temperaturas mais elevadas (Tmed $> 20,5^{\circ}\text{C}$), maior Rs ($\sim 18,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e Ph ($\sim 12,2$ horas). Ou seja, a maior porcentagem e velocidade de emergência (EP e ESI) foram observadas nas amostras de sementes provenientes de regiões com maior Tmin (entre $14,3$ e $16,6^{\circ}\text{C}$), Tmed (entre $20,3$ e $22,6^{\circ}\text{C}$) e Tmax (entre $26,4$ e $28,7^{\circ}\text{C}$), Rs (entre 17 e $19 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e Ph ($\sim 12,2$ horas) e menor Rh ($\sim 74,2\%$) (Santa Maria-RS, Rio das Pedras-SP e Itajubá-MG).

Por outro lado, as amostras de *H. chrysotrichus* A1 e A2, com os maiores escores positivos (Figura 1.4, painel C) que apresentaram menores EP e ESI foram provenientes de regiões mais frias, com menor Rs ($\sim 14,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e Ph (~ 11 horas) e maior Rh ($> 77\%$). Comportamento semelhante foi identificado em estudos com *Copaifera langsdorffii* Desf., em que a tolerância das sementes à dessecação variou conforme a origem das amostras. Sementes coletadas em regiões com clima mais quente e seco apresentaram maior capacidade de suportar a perda de água por mais tempo (Pereira *et al.*, 2017). Esses resultados reforçam a influência das condições ambientais da região de procedência sobre as características fisiológicas das sementes, especialmente em relação à adaptação a estresses abióticos.

A PC2 representa uma relação entre EP, MSE e ESI (autovetores positivos) com SST e Tmin, Tmed e Tmax (autovetores negativos). Dentre elas, a SST apresentou autovetor mais

negativo, e portanto, maior contribuição na PC2. As demais variáveis tiveram menor contribuição na PC2, devido aos menores autovetores (Figura 1.4, painel B). As amostras com escores mais negativos na PC2, como de *T. roseoalba* A1, *C. speciosa* A1, *H. impetiginosus* A1 e *H. impetiginosus* A2 (Figura 1.4, painel C) são provenientes de amostras de sementes com maior SST e temperaturas mais elevadas (Tmed entre 22,6 e 23,3 °C) (Figura 1.4, painel B). Do contrário, os escores mais positivos são das amostras com menor tempo de armazenamento e temperaturas amenas, incluindo *C. speciosa* A2 (256 dias e Tmed = 20,3 °C), *T. rosea* A1 (0 dia e Tmed = 20,3 °C) e *T. roseoalba* A2 (204 dias e Tmed = 19,9 °C). Esses resultados demonstram a sensibilidade das sementes ao SST associado as condições ambientais, especialmente à temperatura do ar, que podem comprometer o desempenho germinativo das sementes dessas espécies.

Entre as variáveis meteorológicas analisadas, a Pr foi a que apresentou menor influência nas duas PCs. A baixa contribuição da Pr pode estar associada à alta variabilidade espaço-temporal dessa variável. No entanto, a Pr impacta indiretamente a viabilidade das sementes por aumentar a quantidade de água disponível na atmosfera em termos da Rh. Por exemplo, Pr intensa e prolongada retarda o processo de secagem natural das sementes, dificultando sua coleta e armazenamento (Aguilar, 1995). Esse cenário compromete a viabilidade das sementes, ou resultar em falhas na germinação, que por sua vez pode resultar em mudas com menor capacidade competitiva e taxa de sobrevivência (Martins *et al.*, 2023a).

É comum que sementes ortodoxas, como as das espécies estudadas, apresentem menor viabilidade em condições de Rh elevada. Por exemplo, valores de Rh superiores a 14% induzem o início das atividades metabólicas do embrião e aumentam a taxa respiratória da semente, que por sua vez levam à degradação de reservas energéticas, acúmulo de metabólitos tóxicos e maior susceptibilidade a estresses oxidativos, o que reduz a viabilidade (Menegaes *et al.*, 2024). Além disso, Rh > 65% durante a maturação dos frutos e enchimento das sementes favorece a ação de fungos e insetos. Por exemplo, fungos dos gêneros *Aspergillus* spp. e *Penicillium* spp. e insetos broqueadores - que perfuram o tronco, galhos ou ponteiros das plantas -, como os das ordens Coleoptera e Lepidoptera, aceleram a deterioração das sementes antes mesmo da sua dispersão. Isso ocorre devido à produção de toxinas e enzimas hidrolíticas, que degradam componentes essenciais das sementes, como proteínas, lipídios e carboidratos (Lemes, 2021; Parisi *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2022).

Variações na temperatura do ar durante a formação das sementes influenciam a maturação fisiológica que reflete no processo de deterioração durante o armazenamento

(Lamarca *et al.*, 2020; Reed *et al.*, 2022). Por exemplo, o estresse por alta temperatura durante o enchimento das sementes reduz o vigor das sementes de grão-de-bico e arroz híbrido, afetando o acúmulo e a estrutura do amido (Devi *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2020), além de afetar a germinação da ervilha (Lamichaney *et al.*, 2021). No entanto, a magnitude dos danos causados por temperaturas fora da faixa ideal de desenvolvimento da planta depende da duração da exposição ao estresse térmico, além do genótipo e do estágio fenológico que a planta se encontra (Bhattacharya, 2022). Nesse sentido, durante a fase inicial de desenvolvimento, que inclui a germinação até a emissão das primeiras folhas verdadeiras, as plantas são mais susceptíveis ao estresse térmico, principalmente em temperaturas supraótimas (Fagundes *et al.*, 2024b; Martins *et al.*, 2023a). Assim, o estresse térmico durante a maturação e dispersão das sementes acoplado aos processos de desenvolvimento inicial pode comprometer a produção de mudas saudáveis e repercutir na menor capacidade competitiva e taxa sobrevivência no campo.

A intensidade e velocidade de deterioração das sementes depende dos fatores genéticos e das condições ambientais que prevalecem no período compreendido entre a maturação e a pré-semeadura (Krzyzanowski *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2017). Desde a década de 1970, pesquisas sobre o armazenamento de sementes de espécies florestais têm sido publicadas, incluindo espécies dos gêneros *Ceiba* spp., *Handroanthus* spp. e *Tabebuia* spp. Embora essas sementes sejam classificadas como ortodoxas, é natural haver perda de longevidade ao longo do tempo de armazenamento. Isso ocorre devido à menor quantidade de substâncias de reserva, combinada com o alto teor de óleo das sementes (Degan *et al.*, 2001). Devido à maior instabilidade química dos lipídios, sementes ricas em óleo como as de *C. speciosa* (15 - 20%), *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose (28,7%) e *T. roseoalba* (18,8%) perdem a viabilidade mais rapidamente em consequência da maior suscetibilidade à peroxidação lipídica, que leva à degradação das membranas celulares e ao comprometimento das funções metabólicas essenciais durante a germinação. (Degan *et al.*, 2001; Martins; Pinto, 2014). Dessa forma, os menores valores de EP, ESI e MSE observados para *C. speciosa* A1, *H. chrysotrichus* A2, *H. impetiginosus* A2 e *T. roseoalba* A1 podem ser explicados pela combinação entre as características intrínsecas das sementes, como o alto teor de óleo, e fatores abióticos, incluindo a temperatura, e o tempo de armazenamento prolongado.

Diversos fatores influenciam a viabilidade de sementes de espécies florestais. Nossa análise através de componentes principais, demonstrou que Tmin, Tmed, Tmax, Rh, Rs, Ph e Pr influenciam a maturação fisiológica em diferentes magnitudes e refletem na viabilidade das sementes de *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus*, *T. rosea* e *T.*

roseoalba. Ou seja, temperaturas mais altas e maior radiação solar aceleram o processo de maturação, enquanto maior umidade relativa pode retardar a secagem das sementes, afetando negativamente sua qualidade. O fotoperíodo mais longo favorece a síntese de compostos de reserva, contribuindo para maior vigor das sementes. Além disso, o SST também é determinante na viabilidade dessas espécies, sendo que quanto maior (menor) o SST, menor (maior) a viabilidade das sementes. Portanto, a qualidade final de uma amostra de sementes é resultante da interação de múltiplos fatores os quais as sementes são expostas, incluindo os fatores bióticos e abióticos, sobre os quais não se tem controle, e os controláveis, como o manejo das sementes pós-colheita.

Embora este estudo não tenha abordado as condições fitossanitárias das sementes, que é igualmente importante para a viabilidade, os resultados fornecem informações valiosas para melhorar a coleta, conservação e qualidade das sementes das espécies florestais estudadas. Por exemplo, períodos prolongados de armazenamento combinado a menores valores de umidade relativa e temperatura (T_{min} , T_{med} e T_{max}) favorecem a manutenção da viabilidade das sementes. Para estudos futuros, sugere-se a realização de análises que integrem dados fenológicos, especialmente durante a frutificação e maturação dos frutos. Além disso, é importante monitorar o teor de umidade das sementes após a coleta e durante o armazenamento. Recomenda-se também a avaliação das condições fitossanitárias das sementes por meio de testes de sanidade. Essa abordagem permitirá uma compreensão mais aprofundada da influência de fatores bióticos e abióticos na viabilidade das sementes florestais.

1.4. CONCLUSÃO

As seis espécies florestais estudadas (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus*, *Tabebuia rosea* e *Tabebuia roseoalba*) apresentam padrões distintos de viabilidade de sementes em termos de porcentagem de emergência, índice de velocidade de emergência, tempo médio de emergência e velocidade média de emergência. As sementes de *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus*, *T. rosea* e *T. roseoalba* são mais sensíveis ao tempo de armazenamento, com redução da viabilidade proporcional ao aumento do tempo de armazenamento.

As variações da temperatura do ar, fotoperíodo, radiação solar e umidade relativa do ar influenciam a maturação fisiológica e emergência das sementes das seis espécies florestais. As amostras provenientes das regiões mais quentes, com maior fotoperíodo e radiação solar e menor umidade relativa apresentaram melhor desempenho na emergência. As menores variáveis de emergência foram observadas em amostras onde a maturação fisiológica ocorreu

em períodos mais frios e úmidos.

Em estudos futuros recomenda-se a inclusão de observações fenológicas detalhadas, avaliação do estado fitossanitário dos frutos e sementes durante o período de maturação fisiológica, além de considerar as variáveis meteorológicas durante a emergência das sementes.

1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBADE, L.C.; TAKAKI, M. Biochemical and physiological changes of *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith (Bignoniaceae) seeds under storage. **Journal of Seed Science**, v.36, p.100-107, 2014. <https://www.scielo.br/j/jss/a/9RwhTDnCrXbRPg7ZmXDyHYd/>.

AGUIAR, I.B. Conservação de sementes. In: SILVA, A.; PIÑA-RODRIGUES, F.C.M.; FIGLIOLIA, M.B. (Coord.). **Manual técnico de sementes florestais**. São Paulo: Instituto Florestal, 1995. (Série Registros, n. 14). p.33-44. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2014/04/IFSR14.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2024.

ALMEIDA, L.S. **Insumos tecnológicos em sementes florestais para uso em restauração via semeadura direta**. 2021. 107 p. Tese (Doutorado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14375>. Acesso em: 14 set. 2023.

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>.

BEZERRA, A.C.; ZUZA, J.F.C.; BARBOSA, L.D.S. AZEVEDO, C.F.; ALVO, E.U. Biometrics of Mulungu seeds from different mother plants in the semi-arid region of Paraíba, Brazil. **Revista Caatinga**, v.35, p.393-401, 2022. <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n215rc>.

BHATTACHARYA, A. Effect of Low Temperature on Dry Matter, Partitioning, and Seed Yield: A Review. In: **Physiological Processes in Plants Under Low Temperature Stress**. Springer, Singapore. 2022. p.629–734. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9037-2_7.

BIEZUS A.; XAVIER E.; BRUSAMARELLO A.P., MANTELI, C.; CARVALHO, A.F.G. Emergência e desenvolvimento inicial de plântulas de feijão em diferentes profundidades de semeadura. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.12, p.428-434, 2017. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i4a5472>.

BORBA FILHO, A.B.; PEREZ, S.C.J.G.A. Armazenamento de sementes de ipê-branco e ipê-roxo em diferentes embalagens e ambientes. **Revista Brasileira de Sementes**, v.31, p.259-269, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222009000100029>.

BROCKERHOFF, E.G.; BÁRBARO, L.; CASTAGNEYROL, B. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. **Biodiversity and Conservation**, v.26, p.3005-3035, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2>.

CETNARSKI FILHO, R.; CARVALHO, R.I.N. Massa da amostra, substrato e temperatura para teste de germinação de sementes de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Ciência Florestal**, v.19, p.257-265, 2009. <https://doi.org/10.5902/198050988880>.

CNCFlora - Centro Nacional de Conservação da Flora. **Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2**. 2012. Disponível em: <http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/listavermelha>. Acesso em: 22 ago. 2023.

CRIA - Centro de Referência e Informação Ambiental. **Specieslink**. 2023. Disponível em: <https://specieslink.net>. Acesso em: 17 mai. 2023.

DEGAN, P.; AGUIAR, I.B.; SADER, R.; PERECIN, D.; PINTO, L.R. Influência de métodos de secagem na conservação de sementes de Ipê-branco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, p.492-496, 2001. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000300021>.

DEVI, P.; AWASTHI, R.; JHA, U.; SHARMA, K.D.; PRASAD, P.V.V.; SIDDIQUE, K.H.M.; ROORKIWAL, M.; NAYYAR, H. Understanding the effect of heat stress during seed filling on nutritional composition and seed yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Scientific Reports**, v.13, p.15450, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42586-0>.

DONAZZOLO, J.; ORNELLAS SANCHES, T.; BIZZOCCHI, L.; VILPERTE, V.; NODARI, R.O. O armazenamento refrigerado prolonga a viabilidade de sementes de goiabeira-serrana. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.37, p.748-54, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-179/14>.

FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; REIS, F.Y.S. COSTA, H.F. Modeling the initial development dynamics for two native Brazilian forest tree species. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v.97, p.295-308, 2024a. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad044>

FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; REIS, F.Y.S.; COSTA, H.F. Predicting temperature ranges for the initial development of two native Brazilian tree species using multiple sowing dates. **Forest Ecology and Management**, v.562, p.121912, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121912>.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Forest Resources Assessment 2020 - Key findings**. 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/en/>. Acesso em: 22 ago. 2023.

FELIX, F.C.; MEDEIROS, J.A.D.; PACHECO, M.V. Morfologia de sementes e plântulas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos. **Revista de Ciências Agrárias**, v.41, p.1028-1035, 2018. <https://doi.org/10.19084/RCA18126>.

FIALHO, E.S.; MACHADO, L.A. classificação climática do Estado do Rio de Janeiro: revisão, reanálise e reflexões. **Revista Continentes**, v.23, p.367-390, 2024. <https://doi.org/10.51308/continentes.v1i23.213>.

FONSECA, F.L., MENEGARIO, C., MORI, E.S.; NAKAGAWA, J. Physiological maturity of ipê amarelo seeds, *Tabebuia chrysotricha* (Mart. Ex DC.) Standl. **Scientia Forestalis**, v.69, p.136-141, 2005.

- FRAGA, M.S.; ALMEIDA, L.T.; ABREU, M.C.; SILVA, F.B.; REIS, G.B.; FERREIRA, R.G. Avaliação da qualidade das águas superficiais na circunscrição hidrográfica do rio Piranga utilizando análise estatística multivariada e não-paramétrica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, p.694-710, 2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p694-710>.
- GARWOOD, N.C.; METZ, M.R.; QUEENBOROUGH, S.A.; PERSSON, V.; WRIGHT, S.J.; BURSLEM, D.F.R.P.; ZAMBRANO, M.; VALENCIA, R. Seasonality of reproduction in an ever-wet lowland tropical forest in Amazonian Ecuador. **Ecology**, v.104, p.e4133, 2023. <https://doi.org/10.1002/ecy.4133>.
- GOMES, R.; PINHEIRO, M.C.B.; LIMA, H.A. Fenologia reprodutiva de quatro espécies de Sapotaceae na restinga de Maricá, RJ. **Brazilian Journal of Botany**, v.31, p.679-687, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042008000400013>.
- GRZYBOWSKI, C.R.S.; VIEIRA, E.S.N.; MICHELON, T.B.; PANOBIANCO, M. Germination test of *Cordia trichotoma* seeds: a forest species native to Brazil. **Journal of Seed Science**, v.44, p.e202244006, 2022. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v44258572>.
- HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Multivariate data analysis: with readings**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc, 1995. 745 p.
- HILLS, R. *Handroanthus impetiginosus*. **The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T144297143A173394208**. 2021a. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-3.RLTS.T144297143A173394208>.
- HILLS, R. *Tabebuia roseoalba*. **The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T145693608A145693610**. 2021b. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-3.RLTS.T145693608A145693610>.
- IUCN - International Union for Conservation of Nature. **The IUCN Red List of Threatened Species 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.iucnredlist.org>. Acesso em: 13 jan. 2024.
- KEISLING, T.C. Calculation of the Length of Day. **Agronomy Journal**, v.74, p.758-759, 1982. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400040036x>.
- KRZYŻANOWSKI, F.C.; FRANÇA-NETO, J.B.; DIAS, D. **Deterioração e vigor da semente**. Londrina: Embrapa Soja, 2022. 19 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 191) Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1151118/1/Circ-Tec-191.pdf>. Acesso em: 06 out. 2024.
- LABOURIAU, L.G. **A germinação das sementes**. Washington: Secretaria Geral da Organização dos Estados Americanos, 1983. 174 p.
- LABRE, J.C.C.; CONCEIÇÃO, O.S.; CRUZ, M.C.S.; BREIER, T.B. Superación de la dormición en semillas de la leguminosa árbol *Pseudosamanea guachapele* (Kunth) Harms. **Gentryana**, v.1, p.e211, 2022. <https://doi.org/10.55873/gentryana.v1i1.211>.
- LAMARCA, E.V.; PARISI, J.J.D.; BARBEDO, C.J. Taxas respiratórias de sementes de *Eugenia pyriformis* Cambess. dispersas em diferentes estádios de maturação. **Hoehnea**, v.47, p. e1012019, 2020. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-101/2019>.

- LAMICHANEY, A.; PARIHAR, A.K.; HAZRA, K.K.; DIXIT, G.P.; KATIYAR, P.K.; SINGH, D.; SINGH, A.K.; KUMAR, N.; SINGH, N.P. Untangling the influence of heat stress on crop phenology, seed set, seed weight, and germination in field pea (*Pisum sativum* L.). **Frontiers in plant science**, v.12, p.635868, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.635868>.
- LAVÔR, I.A.; LAVÔR, D.T.; LAVÔR, C.S.; BRAGA, D.V.V. Análise da diversidade e caracterização das síndromes de dispersão de diásporos em um gradiente sucessional de caatinga hiperxerófila. **Biodiversidade Brasileira**, v.13, p.1-10, 2023. <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v13i3.2207>.
- LEÃO, N.V.M.; OHASHI, S.T.; FREITAS, A.D.D.; NASCIMENTO, M.R.S.N.; SHIMIZU, E.S.C.; REIS, A.R.S.; GALVÃO FILHO, A.F.; SOUZA, D. **Colheita de sementes e produção de mudas de espécies florestais nativas**. 2. ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2015. 47 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 374) Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1016657>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- LEMES, P.G.; ZANUNCIO, J.C. **Novo Manual de Pragas Florestais Brasileiras**. Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. 996 p. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/novo-manual-de-pragas-florestais-brasileiras/Novo_Manual_de_Pragas_Florestais_Brasileiras.pdf. Acesso em: 06 jan. 2025.
- LIMA, R.A.F.; DAUBY, G.; GASPER, A.L.; FERNÁNDEZ, E.P.; VIBRANS, A.C.; OLIVEIRA, A.A.; PRADO, P.I.; SOUZA, V.C.; SIQUEIRA, M.F.; STEEGE, H. Comprehensive conservation assessments reveal high extinction risks across Atlantic Forest trees. **Science**, v.383, p.219-225, 2024. <https://doi.org/10.1126/science.abq509>.
- LOPES JC, BARBOSA LG, CAPUCHO MT. Germinação de sementes de *Bauhinia* spp. **Floresta**, v.37, p.265-274, 2007. <https://doi.org/10.5380/rf.v37i2.8658>.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 7 ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, v.1, 2016. 384 p.
- MAEDA, J.A.; MATTHES, L.A.F. Conservação de sementes de ipê. **Bragantia**, v.43, p.51-61, 1984.
- MAGUIRE, J.D. Speed of germination - Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v.2, p.176-177, 1962. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>.
- MARTINS, C.C.; PINTO, M.A.D.S.C. Armazenamento de sementes de ipê-amarelo-do-brejo (*Handroanthus umbellatus* (Sond.) Mattos. Bignoniaceae). **Ciência Florestal**, v.24, p.5339, 2014. <https://doi.org/10.1590/1980-509820142403002>.
- MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; FAGUNDES, F.F.A.; FLORÊNCIO, G.W.L. Thermal and photoperiodic requirements of the seedling stage of three tropical forest species. **Journal of Forestry Research**, v.34, p.209-220, 2023a. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01530-0>.
- MARTINS, F.B.; FLORÊNCIO, G.W.L.; FERREIRA, M.C.; FAGUNDES, F.F.A.; FREITAS,

C.H. Predicting seedling development for two commercial forest species under current and future climates: A multi-model assessment. **Forest Ecology and Management**, v.537, p.120929, 2023b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120929>.

MATOS, A.C.B.; ATAÍDE, G.M.; BORGES, E.E.L. Physiological, physical, and morpho-anatomical changes in *Libidibia ferrea* ((Mart. ex Tul.) L.P. Queiroz) seeds after overcoming dormancy. **Journal of Seed Science**, v.37, p.26-32, 2015. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v37n1140433>.

MATTOS, J.R.; LOHMANN, L.G.; COELHO, M.A.N. **Bignoniaceae, cultivada no arboreto do Jardim Botânico do Rio de Janeiro: a família do ipê**. 1. ed. Rio de Janeiro: Vertente Edições v.1. 2019. 114p. Disponível em: <https://biologiavegetal.com.br/guias-de-campos/bignoniaceae-cultivada-no-arboreto-do-jardim-botanico-do-rio-de-janeiro-a-familia-do-ipe/>. Acesso em: 23 ago. 2023.

MEDEIROS, R.L.S.; PAULA, R.C.; SOUZA, J.V.O.; FERNANDES, J.P.P. Abiotic stress on seed germination and plant growth of *Zeyheria tuberculosa*. **Journal of Forestry Research**, v.34, p.1511–1522, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11676-023-01608-3>.

MENEGAES, J.F.; STEFANELLO, R.; NUNES, U.R. Introdução: principais aspectos na qualidade de sementes (revisão). In: **Sementes: foco em pesquisa sobre qualidade fisiológica e sanitária**. v.2. Nova Xavantina-MT: Pantanal. 2024. 156p. <https://doi.org/10.46420/9786585756280>.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de Estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2007.293 p.

MISSIO, E.L.; SOUZA, M.T.M.; STEFFEN, G.P.K.; SALDANHA, C.W.; STEFFEN, R.B.; MALDANER, J.; MORAIS, R.M.; BOENI, M.; CONTERATO, I.F.; MARTINS, J.D. **Guia prático para identificação de sementes florestais da família Fabaceae**. Porto Alegre: SEAPDR/DDPA. 2021. 38p. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202111/04162659-missio-et-al-folheto-final.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2023.

MORAES NETO, S.P. **Particularidades biológicas de espécies de ipês de ocorrência no Cerrado brasileiro**. Planaltina,DF: Embrapa Cerrados. 2021. 86 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 375). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1139933>. Acesso em: 26 out. 2023.

NOVAIS, G.T.; GALVANI, E. Uma tipologia de classificação climática aplicada ao Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v.42, p.e184630, 2022. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.184630>.

OLIVEIRA, A.S.; TRINDADE, A.L.C.; CLEMENTE, C.C. CHO, D.F.; MORELLI, F.; ZACHARIAS, G.C.; FERREIRA, G.P.; MORITA, J.P.; CAITANO, L.L.; MUCHAGATA, M.; OLIVEIRA, M.S.; MATTOS, P.P.; FERRAZ, P.C.; LEÃO, R.A.; OLIVEIRA, Y.M.M. Florestas In: IBAMA. **Relatório de qualidade do meio ambiente: RQMA: Brasil 2020**. Brasília, DF, cap.5. p.302-365, 2022. Disponível em:

<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1143844>. Acesso em: 14 set. 2023.

PARISI, J.J.D.; SANTOS, A.F.; BARBEDO, C.J. MEDINA, P.F. Patologia de Sementes Florestais: Danos, Detecção e Controle, uma revisão. **Summa Phytopathologica**, v.45, p.129-133, 2019. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/188545>.

PEREIRA, R.; SOUZA, E.B.; FONTENELLE, R.O.S.; VASCONCELOS, M.A.; SANTOS, H.S.; TEIXEIRA, E.H. Diversidade estrutural e potencial biológico dos metabólitos secundários de espécies do gênero *Myroxylon* L.f. (Fabaceae): uma revisão da literatura. **Hoehnea**, v.46, p.e582017, 2019. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-58/2017>.

PEREIRA, R.S.; SANTANA, D.G.; RANAL, M.A. Emergência de plântulas oriundas de sementes recém colhidas e armazenadas de *Copaifera langsdorffii* Desf. (Caesalpinioideae), Triângulo Mineiro, Brasil. **Revista Árvore**, v.33, p.643-652, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000400007>.

PEREIRA, W.V.S.; FARIA, J.M.R.; JOSÉ, A.C.; TONETTI, O.A.O.; LIGTERINK, W.; HILHORST, H.W.M. Is the loss of desiccation tolerance in orthodox seeds affected by provenance? **South African Journal of Botany**, v.112, p.296-302, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.06.008>.

RAD - Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2023. São Paulo, Brasil. MapBiomas, 2024. 154 p. Disponível em: <http://alerta.mapbiomas.org>. Acesso em: 06 jan. 2024.

RANAL, M.A.; SANTANA, D.G. How and why to measure the germination process? **Brazilian Journal of Botany**, v.29, p.1-11, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042006000100002>.

REED, R.C.; BRADFORD, K.J.; KHANDAY, I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. **Heredity**, v.128, p.450-459, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>.

SASAYA, M.K.; MELO, R.S.; OLIVEIRA, J.M.S.; GARLET, J. Análise da qualidade de lotes de sementes de *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. Ex DC.) Mattos por meio de testes de condutividade elétrica. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.11, p.103-111, 2020. <https://doi.org/10.6008CBPC2179-6858.2020.006.0009>.

SBF - Serviço Florestal Brasileiro. **Florestas do Brasil em Resumo 2019**. 2020. Disponível em: https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Florestas_Brasil_2019_Portugues.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.

SCHMIDT, I.B.; URZEDO, D.I.; PIÑA-RODRIGUES, F.C.M.; VIEIRA, D.L.M.; REZENDE, G.M.; SAMPAIO, A.B.; JUNQUEIRA, R.G.P. Community-based native seed production for restoration in Brazil - the role of science and policy. **Plant Biology**, v.21, p.389-397, 2019. <https://doi.org/10.1111/plb.12842>.

SEGRESTIN, J.; BERNARD-VERDIER, M.; VIOLLE, C.; RICHARTE, J.; NAVAS, M.L.; GARNIER, E. When is the best time to flower and disperse? A comparative analysis of plant reproductive phenology in the Mediterranean. **Functional Ecology**, v.32, p.1770–1783, 2018. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13098>.

- SILVA, A.P.M.; SCHWEIZER, D.; MARQUES, H.R.; TEIXEIRA, A.M.C.; SANTOS, T.V.M.; SAMBUICHI, R.H.R.; BADARI, C.G.; GAUDARE, U.; BRANCALION, P.H.S. Can current native tree seedling production and infrastructure meet an increasing forest restoration demand in Brazil? **Restoration Ecology**, v.25, p.509-515, 2017. <https://doi.org/10.1111/rec.12470>.
- SILVA, I.P.; PERES FILHO, O.; DORVAL, A.; SOUZA, M.D.; FAVARE, L.G. Ocorrência de insetos em frutos de espécies arbóreas do cerrado mato-grossense, Brasil. **Revista Biodiversidade**, v.21, p.83-91, 2022. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/biodiversidade/article/view/13629>.
- SILVA, J.M.C; RAPINI, A.; BARBOSA, L.C.F.; TORRES, R.R. Extinction risk of narrowly distributed species of seed plants in Brazil due to habitat loss and climate change. **PeerJ**, v.7, p.e7333, 2019. <https://doi.org/10.7717/peerj.7333>.
- SILVA, P.; GALASTRI, N.A.; MAZZIERO, F.F.F.; GIMENEZ, J.I. Emergência de plântulas de *Gallesia integrifolia* (Spreng.) Harms (Petiveriaceae) em função do substrato e das condições de armazenamento das sementes. **Paubrasilia**, v.6, p.e0112, 2023. <https://doi.org/10.33447/paubrasilia.2023.0112>.
- SNIF - Sistema Nacional de Informações Florestais. **Florestas Plantadas** - IBGE - Paine Interativo. 2023. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/temas-florestais/recursos-florestais/florestas-plantadas>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- SOUZA, D.C.; ENGEL, V.L. Direct seeding reduces costs, but it is not promising for restoring tropical seasonal forests. **Ecological Engineering**, v.116, p.35-44, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.019>.
- STOCKMAN, A.L.; BRANCALION, P.H.S.; NOVENBRE, A.D.L.C.; CHAMMA, H.M.C.P. Sementes de ipê-branco (*Tabebuia roseo-alba* (Ridl.) Sand. - Bignoniaceae): temperatura e substrato para o teste de germinação. **Revista Brasileira de Sementes**, v.29, p.139-143, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222007000300016>.
- TORMES, E.C.; BARBOSA, B.S.; BERLE, H.; URIARTE, J.F.; POLLNOW, H.E.; PASA, M. Legal aspects of the production of seeds and seedlings of forest species. **Research, Society and Development**, v.11, p.e37911325903, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.25903>.
- WANG, X.; ZHENG, H.; TANG, Q.; CHEN, Q.; MO, W. Seed filling under different temperatures improves the seed vigor of hybrid rice (*Oryza sativa* L.) via starch accumulation and structure. **Scientific Reports**, v.10, p.1-9, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57518-5>.
- WERLANG, M.K.; WERLANG, E.P. Balanço hídrico e classificação climática de Thornthwaite do bairro Camobi, Santa Maria, RS. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v.25, p.e07, 2021. <https://doi.org/10.5902/2236499440437>.
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v.36, p.2644–2659, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO FENOLÓGICA DO ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO INICIAL DE CINCO ESPÉCIES FLORESTAIS NATIVAS BRASILEIRAS SEGUNDO A ESCALA BBCH

2.1. INTRODUÇÃO

As espécies florestais apresentam ritmos de crescimento e necessidades fisiológicas e ecológicas distintas ao longo de seus estágios de desenvolvimento. Os estágios de plântula (embrião em desenvolvimento após emergir da semente) e desenvolvimento inicial (emissão das primeiras folhas) são considerados os mais sensíveis do desenvolvimento vegetativo, e portanto, menos tolerantes às variações e extremos do clima (Fagundes *et al.*, 2024b; Martins *et al.*, 2024). Por exemplo, em estágios posteriores à germinação, as altas temperaturas tendem a afetar a estabilidade das membranas celulares, a função enzimática, e alterar as reações metabólicas das plantas, resultando na supressão da eficiência fotossintética, além de alterar os níveis de hormônios, metabólitos primários e secundários (Baath *et al.*, 2020; Fagundes *et al.*, 2024b). Tais impactos podem ser mais pronunciados no clima futuro e em áreas onde se projetam aumentos graduais e crescentes na temperatura do ar, redução da umidade e alterações heterogêneas nos padrões de precipitação pluviométrica (Dias *et al.*, 2024). Tais condições são projetadas em diversas localidades no Brasil, as quais podem exacerbar ainda mais as pressões evolutivas/adaptativas (Gray; Brady, 2016). Ou seja, as alterações fisiológicas e metabólicas quando amplificadas no tempo, podem gerar alterações fenológicas.

Por meio da fenologia (do grego *phainō* = mostrar, fazer aparecer, *logos* = estudo), que estuda os eventos periódicos das plantas e sua interação com fatores bióticos e abióticos, é possível compreender os padrões e demandas de desenvolvimento de cada espécie florestal, fornecer informações úteis aos silvicultores de modo a melhorar as práticas de manejo, bem como promover o desenvolvimento de tecnologias para o cultivo e produção de mudas, além de auxiliar no desenvolvimento de estratégias viáveis para conservação e manejo das espécies florestais (Adiga *et al.*, 2019; Konan *et al.*, 2023).

Nas últimas décadas houve um impulso crescente à observação e documentação dos eventos fenológicos em plantas, evidenciando a necessidade de estabelecer um padrão uniforme para descrição desses eventos (Adiga *et al.*, 2019). Normalmente, essa descrição é fundamentada em um sistema de codificação por letras e números (ou somente números) que identificam cada estágio (subestágio) de desenvolvimento da planta. Tal sistema é denominado escala fenológica. Nesse sentido, a escala *Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and*

CHemical industry (BBCH) (Meier, 2018) é a mais difundida e utilizada mundialmente.

A escala BBCH é um sistema de codificação simples e uniforme utilizado para identificação fenológica dos estágios de desenvolvimento de plantas monocotiledôneas e dicotiledôneas (Meier, 2018). Com ampla aplicabilidade, tal escala não se limita exclusivamente à descrição fenológica de plantas. É também utilizada no manejo das plantas em campo ou viveiro, como exemplo, no combate a ocorrência de pragas e doenças (Silva *et al.*, 2023), no controle de plantas daninhas (Baccin; Moretti, 2024), na realização de podas e desbastes (Monteiro *et al.*, 2021) e aplicação de fertilizantes (Prysiashniuk *et al.*, 2022).

Embora a escala BBCH seja mais aplicada para culturas anuais e ornamentais de interesse econômico, ela foi estendida para espécies perenes (Finn *et al.*, 2007). Inclusive, nos últimos anos, estudos focados em espécies florestais vêm aumentando, como exemplos os realizados para *Anacardium occidentale* L. (Adiga *et al.*, 2019), *Eugenia uniflora* L., *Psidium cattleianum* Afzel. ex Sabine, *Eugenia involucrata* DC., *Plinia cauliflora* (DC. Berg), *Eugenia myrcianthes* (Nied.), *Myrcianthes pungens* (O. Berg.) D. Legrand, *Campomanesia xanthocarpa* (O. Berg.), *Campomanesia guazumifolia* (Cambess.) O. Berg. (Guollo *et al.*, 2020), *Vitellaria paradoxa* subsp. *paradoxa* (Konan *et al.*, 2023), *Prunus persica* (L.) Batsch (Verma *et al.*, 2023), *Mangifera indica* L. (Hernández Delgado *et al.*, 2011), *Moringa oleifera* Lam. (Singh *et al.*, 2021) e *Tamarindus indica* L. (Kishore *et al.*, 2022) considerando os estágios de desenvolvimento e reprodutivo. Entretanto, estudos focados na descrição fenológica do desenvolvimento inicial de espécies florestais ainda são escassos, sendo o estudo de Martins *et al.* (2024) o único existente até o momento. Estudos desta natureza são importantes, principalmente com a crescente demanda por mudas de espécies nativas para atingir as metas dos programas de restauração em larga escala (Fagundes *et al.*, 2024a).

O Brasil abriga uma grande diversidade de espécies florestais nativas, atualmente estimada em aproximadamente 7900 espécies (SNIF, 2020). Dentre as espécies nativas que apresentam importância ecológica, econômica e ambiental destacam-se: *Bauhinia forficata* Link, *Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna, *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, e *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith (Figura 2.1). As cinco espécies florestais ocorrerem naturalmente em grande parte do território brasileiro, incluindo os biomas Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga, particularmente vulneráveis à perda de biodiversidade em climas futuros previstos (Fagundes *et al.*, 2024b).

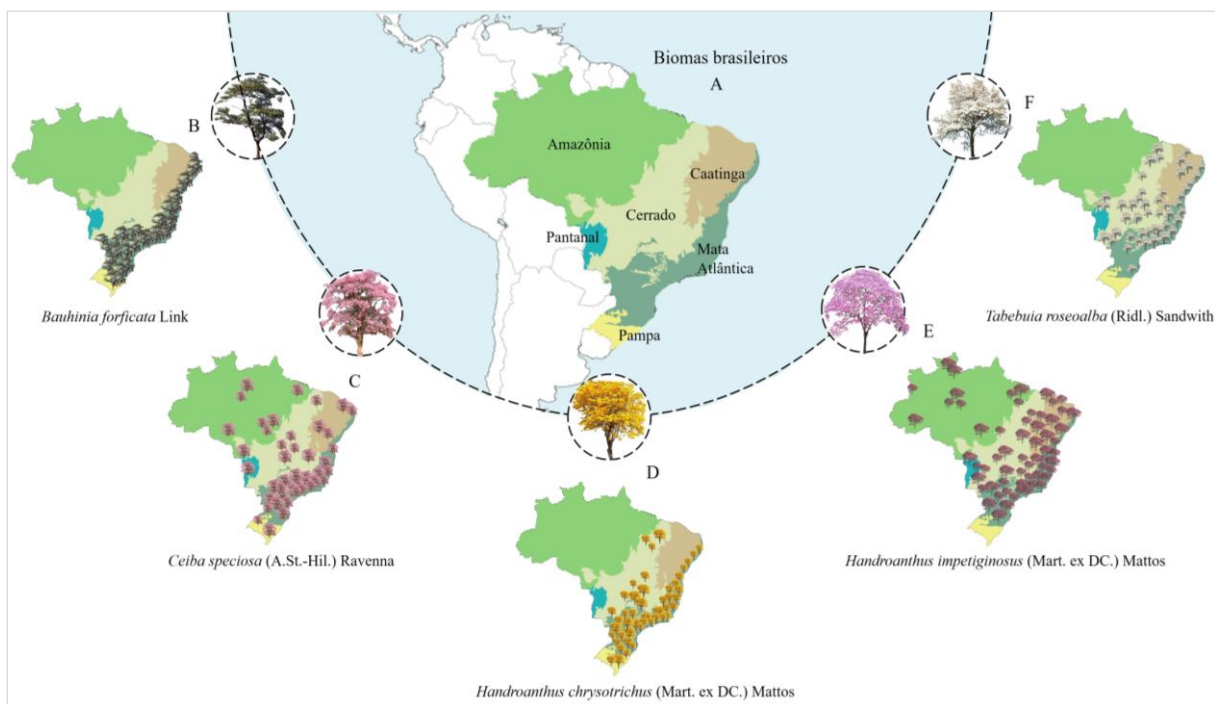


Figura 2.1 – Biomas brasileiros (IBGE, 2019) (A) e distribuição das cinco espécies florestais nos respectivos biomas (dados disponíveis em CRIA (2023)): *Bauhinia forficata* (B), *Ceiba speciosa* (C), *Handroanthus chrysotrichus* (D), *Handroanthus impetiginosus* (E) e *Tabebuia roseoalba* (F).

A *B. forficata* (Fabaceae; pata-de-vaca, bauínia, unha-de-vaca) é uma espécie pioneira a secundária inicial, heliófila, semicaducifólia e de crescimento moderado (~10 m de altura) (Carvalho, 2003). Como possui grande potencial medicinal, ela integra a Relação Nacional de Plantas Medicinais de Interesse ao Sistema Único de Saúde (RENISUS). Suas folhas possuem efeito hipoglicemiante, antioxidante, hepatoprotetor e diurético comprovados, além de ter ação terapêutica no tratamento do *diabetes mellitus* tipo II (Dimer *et al.*, 2024). Sua madeira possui densidade de 0,66 g cm⁻³, sendo usada para caixotaria, construção civil, peças em carpintaria e marcenaria, na produção de carvão, lenha e celulose (Carvalho, 2003).

A *C. speciosa* (Malvaceae; paineira, barriguda, árvore-de-paina) é uma espécie pioneira, heliófila, caducifólia e de crescimento rápido a moderado (~30 m de altura). Sua madeira é leve (0,22 A 0,34 g.cm⁻³), sendo amplamente empregada na confecção de canoas, cochos, forros de móveis, fabricação de aeromodelos e caixotes e produção de pasta celulósica. O fruto (paina) é utilizado no enchimento de almofadas, cobertores e travesseiros. Suas folhas, flores, cascas e resina são utilizadas na medicina popular no tratamento de hérnia, íngua e queimaduras (Roveri Neto; Paula, 2017).

As espécies *H. chrysotrichus* (Bignoniaceae; ipê-amarelo-cascudo, ipê-felpudo, pau-

d'arco-amarelo), *H. impetiginosus* (Bignoniaceae; ipê-roxo-de-bola, ipê-roxo, pau-d'arco-roxo) e *T. roseoalba* (Bignoniaceae; ipê-branco, ipê-do-cerrado; piuxinga) são secundárias, heliófilas, caducifólias e de crescimento lento a moderado (~30-35 m de altura). Apresentam potencial ornamental devido a exuberância de suas flores, sendo muito utilizadas em arborização e projetos paisagísticos (Carvalho, 2003, 2006; Vieira *et al.*, 2018). Suas flores possuem importância ecológica, fornecendo alimento para insetos, aves e pequenos mamíferos (Silva *et al.*, 2021), são consideradas Plantas Alimentícias Não Convencionais (PANCs), sendo utilizadas em restaurantes de alta gastronomia no preparo de saladas ou na forma empanada e frita (Kinupp; Lorenzi, 2021). São espécies recomendadas para restauração ecológica de áreas degradadas, e possuem enorme interesse madeireiro, especialmente na construção civil, devido às propriedades desejáveis, como alta densidade (0,58 – 1,08 g cm⁻³) e durabilidade (Carvalho, 2003, 2006).

Infelizmente, devido à exploração insustentável de madeira, extração e comércio ilegal, as espécies *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* estão sofrendo declínios significativos das populações. Por essas razões, são classificadas pela *International Union for Conservation of Nature's Red List* como “quase ameaçadas” (IUCN, 2021) e incluídas no apêndice II da lista da *Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora* (CITES, 2023), assim como as demais espécies dos gêneros *Handroanthus* Mattos e *Tabebuia* Gomes ex DC. Tal inclusão obriga ações de proteção regulatória e adicionais, além daquelas já adotadas em projetos de manejo florestal, com o objetivo de reduzir a exploração e o comércio ilegal.

Por todas as razões acima mencionadas, conhecer detalhadamente a fenologia e escala fenológica de tais espécies são fundamentais para desenvolver melhorias ou novas tecnologias para a produção de mudas e de manejo mais sustentável (Martins *et al.*, 2024), as quais podem auxiliar na sobrevivência e sucesso do desenvolvimento inicial no campo. Porém, nenhuma escala fenológica das espécies florestais nativas acima mencionadas foi desenvolvida até o momento, considerando o desenvolvimento inicial. Dada a importância dessas espécies e a escassez de estudos desta natureza, este trabalho objetivou adaptar a escala BBCH para descrever os estágios fenológicos do desenvolvimento inicial das espécies *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Design experimental e descrição dos dados

Os dados fenológicos utilizados neste estudo foram datas de semeadura, emergência e

emissão de folhas, imagens e datas de ocorrência de cada estágio/subestágio de desenvolvimento. As folhas foram contabilizadas semanalmente a partir de 1,0 cm de comprimento (folha visível) (Fagundes *et al.*, 2024a; Martins *et al.*, 2024), desde a data de emergência (EM) até a data de término do desenvolvimento inicial (n) de cada espécie florestal. Todos os dados foram obtidos a partir de experimentos conduzidos entre junho de 2022 a fevereiro de 2024. A EM foi considerada como a data em que as sementes germinaram e estavam visíveis acima do solo (Tabela 2.1), enquanto o n foi considerado como o dia em que as espécies atingiram 10 folhas acumuladas no caule principal. Ambos os limiares foram definidos em experimentos preliminares para verificar os valores mínimos de taxa de emergência das amostras de sementes, e o patamar de término do desenvolvimento inicial. Além disso, foram observadas as características morfológicas de cada espécie em cada momento de desenvolvimento (ou emissão de folhas).

Tabela 2.1 - Porcentagem de emergência (%), peso médio, tempo de armazenamento e local de coleta das sementes das espécies florestais utilizadas neste estudo e nos testes de emergência preliminares.

Amostra	Porcentagem de emergência (%)		Peso médio de 1000 sementes ³ (g)	Tempo de armazenamento ⁴ (dias)	Local de coleta
	Teste de emergência ¹	Valor mínimo para EM ²			
Bauhinia forficata					
A1	48,3	24,2	113,0	333	Santa Maria-RS
A2	65,8	32,9		205	
Ceiba speciosa					
A1	60	30	94,9	1428	Rio das Pedras-SP
A2	71,7	35,9		256	Porto Feliz-SP
A3	94,2	47,1		353	Itajubá-MG
Handroanthus chrysotrichus					
A1	11,7	5,9	10,3	193	Santa Maria-RS
A2	10,8	5,4		312	Itajubá-MG
Handroanthus impetiginosus					
A1	48,3	24,2	104,3	1002	Lavras-MG
A2	53,3	26,7		231	Seropédica-RJ
A3	20,8	10,4		295	Itajubá-MG
Tabebuia roseoalba					
A1	70,8	35,4	13,4	204	Porto Feliz-SP
A2	20,8	10,4		270	Itajubá-MG

¹Porcentagem de emergência obtida nos experimentos preliminares. ²Valor mínimo de porcentagem de emergência usado para definir a data de emergência (EM) – pelo menos 50% da porcentagem de emergência -. ³Peso médio de 1000 sementes (Felix *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2007; Maeda; Matthes, 1984; Missio *et al.*, 2021). ⁴Tempo de armazenamento das sementes, contabilizado desde a data da coleta até a data em que foram conduzidos os testes de emergência preliminares. As sementes não foram submetidas a tratamentos de quebra de dormência.

Os experimentos de campo foram conduzidos na área experimental da Universidade

Federal de Itajubá. O município de Itajubá é local de ocorrência natural das espécies florestais estudadas e apresenta clima típico de monções, com duas estações bem definidas: outono e inverno secos (de abril a setembro) e primavera e verão úmidos (de outubro a março) (Fagundes *et al.*, 2024a) (Figura 2.2).

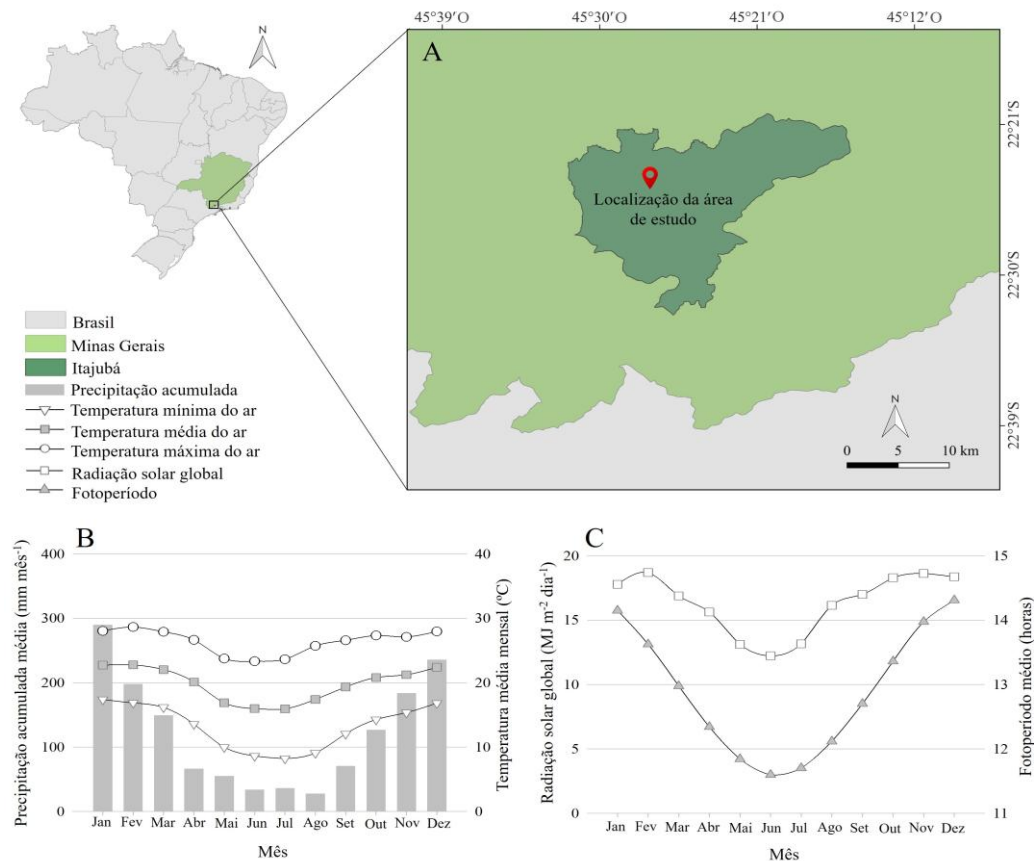


Figura 2.2 - Localização da área de estudo (A) e médias mensais climatológicas para precipitação acumulada (mm mês⁻¹), temperatura do ar (°C; mínima, média e máxima) (B), radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹) e fotoperíodo (horas) (C) para Itajubá. As médias mensais foram obtidas entre 1985 a 2014 a partir de dados meteorológicos de alta resolução espacial (0,25° x 0,25° latitude/longitude) disponível em <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA> (Xavier *et al.*, 2016).

As sementes utilizadas neste estudo foram obtidas de várias localidades brasileiras, coletadas em diferentes períodos de dispersão e gentilmente cedidas por instituições públicas e empresas privadas brasileiras (Centro Estadual de Diagnóstico e Pesquisa Florestal - Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul; Instituto de Florestas - Universidade Federal do Rio de Janeiro; Departamento de Engenharia Florestal - Universidade Federal de Lavras; Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais e Instituto Refloresta. Além disso, foram utilizadas sementes coletadas em Itajubá. O uso de sementes de múltiplos locais e de diferentes matrizes

visam cobrir ampla gama de gradientes geográficos e condições genéticas, que são importantes para a adaptação da escala fenológica.

Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado, com cinco espécies florestais, *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*, cultivadas em vasos de polietileno branco de 8L, em 14 datas de semeadura (DS) instaladas em intervalos de ~30 dias em 8 repetições, totalizando 40 repetições por DS. O uso de múltiplas DSs garante que as plantas se desenvolvam em uma ampla gama de condições meteorológicas (Fagundes *et al.*, 2024b) (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Data de semeadura, emergência e final do desenvolvimento inicial das espécies florestais *Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba* de experimentos realizados em Itajubá.

	Data de semeadura (DS)	Data de emergência ¹ (EM)	Data do término do desenvolvimento inicial ² (n)
<i>Bauhinia forficata</i>	DS1	14 jun. 2022	08 jul. 2022
	DS2	15 jul. 2022	05 ago. 2022
	DS3	16 ago. 2022	02 set. 2022
	DS4	16 set. 2022	17 out. 2022
	DS5	17 out. 2022	01 nov. 2022
	DS6	14 nov. 2022	24 nov. 2022
	DS7	16 dez. 2022	26 dez. 2022
	DS8	17 jan. 2023	30 jan. 2023
	DS9	15 fev. 2023	27 fev. 2023
	DS10	15 mar. 2023	22 mar. 2023
	DS11	17 abr. 2023	05 mai. 2023
	DS12	16 mai. 2023	05 jun. 2023
	DS13	19 jun. 2023	07 jul. 2023
	DS14	13 jul. 2023	04 ago. 2023
<i>Ceiba speciosa</i>	DS1	14 jun. 2022	29 jun. 2022
	DS2	15 jul. 2022	29 jul. 2022
	DS3	16 ago. 2022	02 set. 2022
	DS4	16 set. 2022	07 out. 2022
	DS5	17 out. 2022	27 out. 2022
	DS6	14 nov. 2022	28 nov. 2022
	DS7	16 dez. 2022	23 dez. 2022
	DS8	17 jan. 2023	27 jan. 2023
	DS9	15 fev. 2023	22 fev. 2023
	DS10	15 mar. 2023	22 mar. 2023
	DS11	17 abr. 2023	28 abr. 2023
	DS12	16 mai. 2023	02 jun. 2023
	DS13	19 jun. 2023	07 jul. 2023
	DS14	13 jul. 2023	04 ago. 2023

... continuação

<i>Handroanthus chrysotrichus</i>	DS1	14 jun. 2022	15 jul. 2022	02 dez. 2022
	DS2	15 jul. 2022	22 ago. 2022	21 dez. 2022
	DS3	16 ago. 2022	23 set. 2022	02 fev. 2023
	DS4	16 set. 2022	21 out. 2022	08 fev. 2023
	DS5	17 out. 2022	07 nov. 2022	01 mar. 2023
	DS6	14 nov. 2022	05 dez. 2022	12 abr. 2023
	DS7	16 dez. 2022	02 jan. 2023	10 mai. 2023
	DS8	17 jan. 2023	06 fev. 2023	04 ago. 2023
	DS9	15 fev. 2023	01 mar. 2023	18 ago. 2023
	DS10	15 mar. 2023	12 abr. 2023	01 set. 2023
	DS11	17 abr. 2023	02 mai. 2023	03 nov. 2023
	DS12	16 mai. 2023	07 jun. 2023	10 nov. 2023
	DS13	19 jun. 2023	07 ago. 2023	12 jan. 2024
	DS14	13 jul. 2023	14 ago. 2023	01 dez. 2023
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	DS1	14 jun. 2022	18 jul. 2022	02 dez. 2022
	DS2	15 jul. 2022	01 ago. 2022	19 jan. 2023
	DS3	16 ago. 2022	09 set. 2022	02 fev. 2023
	DS4	16 set. 2022	10 out. 2022	01 mar. 2023
	DS5	17 out. 2022	01 nov. 2022	15 mar. 2023
	DS6	14 nov. 2022	28 nov. 2022	02 jun. 2023
	DS7	16 dez. 2022	23 dez. 2022	07 jun. 2023
	DS8	17 jan. 2023	01 fev. 2023	18 ago. 2023
	DS9	15 fev. 2023	01 mar. 2023	25 ago. 2023
	DS10	15 mar. 2023	31 mar. 2023	15 set. 2023
	DS11	17 abr. 2023	05 mai. 2023	10 nov. 2023
	DS12	16 mai. 2023	23 jun. 2023	17 nov. 2023
	DS13	19 jun. 2023	28 jul. 2023	12 jan. 2024
	DS14	13 jul. 2023	18 ago. 2023	12 jan. 2024
<i>Tabeuia rosealba</i>	DS1	14 jun. 2022	12 jul. 2022	02 dez. 2022
	DS2	15 jul. 2022	10 ago. 2022	19 jan. 2023
	DS3	16 ago. 2022	16 set. 2022	15 fev. 2023
	DS4	16 set. 2022	18 out. 2022	22 fev. 2023
	DS5	17 out. 2022	07 nov. 2022	22 mar. 2023
	DS6	14 nov. 2022	05 dez. 2022	03 mai. 2023
	DS7	16 dez. 2022	28 dez. 2022	26 mai. 2023
	DS8	17 jan. 2023	08 fev. 2023	25 ago. 2023
	DS9	15 fev. 2023	01 mar. 2023	08 set. 2023
	DS10	15 mar. 2023	06 abr. 2023	29 set. 2023
	DS11	17 abr. 2023	10 mai. 2023	10 nov. 2023
	DS12	16 mai. 2023	12 jun. 2023	24 nov. 2023
	DS13	19 jun. 2023	04 ago. 2023	19 jan. 2024
	DS14	13 jul. 2023	21 ago. 2023	26 jan. 2024

¹A data de emergência foi considerada quando as sementes atingiram a porcentagem mínima de emergência definida nos testes preliminares (ver tabela 2.1). ²A data do término do desenvolvimento inicial foi considerada quando as espécies florestais atingiram a média de 10 folhas no caule principal.

Os vasos foram preenchidos com o horizonte ‘A’ moderado de um Latossolo Vermelho distrófico típico (Santos *et al.*, 2018), coletado em Itajubá-MG. O solo era fortemente ácido (pH = 4,7) e continha 18,2 g kg⁻¹ de matéria orgânica, 0,66 mg dm⁻³ de Fósforo (P) e 15,3 mg dm⁻³ de Potássio (K). Aproximadamente 30 dias antes de cada DS foram realizadas correções na acidez e fertilidade de acordo com a Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG, 1999), Evaristo *et al.* (2020) e Freitas *et al.* (2017), pela aplicação em cada repetição de 1,96 g de carbonato de cálcio (CaCO₃) e 0,65 g de carbonato de magnésio. (MgCO₃). Entre 60 e 120 dias após a semeadura, foram realizadas adubações de cobertura com aplicação de 0,8 g de sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄), 1,2 g de cloreto de potássio (KCl) e 1,2 g superfosfato simples (18% de P, 16% de Ca e 10% de S) em cada repetição. Exceto em dias chuvosos, foram realizadas irrigações diárias repondo a água perdida por evapotranspiração, assegurando níveis ideais de umidade do solo, seguindo o método descrito por Fagundes *et al.* (2023a; 2023b).

2.2.2. Adaptação da escala BBCH para cinco espécies florestais nativas brasileiras

Neste estudo, a escala BBCH foi devidamente adaptada para descrever os estágios do desenvolvimento inicial das cinco espécies florestais nativas (Tabela 2.3). Esta escala possui dois dígitos numéricos, no qual o primeiro descreve o estágio de desenvolvimento principal e o segundo dígito descreve os subestágios subsequentes (até a 10ª folha).

Tabela 2.3 - Codificação e descrição adaptadas aos estágios fenológicos de cinco espécies florestais nativas brasileiras (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*) durante o desenvolvimento inicial.

Código original	Descrição original	Código adaptado	Descrição adaptada
Estágio de desenvolvimento principal 0: germinação			
0	Semente seca	00 - 09	Semente seca à emergência (cotilédones acima da superfície do solo)
1	Início da embebição da semente		
3	Embebição completa da semente		
5	Radículas da semente emergidas		
7	Plúmula emergida da semente (plúmula aparente)		
8	Plúmula crescendo em direção à superfície do solo		
9	Emergência: emerge através da superfície do solo		
Estágio de desenvolvimento principal 1: desenvolvimento foliar			

... continuação

10	Par de cotilédones visíveis e completamente desdobrados horizontalmente	10	Par de cotilédones possíveis e completamente desdobrados horizontalmente
11	Primeira folha desdobrada	11	1ª folha visível no caule principal
12	Duas folhas	12	2ª folha visível no caule principal
13	Três folhas	13	3ª folha visível no caule principal
14	Quatro folhas	14	4ª folha visível no caule principal
15	Cinco folhas	15	5ª folha visível no caule principal
16	Seis folhas	16	6ª folha visível no caule principal
17	Sete folhas	17	7ª folha visível no caule principal
18	Oito folhas	18	8ª folha visível no caule principal
19	Nove ou mais folhas desdobradas	19	9ª folha visível no caule principal
		110	10ª folha visível no caule principal

Adaptado de Cavalcante *et al.* (2020) e Martins *et al.* (2024). Foi considerada folha visível quando a lâmina foliar possuía comprimento $\geq 1,0$ cm.

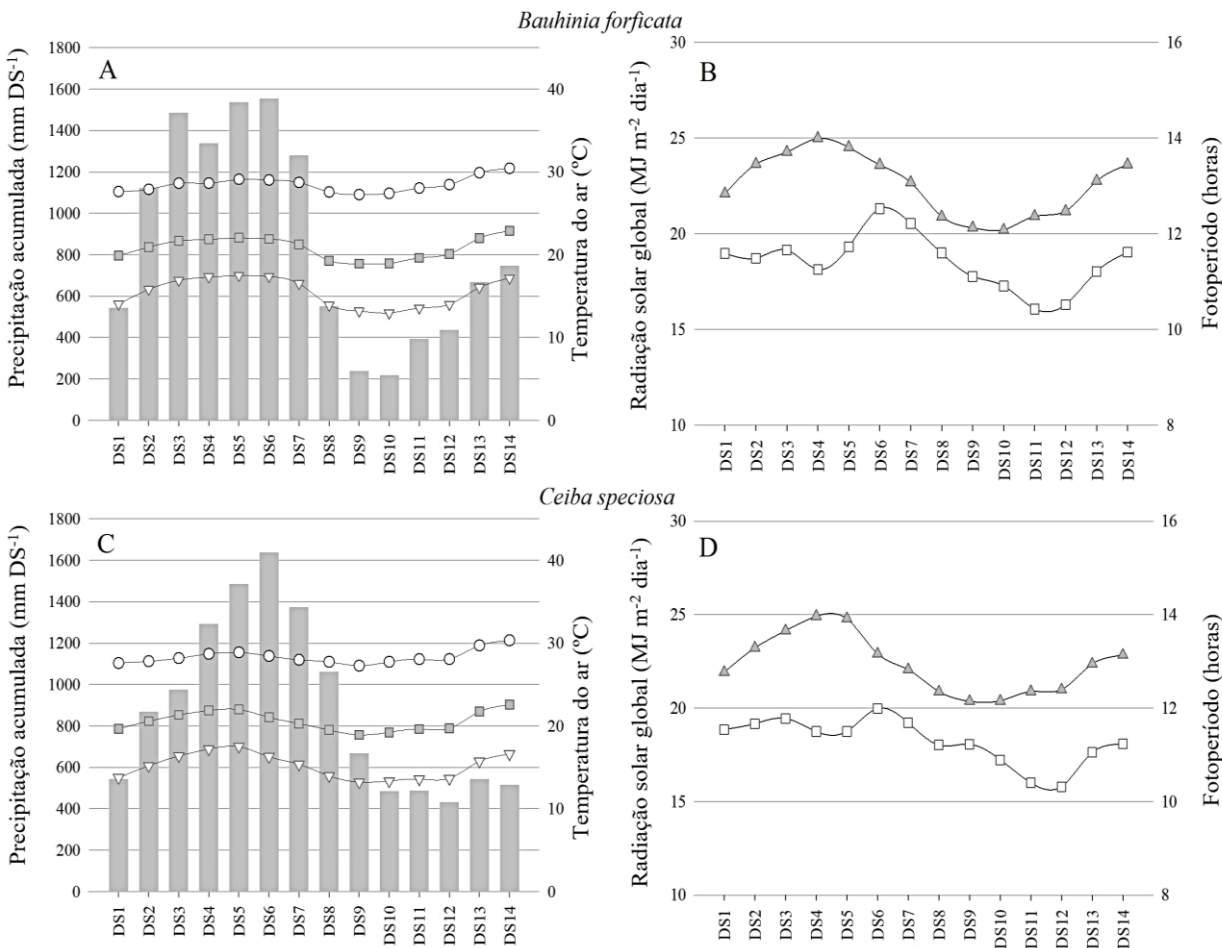
Foram registradas imagens tomadas no momento de ocorrência de cada estágio descrito na Tabela 2.3. Para a confecção da escala fenológica adaptada para as cinco espécies, foi realizada a análise destas imagens acoplada a ocorrência (momento e data) de cada estágio de desenvolvimento e código BBCH. A duração (em dias) de cada estágio para cada espécie foi definida pela duração média das repetições em todas as DSs. A duração de cada estágio foi analisada por meio da análise de variância (ANOVA), seguido do teste de diferença mínima significativa (LSD). Ambos os testes foram usados para detectar se a duração difere entre os estágios de cada espécie florestal. As hipóteses testadas foram: H_0 = os valores de duração não diferem entre os estágios de desenvolvimento ($p \geq 0,05$) versus H_1 = os valores de duração diferem entre os estágios de desenvolvimento ($p < 0,05$).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das observações fenológicas do desenvolvimento inicial das cinco espécies (*B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*) nos experimentos de campo, foi possível identificar e descrever os dois estágios principais e seus respectivos subestágios da escala BBCH. As plantas se desenvolveram sob diferentes condições meteorológicas nas diferentes DSs (Figura 2.3).

Houve variação das condições meteorológicas durante a condução dos experimentos, que permitiu que as plantas se desenvolvessem de forma diferenciada entre as DSs. A precipitação acumulada variou de 124,8 a 1635,4 mm DS⁻¹, a temperatura média foi de 20,6 °C, com mínima absoluta de 3,4 °C e máxima absoluta de 38,1 °C. A radiação solar global variou entre 1,8 MJ m⁻² dia⁻¹ (mínima) a 34,9 MJ m⁻² dia⁻¹ (máxima) e o fotoperíodo variou de 11,6

horas (mínimo) a 14,3 horas (máximo). Os menores valores médios de temperatura do ar foram registrados nas DS9 e DS10, que correspondem ao período de aproximadamente março a setembro. Já os maiores valores médios de temperatura ocorreram nas DS13 e DS14, entre outubro e janeiro. Quanto à precipitação acumulada, os maiores volumes foram observados nas DS5 e DS6, entre outubro e março, enquanto os menores ocorreram nas DS9 e DS10, de março a setembro. Isso indica que os meses mais frios coincidem com os períodos mais secos, enquanto os meses mais quentes são os mais chuvosos. Os valores são coerentes com as médias climatológicas de precipitação, temperatura mensal e radiação solar global para Itajubá (Fagundes *et al.*, 2024a, 2024b). Os valores são coerentes com as médias climatológicas de precipitação, temperatura mensal e radiação solar global para Itajubá (Fagundes *et al.*, 2024a, 2024b).



continua...

...continuação

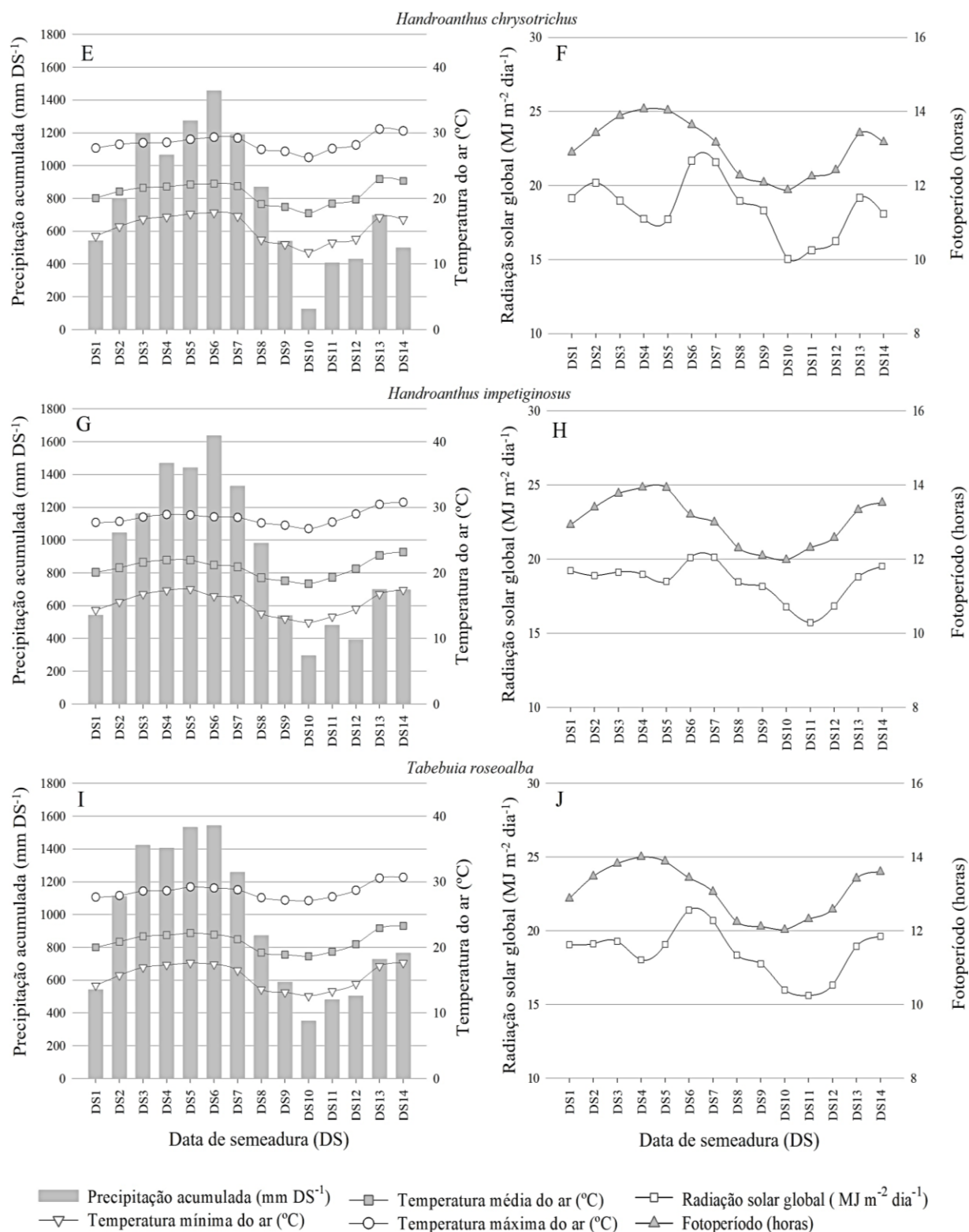


Figura 2.3 - Variação da precipitação acumulada (mm DS⁻¹), temperatura do ar (°C, mínima, média e máxima), radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹) e fotoperíodo médio (horas) para cada data de semeadura (DS) para cinco espécies florestais nativas: (A, B) *Bauhinia forficata*, (C, D) *Ceiba speciosa*, (E, F) *Handroanthus chrysotrichus*, (G, H) *Handroanthus impetiginosus* e

(I, J) *Tabebuia roseoalba* dos experimentos conduzidos em Itajubá. As variáveis foram medidas com uma estação meteorológica automática localizada na área experimental.

2.3.1. Estágio de desenvolvimento principal 0: germinação

As cinco espécies possuem sementes ortodoxas, ou seja, tolerantes à dessecação, as quais passam por uma secagem de maturação para atingir um teor de umidade < 15% antes de serem dispersadas pela planta-mãe (Missio *et al.*, 2021; Ranganathan; Groot, 2023). As sementes dessas espécies possuem perda lenta do vigor, e geralmente podem ser armazenadas por longos períodos, que variam de seis meses a dois anos, sob condições de baixa temperatura (<5 °C) e umidade (<50 %) (Mayrinck *et al.*, 2019). Além disso, essas sementes apresentam germinação epígea, o que significa que durante o estabelecimento da raiz, o hipocótilo se alonga em um arco que rompe o solo, puxando os cotilédones e a plúmula envolvida através do solo e projetando-os no ar. (Nautiyal *et al.*, 2023). Este estágio descreve o período de germinação desde a semente seca (subestágio 00, Figuras 2.4a, 2.5a, 2.6a, 2.7a e 2.8a) até a emergência da radícula e desenvolvimento dos cotilédones (subestágio 09, Figuras 2.4b, 2.5b, 2.5c, 2.6b, 2.7b e 2.8b) (Tabela 2.4).

As cinco espécies possuem diferença na duração do estágio de germinação pelo teste LSD (±9 dias), variando de ~14 dias (*C. speciosa*) a ~27 dias (*H. chrysotrichus*).

Tabela 2.4 - Escala BBCH adaptada e duração média (dias) dos estágios fenológicos para as cinco espécies florestais brasileiras (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*).

<i>Bauhinia forficata</i>			
Código	Descrição do subestágio		Duração (dias) ± desvio padrão
Estágio de desenvolvimento principal 0: germinação			
00-09	Semente seca à emergência (cotilédones acima da superfície do solo)	(Figuras 2.4a, 2.4b)	17 (±6)
Estágio de desenvolvimento principal 1: desenvolvimento foliar			
09-11	emergência – 1ª folha visível no caule principal	(Figura 2.4c)	7 (±3)
12	2ª folha visível no caule principal	(Figura 2.4d)	10 (±5)
13	3ª folha visível no caule principal	(Figura 2.4e)	11 (±5)
14	4ª folha visível no caule principal		17 (±10)
15	5ª folha visível no caule principal	(Figura 2.4f)	19 (±12)
16	6ª folha visível no caule principal		31 (±16)
17	7ª folha visível no caule principal		24 (±9)
18	8ª folha visível no caule principal	(Figura 2.4g)	18 (±7)

... continuação

19	9ª folha visível no caule principal	17 (± 7)
110	10ª folha visível no caule principal	20 (± 5)
Duração do desenvolvimento inicial		190
LSD 5%		11,2

Ceiba speciosa

Código	Descrição do subestágio	Duração (dias) $\pm$ desvio padrão
--------	-------------------------	---------------------------------------

Estágio de desenvolvimento principal 0: germinação

00-09	Semente seca à emergência (cotilédones acima da superfície do solo)	(Figuras 2.5a, 2.5b, 2.5c, 2.5d) 14 (± 5)
-------	--	--

Estágio de desenvolvimento principal 1: desenvolvimento foliar

09-11	emergência – 1ª folha visível no caule principal	10 (± 4)
12	2ª folha visível no caule principal	(Figura 2.5e) 15 (± 5)
13	3ª folha visível no caule principal	17 (± 8)
14	4ª folha visível no caule principal	(Figura 2.5f) 25 (± 19)
15	5ª folha visível no caule principal	23 (± 19)
16	6ª folha visível no caule principal	16 (± 7)
17	7ª folha visível no caule principal	16 (± 6)
18	8ª folha visível no caule principal	15 (± 4)
19	9ª folha visível no caule principal	(Figura 2.5g) 16 (± 6)
110	10ª folha visível no caule principal	17 (± 9)
Duração do desenvolvimento inicial		184
LSD 5%		12,2

Handroanthus chrysotrichus

Código	Descrição do subestágio	Duração (dias) $\pm$ desvio padrão
--------	-------------------------	---------------------------------------

Estágio de desenvolvimento principal 0: germinação

00-09	Semente seca à emergência (cotilédones acima da superfície do solo)	(Figuras 2.6a, 2.6b, 2.6c) 27 (± 10)
-------	--	---

Estágio de desenvolvimento principal 1: desenvolvimento foliar

09-12	emergência – 2ª folha visível no caule principal (1º par de folhas simples e opostas)	(Figura 2.6d) 13 (± 4)
14	4ª folha visível no caule principal (2º par de folhas simples e opostas)	(Figura 2.6e) 26 (± 9)
16	6ª folha visível no caule principal (3º par de folhas simples e opostas)	44 (± 18)
18	8ª folha visível no caule principal (4º par de folhas simples e opostas)	(Figura 2.6f) 28 (± 16)
110	10ª folha visível no caule principal (5º par de folhas simples e opostas)	(Figura 2.6g) 33 (± 15)
Duração do desenvolvimento inicial		171

...continuação

LSD 5%			14,4
<i>Handroanthus impetiginosus</i>			
Código	Descrição do subestágio		Duração (dias) ± desvio padrão
Estágio de desenvolvimento principal 0: germinação			
00-09	Semente seca à emergência (cotilédones acima da superfície do solo)	(Figuras 2.7a, 2.7b)	22 (±10)
Estágio de desenvolvimento principal 1: desenvolvimento foliar			
09-12	emergência – 2ª folha visível no caule principal (1º par de folhas simples e opostas)	(Figura 2.7c)	14 (±4)
14	4ª folha visível no caule principal (2º par de folhas simples e opostas)	(Figuras 2.7d, 2.7e)	22 (±8)
16	6ª folha visível no caule principal (3º par de folhas simples ou compostas e opostas)	(Figura 2.7f)	48 (±19)
18	8ª folha visível no caule principal (4º par de folhas simples ou compostas e opostas)	(Figura 2.7g)	42 (±20)
110	10ª folha visível no caule principal (5º par de folhas simples ou compostas e opostas)		40 (±15)
Duração do desenvolvimento inicial			189
LSD 5%			15,7
<i>Tabebuia roseoalba</i>			
Código	Descrição do subestágio		Duração (dias) ± desvio padrão
Estágio de desenvolvimento principal 0: germinação			
00-09	Semente seca à emergência (cotilédones acima da superfície do solo)	(Figuras 2.8a, 2.8b, 2.8c)	26 (±9)
Estágio de desenvolvimento principal 1: desenvolvimento foliar			
09-12	emergência - 2ª folha visível no caule principal (1º par de folhas simples e opostas)	(Figura 2.8d)	14 (±4)
14	4ª folha visível no caule principal (2º par de folhas simples e opostas)	(Figura 2.8e)	31 (±12)
16	6ª folha visível no caule principal (3º par de folhas simples e opostas)	(Figura 2.8f)	57 (±15)
18	8ª folha visível no caule principal (4º par de folhas simples e opostas)		36 (±12)
110	10ª folha visível no caule principal (5º par de folhas simples e opostas)	(Figura 2.8g)	29 (±8)
Duração do desenvolvimento inicial			193

... continuação

LSD 5%	11,8
LSD 5% do subestágio 00-09 entre as cinco espécies:	9,0

Nota: LSD 5% indica a menor diferença significativa entre grupos (ou médias) com 5% de probabilidade

2.3.2. Estágio de desenvolvimento principal 1: desenvolvimento foliar

O estágio de desenvolvimento principal 1 (código 09 a 110) representa o início do desenvolvimento vegetativo das plantas. A partir do código 09, o par de cotilédones torna-se visível e completamente desdobrado horizontalmente. É neste estágio que ocorre o início das reações que envolvem a fotossíntese, realizada pelos cotilédones verdes (Buffon *et al.*, 2022; Nautiyal *et al.*, 2023) (Figuras 2.4c, 2.5d, 2.6c, 2.7c e 2.8c). Em seguida (códigos 11 e 12), ocorre a abertura dos eófilos, ou seja, primeira folha expandida ou o primeiro par de folhas com lâmina verde. O estágio de desenvolvimento principal 1 variou entre 144 dias (*H. chrysotrichus*) até 173 dias (*B. forficata*).

2.3.2.1. *Bauhinia forficata*

Na *B. forficata* os eófilos são unifoliados com filotaxia alterna, ou seja, uma folha emitida por nó, dispostas de forma dística (nova folha posicionada 180° em relação à folha anterior). Os eófilos não diferem morfológicamente dos metáfilos (folhas adultas), apresentando órgão laminar bífido, ou seja, dividido em duas partes por uma incisão que não ultrapassa a metade do comprimento do órgão laminar (Gonçalves; Lorenzi, 2011), lembrando o formato de uma pata-de-vaca (Figuras 2.4e, 2.4f, 2.4g).

Com o avanço dos subestágios de desenvolvimento subsequentes (códigos 11-110), as folhas passam a apresentar coloração verde-escura (Figuras 2.4f e 2.4g). A haste principal é afilada e flexível e, de acordo com as observações experimentais, o diâmetro da haste cresce lentamente. Espinhos - estípulas transformadas em espinhos (Ye & Craene, 2024) - foram observados na base dos pecíolos.

Ao atingirem 10 folhas no caule principal (código 110), as plantas apresentam altura média de ~22,4 cm (acima do solo), porém, ainda são frágeis, e possuem pouca sustentação da haste principal. Há diferença na duração dos subestágios de desenvolvimento (códigos 00-09 a 110) para a *B. forficata*. O subestágio 09-11 (emergência - 1ª folha visível no caule principal) apresentou menor duração (7 dias), enquanto os subestágios 16 e 17 (6ª e 7ª folhas visíveis no caule principal) apresentaram maior duração (31 e 24 dias, respectivamente).

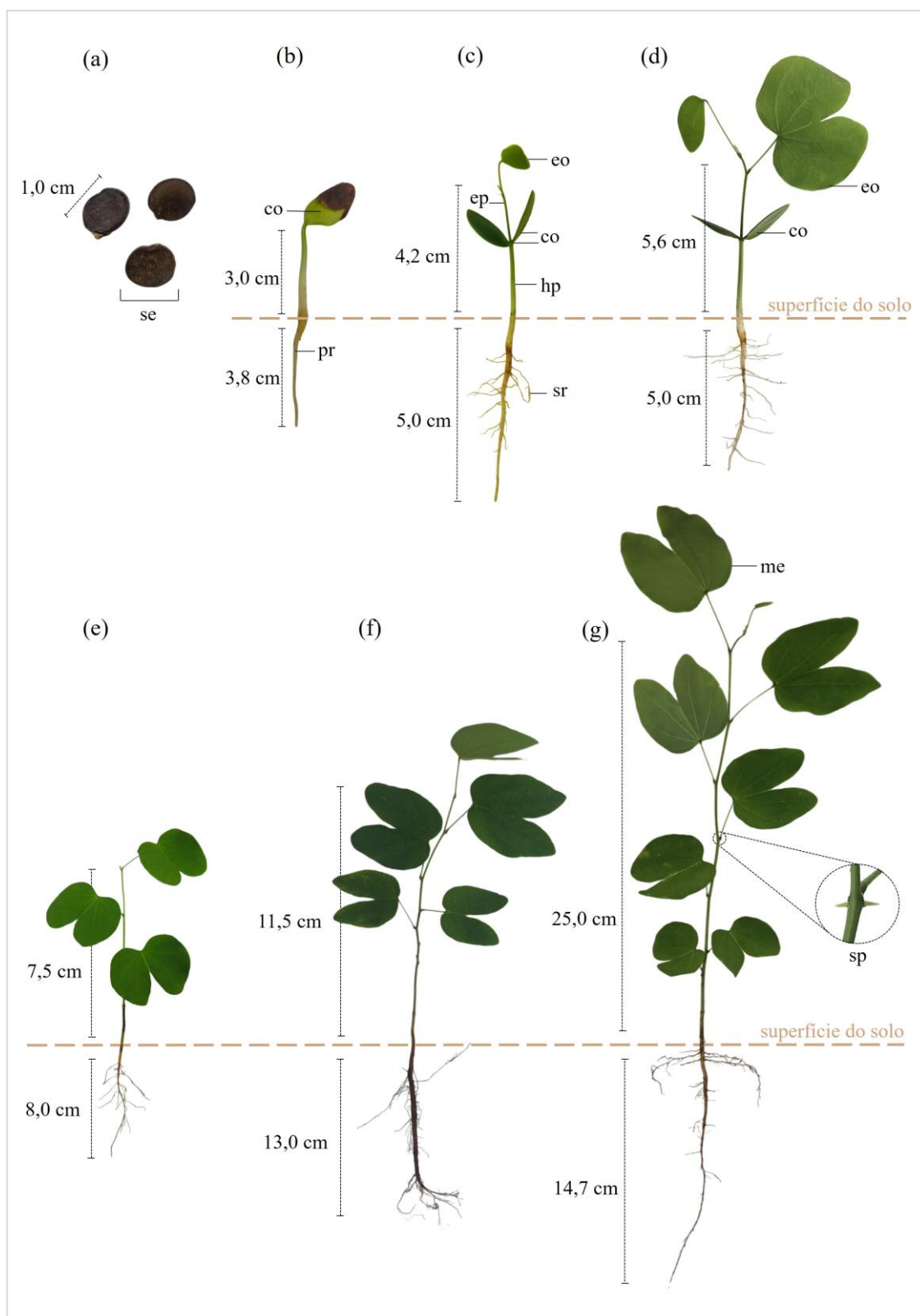


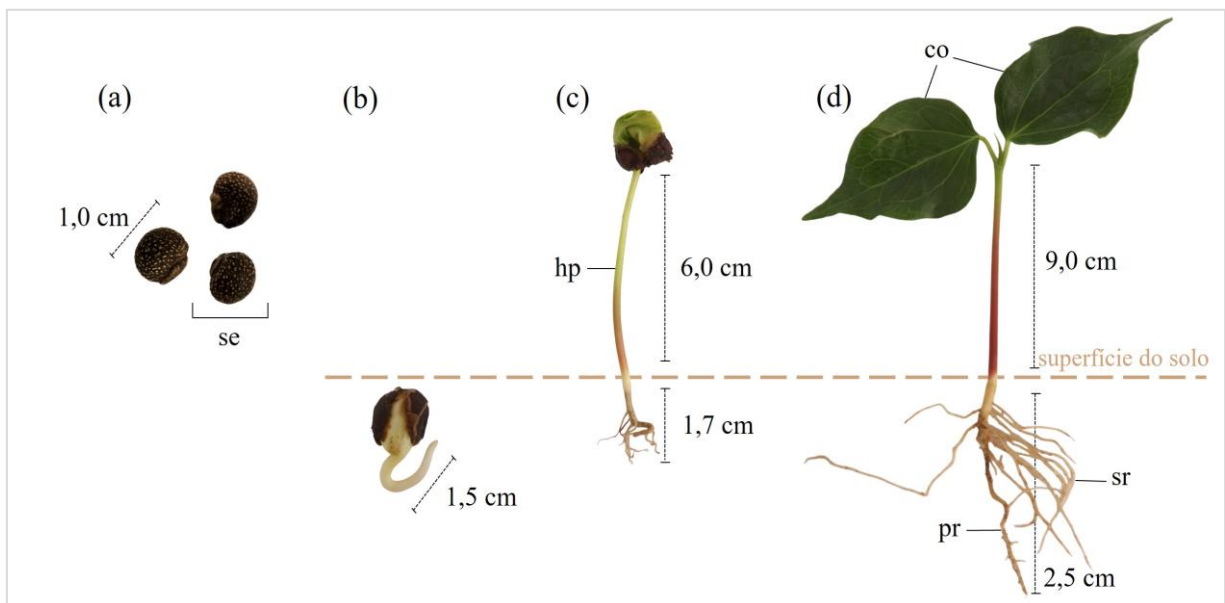
Figura 2.4 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e desenvolvimento foliar da espécie florestal *Bauhinia forficata* (co = cotilédone; eo = eófilo; ep = epicótilo; hp = hipocótilo; me = metáfilo; pr = raiz primária; se = semente; sp = espinhos; sr = raiz secundária).

2.3.2.2. *Ceiba speciosa*

C. speciosa apresenta eófilos unifoliolados dispostos de forma alterna trística, ou seja, uma folha por nó, dispostas em três fileiras ao longo do caule, perfazendo um ângulo de 120° entre as folhas (Gonçalves; Lorenzi, 2011). Os eófilos e metáfilos são folhas compostas digitadas, ou seja, com limbo dividido em folíolos independentes, onde as nervuras irradiam do mesmo ponto na base, formando uma estrutura que se assemelha a palma da mão (Carvalho, 2003), variando de 3 a 7 folíolos (Figuras 2.5e, 2.5f e 2.5g).

A *C. speciosa* possui desenvolvimento/crescimento rápido comparada às demais espécies estudadas, com duração de ~170 dias entre a emergência (código 09) até a emissão da 10ª folha (código 110), e adensamento da base da haste e da raiz principal logo nos primeiros meses (~ três meses após a semeadura). Aproximadamente aos 150 dias, surgem os primeiros acúleos no caule, que são estruturas epidérmicas duras e pontiagudas sem vascularização (Zhou *et al.*, 2021) (Figura 2.5g). As plantas alcançam 10 folhas em ~ 184 dias (código 110) e uma altura média de 31,0 cm.

Há diferença na duração dos subestágios de desenvolvimento (00-09 a 110) para a *C. speciosa*. Ou seja, o subestágio 09-11 (emergência – 1º folha visível no caule principal) apresentou menor duração (10 dias), enquanto os subestágios 14 e 15 (4º e 5º folhas visíveis no caule principal) apresentaram maior duração (25 e 23 dias, respectivamente).



continua...

... continuação

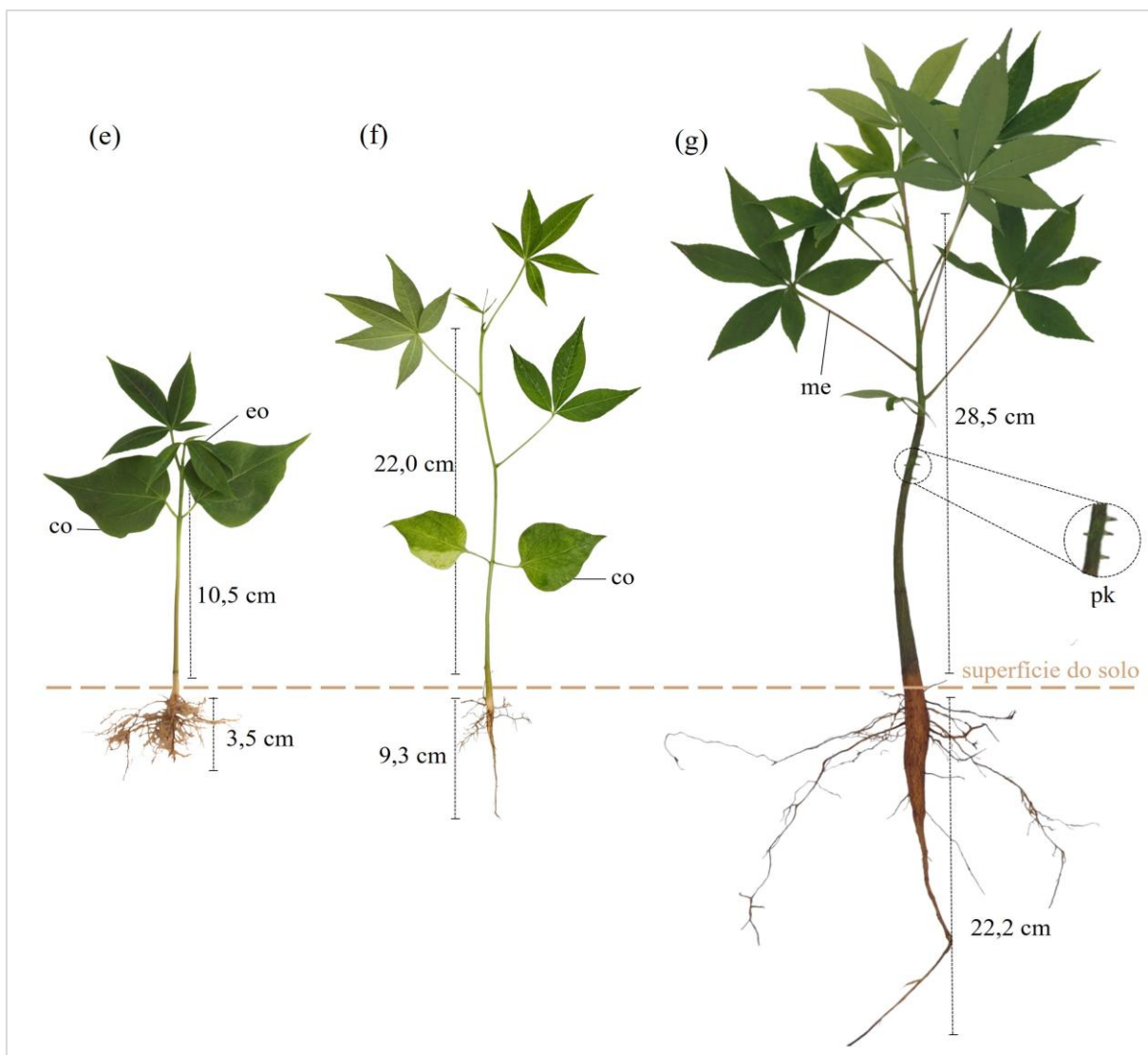


Figura 2.5 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e desenvolvimento foliar da espécie florestal *Ceiba speciosa* (co = cotilédone; eo = eófilo; hp = hipocótilo; me = metáfilo; pk = acúleos; pr = raiz primária; se = semente; sr = raiz secundária).

2.3.2.3. *Handroanthus chrysotrichus*

Na *H. chrysotrichus* os eófilos e metáfilos têm uma disposição de folhas opostas e cruzadas, ou seja, duas folhas surgem em um nó e se conectam de forma oposta, com um ângulo de 90° com os pares subsequentes (Gonçalves; Lorenzi, 2011) (Figuras 2.6d, 2.6e, 2.6f e 2.6g). As primeiras folhas são simples, com limbo piloso (tricomas) em ambas as faces e as bordas são serreadas (Carvalho, 2006). A haste principal e suas ramificações são afiladas e pilosas. Folhas compostas (digitadas com 3 folíolos) foram observadas a partir da emissão do 4º par (7ª e 8ª folhas). Indivíduos juvenis desta espécie apresentam folhas digitadas de 3-5 folíolos (Frigieri et al., 2016). No geral, as plantas atingem 10 folhas (código 110) no caule principal

aos ~171 dias, com uma altura média de 10,6 cm e folhas pequenas (~ 5,0 cm) (Figura 2.6g).

A espécie apresenta diferença de duração dos subestágios de desenvolvimento (00-09 a 110). O subestágio 09-12 (emergência – 1º par de folhas visíveis no caule principal) apresentou menor duração (13 dias), enquanto o subestágio 16 (3º par de folhas visíveis no caule principal) apresentou maior duração (44 dias).

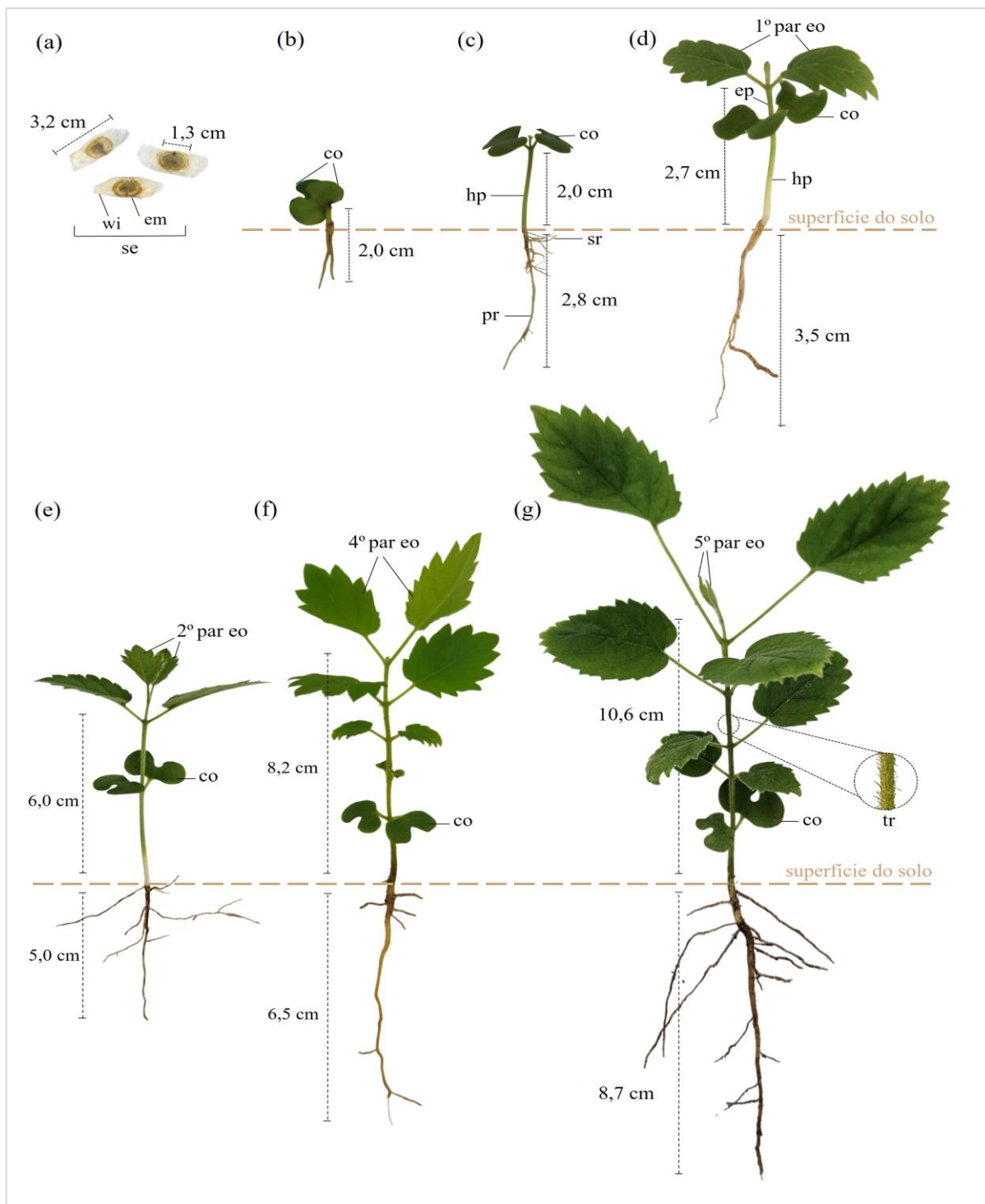


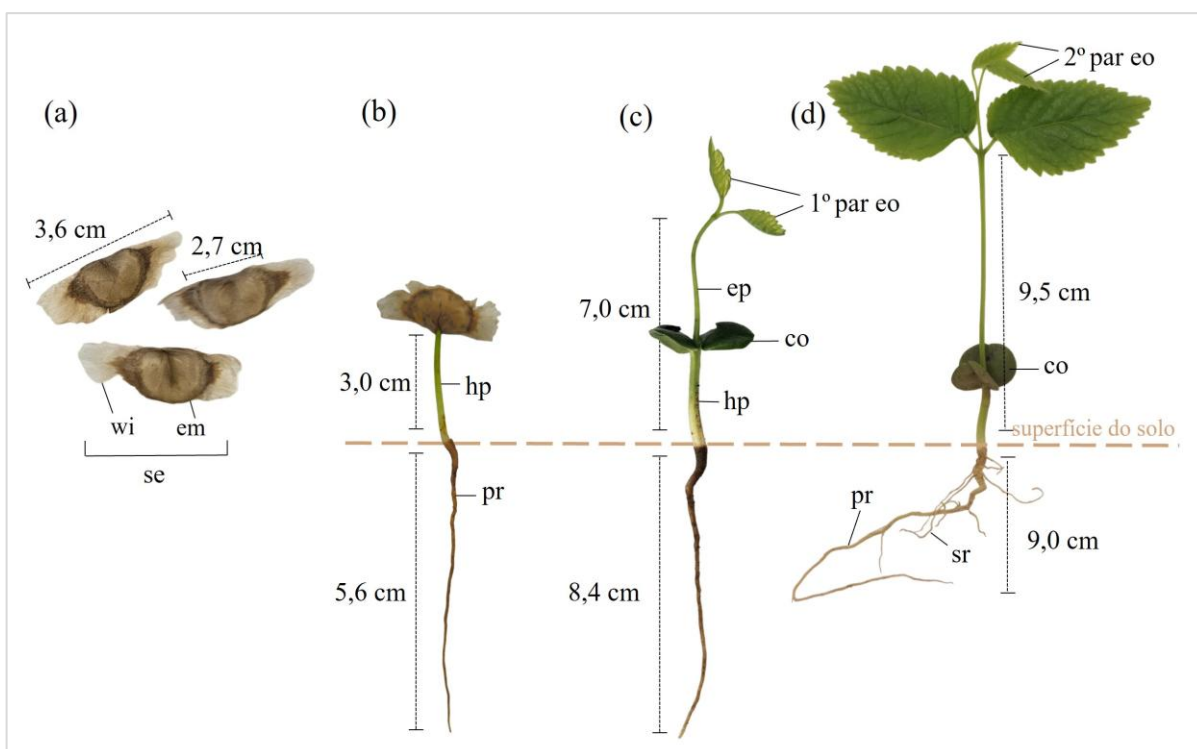
Figura 2.6 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e

desenvolvimento foliar da espécie florestal *Handroanthus chrysotrichus* (co = cotilédone; em = embrião; ep = epicótilo; hp = hipocótilo; par eo = par de eófilos; pr = raiz primária; se = semente; sr = raiz secundária; wi = asa; tr = tricomas).

2.3.2.4. *Handroanthus impetiginosus*

H. impetiginosus apresenta os eófilos e metáfilos em arranjo oposto e cruzado, similar à *H. chrysotrichus*. A haste é afilada e as primeiras folhas são simples e possuem bordas serradas (Carvalho, 2003). Folhas compostas (digitadas com 3 folíolos) são emitidas a partir do 3º e 4º pares de folhas (Figuras 2.7f e 2.7g). Posteriormente, a planta apresenta folhas compostas digitadas com 5 folíolos (Vieira et al., 2016), no entanto, tal característica não foi observada no período de estudo analisado. As plantas atingem o final do desenvolvimento inicial (10ª folha) em ~ 189 dias (código 110) com altura média de 15,2 cm.

A espécie apresenta diferença de duração dos subestágios de desenvolvimento (00-09 a 110), sendo o subestágio 09-12 (emergência – 1º par de folhas visíveis no caule principal) apresentou menor duração (14 dias), enquanto o subestágio 16 (3º par de folhas visíveis no caule principal) apresentou maior duração (48 dias).



continua...

... continuação

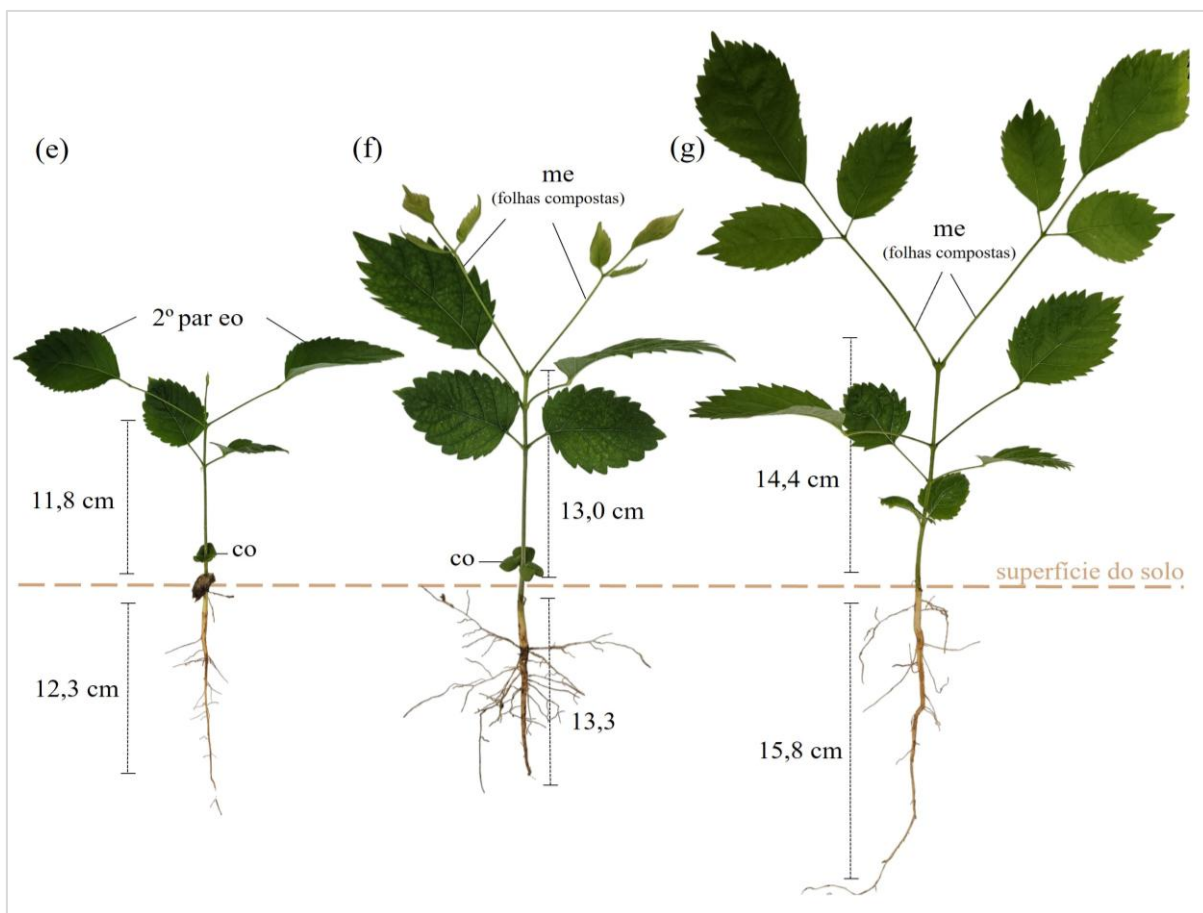


Figura 2.7 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e desenvolvimento foliar da espécie florestal *Handroanthus impetiginosus* (co = cotilédone; em = embrião; ep = epicótilo; hp = hipocótilo; me = metáfilos; par eo = par de eófilos; pr = raiz primária; se = semente; sr = raiz secundária; wi = asa).

2.3.2.5. *Tabebuia roseoalba*

A *T. roseoalba* também apresenta pares de eófilos e metáfilos em arranjo oposto e cruzado. As folhas são simples, com borda serrada e caule afilado (Carvalho, 2003) (Figura 2.8), diferentemente do indivíduo juvenil, que apresenta folhas compostas digitadas com 3 folíolos (Frigieri et al., 2016). A espécie não possui folhas compostas emitidas nos subestágios 11-110. As plantas atingem o final do desenvolvimento inicial (código 110) em ~ 193 dias, com altura média de ~11,5 cm. Além disso, apresenta diferença de duração dos subestágios de desenvolvimento (00-09 a 110), sendo o subestágio 09-12 (emergência - 1º par de folhas visíveis no caule principal) possui menor duração (14 dias), enquanto o subestágio 16 (3º par de folhas visíveis no caule principal) possui maior duração (57 dias). Tal comportamento é similar entre as três espécies de ipês estudadas (*H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*).

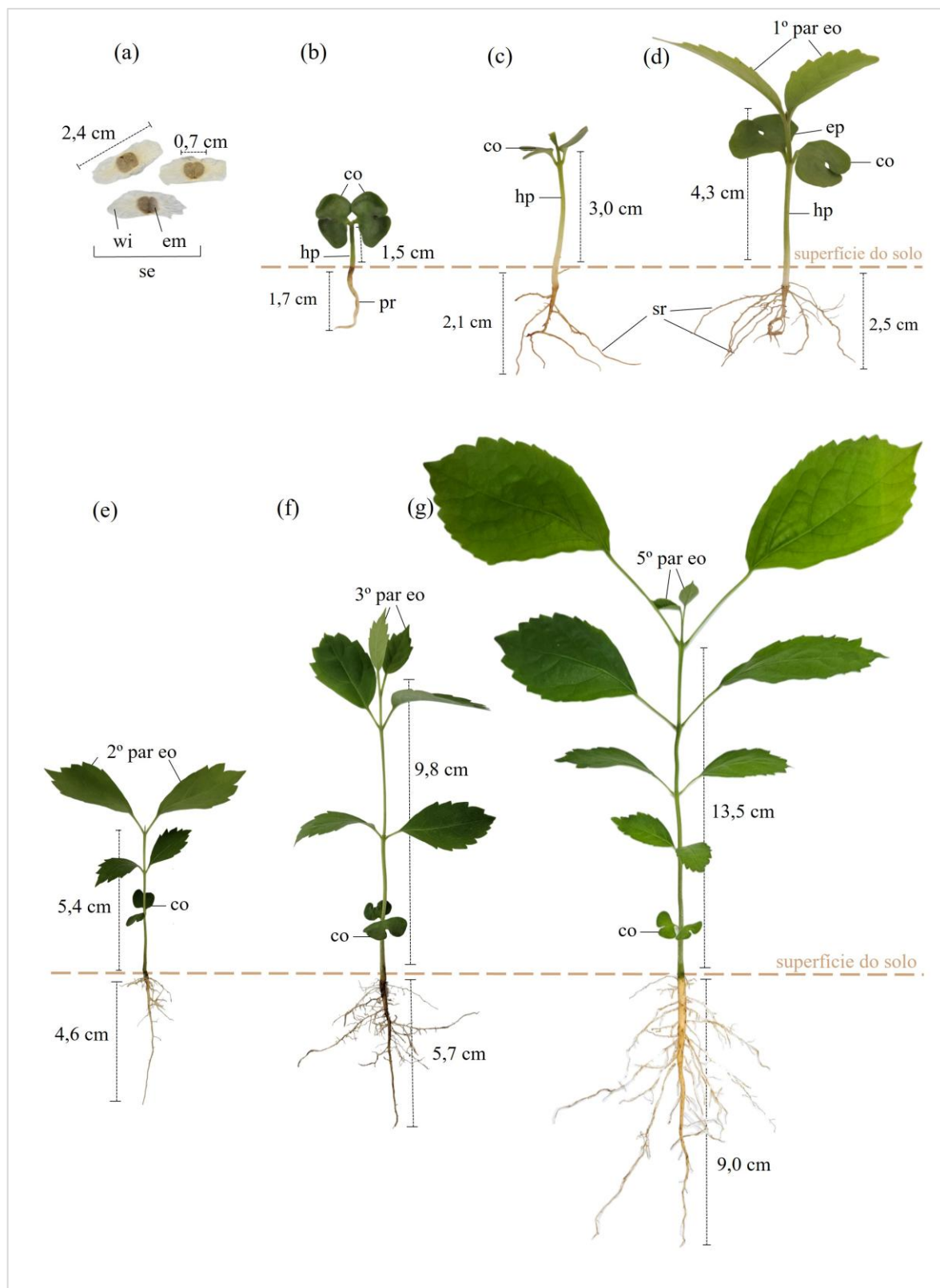


Figura 2.8 - Morfologia dos dois estágios de desenvolvimento principal - germinação e desenvolvimento foliar da espécie florestal *Tabebuia roseoalba* (co = cotilédone; em = embrião; ep = epicótilo; hp = hipocótilo; par eo = par de eófilos; pr = raiz primária; se = semente; sr = raiz secundária; wi = asa).

O ciclo de vida de uma planta propagada por sementes inicia-se com o processo de germinação, definido como a ativação metabólica da semente após a hidratação, culminando no desenvolvimento embrionário e na ruptura ou protrusão da radícula através do tegumento da semente (Buffon *et al.*, 2022; Nautiyal *et al.*, 2023). Esta fase tem início com as sementes ainda secas (código 00) e se encerra quando os cotilédones emergem sobre a superfície do solo e podem ser vistos à olho nu (código 09). As cinco espécies estudadas apresentaram diferença de duração no processo de germinação, o que pode ser atribuído às características intrínsecas de cada espécie, como suas necessidades de temperatura e umidade. Além disso, fatores como a qualidade das sementes também podem influenciar o tempo necessário para a germinação de cada espécie. Mesmo quando um lote de sementes apresenta alta viabilidade, como demonstrado pela porcentagem de germinação, algumas sementes individuais podem ainda não germinar em condições ambientais favoráveis devido a fatores endógenos. Dentre estes, destaca-se a dormência embrionária, caracterizada por embriões pequenos e ainda em desenvolvimento que requerem tempo adicional para atingir a maturidade completa. Além disso, a presença de inibidores bioquímicos, como o ácido abscísico (ABA), quando produzido em altas concentrações pelo embrião, ou inibidores químicos, como compostos fenólicos presentes no pericarpo ou no tegumento da semente, também pode dificultar a germinação (Bewley; Black, 1994; Ranganathan; Groot, 2023).

Nesse sentido, é importante salientar que as diferenças encontradas na germinação das cinco espécies podem estar atreladas ao tempo de armazenamento de algumas amostras utilizadas no presente estudo. Por exemplo, as amostras (A2) de *H. chrysotrichus* e de *T. roseoalba* com 312 e 270 dias de armazenamento apresentaram baixa porcentagem de emergência: 11,7% e 20,8% respectivamente (Tabela 2.1). Ambas as espécies possuem sementes ortodoxas, com alto teor de reservas que são consumidas pela respiração aeróbica durante o armazenamento e germinação (Ranganathan; Groot, 2023; Zhang *et al.*, 2021). Com o avanço do tempo de armazenamento e o envelhecimento das sementes, observa-se um aumento no quociente respiratório - relação entre a quantidade de dióxido de carbono produzida e o oxigênio consumida - indicando uma respiração mais intensa. Esse processo resulta em maior consumo das reservas energéticas, como carboidratos e lipídios (Ranganathan; Groot, 2023; Zhang *et al.*, 2021). Ou seja, mesmo as sementes apresentando características favoráveis à longevidade, e o armazenando sendo feito em condições ótimas (ou mais próximas daquelas ideais), o tempo de armazenamento mais longo pode ter afetado a velocidade de germinação e da emergência destas duas espécies.

O envelhecimento ou deterioração das sementes é um processo irreversível, cumulativo e inexorável, que pode causar o acúmulo de danos celulares, resultando em atraso na emergência das plântulas, menor capacidade de suportar estresses térmicos e hídricos e perda de viabilidade (Ranganathan; Groot, 2023). Mesmo que a menor deterioração possa permitir a protrusão da raiz embrionária, ela pode causar anormalidades nas plântulas, como deformações na radícula, no cotilédone e no hipocótilo. (Ranganathan; Groot, 2023). Nesse estudo, as plântulas com deformações ou deficiências visíveis foram excluídas das observações fenológicas e análises.

A transição entre os estágios de desenvolvimento principal 0 e 1 é decisiva no estabelecimento das plântulas, uma vez que a maior susceptibilidade à ação de agentes bióticos e abióticos, como a ocorrência de pragas e doenças e sensibilidade às variações climáticas, principalmente de temperatura, ocorre durante este período (Nautiyal *et al.*, 2023). A partir do aparecimento dos cotilédones acima do solo (código 09), há a emissão das primeiras folhas verdadeiras, sendo que a frequência de emissão de folhas e filotaxia refletem nos padrões de desenvolvimento e crescimento das espécies florestais (Martins *et al.*, 2024). Por exemplo, este estudo permitiu identificar que durante o desenvolvimento inicial, as espécies *B. forficata* e *C. speciosa* priorizam o crescimento da folha já emitida antes da emissão da folha subsequente. Além disso, ambas espécies possuem maiores alturas ao atingir o subestágio 110 (emissão da 10ª folha). No entanto, a *B. forficata* prioriza o crescimento das folhas e não o da haste. Isto é, a haste da muda é frágil e de pouca sustentação, não sendo recomendado o plantio desta espécie ao atingir o subestágio 110. Já a *C. speciosa* possui características adequadas ao plantio, como hastes firmes e altura correspondente ao padrão recomendado para plantio definitivo de espécies florestais (20 - 30 cm) (Carvalho, 2003; Oliveira *et al.*, 2016).

Por outro lado, as espécies *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* priorizam o desenvolvimento foliar para posterior crescimento das folhas (e em altura). Elas emitem folhas mais lentamente, principalmente nos subestágios 16, 18 e 110. Ou seja, as três espécies levam ~ 49, 35 e 34 dias para emitir a 6ª, 8ª e 10ª folhas, e em média 184 dias para finalizar os estágios de desenvolvimento inicial (00 - 110). Além disso, o plantio definitivo não é recomendado, uma vez que as três espécies apresentam altura média < 15,0 cm no subestágio 110. O plantio definitivo de espécies florestais para arborização urbana e paisagismo é recomendado quando as plantas atingem entre 20,0 cm e 30,0 cm de altura, e para ambientes florestais, recomenda-se que as mudas tenham uma altura mínima de 50,0 cm (Oliveira *et al.*, 2016).

Vale ressaltar que crescimento e desenvolvimento são processos que podem ocorrer simultaneamente ou não. Enquanto o crescimento das folhas envolve um aumento irreversível nas dimensões físicas das folhas (por exemplo, área, comprimento e largura), o desenvolvimento refere-se a processos ontogenéticos em diferentes níveis de organização, como diferenciação celular, iniciação de órgãos (organogênese) e aparência (morfogênese), e se estende à senescência da planta (Fagundes *et al.*, 2024a).

A adaptação da escala BBCH proposta neste estudo proporcionou obter maior compreensão dos padrões de desenvolvimento e crescimento de cinco importantes espécies florestais da flora brasileira e que vêm sofrendo declínios significativos das populações. Por ser focada no desenvolvimento inicial, tal compreensão pode orientar os produtores na seleção de práticas florestais e silviculturais para otimizar a produção de mudas (Martins *et al.*, 2024). Além disso, a escala BBCH é vantajosa comparada a outras escalas devido a simplicidade e adaptabilidade a espécies florestais (Finn *et al.*, 2007; Martins *et al.*, 2024) e em diferentes fases do ciclo de crescimento e estágios de desenvolvimento. O estudo de Finn *et al.* (2007) foi pioneiro em adaptar a escala fenológica BBCH para árvores e plantas lenhosas. Desde então, embora ainda recentes, poucos estudos sobre o desenvolvimento inicial de espécies florestais têm sido conduzidos. Como exemplo, os estudos sobre a descrição da escala fenológica para a fase de muda de *Moringa oleifera* Lam. (Romero-Marcano *et al.*, 2023) e de *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart., *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz e *Platycyamus regnellii* Benth (Martins *et al.*, 2024). Por fim, o uso da escala BBCH permitiu padronizar a comunicação entre os profissionais e pesquisadores florestais, proporcionando um sistema uniforme e detalhado para descrever (e comparar) as cinco espécies florestais estudadas.

2.4. CONCLUSÃO

Este estudo apresenta a primeira escala BBCH adaptada para descrever o desenvolvimento inicial de cinco espécies florestais brasileiras: *Bauhinia forficata* Link, *Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, e *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith. A escala fenológica BBCH foi adaptada e acoplada a imagens para identificar dois estágios de desenvolvimento principal: 0 (germinação) e 1 (desenvolvimento foliar) e 12 subestágios (códigos 00-09 a 110).

As espécies atingiram o subestágio 110 (10ª folha visível no caule principal), que é o patamar de término do desenvolvimento inicial, com aproximadamente 171 dias (*H.*

chrysotrichus), 184 dias (*C. speciosa*) e ~ 190 dias (*B. forficata*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*), havendo diferenças na duração dos subestágios (00 a 110) em todas as espécies. A escala proposta para *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*, tem aplicações práticas, fornecendo informações úteis para a padronização e otimização das técnicas silviculturais. Além disso, é uma ferramenta que pode ser utilizada na avaliação das alterações climáticas no desenvolvimento dessas espécies.

Novos estudos devem ser realizados acoplando necessidades meteorológicas, como temperatura, radiação solar, fotoperíodo ou níveis de sombreamento, na descrição da escala fenológica de desenvolvimento inicial das espécies florestais.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIGA, J.D.; MURALIDHARA, B.M.; PREETHI, P.; SAVADI, S. Phenological growth stages of the cashew tree (*Anacardium occidentale* L.) according to the extended BBCH scale. **Annals of Applied Biology**, v.175, p.246–252, 2019. <https://doi.org/10.1111/aab.12526>.

BAATH, G.S.; KAKANI, V.G.; GOWDA, P.H. ROCATELI, A.C.; NORTHUP, B.K.; SINGH, H.; KATTA, J.R. Guar responses to temperature: estimation of cardinal temperatures and photosynthetic parameters. **Industrial Crops and Products**, v.145, p.111940, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111940>.

BACCIN, L.; MORETTI, M.L. Clopyralid applied with sponge wiper for *Cirsium arvense* control in hops in the western United States. **Crop Protection**, v.177, p.106518, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106518>.

BEWLEY, J.D.; BLACK, M. Dormancy and the control of germination. In: Bewley, J.D.; Black, M. (Eds.) **Seeds: physiology of development and germination**. Plenum Press, p.199-226, 1994. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1002-8>

BUFFON, P.A., STRECK, N.A.; SCHWAB, N.T.; UHLMANN, L.O.; TOMIOZZO, R., LIMA, E.F.; FRESINGHELLI NETTO, J.; GUARIENTI, V.F. A Phenological scale of static. **Annals of Applied Biology**, v.181, p.275-287, 2022. <https://doi.org/10.1111/aab.12765>.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas. 2003. 1.039 p. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras, v. 1). Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 06 mar. 2024.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas. 2006. 627 p. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras, v. 2). Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 06 mar. 2024.

CAVALCANTE, A.G.; LEMOS, L.B.; MEIRELLES, F.C.; CAVALCANTE, A.C.P.; AQUINO, L.A. Thermal sum and phenological descriptions of growth stages of the common

bean according to the BBCH scale. **Annals of Applied Biology**, v.176, p.342-349, 2020. <https://doi.org/10.1111/aab.12571>.

CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. 359 p.

CITES - Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. **Appendices I, II and III (valid from 25 November 2023)**. 2023. Disponível em: <https://cites.org/eng/app/appendices.php>. Acesso em: 19 mar. 2024.

CRIA - Centro de Referência e Informação Ambiental. **Specieslink**. 2023. Disponível em: <https://specieslink.net>. Acesso em: 17 mai. 2023.

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>.

DIMER, L.M.; COLONETTI, T.; UGGIONI, M.L.R. FERRAZ, S.D.; GRANDE, A.J.; ROSA, M.I.; CERETTA, L.B. Evaluation of the effects of *Bauhinia forficata* as an adjuvant in the treatment of type 2 diabetes mellitus: Systematic review and meta-analysis. **European Journal of Integrative Medicine**, v.65, p.102331, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eujim.2024.102331>.

EVARISTO, A.D.P.; CARMO, C.C.A.; SANTANA, F.A. ARÊDES, L.C.; DIAS, J.R.M. NPK, limestone and agricultural gypsum in the production of seedlings of *Ochroma pyramidale*. **Advances in Forestry Science**, v.7, p.1189-1195, 2020. <https://doi.org/10.34062/afs.v7i4.11115>.

FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; REIS, F.Y.S. COSTA, H.F. Modeling the initial development dynamics for two native Brazilian forest tree species. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v.97, p.295-308, 2024a. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad044>

FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; REIS, F.Y.S.; COSTA, H.F. Predicting temperature ranges for the initial development of two native Brazilian tree species using multiple sowing dates. **Forest Ecology and Management**, v.562, p.121912, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121912>.

FELIX, F.C.; MEDEIROS, J.A.D.; PACHECO, M.V. Morfologia de sementes e plântulas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos. **Revista de Ciências Agrárias**, v.41, p.1028-1035, 2018. <https://doi.org/10.19084/RCA18126>.

FINN, G.A.; STRASZEWSKI, A.E.; PETERSON, V. A general growth stage key for describing trees and woody plants. **Annals of Applied Biology**, v.151, p.127-131, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00159.x>.

FREITAS, E.C.S.; PAIVA, H.N.; LEITE, H.G.; OLIVEIRA, S.N. Crescimento e qualidade de mudas de *Cassia grandis* Linnaeus f. em resposta a adubação fosfatada e calagem. **Ciência Florestal**, v.27, p.509-519, 2017. <https://doi.org/10.5902/1980509827732>.

FRIGIERI, F.F.; IWANICKI, N.S.A.; GANDARA, F.B.; FERRAZ, E.M.; ROMÃO, G.O.;

COLETTI, G.F.; SOUZA, V.C.; MORENO, M.A. **Guia de Plântulas e Sementes da Mata Atlântica do Estado de São Paulo**. IPEF. 2016. 99p.

GONÇALVES, E.G.; LORENZI, H. **Morfologia Vegetal. Organografia e dicionário ilustrado de morfologia das plantas vasculares**. 2 ed. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora. 2011. 512 p.

GRAY, S.B.; BRADY, S.M. Plant developmental responses to climate change. **Developmental Biology**, v.419, p.64-77, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>.

GUOLLO, K.; PIROLA, K.; WAGNER JUNIOR, A.; KOSERA NETO, C.; DOTTO, M.; CITADIN, I. Phenological stages of native Myrtaceae species based on the BBCH scale. **Research, Society and Development**, v.9, p.e3719108573, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8573>.

HERNÁNDEZ DELGADO, P.M.; ARANGUREN, M.; REIG, C.; FERNÁNDEZ GALVÁN, D.; MESEJO, C.; MARTÍNEZ FUENTES, A.; GALÁN SAÚCO, V.; AGUSTÍ, M. Phenological growth stages of mango (*Mangifera indica* L.) according to the BBCH scale. **Scientia Horticulturae**, v.130, p.536-540, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.027>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil**. Rio de Janeiro, 2019. 1 mapa. Escala 1:250 000. Projeção policônica. Sistema de Coordenadas Geográficas. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/15842-biomas.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 15 out. 2022.

IUCN - International Union for Conservation of Nature. **The IUCN Red List of Threatened Species 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.iucnredlist.org>. Acesso em: 13 jan. 2024.

KINUPP, V.F.; LORENZI, H. **Plantas alimentícias não convencionais (PANC) no Brasil: Guia de identificação, aspectos nutricionais e receitas**. Instituto Plantarum de estudos da Flora, São Paulo. 2 ed. 2021. 768 p.

KISHORE, K.; KANUPRIYA, C.; SAMANT, D.; ACHARYA, G.C.; SINGH, H.S.; SAHU, A. Phenological description and thermal time requirement of tamarind (*Tamarindus indica*) in tropical conditions. **Annals of Applied Biology**, v.181, p.309-320, 2022. <https://doi.org/10.1111/aab.12777>.

KONAN, J.A.; KOUAKOU, C.K.; ALLOUAN, K.P.J.; COULIBALY, A.S.K.; DJIDJI, H.; FONDIO, L. Phenological growth stages of shea tree (*Vitellaria paradoxa* subsp. *paradoxa*) according to the BBCH scale. **Annals of Applied Biology**, v.182, p.131-139, 2023. <https://doi.org/10.1111/aab.12793>.

LOPES, J.C.; BARBOSA, L.G.; CAPUCHO, M.T. Germinação de sementes de *Bauhinia* spp. **Floresta**, v.37, p.265-274, 2007. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v37i2.8658>.

MAEDA, J.A.; MATTHES, L.A.F. Conservation of "ipê" seeds. **Bragantia**, v.43, p.51-61, 1984.

MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; XAVIER, R.G.; RIBEIRO, G.T.S.; FAGUNDES, F.F.A.;

- REIS, F.Y.S.; COSTA, H.F.; BORGES, B.O. Phenological description and thermal time requirements for the seedling phase of three Brazilian native forest species. **Annals of Applied Biology**, v.184, p.259-274, 2024. <https://doi.org/10.1111/aab.12875>.
- MAYRINCK, R.C.; VILELA, L.C.; PEREIRA, T.M.; RODRIGUES-JUNIOR, A.G.; DAVIDE, A.C.; VAZ, T.A.A. Seed desiccation tolerance/sensitivity of tree species from Brazilian biodiversity hotspots: considerations for conservation. **Trees**, v.33, p.777–785, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01815-8>.
- MEIER, U. **Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH Monograph**. Open Agrar Repositorium, Quedlinburg. 2018. <https://doi.org/10.5073/20180906-074619>.
- MISSIO, E.L.; SOUZA, M.T.M.; STEFFEN, G.P.K.; SALDANHA, C.W.; STEFFEN, R.B.; MALDANER, J.; MORAIS, R.M.; BOENI, M.; CONTERATO, I.F.; MARTINS, J.D. **Guia prático para identificação de sementes florestais da família Fabaceae**. Porto Alegre: SEAPDR/DDPA. 2021. 38p. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202111/04162659-missio-et-al-folheto-final.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2023.
- MONTEIRO, V.F.C.; GONÇALVES, E.D.; MOURA, P.H.A.; SILVA, L.V.; MARTINS, F.B.; NORBERTO, P.M. Phenological stages of the ‘Paluma’ guava tree in a region of subtropical climate according to the BBCH scale. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.16, p.1-8, 2021. <https://doi.org/10.5039/agraria.v16i3a177>.
- NAUTIYAL, P.C.; SIVASUBRAMANIAM, K.; DADLANI, M. Seed dormancy and regulation of germination. In: DADLANI, M.; YADAVA, D.K. (eds) **Seed Science and Technology**. Springer, Singapore, p.39–66, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_3.
- OLIVEIRA, M.C.; OGATA, R.S.; ANDRADE, G.A.; SANTOS, D.S.; SOUZA, R.M.; GUIMARÃES, T.G.; SILVA JÚNIOR, M.C.; PEREIRA, D.J.S.; RIBEIRO, J.F. **Manual de Viveiro e Produção de Mudas: Espécies Arbóreas Nativas do Cerrado**. Editora Rede de Sementes do Cerrado, Brasília, 2016. 124p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1042301/manual-de-viveiro-e-producao-de-mudas-especies-arboreas-nativas-do-cerrado>. Acesso em: 13 abr. 2024.
- PRYSIAZHNIUK, O.; STOROZHYK, L.; HUMENTYK, M.; SVIRIDOV, A.; SVYRYDOVA, L. Optimal time of plant growth regulator application to Sorghum canopy according to BBCH and Kuperman crop growth scales. **Plant and Soil Science**, v.13, p.46-56, 2022. [https://doi.org/10.31548/agr.13\(4\).2022.46-56](https://doi.org/10.31548/agr.13(4).2022.46-56).
- RANGANATHAN, U.; GROOT, S.P.C. Seed Longevity and Deterioration. In: DADLANI, M.; YADAVA, D.K. (eds) **Seed Science and Technology**. Springer, Singapore, p.91-108, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_5.
- ROMERO-MARCANO, G.S.; SILVA-ACUÑA, R.; CAÑIZARES-CHACÍN, A.E. Fenología de moringa durante la etapa de vivero, en Maturín Monagas, Venezuela. **Investigacion y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes**, v.31, p.e4174, 2023. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2023884174>.

- ROVERI NETO, A.; PAULA, R.C. Variability among mother trees of *Ceiba speciosa* St. Hil for characteristics of the fruits and seeds. **Revista Ciência Agronômica**, v.48, p.318-327, 2017. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170037>.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAÚJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed, Revista e Ampliada Embrapa, Brasília. 2018. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2022.
- SILVA, B.G.; CÔRREA, F.R.; SILVA, N.F.; Cavalcante, W.S.S.; Ribeiro, D.F.; Rodrigues, E. Chemical control of whitefly (*Bemisia tabaci*) biotype B (Hemiptera: Aleyrodidae) in cotton crop. **Brazilian Journal of Science**, v.2, p.86–97, 2023. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i2.273>.
- SILVA, P. A.; SILVA, L.L.; CHERUTTE, A.G.; GOMES, A.C.S.; BRITO, L.; RODRIGUES, B.M. Birds visiting flowers of the Yellow Ipe (*Handroanthus vellosi*) in the urbanized area emphasizes the importance of plant-animal interaction in the afforestation of cities. **Research, Society and Development**, v.10, p.e414101522982, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.22982>.
- SINGH, S.; DHAKAD, A.K.; DHILLON, G.P.S.; DHATT, K.K. Extended BBCH scale of *Moringa oleifera* Lam. and its implications for growing in Urban Food Forests Trees. **Forests and People**, v.5, p.100107, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100107>.
- SNIF - Sistema Nacional de Informações Florestais. **Florestas Plantadas** - IBGE - Painel Interativo. 2023. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/temas-florestais/recursos-florestais/florestas-plantadas>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- VERMA, P.; SINGH, J.; SHARMA, S.; THAKUR, H. Phenological growth stages and growing degree days of peach [*Prunus persica* (L.) Batsch] in sub-temperate climatic zone of North-Western Himalayan region using BBCH scale. **Annals of Applied Biology**, v.182, p.284–294, 2023. <https://doi.org/10.1111/aab.12815>.
- VIEIRA, R.F.; CAMILLO, J.; CORADIN, L. **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: Região Centro-Oeste**. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade. Brasília: MMA. 2018. 1.160 p.
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v.36, p.2644–2659, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.
- YE, T., CRAENE, L.R. Stipules in angiosperms. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v.205, p.191-242, 2024. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boad076>
- ZHOU, N.; SIMONNEAU, F.; THOUROUDE, T.; OYANT, L.H.S.; FOUCHER, F. Morphological studies of rose prickles provide new insights. **Horticulture Research**, v.8, p.221, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00689-7>.

CAPÍTULO III

DELIMITANDO OS LIMIARES E REQUISITOS TÉRMICOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS NATIVAS BRASILEIRAS VULNERÁVEIS

3.1. INTRODUÇÃO

A temperatura do ar regula o início, duração e transição dos estágios fenológicos das plantas, determinando o ritmo de desenvolvimento de cada espécie (Faber *et al.*, 2024; Sousa *et al.*, 2022). Como o desenvolvimento ocorre dentro de uma faixa de temperatura, variações fora (abaixo ou acima) desses limiares podem resultar em alterações metabólicas e fisiológicas, alterando o ritmo de desenvolvimento e consequentemente o ciclo de vida da planta (Posse *et al.*, 2018; Shelake *et al.*, 2024). Tais limiares são representados pelas temperaturas base (T_b) ótima (T_{ot}) e superior (T_B). A T_b é o limiar abaixo do qual o desenvolvimento da planta não ocorre, ou ocorre a taxas muito baixas e desprezíveis. A T_{ot} é onde a taxa de desenvolvimento é máxima. Enquanto a T_B é o limiar que limita o desenvolvimento, ou seja, acima do qual o desenvolvimento da planta é reduzido ou nulo (Fernandes *et al.*, 2023; Jafari *et al.*, 2024; Pessotto *et al.*, 2023).

Quando as plantas são expostas a temperaturas próximas ou menores que a T_b ou maiores que a T_B , pode ocorrer uma série de alterações em nível fisiológico, anatômico e morfológico, que quando persistentes no tempo, comprometem o desenvolvimento e os padrões fenológicos das plantas (Faber *et al.*, 2024; Fagundes *et al.*, 2024b). Por exemplo, próximo à T_b , pode haver ruptura na ultraestrutura dos cloroplastos, diminuindo a eficiência fotoquímica do fotossistema II, além da redução da atividade da clorofila sintase, enzima responsável pela síntese de pigmentos fotossintéticos (Li *et al.*, 2024). Como consequência, o fornecimento de matéria-prima para a síntese de clorofila é insuficiente, e pode desacelerar o metabolismo da planta e reduzir o teor de clorofila nas folhas (Li *et al.*, 2024, Shi *et al.*, 2018), afetando negativamente a fotossíntese.

Temperatura superior à T_{ot} e próxima à T_B também reduz a eficiência fotossintética, devido ao comprometimento do fluxo de elétrons nas lamelas dos tilacóides e às reações bioquímicas no estroma dos cloroplastos (Shelake *et al.*, 2024). Ou seja, pode ocorrer aumento da permeabilidade da membrana e comprometimento das funções celulares (Mathur *et al.*, 2014; Shelake *et al.*, 2024), levando à redução do crescimento e desenvolvimento da planta. Alterações morfológicas decorrentes de desvios de temperatura acima da faixa ideal resultam em hipocótilos e pecíolos alongados, menor densidade de estômatos (em número e área) e

folhas menores e mais finas, adaptadas para facilitar o resfriamento da superfície foliar (Shelake *et al.*, 2024).

O estresse térmico é especialmente crítico durante o desenvolvimento inicial, pois as plântulas estão mais próximas do solo, o que limita a dissipação rápida de calor e prolonga a exposição a temperaturas extremas, especialmente em áreas de solo exposto (Jagadish *et al.*, 2021; Villagarcía *et al.*, 2007).

Para determinar os limiares térmicos, duas abordagens principais são utilizadas. A primeira integra dados de desenvolvimento provenientes de experimentos conduzidos a campo com temperatura do ar em métodos estatísticos específicos (Fagundes *et al.*, 2024b; Ferreira *et al.*, 2019a; 2019b; Freitas *et al.*, 2017). A segunda abordagem utiliza dados de desenvolvimento provenientes de experimentos conduzidos em condições controladas como câmaras de crescimento (Alm *et al.*, 1988; Baath *et al.*, 2022; Pessotto *et al.*, 2023). Embora as duas abordagens possam diferir em complexidade e custo, a primeira é bastante utilizada pela maior praticidade e eficácia na estimativa de T_b , T_{ot} e T_B . Em comum, ambas as abordagens requerem que as plantas sejam submetidas a uma ampla variação de temperaturas, seja por experimentos de campo com múltiplas datas de semeadura (Fagundes *et al.*, 2024b; Freitas *et al.*, 2017) ou em câmaras artificiais de crescimento (Alm *et al.*, 1988; Baath *et al.*, 2022; Pessotto *et al.*, 2023). A primeira opção é preferida devido o menor custo, capacidade de gerar estimativas confiáveis (Fagundes *et al.*, 2024b; Freitas *et al.*, 2017) e possibilidade de ser usada em espécies de maior porte, como as espécies florestais, em períodos prolongados de desenvolvimento. Além disso, essa opção permite que os valores de T_b , T_{ot} e T_B sejam estimados usando dados de temperatura representativos das condições naturais de campo (Fagundes *et al.*, 2024b).

Compreender os limiares térmicos é essencial para avaliar como cada espécie pode responder a variações térmicas, especialmente em cenários de mudanças climáticas (Fagundes *et al.*, 2021, Martins *et al.*, 2023b), acompanhar o desenvolvimento em tempo real, prever o momento de ocorrência dos estágios de desenvolvimento (Pessotto *et al.*, 2023), e comparar padrões de desenvolvimento entre espécies (Fagundes *et al.*, 2024a; Martins *et al.*, 2023b). Isso só é possível, aplicando os limiares térmicos em modelos de desenvolvimento (Fagundes *et al.*, 2024b; Ferreira *et al.*, 2019a, 2019b) ou de requerimento térmico (Martins *et al.*, 2024). Estes modelos se baseiam na relação entre variáveis de desenvolvimento, como número de folhas acumuladas ou taxa de aparecimento de folhas, e acúmulo térmico, como soma térmica (ST , $^{\circ}C \text{ dia}^{-1}$) (Andreucci *et al.*, 2016; Sousa *et al.*, 2022) acumulado ao longo dos estágios de

desenvolvimento. Um exemplo é o modelo do filocrono ($^{\circ}\text{C dia folha}^{-1}$), que é um dos mais utilizados para quantificar requerimento térmico para atingir certo estágio de desenvolvimento (Fagundes *et al.*, 2021; Fagundes *et al.*, 2024a; Fernandes *et al.*, 2023; Martins *et al.*, 2022).

Informações sobre os limiares e o requerimento térmico ainda são desconhecidos para a maioria das espécies florestais, especialmente para espécies nativas, devido aos desafios associados à condução de experimentos de longa duração no campo (Fagundes *et al.*, 2024b; Sousa *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2023a). Os poucos estudos existentes foram realizados para as espécies nativas brasileiras *Cybistax antisiphilitica*, *Platycyamus regnellii* (Fagundes *et al.*, 2024b), *Citharexylum myrianthum*, *Bixa orellana* (Ferreira *et al.*, 2019b), *Ilex paraguariensis* St. Hil. (Poletto *et al.*, 2017), *Dipteryx alata* (Borella *et al.*, 2020), além de espécies frutíferas como *Psidium guajava* (Ferreira *et al.*, 2019a), e *Theobroma cacao* L. var. TSH1188 (Posse *et al.*, 2018), todos focados no desenvolvimento inicial, e também no desenvolvimento reprodutivo de *Euterpe oleracea* (Sousa *et al.*, 2022) e *Anacardium occidentale* (Matos *et al.*, 2020). Contudo, há uma lacuna significativa no conhecimento sobre os limiares térmicos de outras espécies florestais com interesse econômico, ecológico, medicinal e industrial, o que limita, por exemplo, a aplicação de práticas de manejo sustentável e estratégias adaptativas frente às mudanças climáticas.

Entre as espécies nativas do Brasil, cinco destacam-se pela importância econômica, ecológica e industrial, aliada à grande representatividade em termos de ocorrência nos diferentes biomas brasileiros (Carvalho, 2003, 2006): *Bauhinia forficata* Link, *Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna, *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos e *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith. Tais espécies ocorrem naturalmente em grande parte do território brasileiro, especialmente nos biomas Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga (Figura 3.1), que vêm sofrendo pressões antropogênicas intensas, de uso e ocupação do solo, e que ao mesmo tempo são considerados os biomas mais vulneráveis à perda de biodiversidade em climas futuros (Lima *et al.*, 2024; RAD, 2024; Silva *et al.*, 2019).

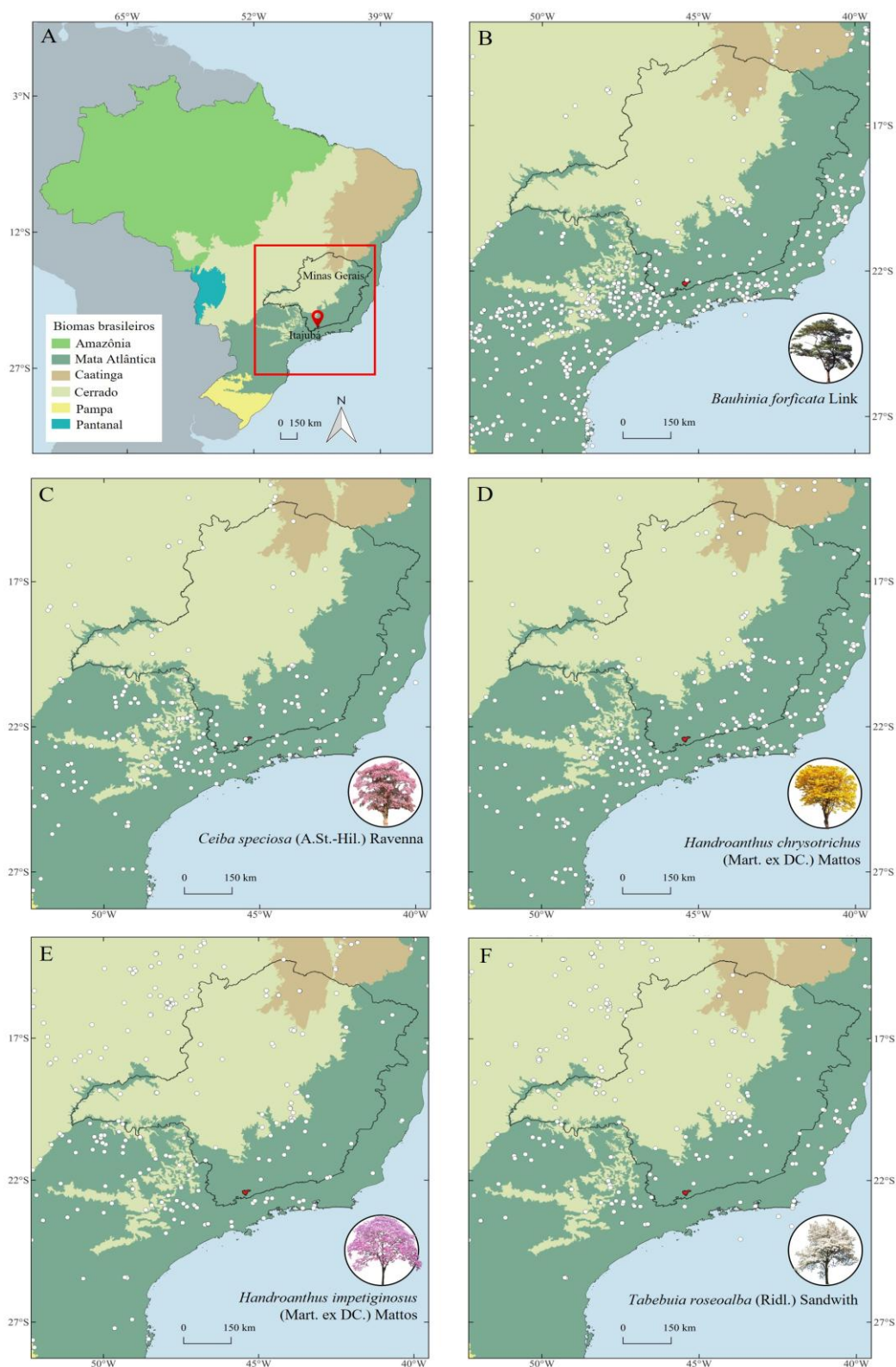


Figura 3.1 - Distribuição das espécies florestais estudadas em Minas Gerais e na área de estudo: *Bauhinia forficata* (B), *Ceiba speciosa* (C), *Handroanthus chrysotrichus* (D), *Handroanthus impetiginosus* (E) e *Tabebuia roseoalba* (F). Os dados de distribuição das espécies foram obtidos de CRIA (2023).

A *B. forficata* (Fabaceae; bauínia, pata-de-vaca) distribui-se naturalmente em florestas ciliares ou galerias, florestas estacionais semidecíduais e ombrófilas mistas e em áreas antropizadas (Vaz; Santos, 2020). A *C. speciosa* (Malvaceae; paineira, árvore-de-paina) distribui-se em florestas estacionais semidecíduais, ombrófilas e áreas antropizadas (Carvalho-Sobrinho, 2020). *H. chrysotrichus* (Bignoniaceae, ipê-amarelo-cascudo, ipê-dourado), *H. impetiginosus* (Bignoniaceae, ipê-roxo-de-bola, pau-d'arco-roxo) e *T. roseoalba* (Bignoniaceae, ipê-branco, ipê-do-cerrado) são encontradas principalmente em áreas de cerrado, vegetação de carrasco, sobre afloramentos rochosos, em florestas estacionais decíduais, ombrófilas mistas e em áreas antropizadas (Lohmann, 2020a, 2020b, 2020c).

Até o momento, não existem estudos sobre os limiares e o requerimento térmico do desenvolvimento inicial das espécies acima mencionadas. Visando contribuir com informações básicas relevantes sobre as espécies *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *H. roseoalba*, este estudo objetivou estimar os valores de Tb, Tot e TB, e o requerimento térmico baseado no modelo do filocrono.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Dados de desenvolvimento e design experimental

Neste estudo foram utilizados dados de desenvolvimento medidos pelo número de folhas acumuladas no caule principal (NFA), contabilizados semanalmente, desde a data de emergência (EM) até a data de término do desenvolvimento inicial (n) de cada espécie florestal. Foi considerada como folha visível quando a lâmina foliar apresentou comprimento ≥ 1 cm, seguindo recomendações de Alm *et al.* (1988) e Fagundes *et al.* (2024b).

A EM foi considerada como o dia em que as sementes germinaram e estavam visíveis acima do solo, enquanto o n foi considerado como o dia em que as espécies atingiram 10 folhas acumuladas no caule principal. A EM e n foram obtidos a partir de testes preliminares com o objetivo de verificar a porcentagem de emergência mínima das amostras de sementes das cinco espécies estudadas e o patamar de término do desenvolvimento inicial, conforme demonstrado na Tabela 2.2 (Item 2.2 do Capítulo II).

Os dados de NFA foram obtidos a partir de experimentos conduzidos a céu aberto entre junho de 2022 a fevereiro de 2024, na área experimental da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. Itajubá possui clima de monção, com outono e inverno seco (de abril a setembro) e primavera e verão úmido (de outubro a março) (Martins *et al.*, 2024) e possui ocorrência natural das cinco espécies estudadas (Figura 3.1).

Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado, com 5

espécies (*B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*), cultivadas em vasos de polietileno branco de capacidade de 8 litros (Figura 3.2), em 14 datas de semeadura (DS) instaladas em intervalos de ~30 dias com 8 repetições (vasos), totalizando 40 repetições por DS. O uso de múltiplas DSs é mandatório neste tipo de estudo, pois assegura que as plantas se desenvolvam em uma ampla faixa de condições meteorológicas, simulando o ambiente natural de campo sem intervenções artificiais (Fagundes *et al.*, 2024a; Martins *et al.*, 2024) (Tabela 2.2, Item 2.2 do Capítulo II).

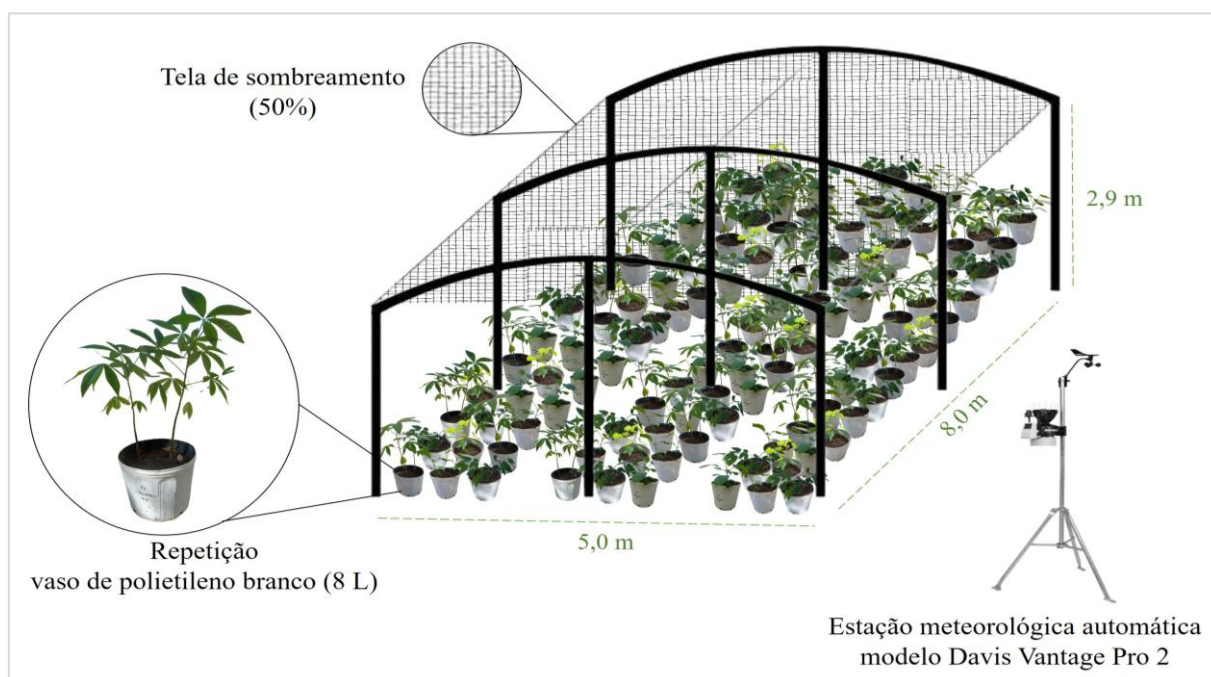


Figura 3.2 - Representação esquemática da organização e design dos experimentos realizados a céu aberto, em Itajubá.

Todas as informações sobre as sementes (procedências e características), substrato, adubações e irrigação estão detalhadas no item 2.2 Material e Métodos do Capítulo II.

3.2.2. Temperatura base (T_b)

Para estimar a T_b foi utilizado o método do menor quadrado médio do erro (QME) (Sinclair *et al.*, 2004). A seleção das DSs para a estimativa da T_b baseou-se em dois critérios: DSs com os menores valores de temperatura mínima, média e máxima do ar (T_{min} , T_{med} e T_{max} ; °C) e com a maior duração de desenvolvimento inicial (dias), conforme recomendações de Fagundes *et al.* (2024b). Para validar tais escolhas, foi aplicado o teste de comparação de médias Scott-Knott ($p = 0,05$) aos valores de duração (dias) e às temperaturas do ar, para cada DS e espécie. Seguindo as recomendações de Sinclair *et al.* (2004) e Fagundes *et al.* (2024b), para fins estatísticos, pelo menos quatro DSs devem ser selecionadas para a estimativa da T_b .

O método QME foi aplicado para cada espécie e repetição em cada uma das DSs selecionadas. O método consiste em ajustes de uma série de regressão linear simples (Equação 3.1) entre o NFA e a soma térmica acumulada (STa; °C dia⁻¹) (Equação 3.2) (Fagundes *et al.*, 2024b; Freitas *et al.*, 2017):

$$\text{NFA} = a \cdot \text{STa} + b \quad (3.1)$$

$$\text{STa} = \sum_{i=\text{EM}}^n (\text{Tmed} - \text{Tb}), \text{ quando } \text{Tmed} \leq \text{Tb}, \text{ STa} = 0 \quad (3.2)$$

em que: NFA = número de folhas acumuladas no caule principal ao longo do tempo (desde EM a n); *a* = coeficiente angular da regressão linear (folhas °C dia⁻¹); STa = soma térmica acumulada (°C dia⁻¹); *b* = coeficiente linear; Tmed = temperatura média diária do ar (°C) obtida pela estação meteorológica automática instalada na área experimental, Tb = temperatura base (°C) usando a série de valores entre 0°C a 20°C, com incrementos de + 0,5 °C; EM = data de emergência; n = data de término do desenvolvimento inicial (Tabela 2.2, Item 2.2 do Capítulo II).

O valor de Tb estimado para cada espécie foi obtido pela média global dos valores de Tb de cada repetição e DS (Fagundes *et al.*, 2024b; Martins *et al.*, 2007).

3.2.3. Temperatura ótima (Tot) e obtenção do requerimento térmico

Para estimar a Tot, foram seguidos a série de procedimentos descritos em Fagundes *et al.* (2024b) e proposto por Freitas *et al.* (2017) e Lisboa *et al.* (2012). O primeiro passo consiste em determinar o valor do filocrono para cada espécie, DS (DS1 a DS14) e repetição (R1 a R8), e o segundo passo é identificar qual a DS em que ocorre o menor valor de filocrono. Na prática, o filocrono é obtido pelo inverso do coeficiente angular (1/*a*) da Equação 3.1, calculando a STa com o valor da Tb previamente estimado (detalhes no item 3.2.2). O filocrono (°C dia folha⁻¹) representa o requerimento térmico necessário para emitir uma folha no caule principal (Fagundes *et al.*, 2024b). Ou seja, menor (maior) valor de filocrono indica menor (maior) necessidade térmica, que por sua vez representa maior (menor) velocidade de desenvolvimento inicial.

Para identificar a(s) DS(s) com menor filocrono, todos os valores de filocrono foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e ao teste de comparação de médias Scott-Knott (*p* = 0,05). A Tot foi obtida pela média aritmética dos valores de Tmed desta(s) DS(s) (Ferreira *et al.*, 2019a, 2019b; Freitas *et al.*, 2017).

3.2.4. Temperatura superior (TB)

A TB de cada espécie foi obtida acoplando dados de duração do desenvolvimento inicial e dados médios de temperatura do ar (Tmin e Tmax) de duas DSs na equação 3.3 (Freitas *et al.*, 2017; Lima; Silva, 2008). Para isso, foram selecionadas as duas DSs que apresentaram simultaneamente os maiores valores de Tmin, Tmed e Tmax e duração do desenvolvimento inicial (dias entre EM e n) (Apêndices 3.1 a 3.5 e Figura 3.3), seguindo o mesmo critério de validação da escolha das DSs do item 3.2.2.

$$TB = \frac{A + B \pm \sqrt{C \cdot (D + E + F + G + H + I)}}{J}, \text{ quando} \quad (3.3)$$

$$A = N_2 \cdot Tmax_1 \cdot Tmax_2 - N_2 \cdot Tmax_2 \cdot Tmin_1 \quad (3.4)$$

$$B = - N_1 \cdot Tmax_1 \cdot Tmax_2 + N_1 \cdot Tmax_1 \cdot Tmin_2 \quad (3.5)$$

$$C = (-Tmax_1 + Tmin_1) \cdot (-Tmax_2 + Tmin_2) \quad (3.6)$$

$$D = N_1 \cdot Tmin_2^2 \cdot N_2 - 2 \cdot Tmin_2 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot Tb - Tmin_2 \cdot Tmin_1 \cdot N_1^2 \quad (3.7)$$

$$E = - Tmin_2 \cdot Tmax_1 \cdot N_1^2 + N_2^2 \cdot Tmax_1 \cdot Tmin_2 - Tmin_1 \cdot N_2^2 \cdot Tmin_2 + 2 \cdot Tmin_2 \cdot N_1^2 \cdot Tb \quad (3.8)$$

$$F = Tmin_1 \cdot N_1^2 \cdot Tmax_2 - 2 \cdot N_2^2 \cdot Tmax_1 \cdot Tb - 2 \cdot N_1^2 \cdot Tmax_2 \cdot Tb \quad (3.9)$$

$$G = Tmax_1 \cdot N_1^2 \cdot Tmax_2 + Tmin_1^2 \cdot N_2 \cdot N_1 - 2 \cdot Tmin_1 \cdot N_2 \cdot N_1 \cdot Tb \quad (3.10)$$

$$H = 2 \cdot Tmin_1 \cdot Tmax_1 \cdot Tb + 2 \cdot N_1 \cdot Tmax_2 \cdot N_2 \cdot Tb + 2 \cdot N_2 \cdot Tmax_1 \cdot N_1 \cdot Tb \quad (3.11)$$

$$I = - 2 \cdot N_2 \cdot Tmax_1 \cdot N_1 \cdot Tmax_2 + N_2^2 \cdot Tmax_1 \cdot Tmax_2 - Tmin_1 \cdot N_2^2 \cdot Tmax_2 \quad (3.12)$$

$$J = - N_1 \cdot Tmax_2 + N_1 \cdot Tmin_2 + N_2 \cdot Tmax_1 - N_2 \cdot Tmin_1 \quad (3.13)$$

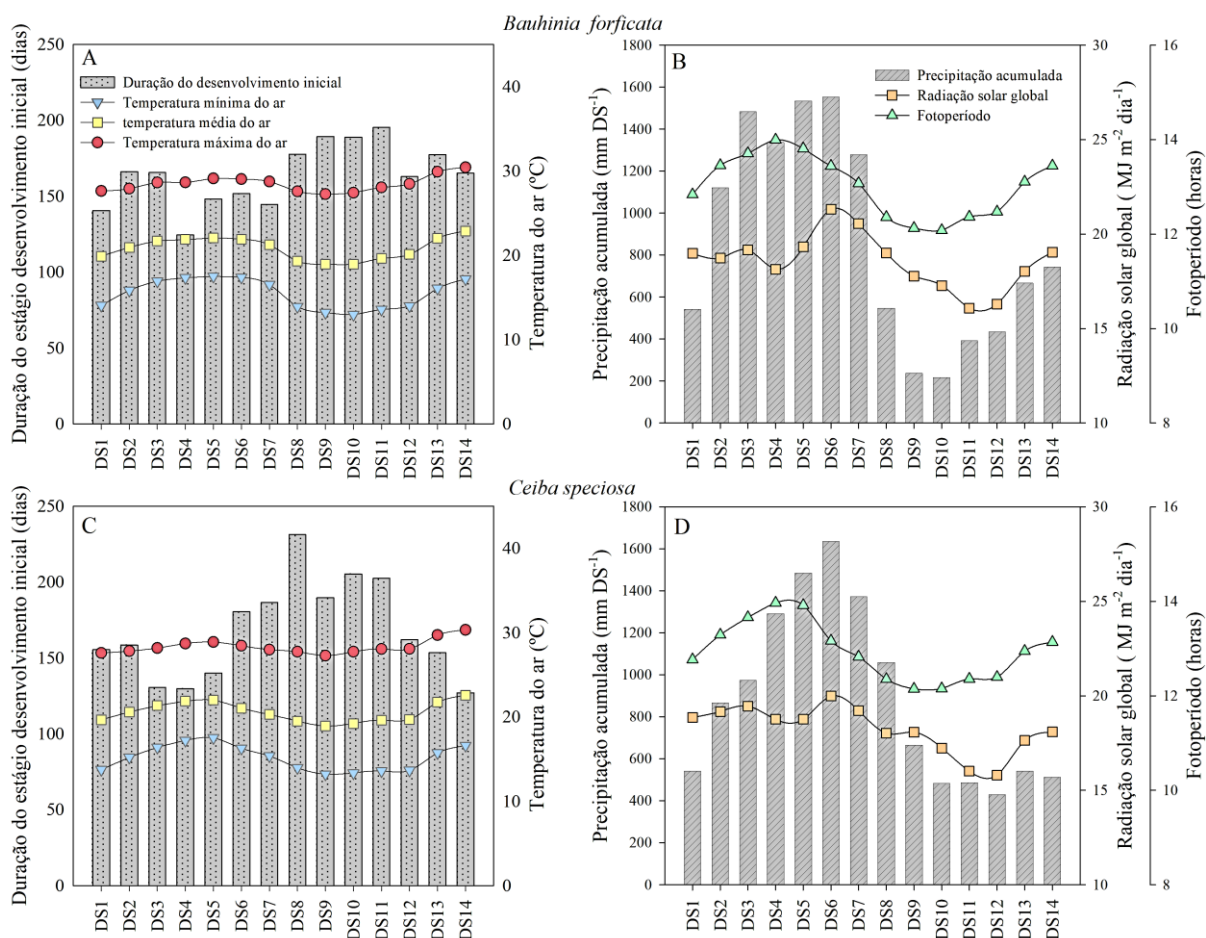
em que: $_1$ e $_2$ referem-se (e distinguem) as duas datas de semeadura selecionadas; N_1 e N_2 = duração (dias) desde emergência (EM) até o final do estágio de desenvolvimento inicial (n); Tmax = média da temperatura máxima do ar durante as datas de semeadura $_1$ e $_2$ (°C), respectivamente; Tmin = média da temperatura mínima do ar durante as datas de semeadura $_1$ e $_2$ (°C), respectivamente; Tb = temperatura base previamente estimada (°C).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso de várias DSs permitiu que as espécies florestais se desenvolvessem sob diferentes condições meteorológicas (Figura 3.3). A temperatura média do ar foi de 20,6 °C, com mínima absoluta de 3,4 °C e máxima absoluta de 38,1 °C. A precipitação acumulada variou

de 124,8 a 1635,4 mm DS⁻¹, a radiação solar global variou entre 1,8 MJ m⁻² dia⁻¹ (mínimo) a 34,9 MJ m⁻² dia⁻¹ (máximo) e o fotoperíodo variou de 11,6 horas (mínimo) a 14,3 horas (máximo). Os menores valores de temperatura do ar foram observados nas DS9 e DS10 (~ março a setembro) e os maiores nas DS13 e DS14 (outubro a janeiro). As maiores (menores) precipitações acumuladas ocorreram nas DS5 e DS6 (outubro a março) (DS9 e DS10, março a setembro), coincidindo com a estação chuvosa (seca) da região de estudo.

Embora os valores registrados durante os experimentos estejam dentro da climatologia de Itajubá (Alves *et al.*, 2020), houve episódios esporádicos (e intensos) de ondas de calor. Um exemplo foi observado entre 12 a 18 de novembro de 2023, quando as temperaturas permaneceram acima da média climatológica por 7 dias consecutivos. Entre setembro a dezembro de 2023, período que abrange as DS12, DS13 e DS14 (Figura 3.3 painéis A, C, E, G, I), foram observadas anomalias positivas de Tmed em relação à média climatológica, com valores de +2 °C (setembro), +0,8 °C (outubro), +1,6 °C (novembro) e +1,3 °C (dezembro). Foram registradas Tmax absolutas de 38,1 °C (setembro) e 37,4 °C (novembro).



continua...

... continuação

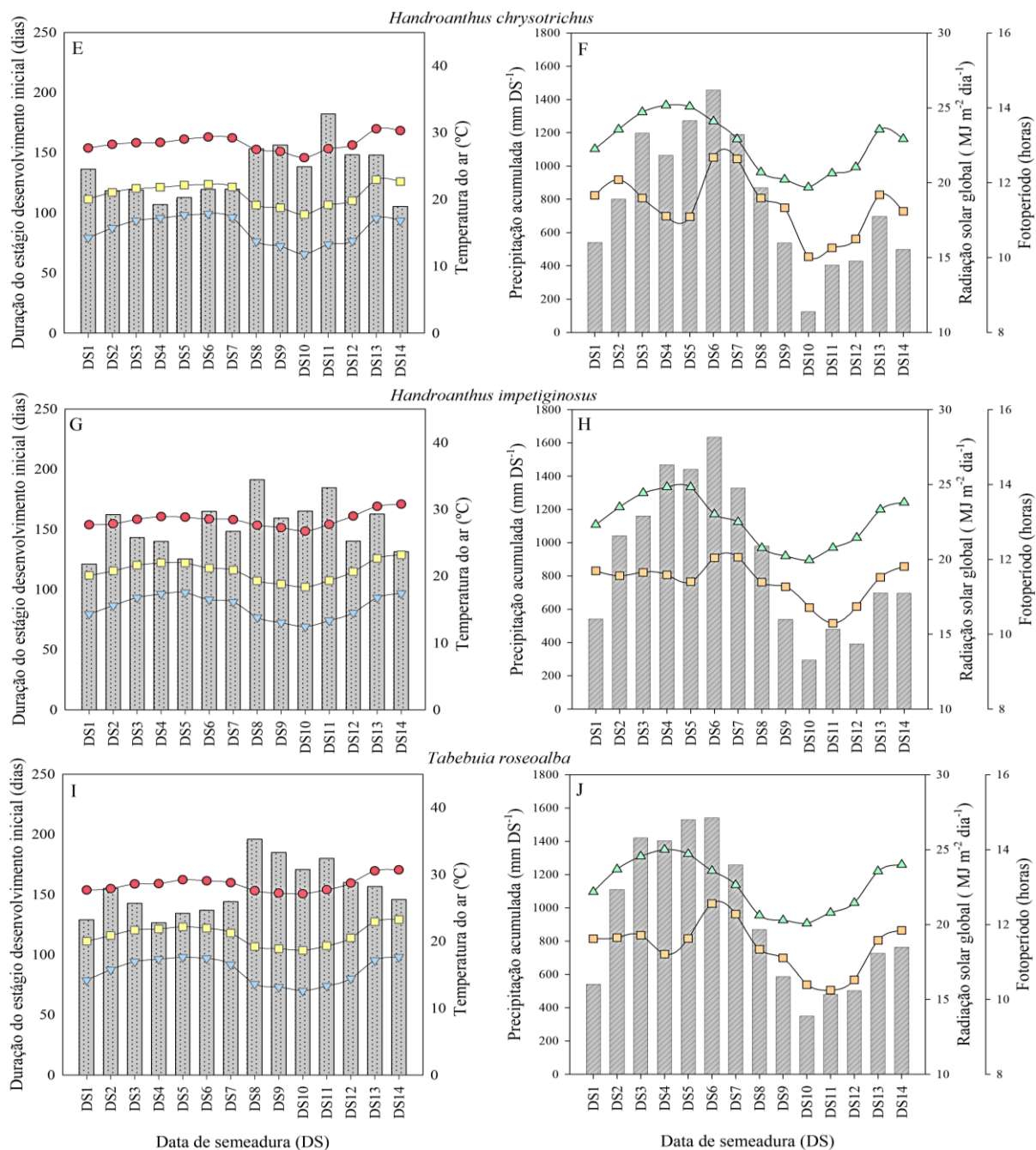


Figura 3.3 – Duração do estágio de desenvolvimento inicial (dias), variação da temperatura do ar (°C, mínima, média e máxima), precipitação acumulada (mm por data de semeadura), radiação solar global média (MJ m⁻² dia⁻¹) e fotoperíodo médio (horas) em cada data de semeadura (DS) durante a condução dos experimentos em Itajubá. Os painéis correspondem às espécies florestais: *Bauhinia forficata* (A, B), *Ceiba speciosa* (C, D), *Handroanthus chrysotrichus* (E, F), *Handroanthus impetiginosus* (G, H) e *Tabebuia roseoalba* (I, J). Os valores das variáveis meteorológicas referem-se aos valores médios desde a emergência (EM) até o fim do estágio de desenvolvimento inicial (n). As variáveis foram registradas a partir de uma estação meteorológica automática instalada na área experimental.

As diferentes condições meteorológicas também influenciaram a velocidade de aparecimento das folhas e, conseqüentemente, a duração do desenvolvimento inicial (EM a n), permitindo a seleção adequada das DSs para a estimativa dos limiares térmicos.

Comparando os valores médios de duração do desenvolvimento inicial e de temperatura do ar (Tmin, Tmed e Tmax) (Apêndices 3.1 a 3.5), é possível observar diferenças significativa entre as DSs ($p \geq 0,05$), assim como a ocorrência de três padrões. Padrão 1, formado pelo grupo de DSs com maior duração do desenvolvimento inicial em condições de temperatura do ar (Tmin e Tmed) significativamente mais baixas, ou seja, padrão ideal para a estimativa da Tb. Padrão 2, formado pelas DSs com menor duração do estágio de desenvolvimento inicial em diferentes condições de temperatura do ar (altas ou amenas). Tal padrão é ideal para a estimativa da Tot. Padrão 3, formado pelas DSs com maior duração do desenvolvimento inicial, porém, em condições de temperatura do ar (Tmax) significativamente mais elevadas, padrão ideal para a estimativa da TB.

O padrão 1 foi identificado nas DS8, DS9, DS10, DS11 e DS12 para as espécies *B. forficata*, *C. speciosa* e *T. roseoalba* (Figura 3.3, painéis A, C, I), e nas DS8, DS9, DS10 e DS11 para a *H. impetiginosus* (Figura 3.3, painel G). Para a *H. chrysotrichus* não houve padrão bem definido entre as DSs, o que dificultou a escolha das DSs para a estimativa dos valores de Tb, Tot e TB (Figura 3.3, painel E). No entanto, foram consideradas as DS8, DS9, DS10, DS11 e DS12 para estimativa da Tb da *H. chrysotrichus*, uma vez que essas DSs apresentaram de forma acoplada os menores valores médios de Tmin e Tmed, e durações entre 138 e 182 dias (Apêndice 3.3).

O padrão 2 foi identificado acoplando os resultados apresentados na Tabela 3.1 e nos Apêndices 3.1 à 3.5, ou seja, considerando as DSs com menor duração e menor valor de filocrono (maior desenvolvimento). O padrão 2 foi observado nas DS1, DS3, DS4 e DS9 para *C. speciosa*, DS4 e DS10 para *H. chrysotrichus*, DS4, DS5, DS7, DS9, DS10 e DS12 para *H. impetiginosus*, e DS2 à DS12 para *T. roseoalba*. Embora tenha sido observado menor duração do desenvolvimento inicial da *B. forficata* na DS4, não houve diferenças na magnitude e influência de cada DS no filocrono desta espécie (Tabela 3.1). Assim, todas as DSs (DS1 a DS14) foram utilizadas na estimativa da Tot de *B. forficata*.

Por fim, o padrão 3 foi identificado em DSs distintas para cada espécie. Para *B. forficata* foi observado nas DS3, DS5, DS6, DS7, DS13 e DS14, com duração de ~155 dias; para *C. speciosa* nas DS1, DS2, DS5, DS6, DS7 e DS13, com duração de ~162 dias; para *H. impetiginosus* nas DS2, DS3, DS4, DS6, DS7, DS12 e DS13 com ~151 dias e *T. roseoalba* nas

DS2, DS3, DS7, DS13 e DS14 com ~149 dias. Para *H. chrysotrichus* foram consideradas as DS1, DS2, DS3, DS4, DS5, DS6, DS7, DS13 e DS14. Tais DSs consideram de forma concomitante os maiores valores de Tmin, Tmed e Tmax e abrangem durações entre 107 e 148 dias, sendo ideais para a estimativa da Tb.

Na estimativa da Tb, as regressões lineares entre NFA e STa ajustadas para cada espécie, repetição e DS apresentaram coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) acima de 0,45, erro (QME) abaixo de 3,34 e valores de coeficiente angular significativo ($p \leq 0,05$) para todas as espécies (Apêndices 3.11 a 3.15). Quando se considera os ajustes individuais por repetição, é esperado obter valores menores de R^2 ajustado e maiores de QME, uma vez que o ajuste reflete as variações inerentes de cada repetição. Exemplos incluem: repetição 7 na DS10 da *B. forficata* (R^2 ajustado = 0,65 e QME = 2,34), repetição 6 na DS10 da *C. speciosa* (R^2 ajustado = 0,64 e QME = 2,40), repetição 4 na DS9 da *H. chrysotrichus* (R^2 ajustado = 0,56 e QME = 2,49), repetição 2 na DS10 da *H. chrysotrichus* (R^2 ajustado = 0,53 e QME = 3,34) e repetição 2 na DS9 da *T. roseoalba* (R^2 ajustado = 0,60 e QME = 2,87). Esses ajustes individuais capturam nuances do desenvolvimento que podem incluir falhas de germinação, variações (atraso ou aceleração) nas taxas de emissão foliar, e respostas fisiológicas diferenciais às variações ambientais, as quais influenciam a taxa de desenvolvimento inicial das espécies. Por outro lado, quando a análise é global, ou seja por DS, esses efeitos são suavizados pela média das repetições, reduzindo os desvios ocasionais e melhorando a qualidade dos ajustes. Ainda assim, optamos pela análise individualizada, uma vez que permite uma avaliação mais detalhada, que é essencial para compreender as características específicas de cada espécie e suas interações com o ambiente.

Houve variação entre os valores estimados de Tb entre as repetições e DSs para todas as espécies (Figura 3.4), resultado desejável (e esperado) quando é utilizado o método QME. Isso ocorre, pois o uso de uma série de valores de Tb (de 0 a 20 °C) gera diferentes valores de STa, que por sua vez influenciam o ajuste das regressões lineares e os valores de QME (Fagundes *et al.*, 2024b).

Para *B. forficata*, na DS8, os menores valores de QME (que variaram de 0,0476 a 0,5842 entre as repetições) foram para Tb = 10 (R1) e 0°C (R2, R3, R4, R5, R6, R7 e R8); na DS9 os menores valores de QME (0,0750 a 0,2547) foram para Tb = 0 (R1), 15 (R2 e R4), 3 (R3), 12 (R5), 7 (R6), 6,5 (R7) e 13,5°C (R8); na DS10 (0,1066 a 0,3765) foram para Tb = 14 (R1), 16 (R2 e R5), 13,5 (R3), 14 (R4), 16,0 (R5), 16,5 (R6), 14,5 (R7) e 15,5°C (R8); na DS11 (0,0976 a 0,4715) foram para a Tb = 0 (R1 e R6), 12,5 (R2), 5,5 (R3), 11 (R5), 5 (R7) e 15,5°C (R8), e

na DS12 (0,0858 a 0,2822) foram para $T_b = 0$ (R1, R2, R3, R5, R7 e R8), 5 (R4) e 8°C (R6). Os valores estimados de $T_b = 0$ °C foram descartados para o cálculo da média aritmética, seguindo as recomendações de Fagundes *et al.* (2024b). O valor de $T_b = 0$ °C não é considerado confiável para uma espécie que se distribui naturalmente em latitudes de $\sim 4^\circ$ S a 31° S (Carvalho, 2003) e possuem ocorrência somente em condições de clima tropical e subtropical (Fagundes *et al.*, 2024b). Assim, os valores de T_b por DS, obtidos pela média aritmética das repetições foram de 10 (DS8), 11,5 (DS9), 15 (DS10), 9,9 (DS11) e 6,5 (DS12) °C. Tais valores resultaram em um valor final de $T_b = 10,6$ °C para *B. forficata* (Figura 3.4 painéis A, B, C, D e E e Apêndice 3.1).

Para *C. speciosa* nas DS8 e DS9, os menores valores de QME (0,1181 a 1,4497) foram para $T_b = 0$ °C (em todas as repetições); em DS10 (0,0445 a 0,4116) foram para a de $T_b = 16,5$ (R1), 16 (R2), 15 (R3), 14 (R4), 14,5 (R5), 12 (R6) e 15,5°C (R7 e R8); em DS11 (0,0953 a 0,2321) foram de $T_b = 8,5$ (R1), 9 (R2), 14,5 (R3), 12,5 (R4), 11,5 (R5, R7 e R8) e 10 °C (R6); em DS12 (0,0697 a 0,2188) foram de $T_b = 8,5$ (R1), 0 (R2 e R8), 12 (R3), 9 (R4), 8 (R5), 0,5 (R6) e 13 °C (R7). *C. speciosa* possui distribuição no território brasileiro desde 7° S a 30° S (Carvalho, 2003) e os valores estimados de $T_b = 0$ e 0,5 °C também não são considerados realísticos para a espécie, e portanto, foram descartados do cálculo da média aritmética das DSs e do valor final da T_b . Os valores de T_b para a DS10 ($T_b = 14,9$ °C), DS11 ($T_b = 11,1$ °C) e DS12 ($T_b = 10,1$ °C) resultaram no valor final de $T_b = 12$ °C (Figura 3.4 painéis F, G, H, I e J e Apêndice 3.2).

Para *H. chrysotrichus* na DS8, os menores valores de QME (0,1786 a 0,5208) foram para $T_b = 20$ (R1), 9,5 (R2), 14,5 (R3), 15 (R4), 8 (R5), 0 (R6), 7,5 (R7) e 14°C (R8); em DS9 (0,1432 a 0,9576) foram de $T_b = 20$ (R1), 7 (R2), 0 (R3) 6 (R4), 13 (R5), 15,5 (R6), 14 (R7) e 19 °C (R8); em DS10 (0,1218 a 0,5019) foram de $T_b = 0$ (R1 e R2), 15 (R3), 10 (R4), 13,5 (R5), 14,5 (R6), 12 (R7) e 9,5 °C (R8); em DS11 (0,2117 a 0,7784) foram de $T_b = 0$ (R1, R2, R4 e R8), 15 (R3), 20 (R5), 14 (R6) e 6 °C (R7); em DS12 (0,2550 a 0,5712) foram de $T_b = 10,5$ (R1), 13 (R2), 0 (R3), 17,5 (R5), 7,5 (R6), 5 (R7) e 11,5 °C (R8). Excluindo valores = 0 e > 18 °C os valores de T_b resultantes foram de 11,4 (DS8), 11,1 (DS9), 12,4 (DS10), 11,7 (DS11) e 10,8 °C (DS12). Tais valores resultaram em um valor final de $T_b = 11,4$ °C (Figura 3.4 painéis K, L, M, N e O e Apêndice 3.3). A exclusão da $T_b > 18$ °C foi baseada nas recomendações de Ferreira *et al.* (2019a) para espécies florestais com ocorrência natural em locais com clima tropical e subtropical.

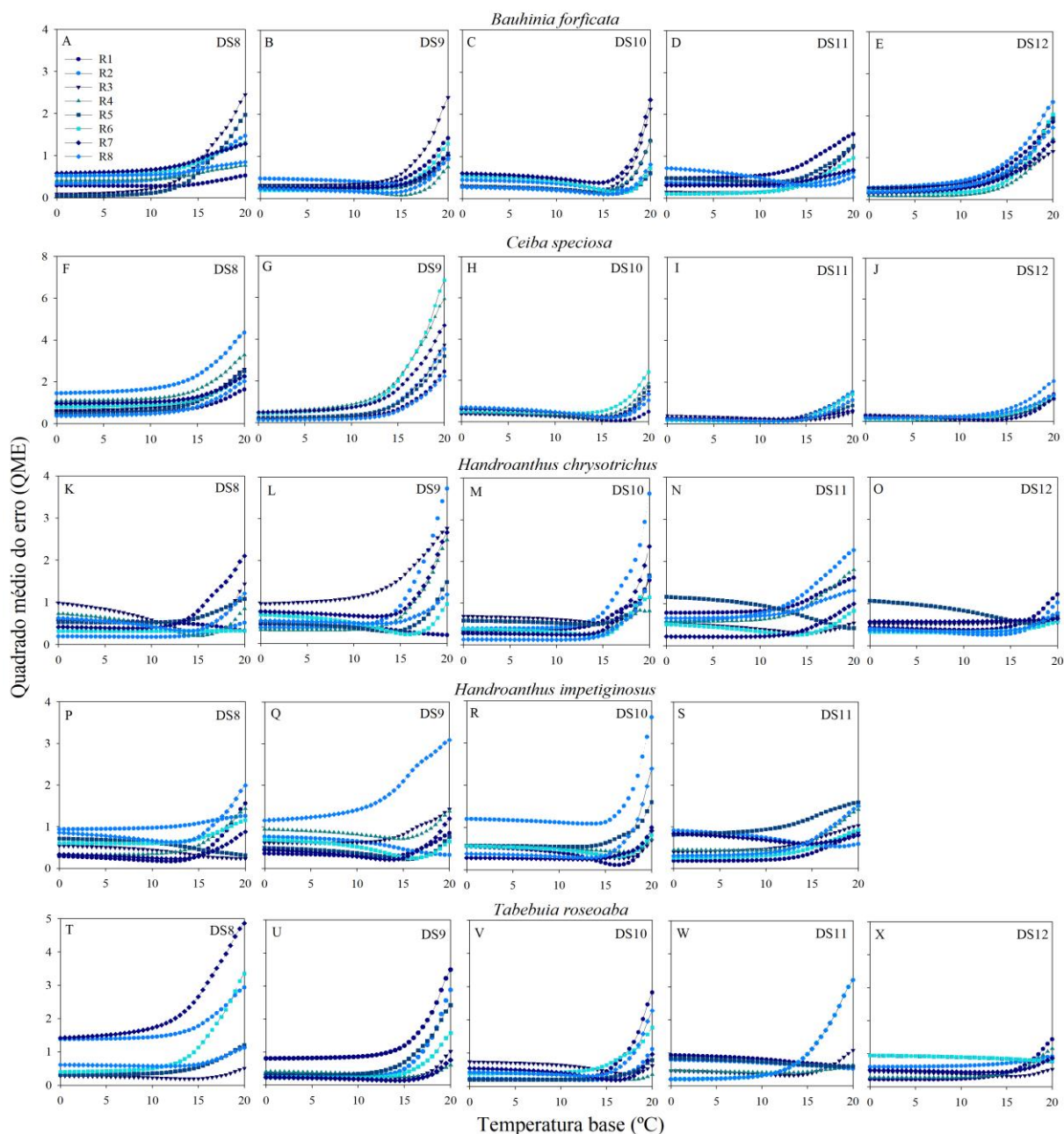


Figura 3.4 – Valores de quadrado médio do erro (QME) obtidos a partir de regressões lineares entre o número de folhas acumuladas no caule principal (NFA) e a soma térmica acumulada (STa), calculados com uma série de valores de temperatura base (variando de 0 °C a 20 °C) para *Bauhinia forficata* (painéis A, B, C, D e E), *Ceiba speciosa* (painéis F, G, H, I e J), *Handroanthus chrysotrichus* (painéis K, L, M, N e O), *Handroanthus impetiginosus* (painéis P, Q, R e S) e *Tabebuia roseoalba* (painéis T, U, V, W e X).

Para *H. impetiginosus* na DS8, os menores valores de QME (0,1665 a 0,9373) foram para $T_b = 12$ (R1), 0 (R2), 20 (R3 e R5), 4,5 (R4), 7 (R6) e 12,5 °C (R7 e R8); em DS9 (0,2110

a 1,1553) foram de $T_b = 12,5$ (R1), 20 (R2), 6,5 (R3), 15 (R4), 15,5 (R5), 16 (R6), 13,5 (R7) e 0°C (R8); em DS10 (0,0964 a 1,1481) foram de $T_b = 16$ (R1 e R6), 14 (R2), 16,5 (R3), 17 (R4), 11,5 (R5), e $12,5^\circ\text{C}$ (R7 e R8); e em DS11 (0,1816 a 0,8121) foram de $T_b = 0,5$ (R1), 18 (R2), 0 (R3, R5, R6 e R8), 7,5 (R4) e $14,5^\circ\text{C}$ (R7). Desconsiderando os valores estimados de $T_b < 4^\circ\text{C}$ e $> 18^\circ\text{C}$ - não realísticos para essa espécie que se distribui desde 2°N a $22^\circ 45'\text{S}$ (Carvalho, 2003; CRIA, 2023; Fagundes *et al.*, 2024b; Ferreira *et al.*, 2019a, 2019b) - os valores resultantes foram $T_b = 9,7$ (DS8), 13,2 (DS9) 14,5 (DS10) e 13,3 (DS11) $^\circ\text{C}$ e o valor final de $T_b = 12,6^\circ\text{C}$ (Figura 3.4 painéis P, Q, R e S e Apêndice 3.4).

Por fim, para *T. roseoalba*, os menores valores de QME na DS8 (0,1894 a 1,4182) foram para $T_b = 0$ (R2, R5, R6 e R7), 14 (R3) e $11,5^\circ\text{C}$ (R8); na DS9 (0,1394 a 0,8027) foram de $T_b = 0$ (R1 e R5), 10 (R2), 14,5 (R3), 15,5 (R4), 9 (R6) e $14,5^\circ\text{C}$ (R7); na DS10 (0,1875 a 0,3848) foram de $T_b = 8,5$ (R1), 13 (R2) 17,5 (R3), 18 (R4), 7 (R5), 0 (R6), 16 (R7) e 13°C (R8); na DS11 (0,2027 a 0,5872) foram de $T_b = 19,5$ (R1 e R6), 20 (R2), 13 (R3), 12,5 (R5) e 0°C (R8), e na DS12 (0,2218 a 0,7700) foram de $T_b = 5$ (R1 e R4), 0 (R2), 15,5 (R3), 20 (R6) e $12,5^\circ\text{C}$ (R7). Similar as demais espécies, os valores estimados de $T_b = 0^\circ\text{C}$ e $> 18^\circ\text{C}$ foram desconsiderados, uma vez que a ocorrência natural dessa espécie se restringe entre 3°S a 24°S (Lohmann, 2020c; CRIA, 2023). Assim, os valores de T_b por DS foram 12,8 (DS8), 12,7 (DS9) 13,3 (DS10), 12,8 (DS11) e $9,5^\circ\text{C}$ (DS12), gerando o valor final de $T_b = 12,2^\circ\text{C}$ (Figura 3.4 painéis T, U, V, W e X e Apêndice 3.5).

Na estimativa da Tot, as etapas envolvem a identificação da DS com menor valor de filocrono ($1/a$), ou seja, onde ocorre a maior taxa de desenvolvimento. Todas as regressões lineares ajustadas entre o NFA e STa (para cada espécie, DS e repetição) apresentaram altos valores de R^2 ajustado ($> 0,7409$), baixo QME ($< 0,7216$) e valores de ' α ' significativos ($p \leq 0,05$)

Pela ANOVA houve efeito significativo ($p \leq 0,05$) para a interação espécie e DSs para *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*. Ou seja, o desenvolvimento inicial destas espécies responde de forma distinta (em padrão e magnitude) às diferentes DSs. Os padrões e as magnitudes da influência de cada DS no filocrono, isto é $1/a$, (taxa de desenvolvimento ' α ') estão na Tabela 3.1. Ao contrário, para *B. forficata* não foi observada interação significativa ($p = 0,41$) entre as 14 DSs. Como o filocrono não diferiu estatisticamente entre as DSs, o valor de Tot foi obtido pela média da Tmed das 14 DSs, resultando na Tot = $21,5^\circ\text{C}$ para a *B. forficata*.

Tabela 3.1 - Comparação das médias dos valores de filocrono ($1/a$; °C dia folha⁻¹) e taxa de desenvolvimento (a ; folha °C dia⁻¹) das cinco espécies florestais estudadas ao longo das 14 datas de semeadura.

Data de semeadura	Filocrono (taxa de desenvolvimento)				
	<i>Bauhinia forficata</i>	<i>Ceiba speciosa</i>	<i>Handroanthus chrysotrichus</i>	<i>Handroanthus impetiginosus</i>	<i>Tabebuia roseoalba</i>
DS1	208,4 (0,0048) A	127,4 (0,0078) A	238,8 (0,0042) C	184,9 (0,0054) B	265,8 (0,0038) B
DS 2	214,8 (0,0047) A	142,3 (0,0070) B	173,1 (0,0058) B	185,5 (0,0054) B	168,3 (0,0059) A
DS 3	205,5 (0,0049) A	118,8 (0,0084) A	157,3 (0,0064) B	178,6 (0,0056) B	186,7 (0,0054) A
DS 4	221,3 (0,0045) A	134,0 (0,0075) A	143,2 (0,0070) A	164,9 (0,0061) A	180,4 (0,0055) A
DS 5	225,5 (0,0044) A	169,6 (0,0059) C	162,3 (0,0062) B	147,1 (0,0068) A	173,2 (0,0058) A
DS 6	229,0 (0,0044) A	205,8 (0,0049) D	194,0 (0,0052) B	201,3 (0,0050) B	166,2 (0,0061) A
DS 7	239,3 (0,0042) A	215,5 (0,0046) D	161,9 (0,0062) B	162,7 (0,0061) A	165,0 (0,0061) A
DS 8	252,4 (0,0040) A	223,2 (0,0045) D	179,5 (0,0056) B	214,5 (0,0047) B	195,2 (0,0051) A
DS 9	227,4 (0,0044) A	125,6 (0,0080) A	177,3 (0,0056) B	141,7 (0,0071) A	167,6 (0,0060) A
DS 10	202,5 (0,0049) A	158,0 (0,0063) B	103,3 (0,0097) A	128,5 (0,0078) A	154,3 (0,0065) A
DS 11	239,4 (0,0042) A	179,9 (0,0056) C	208,9 (0,0048) C	213,0 (0,0047) B	196,4 (0,0051) A
DS 12	187,2 (0,0053) A	144,4 (0,0069) B	223,8 (0,0045) C	133,2 (0,0075) A	192,7 (0,0052) A
DS 13	241,6 (0,0041) A	158,8 (0,0063) B	263,1 (0,0038) C	278,0 (0,0036) C	236,3 (0,0042) B
DS 14	247,9 (0,0040) A	144,0 (0,0069) B	151,3 (0,0066) B	200,1 (0,0050) B	221,0 (0,0045) B
Média geral (± DP)	224,4 (±19,0) c	160,5 (±34,1) a	181,3 (±41,7) b	181,0 (±39,09) b	190,7 (±31,3) b
Tot* (°C)	21,5	21,0	20,3	21,1	21,2

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna (datas de semeadura) e minúscula na linha (espécie) não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($p > 0,05$). Os valores apresentados na tabela referem-se aos dados originais. Porém, os dados foram transformados em Ln, por não atenderem os pressupostos de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$). O filocrono é dado por $1/a$ e a taxa de desenvolvimento é coeficiente angular ' a ' da regressão linear entre o número de folhas acumulado e a soma térmica acumulada. As letras foram dispostas em ordem crescente de valor do filocrono. DP = desvio padrão. *Valores de temperatura ótima resultantes da média dos valores de temperatura média diária das DSs com letra A.

Menor valor de filocrono indica menor requerimento térmico e maior taxa de desenvolvimento (Fagundes *et al.*, 2024b), os quais ocorrem em condições de temperatura do ar próxima à Tot da espécie (Fagundes *et al.*, 2024b; Ferreira *et al.*, 2019a, 2019b). Para a *C. speciosa*, as DS1 (EM = junho), DS3 (EM = setembro), DS4 (EM = outubro) e DS9 (EM = fevereiro) apresentaram os menores valores de filocrono. Ou seja, durante essas DSs, o requerimento térmico foi menor e as plantas se desenvolveram em taxas maiores. Assim, a Tot estimada para *C. speciosa* foi 21 °C, obtida pela média da Tmed das DS1, DS3, DS4 e DS9.

Para a *H. chrysotrichus*, o menor valor de filocrono foi encontrado nas DS4 (EM =

outubro) e DS10 (EM = abril), resultando na Tot estimada de 20,3 °C. Para a *H. impetiginosus* os menores valores de filocrono ocorreram nas DS4 (EM = outubro), DS5 (EM = novembro), DS7 (EM = dezembro), DS9 (EM = março), DS10 (EM = março) e DS12 (EM = junho), resultando em uma Tot estimada de 21,1 °C. Por fim, para *T. roseoalba* somente as DS1, DS13 e DS14 apresentaram maiores valores de filocrono, sendo excluídas da estimativa da Tot. Ou seja, o valor de Tot estimado para a *T. roseoalba* considerou as DS2 à DS12, que compreenderam longo período de desenvolvimento (agosto de 2022 à novembro de 2023). Como resultado, a Tot estimada para *T. roseoalba* foi de 21,2 °C.

Foram observadas ocorrências de insetos-pragas durante a condução dos experimentos. Exceto em *C. speciosa*, foram observadas infestações pontuais de *Aleurothrixus* sp. (mosca branca) e *Toxoptera* sp. (pulgão negro) durante as DS9, DS10 e principalmente na DS11 das demais espécies estudadas. Nessas DSs, menor precipitação (Figura 3.3, painéis B, F, H e J) e Tmed amena (~19,3) (Figura 3.3, painéis A, E, G e I) favoreceram a ocorrência desses insetos. Foram observadas colônias de *Aleurothrixus* sp. na face abaxial de folhas de *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* e de *Toxoptera* sp. em caules e gemas apicais de *B. forficata* e *T. roseoalba*. Ambos são pragas que atacam plantas em condições de viveiro, principalmente durante épocas secas causando danos devido à sucção contínua da seiva (Queiroz *et al.*, 2021). No entanto, não houve perda de repetições devido ao rápido controle. As plântulas atacadas que apresentaram atraso ou estagnação da emissão de folhas foram desconsideradas das estimativas de Tb, Tot e TB. O controle dessas pragas foi feito com aplicação de defensivo natural e limpeza manual das plantas, conforme orientações de Michereff Filho *et al.* (2013).

Na estimativa da TB considerou-se o conjunto das DSs que apresentaram maior duração de desenvolvimento inicial sob condições de temperaturas (Tmin, Tmed e Tmax) elevadas. Como essas condições ocorreram em diferentes DSs, várias combinações entre pares de DSs foram analisadas e o valor final da TB foi obtido pela média aritmética dos valores resultantes destas combinações. Todos os resultados estão apresentados nos Apêndices 3.1 a 3.5.

Para *B. forficata* 6 combinações resultaram em valores confiáveis de TB, exceto TB ~ 3,2°C (DS6 com DS13 e DS14), TB entre 7,8 e 26,1°C (DS3 e DS5 com DS13 e DS14), e TB > 80°C. Excluindo tais combinações, os valores de TB estimados para *B. forficata* variaram de 38,4 a 53,3 °C, resultando no valor final de TB = 43,9 °C. Para *C. speciosa*, 6 combinações geraram valores não confiáveis de TB (~16°C e > 65,9°C). Do contrário, 9 combinações de DSs geraram estimativas pertinentes de TB, com valores variando entre 38,2 e 49,6 °C. Com isso, o valor de TB estimado para *C. speciosa* foi de 42,8 °C. Para *H. chrysotrichus*, 10 combinações

de DSs geraram estimativas confiáveis de TB, com valores variando entre 34,1 e 59,5 °C, resultando no valor final de TB = 41,9 °C. Valores de 32,5 °C < TB > 63,2°C (chegando a 782°C) foram desconsiderados no cálculo da TB desta espécie.

Para *H. impetiginosus*, 9 combinações geraram valores confiáveis de TB, variando entre 37,4 °C e 58,1°C, resultando no valor de TB final de 42,6 °C. Valores de 32,5°C < TB > 81°C foram desconsiderados no cálculo da TB. Por fim, para *T. roseoalba*, somente uma combinação (DS13 e DS14) gerou estimativa confiável de TB = 43,4°C. As demais combinações (Apêndice 3.5) geraram valores de TB próximos da Tb (entre 12°C e 15°C) ou da Tot (~24°C), que foram desconsiderados na obtenção do valor final de TB.

Valores elevados de TB (entre 38°C e 50°C) (Slot; Winter, 2017) e superiores a temperatura máxima absoluta obtida em condições naturais são esperados, inclusive em espécies florestais tropicais (Fagundes *et al.*, 2024b; Ferreira *et al.*, 2019a, 2019b; Silva *et al.*, 2020), uma vez que representa o limiar máximo de temperatura acima do qual ocorrem danos aos processos metabólicos das plantas (Fagundes *et al.*, 2021; Kumarathunge *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2021).

Os processos que governam o desenvolvimento inicial e o aparecimento de folhas, como a diferenciação de primórdios e a divisão celular, são intrinsicamente ligados à atividade enzimática (Bahuguna; Jagadish, 2015; Fagundes *et al.*, 2024b; Martins *et al.*, 2023a), que por sua vez é regulada pela temperatura do ar (Ruelland; Zachowski, 2010). Por exemplo, durante os primeiros estágios do desenvolvimento inicial, como surgimento dos cotilédones e primeiras folhas (Martins *et al.*, 2024), a exposição a temperaturas ótimas (Tot) acelera os processos metabólicos e promove o aparecimento mais rápido das folhas. Do contrário, temperaturas subótimas (~Tb) ou supraótimas (~TB) retardam a emissão de novas folhas e reduzem a velocidade do desenvolvimento inicial (Fagundes *et al.*, 2024b; Hatfield; Prueger, 2015). Isso ocorre, pois, todas as reações metabólicas, incluindo a fotossíntese, são ajustadas para ocorrerem dentro de limiares térmicos (Tb, Tot e TB) adequados (Bahuguna; Jagadish, 2015; Hatfield; Prueger, 2015; Fagundes *et al.*, 2024b). Embora a base fisiológica dos limiares térmicos não seja completamente compreendida, esses limiares estão intrinsecamente relacionados aos processos que determinam o desenvolvimento inicial, como a emissão de novas folhas (Baath *et al.*, 2022; Fagundes *et al.*, 2024b) e a duração dos estágios de desenvolvimento (Martins *et al.*, 2023a).

Os valores de Tb, Tot e TB estimados neste estudo para *B. forficata* (10,6, 21,5 e 43,9 °C), *C. speciosa* (12, 21 e 42,8 °C), *H. chrysotrichus* (11,4, 20,3 e 41,9 °C), *H. impetiginosus*

(12,6, 21,1 e 42,6 °C) e *T. roseoalba* (12,2, 21,2 e 43,4 °C) descrevem os limites nos quais essas espécies se desenvolvem adequadamente em condições naturais de campo. Na prática, o conhecimento desses valores pode ser aplicado para aprimorar os processos de produção de mudas, incluindo o controle artificial de temperatura para mantê-la próxima à Tot de cada espécie, o planejamento da melhor época para a realização da semeadura e plantio (Ferreira *et al.*, 2019a) e a seleção de espécies mais adaptadas às condições climáticas do local de cultivo (Ferreira *et al.*, 2019a, 2019b; Silva *et al.*, 2020). Além disso, eles são dados de entrada obrigatórios em modelos de desenvolvimento (Fagundes *et al.*, 2024a; Martins; Streck, 2007) e requerimento térmico (Martins *et al.*, 2024), que por sua vez são amplamente utilizados para quantificar a taxa de desenvolvimento e prever a duração do desenvolvimento inicial (Martins *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2020).

Com relação a Tb, métodos estatísticos que se baseiam na coleta de dados em condições reais de campo, como os que utilizam múltiplas DSs, frequentemente apresentam diferenças nos valores estimados entre as DSs (Ferreira *et al.*, 2019a, 2019b; Silva *et al.*, 2020). Tais diferenças são esperadas e foram observadas para as espécies deste estudo e assim como para outras espécies florestais nativas como *C. antisiphilitica*, *P. regnellii* (Fagundes *et al.*, 2024b), *I. paraguariensis* (Poletto *et al.*, 2017) e espécies naturalizadas, como *P. guajava* (Ferreira *et al.*, 2019a).

Os valores de Tb estimados para o desenvolvimento inicial da *B. forficata* (10,6 °C), *C. speciosa* (12 °C), *H. chrysotrichus* (11,4 °C), *H. impetiginosus* (12,6 °C) e *T. roseoalba* (12,2 °C) estão próximos aos estimados para várias espécies florestais nativas e exóticas cultivadas em locais de clima tropical e subtropical (Tabela 3.2). Além disso, a maioria dos valores de Tb estimados neste estudo são coerentes com as observações de NFA medidas nos experimentos. Valores incoerentes de Tb e bem abaixo da temperatura do ar medida nas condições de campo (Tb = 0 °C, Figura 3.4) foram estimados principalmente nas DS8 e DS9 (em todas as repetições) para *C. speciosa*. Nesses casos, a Tb = 0 °C foi desconsiderada na determinação do valor final de Tb, seguindo as recomendações de Fagundes *et al.* (2024b) e Ferreira *et al.* (2019a; 2019b). Embora o padrão 1 tenha sido observado em ambas DSs, as plântulas de *C. speciosa* na DS8 (em todas repetições) se desenvolveram mais lentamente comparada as demais DSs do padrão 1 (Apêndice 3.2), atingindo o término do desenvolvimento inicial em ~231 dias após a emergência. Na DS8 foram utilizadas sementes armazenadas por ~ 520 dias, que pode ter reduzido o vigor das sementes e influenciado negativamente a velocidade de emergência, resultando no desenvolvimento mais lento das plântulas desta DS. Como as sementes de *C.*

speciosa possuem alto teor de óleo (15-20%), a maior instabilidade química dos lipídios favorece a perda da viabilidade ao longo do tempo, tornando-as mais sensíveis ao armazenamento prolongado em comparação às sementes ricas em proteínas e carboidratos (Degan *et al.*, 2001).

Tabela 3.2 - Valores estimados de temperatura base (Tb; °C), ótima (Tot; °C), superior (TB; °C) e filocrono (°C dia folha⁻¹) para o desenvolvimento inicial de espécies florestais nativas brasileiras e exóticas cultivadas no Brasil.

	Desenvolvimento inicial				Referências
	Tb (°C)	Tot (°C)	TB (°C)	Filocrono (°C dia folha ⁻¹)	
Espécies florestais nativas brasileiras					
<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.	10,3	23,0	45,5	163,8	Silva <i>et al.</i> (2020)
<i>Annona squamosa</i> L.	11,0	-	38,0	109,0	Gomes <i>et al.</i> (2023)
<i>Bixa orellana</i> L.	12,0	18,4	46,4	82,4	Ferreira <i>et al.</i> (2019b)
<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	11,4	18,1	36,6	66,6	Ferreira <i>et al.</i> (2019b)
<i>Cybistax antisyphilitica</i> (Mart.)	13,0	20,0	48,4	88,2	Fagundes <i>et al.</i> (2024b)
<i>Dipteryx alata</i> Vogel.	10,1	-	39,8	166,4	Borella <i>et al.</i> (2020)
<i>Hymenolobium petraeum</i> (Ducke)	14,5	24,9	38,6	26,7	Monteiro <i>et al.</i> (2014)
<i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.	8,5	-	-	401,0	Poleto <i>et al.</i> (2017)
<i>Libidibia ferrea</i> (Mart. ex Tul.)	12,8	20,7	46,3	56,9	Silva <i>et al.</i> (2020)
<i>Parkia pendula</i> (Willd.)	14,6	25,1	40,1	30,3	Monteiro <i>et al.</i> (2014)
<i>Platycyamus regnellii</i> Benth.	13,7	21,5	43,4	109,7	Fagundes <i>et al.</i> (2024b)
<i>Psidium guajava</i> L.	10,9	17,3	51,2	76,0	Ferreira <i>et al.</i> (2019a)
<i>Theobroma cacao</i> L.	10,0	-	37,0	-	Posse <i>et al.</i> (2018)
Espécies florestais exóticas cultivadas no Brasil					
<i>Adenanthera pavonina</i> L.	15,0	24,4	39,7	11,4	Monteiro <i>et al.</i> (2014)
<i>Cassia fistula</i> L.	16,4	24,9	37,1	19,5	Monteiro <i>et al.</i> (2014)
<i>Corymbia citriodora</i> (Hook) K. D. Hill & L. A. S. Johnson	8,7	17,1	41,3	62,9	Freitas <i>et al.</i> (2017)
<i>Eucalyptus grandis</i> (Hill ex Maiden)	10,0	-	-	32,0	Martins; Streck (2007)
<i>Eucalyptus saligna</i> (Smith)	8,0	-	-	30,7	Martins; Streck (2007)
<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	11,5	17,1	40,5	46,0	Freitas <i>et al.</i> (2017)
<i>Toona ciliata</i> M. Roem var. <i>australis</i>	7,7	-	-	-	Schwerz <i>et al.</i> (2019)

Quando a temperatura do ar é próxima ou menor que a Tb, há redução nas atividades enzimáticas, enrijecimento da membrana, aumento do estresse oxidativo celular e redução da fotossíntese (Bahuguna; Jagadish, 2015; Ruelland; Zachowski, 2010), resultando em atraso ou inibição na emissão de novas folhas (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2023a) e aumento

da duração do desenvolvimento inicial. Tais condições foram observadas nas DS8, DS9, DS10, DS11 e DS12, principalmente na *C. speciosa*, com maior número de casos (dias) em que a T_{min} e T_{med} foram próximas (ou menores) que a T_b (12 °C). Por exemplo, nas DS8, DS9 e DS10 de *C. speciosa* ocorreram ~65 casos por DS (~34 %) de $T_{min} < 12$ °C e 87 casos de $T_{med} < 15$ °C (~42 %) (Apêndice 3.7).

Por outro lado, quando a temperatura do ar é próxima à T_{ot} , a atividade carboxilase da enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (RuBisCO) é favorecida devido a maior solubilidade do dióxido de carbono (CO_2) em relação ao oxigênio (O_2), com maior fixação de CO_2 pelo ciclo de Calvin-Benson (Bahuguna; Jagadish, 2015), que por sua vez contribui para o aumento da fotossíntese líquida (Bahuguna; Jagadish, 2015; Reis *et al.*, 2021). Ou seja, quando a temperatura do ar é ~21°C, maior será a taxa de desenvolvimento, velocidade de emissão de folhas e menor a duração, em dias, do desenvolvimento inicial das cinco espécies estudadas. Por exemplo, na DS3 de *B. forficata* e DS6 de *T. roseoalba* houve maior número de casos (166 (~95%) e 144 (~96%), respectivamente) em que a T_{med} (entre 18 e 24 °C) foi próxima a T_{ot} , e repercutindo na menor duração do desenvolvimento inicial (131 e 137 dias). Esse padrão também foi observado para espécies como *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* (Tabela 3.2).

Em relação à T_b , os valores estimados para *B. forficata* (43,9 °C), *C. speciosa* (42,8 °C), *H. chrysotrichus* (41,9 °C), *H. impetiginosus* (42,6 °C) e *T. roseoalba* (43,4 °C) representam o limite máximo absoluto, acima do qual o desenvolvimento foliar (emissão de novas folhas) é insignificante ou interrompido (Freitas *et al.*, 2017; Hartfield; Prueger 2015; Martins *et al.*, 2023b). Tais valores estimados estão dentro da faixa esperada para espécies tropicais - entre 39 e 46 °C - (Fagundes *et al.*, 2024b), e estão próximos dos valores estimados para o desenvolvimento inicial de espécies florestais nativas, como *P. regnellii* e *A. peregrina*, e exóticas, como *C. citriodora* e *E. urophylla* (Tabela 3.2). Apesar disso, são ligeiramente inferiores as T_b s estimadas para *P. guajava*, *B. orellana* e *C. antisiphilitica* (> 46 °C) (Tabela 3.2).

Quando a temperatura do ar é próxima ou superior à T_b , diversas alterações metabólicas e fisiológicas podem ser observadas devido (Bahuguna; Jagadish, 2015; Nievola *et al.*, 2017): I) favorecimento da atividade oxigenase da enzima RuBisCO, aumentando a razão fotorrespiração/fotossíntese; II) redução do fluxo fotossintético de elétrons, da síntese de ATP, e da regeneração da ribulose 1,5 bifosfato (RuBP), limitando a fixação do CO_2 ; III) elevação do consumo de energia e de esqueletos de carbono, resultando em aumento dos custos

metabólicos associados à manutenção celular; IV) aumento da fluidez das membranas celulares, resultando no extravasamento de eletrólitos, afetando a homeostase celular; V) desorganização das estruturas celulares, incluindo organelas e citoesqueleto.

Outras alterações metabólicas em condições de temperaturas supraótimas incluem (Baath *et al.*, 2020; Bitá; Getars, 2013; Ruelland; Zachowski, 2010; Shelake *et al.*, 2024): I) acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), que podem causar dano oxidativo a lipídios, proteínas e DNA; II) aumento da síntese de proteínas de choque térmico (HSPs), essenciais para a proteção contra o desnaturamento e redobramento de proteínas danificadas; III) diminuição da atividade enzimática, afetando processos como a síntese de carboidratos; IV) redução no metabolismo de nitrogênio e na assimilação de nutrientes; V) desequilíbrio hormonal, incluindo o aumento na produção do ácido abscísico (ABA), que regula o fechamento estomático e influencia a síntese do etileno, auxinas e citocininas, afetando o crescimento e desenvolvimento. Além disso, o aumento da T_{med} é acompanhado pelo déficit de pressão de vapor, que leva ao fechamento dos estômatos para reduzir a perda de água. Esse processo diminui a entrada de CO₂, limitando a fotossíntese e reduzindo a capacidade de resfriamento da planta, aumentando o risco de superaquecimento da folha (Fagundes *et al.*, 2024b; Hatfield; Prueger, 2015; Perdomo *et al.*, 2017). Assim, valores de T_{med} ou T_{max} próximos à TB limitam a emissão de novas folhas e prolongam a duração do estágio de desenvolvimento inicial. Tal padrão foi observado por Fagundes *et al.* (2021), Martins *et al.* (2023b) e Reis *et al.* (2021) em espécies florestais nativas e exóticas cultivadas no Brasil.

Os valores de filocrono variaram entre as DSs (103,3 a 278 °C dia folha⁻¹), exceto para a *B. forficata*, e entre as cinco espécies estudadas (160,5 a 224,4 °C dia folha⁻¹). A *B. forficata* possui a maior amplitude térmica de desenvolvimento (10,2 a 43,9 °C) e ao mesmo tempo necessita acumular maior quantidade de energia (224,4 °C dia) para emitir uma folha (Tabela 3.1). Ou seja, independente da DS, essa espécie consegue se desenvolver em uma ampla faixa térmica, sendo uma vantagem em condições de maior amplitude térmica diária ou em eventos extremos de temperatura. Porém, a exigência térmica para finalizar o estágio de desenvolvimento inicial da *B. forficata* é significativamente maior comparada as demais espécies estudadas. Já a *C. speciosa* possui menor filocrono (160,5 °C dia folha⁻¹) e, consequentemente, menor exigência térmica que as demais espécies estudadas. Os valores de filocrono das cinco espécies foram superiores a maioria das espécies florestais nativas e exóticas (Tabela 3.2).

Quando se analisa os valores de filocrono, espera-se que o menor (maior) valor do

filocrono, ou seja, menor (maior) exigência térmica, resulte em menor (maior) duração do estágio inicial de desenvolvimento (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2024). Tal padrão ocorreu na maioria das DSs, como por exemplo, nas DS3 (118,8 °C dia folha⁻¹; 131 dias) e DS4 (134 °C dia folha⁻¹; 130 dias) de *C. speciosa*; DS4 (143,2 °C dia folha⁻¹; 107 dias) de *H. chrysotrichus*; DS5 (147,1 °C dia folha⁻¹; 125 dias) de *H. impetiginosus* e DS4, DS5 e DS6 (~173,2 °C dia folha⁻¹; ~ 132 dias) de *T. roseoalba*. No entanto, em algumas DSs, o menor valor do filocrono não resultou em menor duração do estágio de desenvolvimento inicial. Por exemplo, na DS9 de *C. speciosa*, o menor valor do filocrono (125,6 °C dia folha⁻¹) foi acompanhado de maior duração (~190 dias), assim como, as DS9 e DS10 de *H. impetiginosus* que apresentaram menores valores de filocrono (141,7 e 128,5 °C dia folha⁻¹) com maior duração (159 e 165 dias). De forma oposta, na DS14 de *H. chrysotrichus* e *H. impetiginosus*, o maior valor de filocrono (151,3 e 200,1 °C dia folha⁻¹) foi acompanhado da menor duração (~105 e 131 dias, respectivamente).

Essas diferenças são esperadas e podem ser explicadas pela relação intrínseca do filocrono com o método de cálculo do ST (Martins *et al.*, 2023a). Cada método de ST pode resultar em diferentes valores de STa, principalmente quando a temperatura do ar está acima de Tot (ou próxima de TB) da espécie, afetando assim os valores do filocrono. Portanto, o método de ST que incorpora os três limiares térmicos (Tb, Tot e TB) é o mais adequado para espécies de florestas tropicais (Fagundes *et al.*, 2024b; Martins *et al.*, 2023b), ressaltando a importância do conhecimento e da estimativa precisa dos valores de Tb, Tot e TB. Além disso, o filocrono é uma variável mais completa comparada a duração (em dias) para descrever o desenvolvimento das plantas, pois integra o tempo e o requerimento térmico necessário para emitir uma folha (Fagundes *et al.*, 2024b).

A inclusão das Tb, Tot e TB também reduz a influência de eventos extremos, como ondas de calor, no valor do filocrono. Entre setembro e dezembro de 2023, a ocorrência de ondas de calor durante as DS11, DS12, DS13 e DS14 expôs as plantas a temperaturas supraótimas por períodos prolongados. A maior frequência de valores de Tmed acima da Tot e próxima a TB pode ter contribuído para o maior requerimento térmico das espécies e o retardo do desenvolvimento foliar. O estresse térmico compromete o desenvolvimento das plantas, reduzindo a eficiência no uso da energia térmica e prolongando o tempo necessário para a emissão de novas folhas.

Os limiares térmicos estimados neste estudo para as cinco espécies são dados de entrada obrigatórios em modelos de desenvolvimento (e requerimento térmico), como o Wang e Engel,

(1998), e modelos de produtividade, como o 3PG (Sands; Landsberg, 2002) e APSIM (Keating *et al.*, 2003), amplamente utilizados na área florestal. Portanto, a incorporação da Tb, Tot e TB nesses modelos permite projetar o desenvolvimento e a produtividade das espécies em diferentes cenários de mudanças climáticas. Diante dos aumentos de temperatura (de 1,5°C a 6°C) projetados para diversas regiões brasileiras (Florêncio *et al.*, 2022), o conhecimento dos limiares e do requerimento térmico de espécies florestais nativas possibilita compreender como temperaturas extremas e tendências de aquecimento impactam a fenologia dessas espécies, e como isso implica na dinâmica dos ecossistemas, na distribuição geográfica e na produtividade florestal.

3.4. CONCLUSÃO

Os limiares térmicos estimados para o desenvolvimento inicial foram distintos entre as cinco espécies florestais nativas. Para *B. forficata* foram: Tb = 10,6 °C, Tot = 21,5 °C e TB = 43,9 °C; para *C. speciosa* foram Tb = 12 °C, Tot = 21 °C e TB = 42,8 °C; para *H. chrysotrichus* foram Tb = 11,4 °C, Tot = 20,3 °C e TB = 41,9 °C; para *H. impetiginosus* foram Tb = 12,6 °C, Tot = 21,1 °C e TB = 42,6 °C e para *T. roseoalba* Tb = 12,2 °C, Tot = 21,2 °C e TB = 43,4 °C. A *B. forficata* possui a maior amplitude térmica de desenvolvimento (10,6 a 43,9 °C) e ao mesmo tempo necessita acumular maior energia (224,4 °C dia folha⁻¹, ± DP 19) para emitir uma folha, enquanto *C. speciosa* possui menor filocrono (160,5 °C dia folha⁻¹, ± DP 34,1) e, consequentemente, menor exigência térmica comparada as demais espécies estudadas.

As cinco espécies florestais nativas desenvolveram-se de formas distintas ao longo das 14 datas de semeadura, apresentando taxas de desenvolvimento diferentes nas mesmas condições de campo.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALM, D.M.; PIKE, D.R.; HESKETH, J.D.; STOLLER, E.W. Leaf area development in some crop and weed species. **Biotronics**, v.17, p.29-39, 1988. <https://hdl.handle.net/2324/8141>.
- 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>.
- ANDREUCCI, M.P.; MOOT, D.J.; BLACK, A.D.; SEDCOLE, R. A comparison of cardinal temperatures estimated by linear and nonlinear models for germination and bulb growth of forage brassicas. **European Journal of Agronomy**, v.81, p.52-63, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.010>.

- BAATH, G.S.; KAKANI, V.G.; GOWDA, P.H.; ROCATELI, A.C.; NORTHUP, B.K.; SINGH, H.; KATTA, J.R.. Guar responses to temperature: estimation of cardinal temperatures and photosynthetic parameters. **Industrial Crops and Products**, v.145, p.111940, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111940>.
- BAATH, G.S.; KAKANI, V.G.; NORTHUP, B.K.; GOWDA, P.H.; ROCATELI, A.C.; SINGH, H. Quantifying and modeling the influence of temperature on growth and reproductive development of sesame. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.41, p.143-152, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10278-y>.
- 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>.
- BITA, C.E.; GERATS, T. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. **Frontiers in Plant Science**, v.4, p.273, 2013. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00273>.
- BORELLA, D.R.; SOUZA, A.P.; SILVA, A.C.; FELIPE, R.T.A.; SILVA, K.N.C.; SOUZA, J.H. G. Exigências térmicas e filocrono de *Dipteryx alata* sob níveis de sombreamento na transição Cerrado-Amazônia. **Scientia Plena**, v.16, p.051702, 2020. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.051702>.
- CARVALHO, P.E.R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas. 2003. 1.039 p. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras, v. 1). Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 06 mar. 2024.
- CARVALHO, P.E.R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas. 2006. 627 p. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras, v. 2). Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 06 mar. 2024.
- CARVALHO-SOBRINHO, J.G. **Ceiba in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB9037>. Acesso em: 27 fev. 2024.
- CRIA - Centro de Referência e Informação Ambiental. **Specieslink**. 2023. Disponível em: <https://specieslink.net>. Acesso em: 17 mai. 2023.
- DEGAN, P.; AGUIAR, I.B.; SADER, R.; PERECIN, D.; PINTO, L.R. Influência de métodos de secagem na conservação de sementes de Ipê-branco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, p.492-496, 2001. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000300021>.
- FABER, A.H.; ØRSTED, M.; EHLERS, B.K. Application of the thermal death time model in predicting thermal damage accumulation in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.75, p.3467-3482, 2024. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae096>.
- FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; REIS, F.Y.S. COSTA, H.F. Modeling the initial

development dynamics for two native Brazilian forest tree species. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v.97, p.295-308, 2024a. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad044>

FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; REIS, F.Y.S.; COSTA, H.F. Predicting temperature ranges for the initial development of two native Brazilian tree species using multiple sowing dates. **Forest Ecology and Management**, v.562, p.121912, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121912>.

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>.

FERNANDES, M.E.S.; TOMIOZZO, R.; FREITAS, C.P.O.; ROSO, T.P.; SOUSA, M.H.L.; UHLMANN, L.O.; ZANON, A.J.; STRECK, N.A. Damage and lethal temperature due to heat stress in field grown dahlia. **Ornamental Horticulture**, v.29, p.216-223, 2023. <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v29i2.2624>.

FERREIRA, M.C.; MARTINS, F.B.; FLORÊNCIO, G.W.L.; PASIN, L.A.A.P. Cardinal temperatures and modeling of vegetative development in guava. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.819-825, 2019a. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n11p819-825>.

FERREIRA, M.C.; MARTINS, F.B.; FLORÊNCIO, G.W.L.; SILVA, J.P.G.C.; PASIN, L.A.A.P. Cardinal temperatures and thermal requirements for the initial development of two Brazilian native species. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, p. e00525, 2019b. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00525>.

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.; MARTINS, F.B.; ABREU, M.C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, p.283-292, 2017. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000500001>.

GOMES, A.A.; DEBASTIANI, M.M.; PIZZATTO, M.; SILVA, A.C.; SOUZA, A.P. Thermal requirements and estimates of number of leaves of *Annona squamosa* L. grown under different shading conditions. **Comunicata Scientiae**, v.14, p.e3973, 2023. <https://doi.org/10.14295/cs.v14.3973>.

HATFIELD, J.L.; PRUEGER, J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v.10, p.4-10, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>.

JAFARI, B.; KORDROSTAMI, M.; GHASEMI-SOLOKLUI, A.A. Maximizing tomato seed germination: Quantifying cardinal temperatures and thermal time requirements. **International**

Journal of Horticultural Science and Technology, v.11, p.83-94, 2024. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2023.351815.600>.

JAGADISH, S.V.K.; WAY, D.A.; SHARKEY, T.D. Plant heat stress: Concepts directing future research. **Plant Cell and Environment**, v.44, p.1992-2005, 2021. <https://doi.org/10.1111/pce.14050>.

KEATING, B.; CARBERRY, P.; HAMMER, G.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, M.J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N.I.; HARGREAVES, J.N.G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J.P.; SILBURN, M.; WANG, E. BROWN, S.; BRISTOW, K.L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN R.L.; FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 267-288, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9).

KUMARATHUNGE, D.P.; MEDLYN, B.E.; DRAKE, J.E. Acclimation and adaptation components of the temperature dependence of plant photosynthesis at the global scale. **New Phytologist**, v.222, p.768-784, 2018. <https://doi.org/10.1111/nph.15668>.

LI, J.; BAI, X.; RAN, F.; ZHANG, C.; YAN, Y.; LI, P.; CHEN, H. Effects of combined extreme cold and drought stress on growth, photosynthesis, and physiological characteristics of cool-season grasses. **Scientific Reports**, v.14, p.116, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49531-1>.

LIMA, E.P.; SILVA, E.L. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p. 266-273, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300007>.

LIMA, R.A.F.; DAUBY, G.; GASPER, A.L.; FERNANDEZ, E.P.; VIBRANS, A.C.; OLIVEIRA, A.A.; PRADO, P.I.; SOUZA, V.C.; SIQUEIRA, M.F.; STEEGE, H. Comprehensive conservation assessments reveal high extinction risks across Atlantic Forest trees. **Science**, v.383, p.219-225, 2024. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abq5099>.

LISBOA, P.M.M.; MARTINS, F.B.; ALVARENGA, M.I.N.; VIEIRA NETO, J.; REIS, D.F. Desenvolvimento vegetativo de duas cultivares de oliveira na fase de muda. **Ciência Rural**, v.42, p.1556-1562, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000900007>.

LOHMANN, L.G. **Handroanthus in Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020a. Disponível em: <http://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB114078>. Acesso em: 27 fev. 2024.

LOHMANN, L.G. **Handroanthus in Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020b. Disponível em: <http://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB114086>. Acesso em: 27 fev. 2024.

LOHMANN, L.G. **Tabebuia in Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020c. Disponível em: <http://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB114338>. Acesso em: 27 fev. 2024.

- MARTINS, F.B.; SILVA, J.C.; STRECK, N.A. Estimativa da temperatura-base para emissão de folhas e do filocrono em duas espécies de eucalipto na fase de muda. **Revista Árvore**, v.31, p. 373-381, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000300002>.
- MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; FAGUNDES, F.F.A.; FLORÊNCIO, G.W.L. Thermal and photoperiodic requirements of the seedling stage of three tropical forest species. **Journal of Forestry Research**, v.34, p.209-220, 2023a. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01530-0>.
- MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; FLORÊNCIO, G.W.L. Agrometeorological models for predicting seedlings development of two native forest species. **Scientia Agricola**, v.79, p. e20200192, 2022. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0192>.
- MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; XAVIER, R.G.; RIBEIRO, G.T.S.; FAGUNDES, F.F.A.; REIS, F.Y.S.; COSTA, H.F.; BORGES, B.O. Phenological description and thermal time requirements for the seedling phase of three Brazilian native forest species. **Annals of Applied Biology**, v.184, p.259-274, 2024. <https://doi.org/10.1111/aab.12875>.
- MARTINS, F.B.; FLORÊNCIO, G.W.L.; FERREIRA, M.C.; FAGUNDES, F.F.A.; FREITAS, C.H. Predicting seedling development for two commercial forest species under current and future climates: A multi-model assessment. **Forest Ecology and Management**, v.537, p.120929, 2023b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120929>.
- MARTINS, F.B.; STRECK, N.A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.8, p.1091-1100, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800005>.
- MATHUR, S.; AGRAWAL, D.; JAJOO, A. Photosynthesis: Response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, v.137, p.116-126, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.01.010>.
- MATOS, V.A.T.; DUARTE, T.F.; PIVETTA, F.; CAMPELO JÚNIOR, J.H. Determinação das temperaturas cardinais de frutos de cajueiros utilizando um modelo não linear de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, p.717-725, 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-77863540079>.
- MICHEREFF FILHO, M.; RESENDE, F.V.; VIDAL, M.C.; GUIMARAES, J.A.; MOURA, A.P.; SILVA, P.S.; REYES, C.P. **Manejo de pragas em hortaliças durante a transição agroecológica**. Embrapa Hortaliças, Circular técnica 119, 2013. 20 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/957535>. Acesso em: 26 mar. 2023.
- MONTEIRO, E.B.; SILVA, C.C.; SILVA, A.C.; SOUZA, A.P. Estimating emission of leaves seedlings forest in different shading levels, at conditions of transition Amazon-Cerrado, Brazil. **American Journal of Plant Sciences**, v.5, p.2330-2341, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.515247>.
- 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>.

- PERDOMO, J.A.; CAPÓ-BAUÇÀ, S.; CARMO-SILVA, E.; GALMÉS, J. Rubisco and Rubisco activase play an important role in the biochemical limitations of photosynthesis in rice, wheat, and maize under high temperature and water deficit. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.1-15, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00490>.
- PESSOTTO, M.V.; ROBERTS, T.L.; BERTUCCI, M.; SANTOS, C.; ROSS, J.; SAVIN, M. Determining cardinal temperatures for eight cover crop species. **AgroSystems, Geosciences & Environment**, v.6, p. e20393, 2023. <https://doi.org/10.1002/agg2.20393>.
- POLETO, G.C.; PAULA, G.M.; CARON, B.O.; ELLI, E.F. Estimativa da temperatura-base para emissão de folhas e do filocrono da erva-mate na fase de muda. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v.5, p.23-32, 2017. <https://doi.org/10.5902/2316980X23814>.
- POSSE, R.P.; VALANI, F.; SOUZA, C.A.S.; POSSE, S.C.P.; SALES, R.A.; OLIVEIRA, E.C.; QUARTEZANI, W.Z.; LEITE, M.C.T. Basal temperature and thermal constant for the production of cacao tree seedlings. **Journal of Experimental Agriculture International**, v.25, p.1-16, 2018. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/43321>.
- QUEIROZ, D.L.; SOLIMAN, E.P.; BURCKHARDT, D. Principais pragas em viveiros de mudas de eucalipto. In: LEMES, P.; ZANUNCIO, J.C. **Novo Manual de Pragas Florestais Brasileiras**. Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/novo-manual-de-pragas-florestais-brasileiras/>. Acesso em: 26 mar. 2023.
- RAD - Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2023. São Paulo, Brasil. **MapBiomás**, 2024. 154 p. Disponível em: <http://alerta.mapbiomas.org>. Acesso em: 06 jan. 2024.
- REIS, F.Y.S.; MARTINS, F.B.; TORRES, R.R.; FLORÊNCIO, G.W.L.; CASSEMIRO, J.M.; MONTEIRO, V.F.C.; FERREIRA, M.C. Climate change impact on the initial development of tropical forest species: a multi-model assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, v.1, p.1-15, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03646-5>
- RUELLAND, E.; ZACHOWSKI, A. How plants sense temperature. **Environmental and Experimental Botany**, n.69, p.225-232, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.011>.
- SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterization of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v.163, p.273-292, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00586-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00586-2).
- SCHWERZ, F. ELOY, E.; ELLI, E.F.; CARON, B.O.; PAULA, G.M. Temperatura e radiação solar na produção de mudas de cedro australiano. **Scientia Forestalis**, v.47, p.733-743, 2019. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n124.15>.
- SHELAKE, R.M.; WAGH, S.G.; PATIL, A.M.; ČERVENÝ, J.; WAGHUNDE, R.R.; KIM, J.Y. Heat Stress and Plant-Biotic Interactions: Advances and Perspectives. **Plants**, v.13, p.2022, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13152022>.
- SHI, Y.; DING, Y.; YANG, S. Molecular regulation of CBF signaling in cold acclimation. **Trends in Plant Science**, v.23, p.623-637, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.04.002>.

- SILVA, J.M.C.; RAPINI, A.; BARBOSA, L.C.F.; TORRES, R.R. Extinction risk of narrowly distributed species of seed plants in Brazil due to habitat loss and climate change. **PeerJ**, v.7, p. e7333, 2019. <https://doi.org/10.7717/peerj.7333>.
- SILVA, L.V.; REIS, F.Y.S.; MARTINS, F.B. Desenvolvimento Vegetativo de *Cesalpineia ferrea* e *Anadenanthera macrocarpa*: I - Estimativa das Temperaturas Cardinais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, p.23-33, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786351006>.
- SINCLAIR, T.R.; GILBERT, R.A.; PERDOMO, R.E.; SHINE JR., J.M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, p.171-178, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.12.005>.
- SLOT, M.; WINTER, K. Photosynthetic acclimation to warming in tropical forest tree seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v.68, p.2275–2284, 2017. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx071>.
- SOUSA, D.P.; FRARE, J.V.; FARIAS, V.S.; NUNES, H.G.G.C.; MARTINS, M.S.; LIMA, A.F.T.; TAVARES, L.B.; COSTA, D.L.P.; LIMA, M.J.A.; CARVALHO, C.J.R.; SOUZA, P.J.O.P. Açaí palm base temperatures and thermal time requirements in eastern Amazon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, e01667, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.01667>.
- VAZ, A.M.S.F.; SANTOS, A.C.B. **Bauhinia in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB82666>. Acesso em: 27 fev. 2024.
- VILLAGARCÍA, L.; WERE, A.; DOMINGO, F.; GARCÍA, M.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. Estimation of soil boundary-layer resistance in sparse semiarid stands for evapotranspiration modelling. **Journal of Hydrology**, v.342, p.173-183, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.023>.

APÊNDICES DO CAPÍTULO III

Apêndice 3.1 - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Bauhinia forficata*.

Bauhinia forficata																								
Data de semeadura	Duração (dias)		Temperatura do ar (°C)				Tb (°C) pelo QME	Combinações entre DSs																
			Tmin	Tmed	Tmax	TB																		
DS1	141	B	14,0	B	19,9	B	27,6	A	10,0 11,5 15,0 9,9 6,5	DS3	DS3	DS3	DS3	DS3	DS5	DS6	DS5	DS5	DS6	DS6	DS6	DS7	DS7	
DS2	166	D	15,8	C	20,9	C	27,9	A																
DS3	166	D	16,9	D	21,7	D	28,6	B																
DS4	124	A	17,3	D	21,9	D	28,6	B																
DS5	148	C	17,5	D	22,0	D	29,1	B																
DS6	152	C	17,4	D	21,9	D	29,0	B																
DS7	145	B	16,5	C	21,2	C	28,7	B																
DS8	178	E	13,9	B	19,3	A	27,6	A																
DS9	189	F	13,2	A	18,9	A	27,2	A																
DS10	189	F	12,9	A	18,9	A	27,4	A																
DS11	195	F	13,6	A	19,6	B	28,0	A																
DS12	163	D	14,0	B	20,1	B	28,5	A																
DS13	177	E	16,1	C	22,0	D	29,9	C																
DS14	165	D	17,2	D	22,9	E	30,4	C																
Resultados (°C)									10,6	38,8*	38,4*	43,6*	26,1	18,8	40,2*	53,3*	361,1	7,8	49,2*	3,1	3,3	79,9	113,9	32,6
* valores considerados para a média da TB = 43,9																								

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna (datas de semeadura) não diferiram entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$). Os valores de duração (em dias) referem-se aos dados originais. Contudo, os dados foram transformados em Ln dado o pressuposto de não normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$). As letras A - F foram dispostas em ordem crescente de valor de duração, Tmin, Tmed e Tmax das DSs.

Apêndice 3.2 - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Ceiba speciosa*.

Ceiba speciosa																														
Data de semeadura	Duração (dias)		Temperatura do ar (°C)						Tb (°C) pelo QME	Combinações entre DSs																				
			Tmin			Tmed				Tmax			TB																	
DS1	155	C	13,7	A	19,7	B	27,6	A	0,0 0,0 14,9 11,1 10,1	DS1 DS2	DS1	DS1	DS1	DS1	DS2 DS5 DS6 DS7 DS13	DS2	DS2	DS2	DS2	DS5 DS6 DS7 DS13	DS5	DS5	DS5	DS6 DS7 DS13	DS6	DS6	DS6			
DS2	158	D	15,2	B	20,6	D	27,8	A																						
DS3	131	A	16,4	C	21,3	D	28,2	A																						
DS4	130	A	17,2	D	21,9	E	28,7	B																						
DS5	140	B	17,5	D	22,0	E	28,9	B				DS5													DS5	DS5	DS5			
DS6	180	E	16,3	C	21,0	D	28,4	A					DS6												DS6				DS6	DS6
DS7	186	F	15,4	B	20,3	C	28,0	A						DS7											DS7				DS7	DS7
DS8	231	H	14,0	A	19,5	B	27,7	A																						
DS9	190	F	13,2	A	18,9	A	27,3	A																						
DS10	205	G	13,3	A	19,2	A	27,7	A																						
DS11	202	G	13,6	A	19,6	B	28,0	A																						
DS12	162	D	13,7	A	19,7	B	28,1	A																						
DS13	153	C	15,7	B	21,7	E	29,7	C								DS13						DS13				DS13			DS13	DS13
DS14	127	A	16,6	C	22,6	E	30,3	C																						
Resultados (°C)									12,0	44,7*	65,9	47,8*	45,3*	15,0	23,3	49,6*	45,7*	17,2	39,6*	38,2*	29,9	141,2	39,8*	34,1*						
										* valores considerados para a média da TB = 42,8																				

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna (datas de semeadura) não diferiram entre si pelo teste de Scott-Knott (p ≥ 0,05). Os valores de duração (em dias) referem-se aos dados originais. Contudo, os dados foram transformados em Ln dado o pressuposto de não normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (p < 0,05). As letras A - H foram dispostas em ordem crescente de valor de duração, Tmin, Tmed e Tmax das DSs.

Apêndice 3.3 - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Handroanthus chrysotrichus*.

Handroanthus chrysotrichus																																									
Data de semeadura	Duração (dias)	Temperatura do ar (°C)						Tb (°C) pelo QME	Combinações entre DSs																																
		Tmin		Tmed		Tmax			TB																																
DS1	136	B	14,3	C	20,0	D	27,7	B		SD1	SD1	SD1	SD1	SD1	SD1	SD1	SD1																								
DS2	118	A	15,7	D	21,1	E	28,2	C		SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SD7																										
DS3	119	A	16,8	E	21,6	F	28,5	C																																	
DS4	107	A	17,2	E	21,8	F	28,5	C																																	
DS5	113	A	17,7	E	22,1	G	29,0	D																																	
DS6	120	A	17,8	E	22,3	G	29,3	D																																	
DS7	120	A	17,3	E	21,9	F	29,2	D																																	
DS8	153	B	13,7	B	19,2	C	27,5	B																																	
DS9	156	B	13,0	B	18,7	B	27,2	B																																	
DS10	138	B	11,8	A	17,7	A	26,2	A																																	
DS11	182	C	13,3	B	19,2	C	27,6	B																																	
DS12	148	B	13,8	B	19,8	D	28,1	C																																	
DS13	148	B	17,1	E	22,9	G	30,6	E																																	
DS14	105	A	16,8	E	22,7	G	30,3	E																																	
Resultados (°C)									11,4	35,8*	781,8	35,8*	24,9	152,5	20,6	119,1	30,1	48,9*	35,6*	66,3	63,2	71,8														77,8	27,3	46,5*			
TB																																									
continuação - combinações entre DSs de <i>H. chrysotrichus</i> para estimativa da TB		SD3	SD3	SD3	SD3	SD3	SD3	SD4 SD5	SD4	SD4	SD4	SD4	SD5 SD6	SD5	SD5	SD5	SD6 SD7	SD6	SD6	SD7	SD7	SD13	SD13																		
		SD5	SD6	SD7	SD13	SD14																																			
		26,4	103,5	16,1	102,9	32,5	61,5	60,6	67,6	76,0	25,1	59,5*	100,7	83,6	34,1*	46,8*	102,6	38,6*	81,8	37,5*	60,2																				
* valores considerados para a média da TB = 41,9																																									

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna (datas de semeadura) não diferiram entre si pelo teste de Scott-Knott (p ≥ 0,05). Os valores de duração (em dias) referem-se aos dados originais. Contudo, os dados foram transformados em Ln dado o pressuposto de não normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (p < 0,05). As letras A - G foram dispostas em ordem crescente de valor de duração, Tmin, Tmed e Tmax das DSs.

Apêndice 3.4 - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Handroanthus impetiginosus*.

Handroanthus impetiginosus																								
Data de semeadura	Duração (dias)	Temperatura do ar (°C)						Tb (°C) pelo QME	Combinações entre DSs															
									TB															
DS1	121	A	14,3	C	20,1	C	27,7	B		DS2	DS3	DS4	DS6	DS7	DS12	DS13	DS3	DS4	DS6	DS7	DS12	DS13		
DS2	162	C	15,6	D	20,8	D	27,8	B																
DS3	143	B	16,8	E	21,6	E	28,5	C																
DS4	140	B	17,3	E	22,0	E	28,9	C																
DS5	125	A	17,5	E	22,0	E	28,8	C																
DS6	165	C	16,5	D	21,2	D	28,5	C																
DS7	148	B	16,1	D	20,9	D	28,4	C																
DS8	191	D	13,8	B	19,3	B	27,6	B																
DS9	159	C	13,0	A	18,8	A	27,3	B																
DS10	165	C	12,4	A	18,3	A	26,7	A																
DS11	185	D	13,3	A	19,3	B	27,7	B																
DS12	140	B	14,5	C	20,6	D	29,0	C																
DS13	163	C	16,8	E	22,7	F	30,4	D																
DS14	131	A	17,4	E	23,2	F	30,8	D																
Resultados (°C)									12,6	31,6	28,6	81,1	32,5	35,6*	16,0	21,0	44,5*	46,5*	37,9*	12,5	39,9*	366,1	41,0*	10,9
TB																								
continuação - combinações entre DSs de <i>H. impetiginosus</i> para estimativa da TB		DS6		DS7		DS6		DS7		DS7		DS12		DS12		DS13		DS13						
		DS6		DS7		DS6		DS6		DS7		DS7		DS12		DS12		DS13		DS13		DS13		
		44,7*		40,5*		18,8		37,4*		14,0		58,1*												

* valores considerados para a média da TB = 42,6

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna (datas de semeadura) não diferiram entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$). Os valores de duração (em dias) referem-se aos dados originais. Contudo, os dados foram transformados em Ln dado o pressuposto de não normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$). As letras A - F foram dispostas em ordem crescente de valor de duração, Tmin, Tmed e Tmax das DSs.

Apêndice 3.5 - Comparação de médias para a duração do desenvolvimento inicial (dias), media da temperatura mínima, media e máxima do ar (Tmin, Tmed, Tmax; °C) e combinações entre datas de semeadura (DS) para estimativa da temperatura base (Tb) e temperatura superior (TB) para *Tabebuia roseoalba*.

Tabebuia roseoalba																				
Data de semeadura	Duração (dias)		Temperatura do ar (°C)						Tb (°C) pelo QME	Combinações entre DSs										
			Tmin		Tmed		Tmax			TB										
DS1	129	A	14,2	B	20,0	B	27,7	A	12,8 12,7 13,3 12,8 9,5	DS2 DS3	DS2	DS2	DS2	DS3	DS3	DS3	DS7	SD7	SD7	
DS2	155	C	15,7	C	20,9	C	27,9	A												
DS3	143	B	17,0	D	21,7	D	28,6	B												
DS4	126	A	17,3	D	21,9	D	28,6	B												
DS5	134	A	17,6	D	22,2	E	29,2	B												
DS6	137	A	17,4	D	22,0	D	29,0	B												
DS7	144	B	16,5	C	21,2	C	28,8	B												
DS8	196	D	13,6	A	19,2	A	27,6	A												
DS9	185	D	13,1	A	18,9	A	27,2	A												
DS10	171	C	12,6	A	18,6	A	27,1	A												
DS11	180	D	13,3	A	19,3	A	27,7	A												
DS12	160	C	14,4	B	20,5	B	28,7	A												
DS13	157	C	17,1	D	22,9	F	30,5	C												
DS14	146	B	17,6	D	23,3	F	30,7	C												
Resultados (°C)									12,2	24,8	26,7	15,9	19,2	31,9	12,1	15,6	13,8	16,4	43,4*	
* valores considerados para a média da TB = 43,4																				

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna (datas de semeadura) não diferiram entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$). Os valores de duração (em dias) referem-se aos dados originais. Contudo, os dados foram transformados em Ln dado o pressuposto de não normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$). As letras A - F foram dispostas em ordem crescente de valor de duração, Tmin, Tmed e Tmax das DSs.

Apêndice 3.6 - Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar (mínima, média e máxima) nas 14 datas de semeadura de *Bauhinia forficata*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.

<i>Bauhinia forficata</i>														
Data de semeadura		Faixas de temperatura do ar (°C)												
		0 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 12	12 - 15	15 - 18	18 - 21	21 - 24	24 - 27	27 - 30	30 - 33	33 - 36	> 36
DS1	Tmin	0	1	7	20	25	43	6	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	3	23	40	34	2	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	1	1	5	6	27	39	22	3	0
DS2	Tmin	0	0	3	7	20	46	25	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	10	37	51	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	1	1	5	59	23	36	28	3	0
DS3	Tmin	0	0	0	3	14	47	39	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	31	64	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	3	60	17	38	36	3	0
DS4	Tmin	0	0	0	1	13	39	48	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	24	69	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	3	5	17	36	39	1	0
DS5	Tmin	0	0	0	1	11	38	51	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	21	74	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	2	4	14	35	44	2	0
DS6	Tmin	0	0	0	1	12	38	50	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	1	28	68	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	0	4	15	39	40	2	0
DS7	Tmin	0	0	4	7	14	30	47	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	9	28	59	3	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	0	3	23	37	36	1	0
DS8	Tmin	0	2	10	24	19	23	23	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	29	25	37	1	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	1	10	32	33	24	1	0

continua... 122

... continuação

DS9	Tmin	0	2	10	26	30	24	10	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	30	36	25	2	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	10	34	32	20	2	0
DS10	Tmin	0	2	10	26	33	24	7	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	31	36	23	3	1	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	10	35	30	16	5	2
DS11	Tmin	0	2	10	24	28	23	15	1	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	29	26	27	8	3	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	10	31	25	21	6	4
DS12	Tmin	0	2	8	20	29	24	18	1	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	8	23	25	32	10	3	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	4	10	25	27	25	7	5
DS13	Tmin	0	1	2	10	25	28	34	3	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	10	23	38	24	4	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	3	14	28	37	13	4
DS14	Tmin	0	0	0	3	20	31	45	3	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	19	48	27	4	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	2	9	28	44	14	5

Apêndice 3.7 – Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar (mínima, média e máxima) nas 14 datas de semeadura de *Ceiba speciosa*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.

<i>Ceiba speciosa</i>														
Data de semeadura		Faixas de temperatura do ar (°C)												
		0 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 12	12 - 15	15 - 18	18 - 21	21 - 24	24 - 27	27 - 30	30 - 33	33 - 36	> 36
DS1	Tmin	0	1	10	21	24	41	6	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	3	27	38	32	2	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	1	1	5	6	29	39	21	3	0
DS2	Tmin	0	1	4	11	22	48	17	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	14	38	45	3	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	1	1	5	8	23	39	25	3	0
DS3	Tmin	0	0	0	4	18	56	24	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	5	39	53	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	4	7	23	36	29	4	0
DS4	Tmin	0	0	0	1	13	42	45	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	24	68	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	3	5	17	36	38	2	0
DS5	Tmin	0	0	0	1	11	36	54	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	23	70	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	2	4	16	37	41	1	0
DS6	Tmin	0	0	3	10	14	33	42	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	11	28	57	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	0	5	25	35	33	2	0
DS7	Tmin	0	1	6	16	14	27	37	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	5	20	25	48	3	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	1	8	29	32	30	1	0
DS8	Tmin	0	1	8	22	27	23	20	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	7	25	31	37	1	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	9	28	34	27	1	0

continua... 124

... continuação

DS9	Tmin	0	2	10	26	29	24	11	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	31	34	26	1	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	10	33	31	21	2	0
DS10	Tmin	0	1	9	24	31	25	11	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	8	29	34	26	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	10	33	29	19	4	1
DS11	Tmin	0	1	9	24	30	23	15	1	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	8	28	28	26	8	2	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	9	31	27	21	6	4
DS12	Tmin	0	2	8	23	30	25	15	1	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	26	26	33	8	1	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	4	10	27	27	26	6	2
DS13	Tmin	0	1	2	11	28	28	30	3	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	12	26	39	19	4	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	3	15	29	35	12	5
DS14	Tmin	0	0	0	5	28	33	35	4	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	4	25	46	21	6	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	2	10	25	41	13	6

Apêndice 3.8 – Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar (mínima, média e máxima) nas 14 datas de semeadura de *Handroanthus chrysotrichus*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.

<i>Handroanthus chrysotrichus</i>														
Data de semeadura		Faixas de temperatura do ar (°C)												
		0 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 12	12 - 15	15 - 18	18 - 21	21 - 24	24 - 27	27 - 30	30 - 33	33 - 36	> 36
DS1	Tmin	0	1	5	19	26	45	6	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	21	41	35	2	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	1	1	6	6	25	40	23	3	0
DS2	Tmin	0	0	1	7	23	57	15	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	9	38	50	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	5	7	21	36	31	4	0
DS3	Tmin	0	0	0	2	17	47	35	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	4	32	60	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	4	5	20	36	35	2	0
DS4	Tmin	0	0	0	1	14	40	46	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	4	26	66	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	3	6	20	34	37	1	0
DS5	Tmin	0	0	0	0	10	34	57	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	1	22	74	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	0	5	17	37	41	2	0
DS6	Tmin	0	0	0	0	5	37	57	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	0	19	78	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	0	5	12	34	47	2	0
DS7	Tmin	0	0	0	2	16	33	50	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	1	29	67	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	0	3	12	41	43	2	0
DS8	Tmin	0	2	11	25	20	24	20	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	30	26	35	1	0	0	0	0

continua... 126

... continuação

	Tmax	0	0	0	0	0	1	1	11	33	32	24	1	0
DS9	Tmin	0	2	11	28	26	25	10	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	10	32	35	24	1	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	1	11	37	32	19	1	0
DS10	Tmin	0	2	13	35	36	13	3	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	12	41	42	6	1	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	4	13	45	32	6	1	0
DS11	Tmin	0	2	10	26	29	23	12	1	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	31	30	26	6	1	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	10	33	28	20	4	2
DS12	Tmin	0	2	8	20	31	25	15	1	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	24	27	34	8	1	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	4	10	25	28	27	6	2
DS13	Tmin	0	0	0	2	22	33	43	3	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	19	47	28	4	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	1	9	24	45	15	5
DS14	Tmin	0	0	0	2	26	37	36	3	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	5	20	54	18	6	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	4	2	9	26	40	13	7

Apêndice 3.9 – Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar (mínima, média e máxima) nas 14 datas de semeadura de *Handroanthus impetiginosus*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.

<i>Handroanthus impetiginosus</i>														
Data de semeadura		Faixas de temperatura do ar (°C)												
		0 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 12	12 - 15	15 - 18	18 - 21	21 - 24	24 - 27	27 - 30	30 - 33	33 - 36	> 36
DS1	Tmin	0	1	5	18	25	46	7	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	20	41	36	2	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	1	1	6	7	24	40	24	3	0
DS2	Tmin	0	0	3	9	20	47	22	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	11	39	47	3	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	1	1	5	8	23	37	27	3	0
DS3	Tmin	0	0	0	2	16	50	34	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	33	59	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	3	6	19	37	33	3	0
DS4	Tmin	0	0	0	1	12	41	48	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	22	71	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	3	5	15	35	41	3	0
DS5	Tmin	0	0	0	1	11	34	55	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	23	70	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	2	4	16	39	39	1	0
DS6	Tmin	0	0	3	7	14	34	43	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	10	28	58	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	0	5	23	36	34	2	0
DS7	Tmin	0	0	4	11	14	29	43	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	13	28	55	3	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	0	5	25	35	34	1	0
DS8	Tmin	0	2	10	24	23	23	21	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	27	30	34	1	0	0	0	0

continua... 128

... continuação

	Tmax	0	0	0	0	0	1	1	10	32	33	25	1	0
DS9	Tmin	0	2	11	28	28	24	10	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	10	31	35	24	1	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	2	11	36	31	20	1	0
DS10	Tmin	0	2	11	30	36	19	5	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	10	35	40	16	1	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	4	12	38	33	14	1	0
DS11	Tmin	0	2	10	25	29	24	13	1	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	31	27	28	7	1	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	10	33	26	22	5	2
DS12	Tmin	0	1	5	18	31	26	20	1	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	5	20	28	36	11	3	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	6	22	29	28	8	5
DS13	Tmin	0	0	0	7	22	31	41	3	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	6	21	44	27	4	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	2	1	10	25	44	14	5
DS14	Tmin	0	0	0	1	18	33	47	3	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	13	51	30	5	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	1	6	23	47	16	5

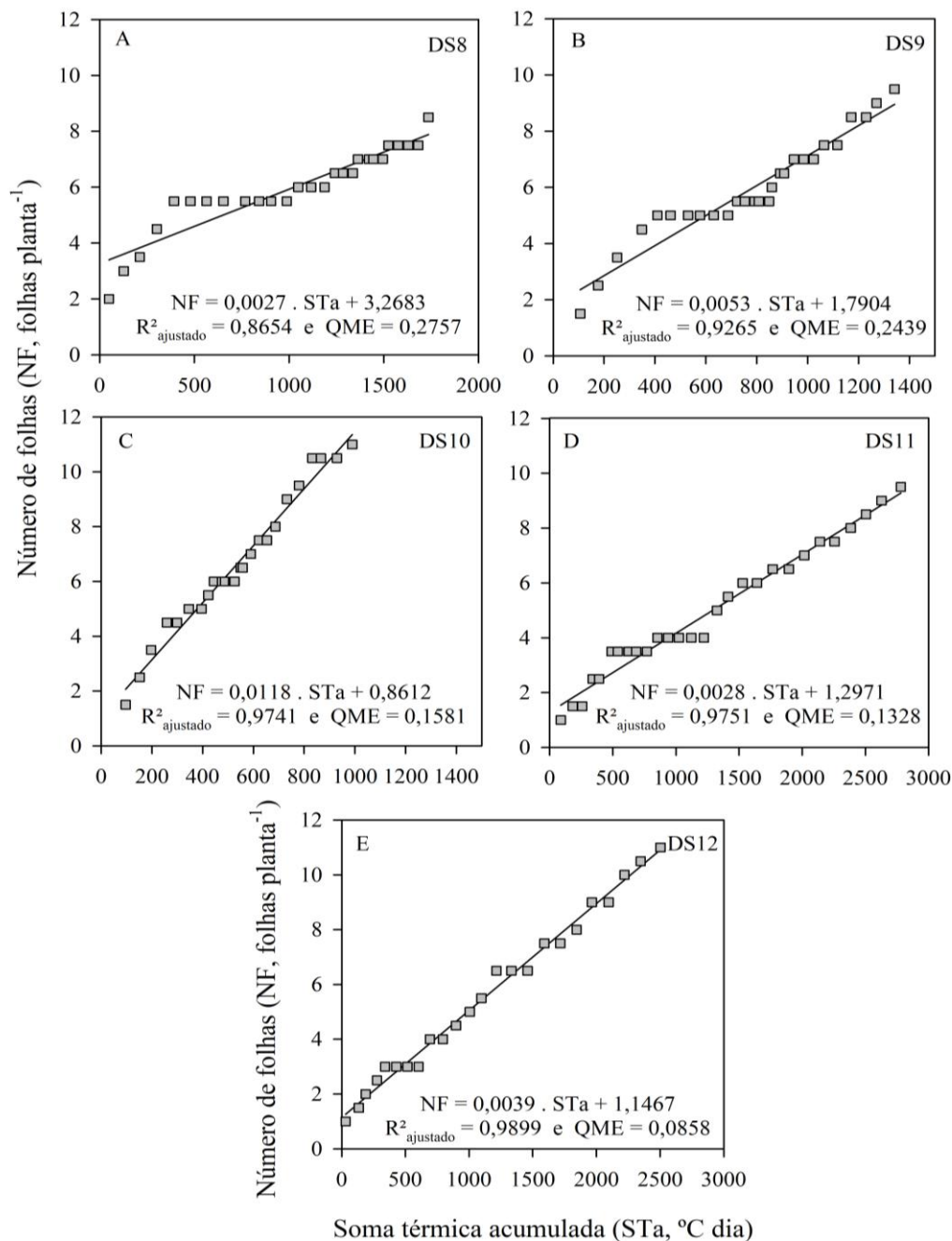
Apêndice 3.10 – Distribuições de frequência relativa (%) das faixas de temperatura do ar (mínima, média e máxima) nas 14 datas de semeadura de *Tabebuia roseoalba*, durante a condução dos experimentos em Itajubá.

<i>Tabebuia roseoalba</i>														
Data de semeadura	Faixas de temperatura do ar (°C)													
		0 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 12	12 - 15	15 - 18	18 - 21	21 - 24	24 - 27	27 - 30	30 - 33	33 - 36	> 36
DS1	Tmin	0	1	6	19	26	44	6	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	22	41	35	2	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	1	1	6	6	26	40	23	3	0
DS2	Tmin	0	0	4	7	20	47	23	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	11	37	48	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	1	1	4	8	23	36	28	3	0
DS3	Tmin	0	0	0	2	15	44	40	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	31	62	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	3	5	18	39	35	2	0
DS4	Tmin	0	0	0	1	13	38	48	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	24	69	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	3	5	17	36	39	1	0
DS5	Tmin	0	0	0	0	10	37	54	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	1	21	75	4	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	0	4	14	38	44	1	0
DS6	Tmin	0	0	0	1	11	35	52	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	1	26	70	5	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	0	5	15	38	41	2	0
DS7	Tmin	0	0	4	7	14	30	46	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	2	9	27	59	3	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	0	0	3	22	37	37	1	0
DS8	Tmin	0	2	10	25	25	24	17	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	28	32	32	1	0	0	0	0

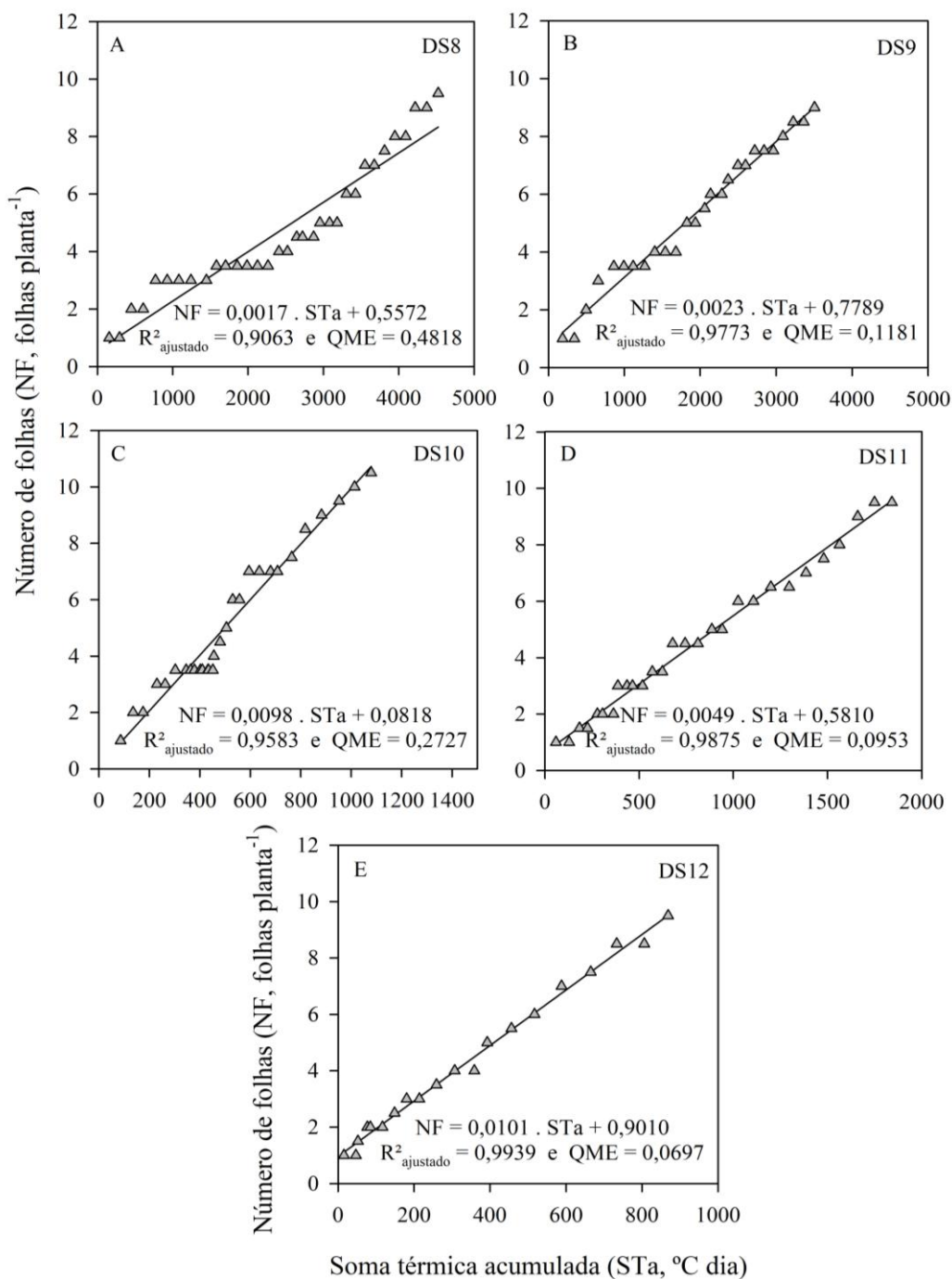
continua... 130

... continuação

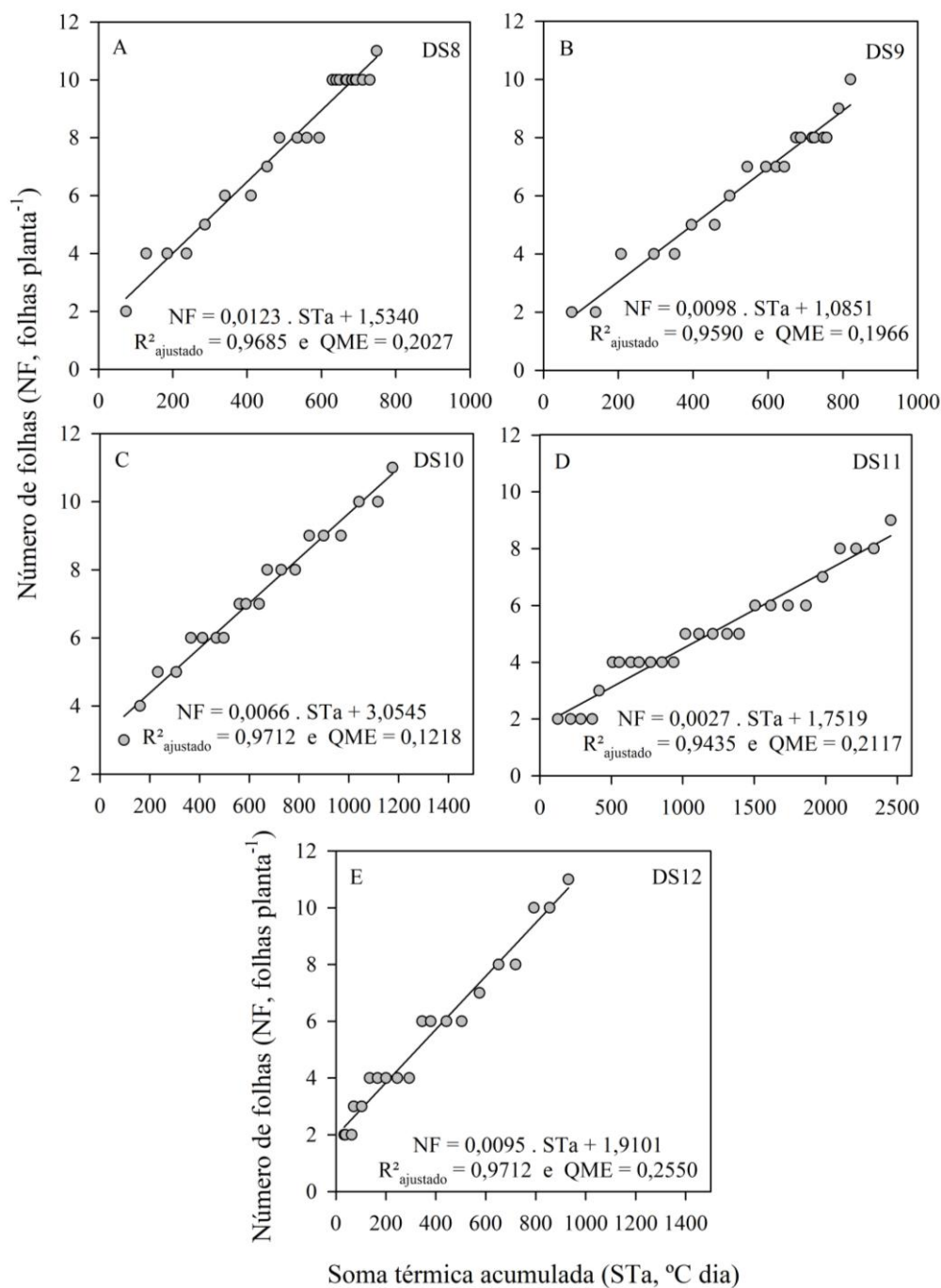
	Tmax	0	0	0	0	0	1	2	10	32	32	24	2	0
DS9	Tmin	0	2	10	26	30	24	10	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	31	36	24	2	0	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	10	34	32	20	1	0
DS10	Tmin	0	2	11	28	36	20	6	0	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	10	33	39	16	3	1	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	11	38	32	11	5	2
DS11	Tmin	0	2	10	26	28	24	13	1	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	9	31	25	29	7	1	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	10	34	24	23	5	2
DS12	Tmin	0	2	7	17	29	25	21	2	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	7	20	25	33	11	4	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	4	10	20	28	28	8	5
DS13	Tmin	0	0	0	4	21	31	45	3	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	20	47	28	4	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	2	1	8	25	46	15	5
DS14	Tmin	0	0	0	1	16	33	50	3	0	0	0	0	0
	Tmed	0	0	0	0	0	3	11	53	30	4	0	0	0
	Tmax	0	0	0	0	0	1	3	2	6	26	47	16	5



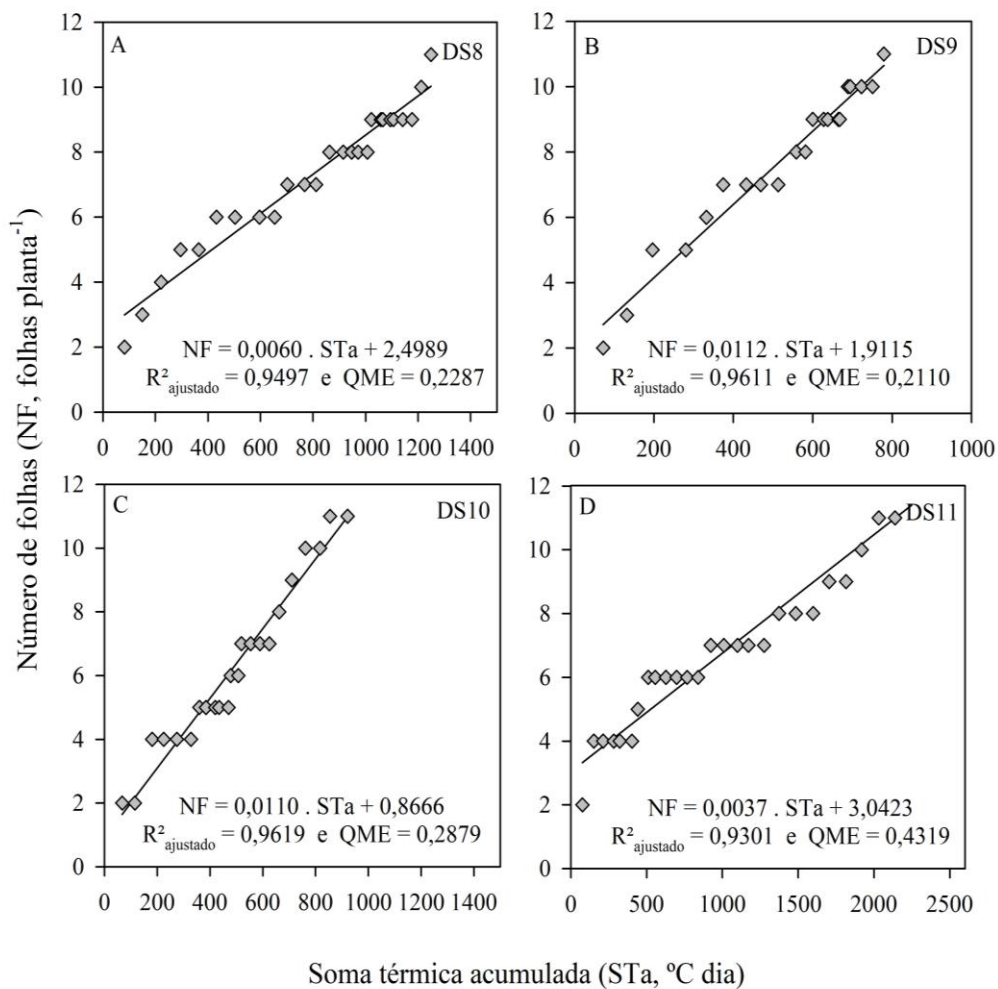
Apêndice 3.11 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta⁻¹) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS12 de *Bauhinia forficata*. Cada painel representa dados de uma única repetição. $R^2_{ajustado}$ é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.



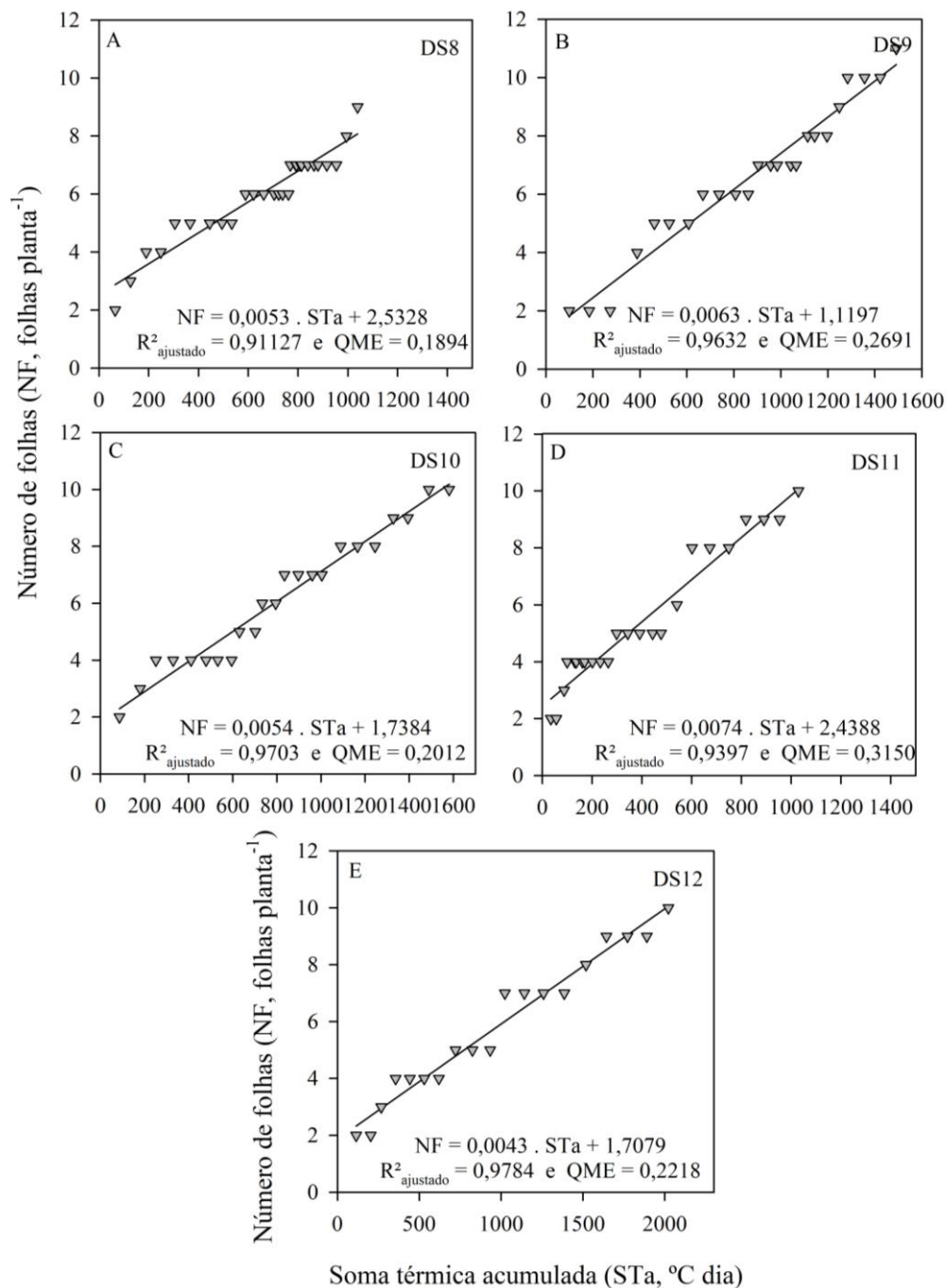
Apêndice 3.12 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta⁻¹) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS12 de *Ceiba speciosa*. Cada painel representa dados de uma única repetição. $R^2_{ajustado}$ é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.



Apêndice 3.13 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta⁻¹) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS12 de *Handroanthus chrysotrichus*. Cada painel representa dados de uma única repetição. $R^2_{ajustado}$ é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.



Apêndice 3.14 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta⁻¹) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS11 de *Handroanthus impetiginosus*. Cada painel representa dados de uma única repetição. $R^2_{ajustado}$ é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.



Apêndice 3.15 - Número de folhas acumuladas no caule principal (NF, folhas planta⁻¹) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante as datas de semeadura DS8 à DS12 de *Tabebuia roseoalba*. Cada painel representa dados de uma única repetição. $R^2_{ajustado}$ é o coeficiente de determinação ajustado, dado por $R^2 = MSS/STQ$, onde MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; STQ é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2 \leq 1$). QME é o quadrado médio do erro.

CAPÍTULO IV

MODELANDO O DESENVOLVIMENTO INICIAL DE ESPÉCIES FLORESTAIS BRASILEIRAS NO CLIMA ATUAL E FUTURO

4.1. INTRODUÇÃO

Aumentos de temperatura projetados para ocorrerem ao longo do século XXI emergem como um dos principais fatores limitantes para o desenvolvimento das plantas (Reis *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2023), impactando negativamente os padrões fisiológicos, morfológicos e anatômicos. Tais alterações, quando amplificadas no tempo, podem influenciar processos como germinação, emissão de folhas (Fagundes *et al.*, 2024b; Ferreira *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2023b), floração e frutificação (Inouye, 2022), repercutindo diretamente na fenologia e na distribuição geográfica das espécies (Florêncio *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2019) .

Além disso, o estresse térmico pode prejudicar interações ecológicas importantes, como polinização e dispersão de sementes, afetando a sobrevivência de espécies dependentes dessas relações, incluindo polinizadores como as abelhas (Memmott *et al.*, 2007; Ogilvie; Forrest, 2017). Alterações na temperatura também podem favorecer a proliferação de espécies invasoras e pragas, que competem com as nativas e alteram a composição e a estrutura das comunidades vegetais (Bettiol *et al.*, 2017; Pivello *et al.*, 2024). A diminuição da cobertura vegetal resultante desses impactos pode intensificar processos de degradação ambiental, como desertificação e perda de habitats, comprometendo a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos essenciais para o equilíbrio ambiental (IPCC, 2023; Silva *et al.*, 2019).

Os impactos são particularmente críticos durante o estágio inicial de desenvolvimento, quando as plântulas apresentam maior sensibilidade e menor tolerância à variabilidade térmica (Fagundes *et al.*, 2024b; Martins *et al.*, 2023a). Essa vulnerabilidade reforça a necessidade de investigar como o clima futuro afetará o desenvolvimento das plantas, considerando as mudanças nos padrões fenológicos e suas consequências na emissão de folhas (Faber *et al.*, 2024; Piao *et al.*, 2019; Reis *et al.*, 2021). Apesar da relevância, o conhecimento sobre os impactos das projeções em espécies florestais ainda é escasso, principalmente em espécies florestais nativas que ocorrem na Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga, que são os biomas brasileiros mais ameaçados, devido as projeções de redução significativas em área e biodiversidade (Silva *et al.*, 2019).

Vários fatores contribuem para a escassez desse tipo de estudo em espécies florestais nativas. Entre eles estão questões práticas, como a falta de informações detalhadas sobre os padrões fenológicos dessas espécies e a ausência de protocolos experimentais bem

estabelecidos, o que dificulta a condução de experimentos para essa finalidade (Martins *et al.*, 2023; Reis *et al.*, 2021). Além disso, a falta de incentivos, regulamentações de mercado, aliada à falta de ações governamentais adequadas, restringe a criação e expansão de viveiros florestais dedicados à produção de mudas de espécies nativas (Silva *et al.*, 2016). Tal situação é agravada pelo direcionamento de empresas públicas e privadas em investimentos destinados a pesquisas de desenvolvimento científico e tecnológico voltadas para espécies exóticas de interesse comercial (Mendonça *et al.*, 2017).

No entanto, a importância dos estudos com espécies florestais nativas vai além do interesse comercial imediato. Essas espécies desempenham um papel fundamental na conservação da biodiversidade, na manutenção dos serviços ecossistêmicos, como a regulação do ciclo hidrológico, o sequestro de carbono e a proteção do solo contra a erosão (Borma *et al.*, 2022). Além disso, sua utilização em programas de restauração ecológica é essencial para a recuperação de ecossistemas degradados, contribuindo para o cumprimento de metas ambientais globais, como as estabelecidas no Acordo de Paris e na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015; UNFCCC, 2015).

O avanço do conhecimento científico sobre o desenvolvimento e as exigências dessas espécies pode, ainda, gerar novas oportunidades econômicas, promovendo a diversificação da produção florestal e incentivando práticas de manejo mais sustentáveis (Fagundes *et al.*, 2021). Apesar dos desafios, pesquisas com espécies nativas são estratégicas para equilibrar conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico no clima futuro. Poucos estudos investigaram as respostas das espécies florestais nativas no clima futuro. Entre eles, Fagundes *et al.* (2021) para *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. e *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz; Reis *et al.* (2021) para *Citharexylum myrianthum* Cham., *Bixa orellana* L. e *Psidium guajava* L., e Fagundes (2023) para *Cydistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. e *Platygyamus regnellii* Benth. Estes estudos mostraram respostas heterogêneas entre as espécies estudadas. Por exemplo, para *L. ferrea* foi projetado atraso do desenvolvimento inicial, com aumento da duração (em dias) entre emergência e término do desenvolvimento inicial (Fagundes *et al.*, 2021), enquanto para a *B. orellana* foi projetado aceleração do desenvolvimento e antecipação do término do estágio de desenvolvimento inicial (Reis *et al.*, 2021).

Para projetar as respostas do desenvolvimento inicial no clima futuro, devem ser realizados dois procedimentos consecutivos. O primeiro refere-se à calibração e avaliação dos modelos de desenvolvimento, que deve ser realizado para cada espécie e local nas condições climáticas atuais (Fagundes *et al.*, 2024a; Martins *et al.*, 2022). O segundo é aplicar as saídas

dos modelos climáticos nos modelos previamente calibrados/avaliados (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2023b; Reis *et al.*, 2021).

Com relação aos modelos de desenvolvimento, dois têm sido utilizados com sucesso em espécies florestais: Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) (Fagundes *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2022; Martins; Streck, 2007). Tais modelos permitem obter o número de folhas acumuladas (NFA) e a duração do desenvolvimento inicial (DDI, em dias) por meio da relação entre a taxa de aparecimento de folhas (TAF) - uma variável de desenvolvimento - e funções de temperatura do ar (Fagundes *et al.*, 2024a; Ferreira *et al.*, 2019). No modelo FIL, a função de temperatura é a soma térmica (ST; °C dia) (Fagundes *et al.*, 2024a; Martins *et al.*, 2022; Martins; Streck, 2007), e no WE é a função beta [$f(T)$, adimensional] (Wang; Engel, 1998). A principal diferença entre as duas funções, é que a ST admite vários métodos de cálculo, sendo o principal deles aquele que considera duas respostas lineares à temperatura do ar, sendo a primeira entre a temperatura base (T_b) e ótima (T_{ot}), e a segunda entre a T_{ot} e superior (T_B) (Gilmore Junior; Rogers, 1958; Rosa *et al.*, 2009). Ou seja, métodos diferentes de ST podem gerar diferentes respostas à temperatura a partir dos mesmos dados de entrada (Streck *et al.*, 2008; Zhou; Wang, 2018; Martins *et al.*, 2023b). Já a $f(T)$ admite uma relação não linear entre a temperatura do ar e T_b , T_{ot} e T_B (Wang; Engel, 1998). Portanto, a $f(T)$ possui maior aderência com os limiares e T_b , T_{ot} e T_B , especialmente quando a temperatura do ar é próxima da T_b e acima da T_{ot} (Streck *et al.*, 2008; Streck *et al.*, 2011; Fagundes *et al.*, 2024a).

Os modelos de Circulação Geral (MCGs) da NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6), derivados das saídas do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), constituem a nova geração de modelos climáticos e possuem alta resolução espacial devido a correção de viés (Thrasher *et al.*, 2022). Ou seja, os modelos do NEX-GDDP-CMIP6 conseguem projetar a temperatura do ar em uma escala mais refinada, sendo úteis para avaliar tendências climáticas em escala local (Dias *et al.*, 2024; Fagundes *et al.*, 2021; Thrasher *et al.*, 2022) como pretendido neste estudo. Tais modelos combinam cenários socioeconômicos, do inglês *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), com cenários de forçantes radiativas, do inglês *Representative Concentration Pathways* (RCPs), e por isso, compreendem melhor as respostas do sistema terrestre em relação aos forçamentos antropogênicos (Almazroui *et al.*, 2021; Riahi *et al.* 2017).

Integrando as saídas dos modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 nos modelos de desenvolvimentos (FIL ou WE) devidamente calibrados e avaliados é possível projetar a dinâmica do desenvolvimento inicial, em termos do NFA e DDI, (Ferreira *et al.*, 2019;

Fagundes *et al.*, 2024a; Martins *et al.*, 2023b; Reis *et al.*, 2021), e obter informações valiosas sobre as respostas aos aumentos projetados de temperatura. Por sua vez, tais informações possibilitam delinear medidas adaptativas mais seguras para lidar com os aumentos de temperatura no clima futuro.

Várias espécies florestais nativas são vulneráveis e sofrem pressões antrópicas com exploração insustentável e declínio populacional. Entre elas, cinco merecem destaque: *Bauhinia forficata* Link (Fabaceae; bauínia, pata-de-vaca), *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae; paineira, árvore-de-paina), *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. Ex DC.) Mattos (Bignoniaceae; ipê-amarelo-cascudo, ipê-dourado), *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC.) Mattos (Bignoniaceae; ipê-roxo-de-bola, pau-d'arco-roxo) e *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith (Bignoniaceae; ipê-branco, ipê-do-cerrado). Tais espécies possuem usos-múltiplos e importância ecológica, ambiental, e econômica reconhecidas pela população e comunidade científica (Carvalho, 2003, 2006; Vieira *et al.*, 2018).

Apesar de modelos de desenvolvimento, como FIL e WE, gerarem informações úteis para o planejamento e gestão resiliente ao clima, nenhum estudo desta natureza foi realizado para as cinco espécies nativas acima mencionadas. Neste contexto, três questões práticas permanecem sem respostas: I) Os modelos FIL e WE são capazes de gerar valores confiáveis de desenvolvimento, em termos do NFA e DDI, para as condições de clima atual? II) como os aumentos projetados de temperatura do ar dos modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 podem influenciar o NFA e a DDI das cinco espécies florestais nativas em relação ao clima atual? III) Se o desenvolvimento e a DDI forem afetados, quais as medidas de adaptação mais efetivas?

Este estudo tem como objetivo responder essas questões através da avaliação da capacidade dos dois modelos FIL e WE em estimar o NFA e a DDI das cinco espécies em condições experimentais e identificar as respostas do desenvolvimento nas condições do clima atual (1995-2014) e futuro (2041-2100), considerando as projeções de temperatura do ar de múltiplos modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foram realizadas duas etapas: I) calibração e avaliação da performance dos modelos FIL e WE em descrever o desenvolvimento inicial para as espécies florestais *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*, (descritas nos itens 4.2.1 e 4.2.2), e II) identificar as respostas do desenvolvimento dessas espécies no clima futuro, considerando as projeções de temperatura do ar de múltiplos modelos climáticos do NEX-

GDDP-CMIP6 (descrita no item 4.2.3).

4.2.1. Dados e descrição dos modelos de desenvolvimento

Os dados de desenvolvimento inicial utilizados na etapa I referem-se ao número de folhas emitidas (NF) e acumuladas (NFA) no caule principal, medidos desde a data de emergência (EM) até o término do desenvolvimento inicial (n), e a duração do desenvolvimento inicial (DDI, em dias). Os dados foram provenientes de experimentos conduzidos a céu aberto na área experimental da Universidade Federal de Itajubá em 14 datas de semeadura (DS), instaladas em intervalos de ~30 dias (Tabela 4.1). O protocolo experimental usado para a coleta dos dados de NF está detalhado no item 2.2.1 (capítulo II).

Tabela 4.1 - Data de semeadura, emergência e término do desenvolvimento inicial das espécies florestais *Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba* do experimento realizado em Itajubá.

Data de semeadura (DS)	<i>Bauhinia forficata</i>		<i>Ceiba speciosa</i>		<i>Handroanthus chrysotrichus</i>		<i>Handroanthus impetiginosus</i>		<i>Tabebuia roseoalba</i>	
	EM ¹	n ²	EM	n	EM	n	EM	n	EM	n
DS1 14 jun. 2022	08 jul. 2022	02 dez. 2022	29 jun. 2022	02 dez. 2022	15 jul. 2022	02 dez. 2022	18 jul. 2022	02 dez. 2022	12 jul. 2022	02 dez. 2022
DS2 15 jul. 2022	05 ago. 2022	26 jan. 2023	29 jul. 2022	04 jan. 2023	22 ago. 2022	21 dez. 2022	01 ago. 2022	19 jan. 2023	10 ago. 2022	19 jan. 2023
DS3 16 ago. 2022	02 set. 2022	22 fev. 2023	02 set. 2022	12 jan. 2023	23 set. 2022	02 fev. 2023	09 set. 2022	02 fev. 2023	16 set. 2022	15 fev. 2023
DS4 16 set. 2022	17 out. 2022	22 fev. 2023	07 out. 2022	15 fev. 2023	21 out. 2022	08 fev. 2023	10 out. 2022	01 mar. 2023	18 out. 2022	22 fev. 2023
DS5 17 out. 2022	01 nov. 2022	31 mar. 2023	27 out. 2022	15 mar. 2023	07 nov. 2022	01 mar. 2023	01 nov. 2022	15 mar. 2023	7 nov. 2022	22 mar. 2023
DS6 14 nov. 2022	24 nov. 2022	3 mai. 2023	28 nov. 2022	07 jun. 2023	05 dez. 2022	12 abr. 2023	28 nov. 2022	02 jun. 2023	05 dez. 2022	03 mai. 2023
DS7 16 dez. 2022	26 dez. 2022	26 mai. 2023	23 dez. 2022	30 jun. 2023	02 jan. 2023	10 mai. 2023	23 dez. 2022	07 jun. 2023	28 dez. 2022	26 mai. 2023
DS8 17 jan. 2023	30 jan. 2023	04 ago. 2023	27 jan. 2023	15 set. 2023	06 fev. 2023	04 ago. 2023	01 fev. 2023	18 ago. 2023	08 fev. 2023	25 ago. 2023
DS9 15 fev. 2023	27 fev. 2023	08 set. 2023	22 fev. 2023	01 set. 2023	01 mar. 2023	18 ago. 2023	01 mar. 2023	25 ago. 2023	01 mar. 2023	08 set. 2023
DS10 15 mar. 2023	22 mar. 2023	29 set. 2023	22 mar. 2023	13 out. 2023	12 abr. 2023	01 set. 2023	31 mar. 2023	15 set. 2023	06 abr. 2023	29 set. 2023
DS11 17 abr. 2023	05 mai. 2023	17 nov. 2023	28 abr. 2023	17 nov. 2023	02 mai. 2023	03 nov. 2023	05 mai. 2023	10 nov. 2023	10 mai. 2023	10 nov. 2023
DS12 16 mai. 2023	05 jun. 2023	17 nov. 2023	02 jun. 2023	10 nov. 2023	07 jun. 2023	10 nov. 2023	23 jun. 2023	17 nov. 2023	12 jun. 2023	24 nov. 2023
DS13 19 jun. 2023	07 jul. 2023	05 jan. 2024	07 jul. 2023	15 dez. 2023	07 ago. 2023	12 jan. 2024	28 jul. 2023	12 jan. 2024	04 ago. 2023	19 jan. 2024
DS14 13 jul. 2023	04 ago. 2023	26 jan. 2024	04 ago. 2023	08 dez. 2023	14 ago. 2023	01 dez. 2023	18 ago. 2023	12 jan. 2024	21 ago. 2023	26 jan. 2024

¹EM = data de emergência, considerada quando as sementes atingiram a porcentagem mínima de emergência definida nos testes preliminares (ver tabela 2.1, Capítulo

II). ²n = data do término do desenvolvimento inicial, considerada quando as espécies florestais atingiram a média de 10 folhas no caule principal.

Em ambos modelos (FIL e WE), o desenvolvimento inicial foi estimado em três etapas, seguindo a metodologia descrita em Fagundes *et al.*, 2021; Fagundes *et al.*, 2024a e Martins *et al.*, 2023b: I) cálculo do NF diário, obtido pela soma dos valores diários de TAF desde a data de emergência (EM) até a data do término do desenvolvimento inicial (n) (Tabela 4.1); II) cálculo do NFA, obtido pelo acúmulo dos valores de NF, e determinação da data em que NFA = 10 folhas; e III) obtenção do DDI, dado pela duração, em dias, entre EM e n. O valor de NFA = 10 refere-se à fase final do desenvolvimento da plântula, definido em experimentos preliminares.

No modelo FIL, a TAF é dada por (adaptado de Martins *et al.*, 2014):

$$TAF_{FIL} = a \cdot STd \quad (4.1)$$

em que: TAF_{FIL} = taxa diária de aparecimento de folhas pelo modelo FIL (folhas dia⁻¹); a = coeficiente angular da regressão linear entre TAF e STd (folhas °C dia⁻¹) que é específica de cada espécie e representa a taxa média de desenvolvimento; STd = soma térmica diária (°C dia), calculada por (Arnold, 1960; Streck *et al.*, 2011):

$$Std = \begin{cases} 0, & \text{se } Tmed < Tb \text{ ou } Tmed > Tb \\ (Tmed - Tb), & \text{se } Tb \leq Tmed \leq TB \\ \frac{(Tot - Tb) \cdot (TB - Tmed)}{(TB - Tot)}, & \text{se } Tot < Tmed \leq TB \end{cases} \quad (4.2)$$

em que: Tmed = temperatura média do ar diária, obtida a partir da estação meteorológica automática instalada na área experimental; Tb, Tot e TB = limiares térmicos do desenvolvimento inicial (temperatura base, ótima e superior, respectivamente) obtidos no capítulo III. Os limiares térmicos para *B. forficata* são Tb = 10,6 °C, Tot = 21,5 °C e TB = 43,9 °C; para *C. speciosa* Tb = 12,0 °C, Tot = 21,0 °C e TB = 42,8 °C, para *H. chrysotrichus* Tb = 11,4 °C, Tot = 20,3 °C e TB = 41,9 °C, para *H. impetiginosus* Tb = 12,6 °C, Tot = 21,1 °C e TB = 42,6 °C e para *T. roseoalba* Tb = 12,2°C, Tot = 21,2°C e TB = 43,4 °C .

No modelo WE, a TAF é obtida por (Wang; Engel, 1998):

$$TAF_{WE} = TAF_{max} \cdot f(T) \quad (4.3)$$

em que: TAF_{WE} = taxa diária de aparecimento de folhas pelo modelo WE (folhas dia⁻¹); TAF_{max} = taxa máxima diária de aparecimento de folhas (folhas dia⁻¹), específica para cada espécie; $f(T)$ = função beta de temperatura (de 0 a 1) dada por (Wang; Engel, 1998):

$$f(T) = \begin{cases} 0, & \text{se } Tmed < Tb \text{ ou } Tmed > Tb \\ \frac{[2(Tmed - Tb)^\alpha \cdot (Tot - Tb)^\alpha - (Tmed - Tb)^{2\alpha}]}{(Tot - Tb)^{2\alpha}}, & \text{se } Tb \leq Tmed \leq TB \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\ln \left[\frac{(TB - Tb)}{(Tot - Tb)} \right]} \quad (4.5)$$

em que: Tmed = temperatura média diária do ar (°C); Tb, Tot e TB são os limiares térmicos de cada espécie (°C) informados anteriormente; α = é o coeficiente da $f(T)$.

A representação das funções de temperatura de ambos modelos (STd e $f(T)$) estão demonstradas na Figura 4.1.

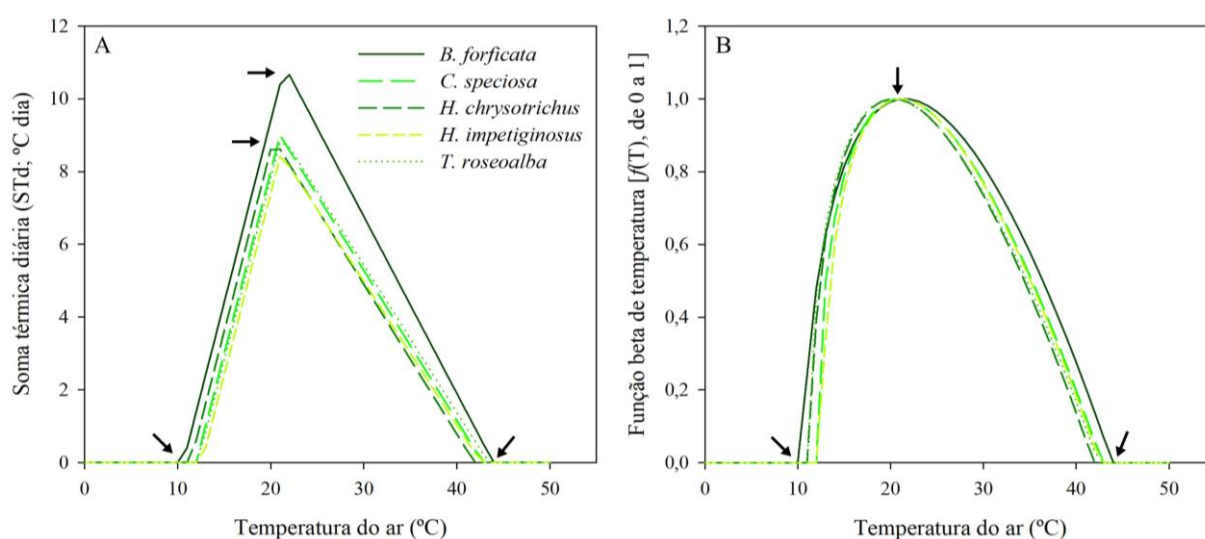


Figura 4.1 - Funções de resposta à temperatura usadas no modelo do filocrono (A), dada pela soma térmica, e no modelo de Wang e Engel (B), dada pela função beta, para estimar o número de folhas acumuladas no caule principal. As setas informadas em cada painel representam os limiares térmicos de desenvolvimento inicial

4.2.2 Calibração e avaliação do desempenho dos modelos FIL e WE

Os coeficientes ‘ a ’ (modelo FIL) e TAFmax (modelo WE) foram calibrados usando dados de NFA das DS1 a DS6, seguindo os procedimentos descritos por Fagundes *et al.* (2024a), Martins *et al.* (2022) e Martins *et al.* (2023b). O ‘ a ’ foi calibrado a partir de uma série de regressões lineares entre NFA e STd acumulada, ajustadas para cada DS e espécie florestal. O coeficiente ‘ a ’ de cada espécie foi obtido pela média aritmética dos coeficientes angulares dessas regressões (Ferreira *et al.*, 2019; Martins; Streck, 2007).

O coeficiente TAFmax foi calibrado a partir de uma série de regressões não lineares entre o NFA e a $f(T)$ acumulada, ajustadas para cada DS e espécie florestal. O valor de TAFmax foi obtido da regressão que gerou o menor valor de quadrado médio do erro (QME) (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2023a).

O desempenho de ambos modelos foi avaliado usando dados de NFA das DS7 a DS14, (DSs independentes do processo de calibração) em duas etapas: I) comparação entre o NFA observado e estimado pelos dois modelos e II) comparação entre a DDI observada e estimada pelos dois modelos (Martins *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2023b).

As estatísticas utilizadas na etapa I foram: raiz do quadrado médio do erro (RQME), erro médio (BIAS), índice de desempenho (índice-c), teste de Bartlett e de Tukey, ambos a $p = 0,05$. Os valores de RQME, BIAS e índice-c foram obtidos por (Camargo; Sentelhas, 1997; Snedecor; Cochran, 1989; Tukey, 1977):

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_i - O_i)^2}{nd}} \quad (4.6)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{nd} E_i - \sum_{i=1}^{nd} O_i}{\sum_{i=1}^{nd} O_i} \quad (4.7)$$

$$\text{Índice-c} = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O}_i) \cdot (E_i - \bar{E}_i)}{[\{\sum (O_i - \bar{O}_i)^2\} \cdot \{\sum (E_i - \bar{E}_i)^2\}]^{0,5}} \right] \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{\sum (|E_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \right] \right\} \quad (4.8)$$

em que: E_i = valores de NFA estimados pelos modelos FIL e WE; $\bar{E}$ = média dos valores de NFA estimados pelos modelos FIL e WE; O_i = valores de NFA observados no experimento; $\bar{O}_i$ = média dos valores observados de NFA; nd = número de dados.

A interpretação do desempenho do índice-c é dada por (Camargo; Sentelhas, 1997): $> 0,85$: excelente; $0,76 < c < 0,85$: muito bom; $0,66 < c < 0,75$ bom; $0,61 < c < 0,65$: razoável; $0,51 < c < 0,60$: ruim; $0,41 < c < 0,50$: muito ruim e $c \leq 0,40$: extremamente ruim.

O teste Bartlett foi usado para testar a homogeneidade da variância entre os valores de NFA observados e estimados por ambos os modelos. As hipóteses testadas foram: H_0 = variâncias homogêneas ($p \geq 0,05$) versus H_1 = variâncias heterogêneas ($p < 0,05$), por (Snedecor; Cochran, 1989):

$$B = \frac{(\sum v_i) \ln \left(\frac{\sum v_i \cdot S_i^2}{\sum v_i} \right) - \sum v_i \ln S_i^2}{1 + \left\{ \sum \left(\frac{1}{v_i} \right) - 1 \right\} / \{3(k - 1)\}} \quad (4.9)$$

em que: B = valor do teste de Bartlett; $v_i = nd - 1$ e nd = número de dados; S_i^2 = variância entre NFA observado e estimado para cada modelo e espécie; $K = 2$ que se refere aos dados pareados de NFA observado e estimado.

O teste Tukey foi usado para testar as médias entre os valores de NFA observados e estimados por ambos modelos. Foram testadas as hipóteses: H_0 = média dos valores de NFA

observado não difere da média de NFA estimado (para cada modelo e espécie) ($p \geq 0,05$) versus H_1 = média dos valores de NFA observado diferem da média do NFA estimado ($p < 0,05$), considerando (Tukey, 1977):

$$\Delta = q \sqrt{\frac{QME}{nd}} \quad (4.10)$$

em que: Δ = valor do teste Tukey; q = (2 modelos), QME = obtido pela soma dos quadrados das diferenças entre os valores de NFA observado e estimado, dividido pelo número total de dados; nd = número de dados.

Na etapa II foram usados os testes de RQME, BIAS e Tukey aplicados nos valores de DDI observados e estimados pelos modelos FIL e WE. O modelo de desenvolvimento que apresentou melhor estimativa de NFA, dado pelo menor valor de RQME e BIAS, maior valor de índice-c, variância homogênea ($p \geq 0,05$) e médias iguais ($p \geq 0,05$), e melhor estimativa da DDI, foi considerado o melhor modelo para descrever o desenvolvimento inicial de cada espécie (Fagundes *et al.*, 2024a).

4.2.3. Identificação dos impactos das projeções de temperatura do ar na duração do desenvolvimento inicial

A DDI foi simulada para o clima atual (CA, 1995-2014) e projetada para três períodos futuros - próximo (FP, 2041-2060), intermediário (FI, 2061-2080) e distante (FD, 2081-2100) em três SSPs: SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5, considerando o modelo que melhor descreveu o desenvolvimento inicial nas condições experimentais. As simulações e projeções foram realizadas para cada espécie e DSs (Tabela 4.1), contabilizando a DDI pelo somatório de dias desde a EM até NFA = 10 folhas (Fagundes *et al.*, 2024a; Martins *et al.*, 2022).

Dados diários de Tmed de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 (Anexo 4.1) foram extraídos para o ponto de grade mais próximo de Itajubá (22°25,5'S e 45°27'W) e inseridos nas funções de temperatura dos modelos FIL (ST_d) ou WE ($f(T)$). Os dados do NEX-GDDP-CMIP6 são fornecidos pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center* e disponibilizado por meio do portal *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS) (Thrasher *et al.*, 2022) em <<https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp>> e possuem resolução horizontal de 0,25° (latitude/longitude), adequada para estudos de escala reduzida. Os modelos climáticos foram escolhidos com base no excelente desempenho em simular a Tmed para o local de estudo (Dias *et al.*, 2024; Ribeiro *et al.*, 2024). As projeções (FP, FI e FD) foram realizadas usando três SSPs: I) SSP2-4.5, que representa um futuro com

desafios intermediários para mitigação e adaptação, com uma forçante radiativa de 4,5 W m⁻² até 2100; II) SSP3-7.0, que apresenta grandes desafios para mitigação e adaptação, com um forçamento radiativo de 7,0 W m⁻² até 2100 e; III) SSP5-8.5, que apresenta grandes desafios de mitigação combinados com baixos desafios de adaptação e forçamento radiativo de 8,5 W m⁻² até 2100 (O'Neill *et al.*, 2017). Todas as simulações (CA) e projeções (FP, FI e FD) de DDI foram realizadas para cada modelo climático e SSP; e posteriormente foi obtida a média global de DDI (chamada neste texto de *ensemble mean*).

Os dados de Tmed dos modelos climáticos foram validados para o CA (1995-2014) pela comparação com os dados disponibilizados por Xavier *et al.* (2016) (https://www.dropbox.com/sh/kz57win77tbecu9/AADF5eV_JbJwy4hq5vXytKSPa?dl=0), extraídos para o ponto de grade mais próximo a Itajubá, com resolução de 0,25° (latitude/longitude). Este procedimento foi realizado para avaliar a confiabilidade dos 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 em simular a Tmed, e consequentemente a DDI das espécies. Na validação foram utilizadas as estatísticas RQME e correlação de Pearson (r) (Dias *et al.*, 2024; Snedecor; Cochran, 1989):

$$RQME = \left[\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{nd} \right]^{0,5} \quad (4.11)$$

$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E}) \cdot (O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum (E_i - \bar{E})^2 - \sum (O_i - \bar{O})^2)}} \quad (4.12)$$

em que: E_i = valores diários de Tmed simulados para cada modelo climático do NEX-GDDP-CMIP6; O_i = valores diários de Tmed do banco de dados disponibilizado por Xavier *et al.* (2016), ambos para o período de 1995-2014; nd = número de dados; $\bar{E}$ e $\bar{O}$ = média dos valores de E_i e O_i, respectivamente. As estatísticas foram realizadas para cada modelo climático e para a média do conjunto de modelos (*ensemble mean*).

Para identificar o impacto das projeções de Tmed no desenvolvimento, os dados de DDI de cada espécie foram submetidos a análise de variância (ANOVA) em esquema trifatorial, considerando 4 períodos (CA, FP, FI e FD), 3 cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) e 14 datas de semeadura (Tabela 4.1). Por fim, os valores médios de DDI foram comparados pelo teste de Scott-Knott (p = 0,05), conforme recomendação de Fagundes *et al.* (2021), Florêncio *et al.* (2019), Reis *et al.* (2021) e Martins *et al.* (2023). A ANOVA e o teste de Scott-Knott foram realizados considerando o valor médio da DDI (*ensemble mean*) obtido

dos 16 MCGs em cada SSP.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto de dados de NFA usados para calibrar (DS1 a DS6) e avaliar (DS7 A DS14) ambos modelos foram conduzidos em DSs com ampla variação das condições meteorológicas, especialmente da temperatura do ar (Figura 3.3, Capítulo III). De forma geral, a temperatura durante as condições experimentais variou de 3,4 (mínimo absoluta) a 38,1 °C (máximo absoluta), a precipitação acumulada variou de 124,8 a 1635,4 mm DS⁻¹, a radiação solar global variou entre 1,8 (valor mínimo) a 34,9 MJ m⁻² dia⁻¹ (valor máximo) e o fotoperíodo variou de 11,6 (valor mínimo) a 14,3 horas (valor máximo). Tais valores são coerentes com as médias climatológicas de temperatura mensal, precipitação e radiação solar global para Itajubá (Alves *et al.*, 2020) (Figura 2.2, Capítulo II). Essas variações entre as DSs são requisitos importantes, pois geram conjuntos de dados de NFA robustos para calibrar e avaliar os modelos de desenvolvimento inicial (Fagundes *et al.*, 2024a; Ferreira *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2022).

4.3.1 Calibração e avaliação do desempenho dos modelos de desenvolvimento inicial

Os coeficientes ‘a’ (FIL) e TAFmax (WE) calibrados variaram entre as espécies florestais estudadas (Tabela 4.2), e foram significativos ($p \leq 0,05$). Ambos os coeficientes informam o tempo térmico do desenvolvimento inicial. Ou seja, quanto menor (maior) forem os valores de ‘a’ e TAFmax, mais lenta (rápida) será a taxa de emissão de folhas, resultando em um desenvolvimento inicial (DDI, em dias) mais tardio (precoce) (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2022).

Tabela 4.2 - Coeficientes ‘a’ (modelo filocrono) e TAFmax (modelo Wang e Engel) calibrados para as cinco espécies florestais nativas, em Itajubá.

Espécie florestal	a (folhas °C dia ⁻¹)	TAFmax (folhas dia ⁻¹)
<i>Bauhinia forficata</i>	0,005569	0,0597
<i>Ceiba speciosa</i>	0,008288	0,0811
<i>Handroanthus chrysotrichus</i>	0,008688	0,0953
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	0,006819	0,0767
<i>Tabebuia roseoalba</i>	0,006980	0,0716

Por exemplo, no modelo FIL, o significado biológico do coeficiente ‘a’ é dado pelo inverso de ‘a’, que representa o requerimento térmico necessário para a emissão de uma folha (°C dia folha⁻¹) (Martins *et al.*, 2023b; Martins; Streck, 2007). Assim, as espécies florestais necessitam acumular ~ 115,1 °C dia (*H. chrysotrichus*), 120,6 °C dia (*C. speciosa*), 143,2 °C

dia (*T. roseoalba*), 146,6 °C dia (*H. impetiginosus*) e 179,5 °C dia (*B. forficata*) para emitir uma folha. Por essa abordagem, o acúmulo térmico necessário para finalizar o desenvolvimento inicial (NFA =10 folhas) é de ~ 1.151 °C dia para *H. chrysotrichus* até 1.795 °C dia para a *B. forficata*. Este acúmulo térmico foi próximo aos valores obtidos nas condições experimentais da DS13 (~1.155 °C dia) para *H. chrysotrichus* e das DS11 (~1.683 °C dia) e DS13 (~1.685 °C dia) para *B. forficata*. Entretanto, para *H. impetiginosus*, as DS11 (~1.216 °C dia) e DS13 (~1.197 °C dia) apresentaram tempo térmico menor que no obtido pela abordagem do filocrono (~1.466 °C dia), enquanto, a DS11 (~1.422 °C dia) para *C. speciosa* apresentou tempo térmico maior que da abordagem do filocrono (~1.206 °C dia).

Com relação ao modelo WE, o coeficiente TAFmax indica a taxa máxima de emissão de folha em 1 dia, que ocorre quando a Tmed é mais próxima à Tot de desenvolvimento (Martins *et al.*, 2022; Streck *et al.*, 2011). Em outras palavras, quanto maior TAFmax mais rápida a espécie se desenvolve e atinge o término de desenvolvimento inicial, e, portanto, menor é a DDI. Assim, por essa abordagem, a DDI estimada variou de ~ 104 dias (*H. chrysotrichus*) a 168 dias (*B. forficata*). De maneira geral, as DDI encontradas usando a TAFmax são próximas aquelas observadas nas DSs onde há maior frequência de Tmed próxima a Tot. Por exemplo, para *T. roseoalba*, a DDI simulada = 140 dias foi similar a DDI observada nas DS3, DS5, DS6 e DS7 (Apêndice 3.5), onde foram observadas maiores frequências de dias (~70%) com Tmed próxima a Tot (21,2°C) (Apêndice 3.10). Do contrário, as DDI estimadas foram diferentes das observadas nas DSs onde há maior frequência de Tmed próximo a Tb ou TB. Como exemplo, para *H. impetiginosus*, a DDI estimada de 131 dias difere da DDI observada nas DS8 (191 dias) DS9 (159 dias), DS10 (165 dias) e DS11 (185 dias), que apresentaram maior frequência de Tmed próximo a Tb (12,6 °C) ou TB (42,6°C) (Apêndice 3.9) (~46 casos = 26% e ~19 casos = 12%, respectivamente).

Ambos os modelos estimaram com precisão o NFA para as cinco espécies estudadas em praticamente todas as DS, com baixos valores de RQME (0,35 folhas a 5,2 folhas) e BIAS (-0,45 a 0,78) e moderado a alto valor de índice-c (0,61 a 0,99) (Tabela 4.3). Além disso, exceto na DS8 de *C. speciosa* e DS11 de *H. chrysotrichus* os dois modelos não violaram simultaneamente os pressupostos de homogeneidade e normalidade. Tais respostas são desejáveis ao escolher o modelo de desenvolvimento mais adequado (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2022; Martins; Streck, 2007).

Tabela 4.3 - Desempenho dos modelos Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) em estimar o número de folhas acumuladas (NFA) para as cinco espécies florestais nativas em Itajubá.

Data de semeadura	Modelo	RQME (folhas)	BIAS	Índice-c ¹ (adimensional)	Bartlett ²	NFA observado	NFA estimado ³
Bauhinia forficata							
DS7	FIL	2,03	-0,31	0,82	0,91 ^{ns}	6,35	4,35 ^{ns}
	WE	1,64	-0,25	0,88	0,75 ^{ns}		4,78 ^{ns}
DS 8	FIL	1,93	-0,27	0,84	0,32 ^{ns}	6,62	4,82 [*]
	WE	1,56	-0,17	0,89	0,08 ^{ns}		5,47 [*]
DS 9	FIL	1,51	-0,20	0,87	0,13 ^{ns}	6,31	5,04 ^{ns}
	WE	1,38	-0,08	0,89	0,02 [*]		5,78 ^{ns}
DS 10	FIL	1,54	-0,22	0,87	0,33 ^{ns}	6,22	4,83 [*]
	WE	1,29	-0,10	0,90	0,07 ^{ns}		5,61 ^{ns}
DS 11	FIL	1,00	-0,12	0,93	0,32 ^{ns}	5,25	4,61 ^{ns}
	WE	1,16	0,06	0,93	0,08 ^{ns}		5,56 ^{ns}
DS 12	FIL	1,75	-0,31	0,89	0,68 ^{ns}	5,60	3,88 [*]
	WE	0,99	-0,17	0,96	0,85 ^{ns}		4,65 ^{ns}
DS 13	FIL	0,73	-0,12	0,98	0,88 ^{ns}	5,54	4,86 ^{ns}
	WE	0,49	-0,01	0,99	0,49 ^{ns}		5,47 ^{ns}
DS 14	FIL	1,05	-0,17	0,96	0,92 ^{ns}	5,88	4,84 ^{ns}
	WE	0,61	-0,09	0,98	0,65 ^{ns}		5,37 ^{ns}
Média global	FIL	1,44	-0,22	0,89	0,56 ^{ns}	5,97	4,65 [*]
	WE	1,14	-0,10	0,93	0,37 ^{ns}		5,34 [*]
Ceiba speciosa							
DS7	FIL	1,31	0,40	0,94	0,10 ^{ns}	5,56	6,27 ^{ns}
	WE	2,92	0,78	0,82	0,01 [*]		7,76 ^{ns}
DS 8	FIL	2,81	0,40	0,76	0,00 [*]	5,17	7,21 ^{ns}
	WE	5,02	0,78	0,61	0,00 [*]		9,18 [*]
DS 9	FIL	0,58	0,00	0,98	0,66 ^{ns}	6,01	5,99 ^{ns}
	WE	2,10	0,27	0,90	0,07 ^{ns}		7,64 ^{ns}
DS 10	FIL	1,87	0,30	0,87	0,09 ^{ns}	4,82	6,27 ^{ns}
	WE	3,88	0,67	0,71	0,00 [*]		8,06 [*]
DS 11	FIL	1,55	0,24	0,92	0,11 ^{ns}	4,73	5,87 ^{ns}
	WE	3,62	0,64	0,76	0,00 [*]		7,74 [*]
DS 12	FIL	0,58	-0,09	0,98	0,82 ^{ns}	5,03	4,60 ^{ns}
	WE	1,45	0,22	0,94	0,20 ^{ns}		6,12 ^{ns}
DS 13	FIL	0,44	0,01	0,98	0,99 ^{ns}	5,19	5,25 ^{ns}
	WE	1,61	0,26	0,93	0,32 ^{ns}		6,56 ^{ns}
DS 14	FIL	1,26	-0,20	0,93	0,42 ^{ns}	5,48	4,36 ^{ns}
	WE	0,35	-0,03	0,99	0,93 ^{ns}		5,05 ^{ns}

... continuação

Média global	FIL	1,30	0,13	0,92	0,40 ^{ns}	5,25	5,73 ^{ns}
	WE	2,62	0,45	0,83	0,19 ^{ns}		7,26*
<i>Handroanthus chrysotrichus</i>							
DS7	FIL	1,33	-0,20	0,96	0,58 ^{ns}	5,68	4,55 ^{ns}
	WE	1,25	0,15	0,92	0,37 ^{ns}		6,53 ^{ns}
DS 8	FIL	1,64	-0,15	0,87	0,07 ^{ns}	7,07	5,98 ^{ns}
	WE	3,08	0,23	0,76	0,00*		8,68 ^{ns}
DS 9	FIL	1,60	-0,17	0,88	0,10 ^{ns}	6,84	5,64*
	WE	2,70	0,19	0,80	0,00*		8,14 ^{ns}
DS 10	FIL	1,44	-0,23	0,91	0,78 ^{ns}	6,10	4,68 ^{ns}
	WE	1,50	0,11	0,93	0,05 ^{ns}		6,73 ^{ns}
DS 11	FIL	1,39	0,03	0,89	0,03*	5,67	5,85 ^{ns}
	WE	4,05	0,53	0,68	0,00*		8,65 ^{ns}
DS 12	FIL	1,02	-0,08	0,92	0,36 ^{ns}	5,40	4,98 ^{ns}
	WE	2,69	0,35	0,81	0,02*		7,32 ^{ns}
DS 13	FIL	0,67	-0,06	0,97	0,46 ^{ns}	5,91	5,55 ^{ns}
	WE	2,62	0,33	0,84	0,02*		7,86 ^{ns}
DS 14	FIL	2,18	-0,36	0,79	0,45 ^{ns}	5,84	3,75*
	WE	0,89	-0,09	0,95	0,52 ^{ns}		5,30 ^{ns}
Média global	FIL	1,41	-0,15	0,90	0,35 ^{ns}	6,06	5,12*
	WE	2,35	0,22	0,84	0,12 ^{ns}		7,40 ^{ns}
<i>Handroanthus impetiginosus</i>							
DS7	FIL	2,13	-0,32	0,84	0,65 ^{ns}	6,45	4,36*
	WE	1,13	0,02	0,95	0,13 ^{ns}		6,56 ^{ns}
DS 8	FIL	2,10	-0,29	0,79	0,31 ^{ns}	6,78	4,81*
	WE	2,16	0,10	0,84	0,00*		7,48 ^{ns}
DS 9	FIL	2,89	-0,40	0,67	0,93 ^{ns}	7,10	4,25*
	WE	1,59	-0,07	0,88	0,02*		6,60 ^{ns}
DS 10	FIL	2,03	-0,34	0,78	0,91 ^{ns}	5,84	3,85*
	WE	1,35	0,03	0,91	0,03*		6,03 ^{ns}
DS 11	FIL	2,08	-0,33	0,76	0,27 ^{ns}	5,97	4,01*
	WE	2,08	0,10	0,84	0,00*		6,57 ^{ns}
DS 12	FIL	2,20	-0,37	0,81	0,23 ^{ns}	5,70	3,59*
	WE	0,42	-0,01	0,99	0,57 ^{ns}		5,64 ^{ns}
DS 13	FIL	1,59	-0,26	0,84	0,59 ^{ns}	5,85	4,34*
	WE	1,78	0,12	0,86	0,01*		6,55 ^{ns}
DS 14	FIL	3,18	-0,45	0,68	0,57 ^{ns}	6,92	3,77*
	WE	1,49	-0,17	0,91	0,18 ^{ns}		5,76 ^{ns}
Média global	FIL	2,27	-0,34	0,77	0,56 ^{ns}	6,32	4,12*
	WE	1,50	0,02	0,90	0,12 ^{ns}		6,40 ^{ns}

... continuação

<i>Tabebuia roseoalba</i>							
DS7	FIL	1,51	-0,25	0,90	0,65 ^{ns}	5,78	4,33 ^{ns}
	WE	0,65	-0,04	0,97	0,50 ^{ns}		5,54 ^{ns}
DS 8	FIL	1,12	-0,13	0,92	0,24 ^{ns}	6,04	5,26 ^{ns}
	WE	1,97	0,16	0,86	0,01*		7,03 ^{ns}
DS 9	FIL	1,24	-0,18	0,92	0,28 ^{ns}	6,07	5,00 ^{ns}
	WE	1,67	0,10	0,89	0,01*		6,70 ^{ns}
DS 10	FIL	1,46	-0,24	0,88	0,50 ^{ns}	5,73	4,38*
	WE	1,39	0,05	0,91	0,02*		5,99 ^{ns}
DS 11	FIL	1,27	-0,19	0,89	0,43 ^{ns}	5,27	4,26*
	WE	1,73	0,16	0,87	0,03*		6,12 ^{ns}
DS 12	FIL	1,38	-0,23	0,90	0,97 ^{ns}	5,39	4,13*
	WE	1,04	0,06	0,94	0,20 ^{ns}		5,70 ^{ns}
DS 13	FIL	1,12	-0,17	0,93	0,87 ^{ns}	5,96	4,96 ^{ns}
	WE	1,03	0,08	0,95	0,16 ^{ns}		6,40 ^{ns}
DS 14	FIL	2,01	-0,31	0,86	0,95 ^{ns}	6,32	4,37*
	WE	1,07	-0,10	0,96	0,19 ^{ns}		5,70 ^{ns}
Média global	FIL	1,39	-0,21	0,90	0,61 ^{ns}	5,82	4,59*
	WE	1,32	0,06	0,92	0,14 ^{ns}		6,15 ^{ns}

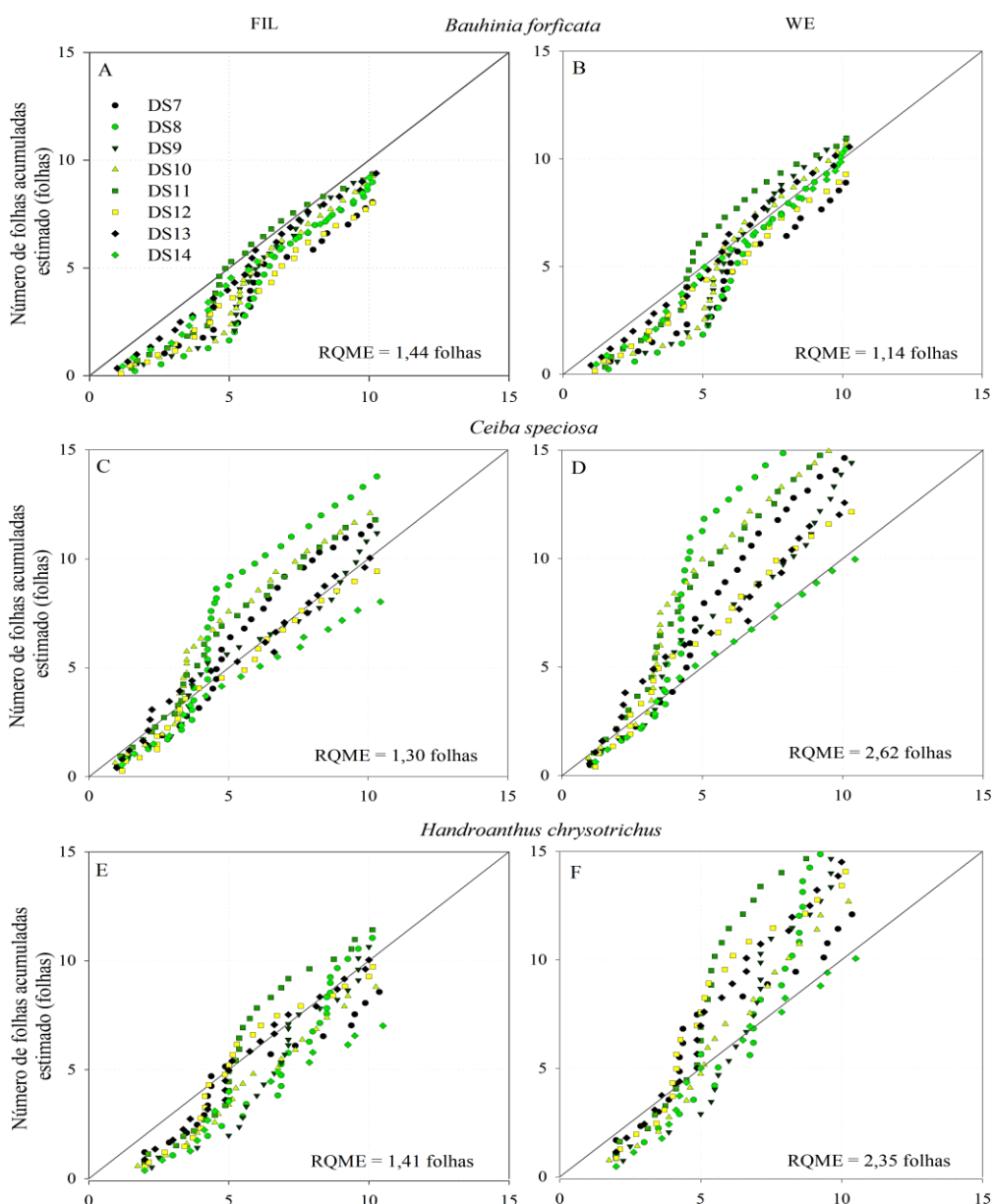
¹Critérios de classificação de desempenho para índice-c: $c \geq 0,85$: excelente; $0,76 < c < 0,85$: muito bom; $0,66 < c < 0,75$: bom; $0,61 < c < 0,65$: razoável; $0,51 < c < 0,60$: ruim; $0,41 < c < 0,50$: muito ruim e $c \leq 0,40$: extremamente ruim (Camargo; Sentelhas, 1997). ²Valor p = valor de probabilidade do teste de Bartlett que compara a variância entre o número de folhas acumuladas observado e estimado por cada modelo. A hipótese nula (ns) para o teste de Bartlett é de variâncias homogêneas ($p \geq 0,05$) e a hipótese alternativa (*) é variâncias heterogêneas ($p < 0,05$). ³Teste Tukey, que compara as médias entre o número de folhas acumulado observado e estimado por cada modelo – FIL e WE). A hipótese nula (ns) para o teste de Tukey é de médias não diferentes entre si ($p \geq 0,05$) e a hipótese alternativa (*) é de médias diferentes ($p < 0,05$).

Ao analisar o comportamento do NFA estimado e observado entre as espécies e DSs ao longo do desenvolvimento inicial (Figura 4.2) é possível notar tendência de subestimativa no FIL, principalmente nas espécies *B. forficata* (todas as DSs), *H. impetiginosus* (todas as DSs) e *T. roseoalba* (todas as DSs), e superestimativa no WE a partir de ~5 folhas, principalmente para a *C. speciosa* (exceto a DS14), *H. chrysotrichus* (exceto DS14) e *T. roseoalba* (exceto DS7 e DS14).

Embora os dois modelos tenham estimado com precisão o NFA, o WE foi ligeiramente melhor para *B. forficata*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* para a maioria das DSs, com um RQME global de ~1,14 a 1,50 folhas e maior proximidade da linha 1:1. Enquanto o FIL foi melhor para a *C. speciosa* (RQME global = 1,30 folhas) e *H. chrysotrichus* (RQME global =

1,41 folhas).

Quando se analisa a DDI (Figura 4.3), exatamente nas DS onde houve subestimativa (superestimativa) do NFA (Tabela 4.3 e Figura 4.2) houve superestimativa (subestimativa) da DDI, com magnitudes proporcionais ao RQME e BIAS. Por exemplo, para a *H. impetiginosus*, a subestimativa do NFA pelo modelo FIL em todas as DSs (Figura 4.2, painel G) gerou superestimativa na DDI entre + 41 (DS11) e +70 dias (DS12) (Figura 4.3 painéis E e F). Por outro lado, a maior superestimativa do NFA gerada pelo modelo WE foi observada para a *Ceiba speciosa* em praticamente todas DSs (exceto na DS14), gerando subestimativas na DDI entre - 21 (DS12) e -105 dias (DS8).



continua...

...continuação

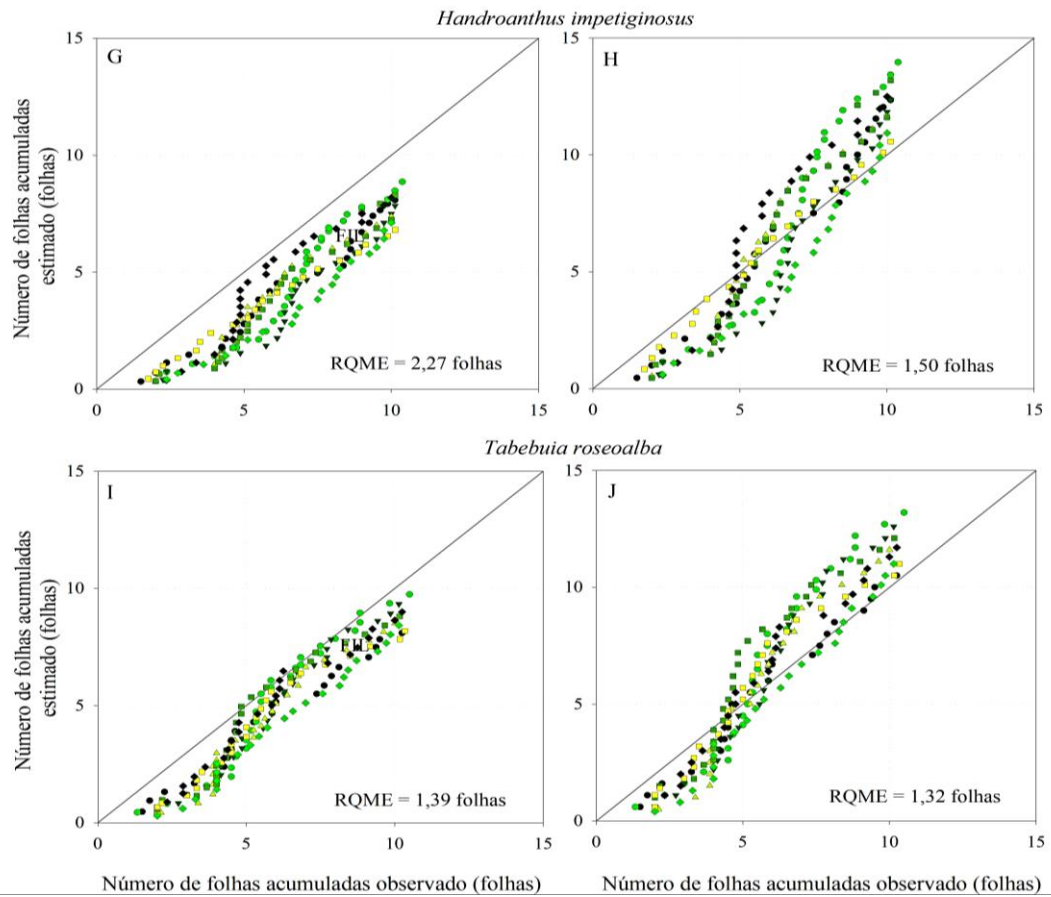


Figura 4.2 - Número de folhas acumuladas (NFA) estimado versus observado pelos modelos Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) para *Bauhinia forficata* (painéis A e B), *Ceiba speciosa* (painéis C e D), *Handroanthus chrysotrichus* (painéis E e F), *Handroanthus impetiginosus* (painéis G e H) e *Tabebuia roseoalba* (painéis I e J). A linha contínua é a linha 1:1.

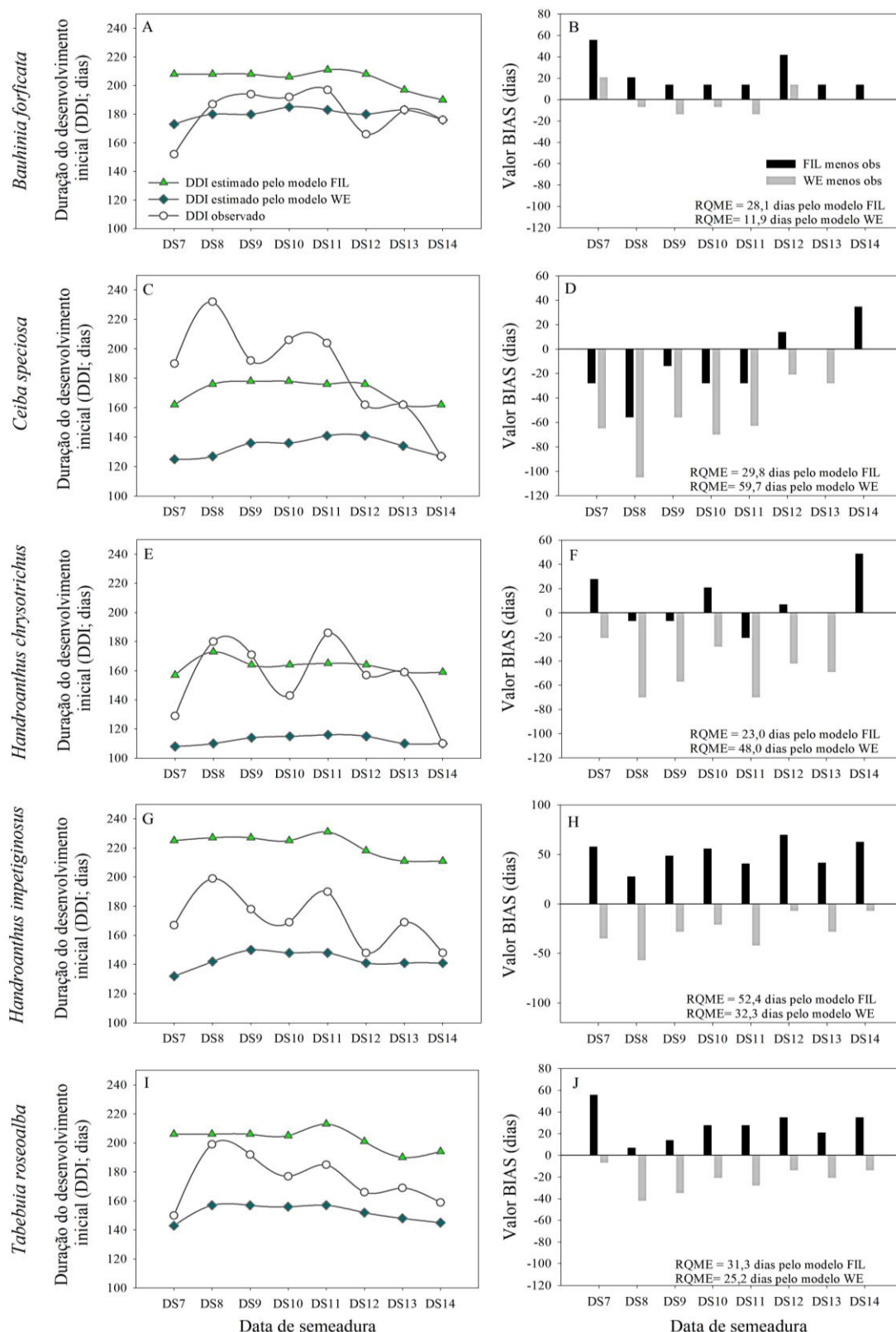


Figura 4.3 - Duração do desenvolvimento inicial (DDI, dias) das DS7 a DS14 para *Bauhinia forficata* (painéis A e B), *Ceiba speciosa* (painéis C e D), *Handroanthus chrysotrichus* (painéis E e F), *Handroanthus impetiginosus* (painéis G e H) e *Tabebuia roseoalba* (painéis I e J). O valor de BIAS foi obtido pela diferença entre a DDI estimada pelos modelos FIL e WE e a observada.

De forma geral, o desempenho na estimativa da DDI entre as espécies (e DSs) seguiu o padrão do NFA. Ou seja, o WE apresentou melhor performance para *B. forficata*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*, enquanto o FIL foi melhor para a *C. speciosa* e *H. chrysotrichus*. No entanto, o desempenho de ambos os modelos na estimativa da DDI foi pior (maior RQME) comparado ao NFA, com magnitude das subestimativas (ou superestimativas) da DDI proporcional ao erro do NFA (Tabela 4.3). Por exemplo, a maior superestimativa do NFA para a *C. speciosa* nas DS7 e DS8 gerou a maior subestimativa na DDI pelo FIL (-28 e -56 dias) e WE (-65 e -105 dias). Do contrário, a menor subestimativa do NFA na DS12 para a *H. chrysotrichus* pelo FIL gerou a menor superestimativa da DDI (+7 dias).

Erros na estimativa da DDI resultam de erros cumulativos na estimativa do NFA e são comuns em modelos de desenvolvimento de espécies florestais (Fagundes *et al.*, 2021; 2023, Martins *et al.*, 2022, 2023a). Não há definição do limite de erro aceitável na estimativa da DDI em espécies florestais (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2022; Reis *et al.*, 2021). E neste estudo, o modelo FIL gerou erros menores para *C. speciosa* (RQME = 1,30 folhas e 29,8 dias) e *H. chrysotrichus* (RQME = 1,41 folhas e 23,0 dias), e o modelo WE gerou erros menores para *B. forficata* (RQME = 1,14 folhas e 11,9 dias), *H. impetiginosus* (RQME = 1,50 folhas e 32,3 dias) e *T. roseoalba* (RQME = 1,32 folhas e 25,2 dias). Portanto, o modelo FIL foi selecionado para avaliar as respostas do desenvolvimento, em termos de DDI, no clima futuro para *C. speciosa* e *H. chrysotrichus* e o modelo WE foi selecionado para *B. forficata*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*.

4.3.2 Validação, simulação e projeções da Tmed e DDI

Os 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 e a média do conjunto (*ensemble mean*) conseguiram representar o padrão mensal e anual da Tmed no CA (Figura 4.4) ($r > 0,97$ e $RQME < 0,79$ °C), com destaque para os modelos IPSL-CM6A-LR ($r = 0,99$, $RQME = 0,56$ °C), MPI-ESM1-2-LR ($r = 0,99$, $RQME = 0,59$ °C) e NorESM2-LM ($r = 0,99$, $RQME = 0,59$ °C). Dessa forma, os dados de Tmed de cada modelo climático do NEX-GDDP-CMIP6 foram inseridos na STd (do modelo FIL) para simular (CA) e projetar (FP, FI, FD nos três SSPs) a DDI das espécies *C. speciosa* e *H. chrysotrichus*, e na $f(T)$ (do modelo WE) para *B. forficata*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*.

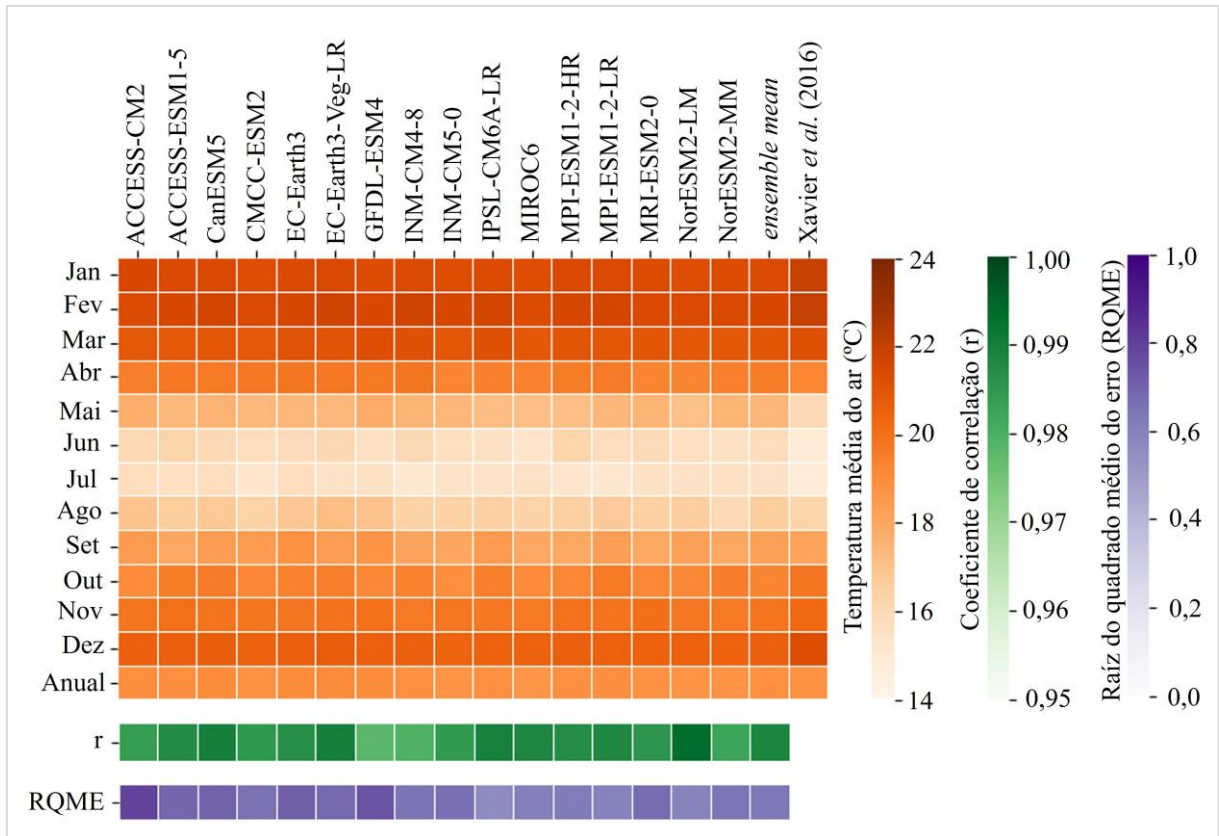


Figura 4.4 – Ciclo mensal e anual da temperatura média do ar (T_{med} , °C) simulada pelos 16 Modelos de Circulação Geral (MCGs) do conjunto de dados do NEX-GDDP-CMIP6, média do conjunto de modelos (*ensemble mean*) e dados observados disponibilizados por Xavier *et al.* (2016) para o clima atual (1995-2014).

As projeções dos modelos do NEX-GDDP-CMIP6 indicam aumento gradual e contínuo da T_{med} para Itajubá decorrerão longo do século XXI, entre $\sim +1,3$ °C no FP (e SSP2-4.5) até $+4,5$ °C (Figura 4.5). Esses resultados se alinham aos estudos realizados para Itajubá utilizando outros modelos climáticos, escalas e versões do CMIP. Como exemplo, Fagundes (2023), usando 13 modelos do NEX-GDDP-CMIP6, Fagundes *et al.* (2021), usando 8 modelos do NEX-GDDP-CMIP5 e Alves *et al.* (2020), usando um modelo climático regional (RegCM4), projetaram aumentos de $\sim 1,1$ °C (no FP e SSP2-4.5) a 5 °C (FD e RCP8.5).

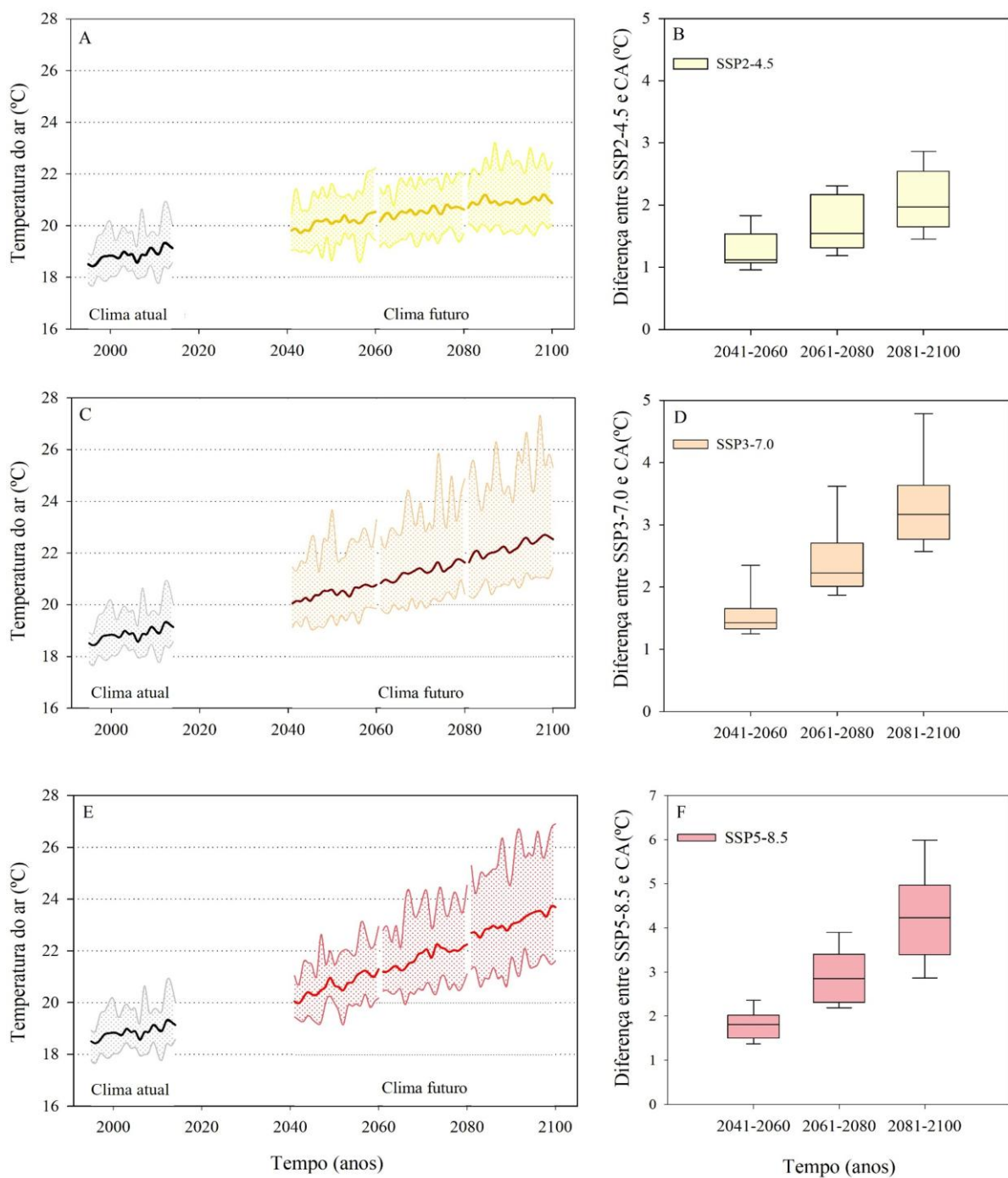


Figura 4.5 – Variação temporal da temperatura média do ar simulada para o clima atual (CA = 1995-2014) e projetada para o clima futuro (futuro próximo = 2041-2060; intermediário = 2061-2080; distante = 2081-2100) para Itajubá pelos 16 modelos climáticos em três cenários socioeconômicos: SSP2-4.5 (painel A), SSP3-7.0 (painel C) e SSP5-8.5 (painel E). As linhas em negrito (preto, laranja, marrom e vermelho) representam o *ensemble mean* dos modelos climáticos. As linhas gradiente (cinza, amarelo, laranja e vermelho) representam os dados de

cada MCG. Boxplot representa as diferenças entre os períodos futuros (FP, FI e FD) e clima atual (CA) em cada SSP (painel B - SSP2-4.5, painel D - SSP3-7.0 e painel F - SSP5-8.5).

As projeções de Tmed irão impactar nos padrões da DDI ao longo do século XXI com magnitudes de alterações distintas entre as espécies, DSs e SSPs (Figura 4.6 e Tabela 4.4). Ao analisar as projeções da DDI para cada espécie (e DS), período e SSP (Figura 4.6), três tendências distintas podem ser observadas: I) o aumento de Tmed pode acelerar a TAF, levando as plantas a emitir folhas mais rapidamente e antecipar o término do desenvolvimento inicial, com redução da DDI; II) diminuição da TAF e aumento de DDI; ou III) TAF e DDI praticamente inalterados. Além disso, as magnitudes das mudanças da DDI variam entre espécies, DS e modelos climáticos, com uma tendência majoritária da situação I, principalmente para *C. speciosa* e *H. chrysotrichus* no FD e SSP5-8.5 (Figura 4.6).

A menor variabilidade na DDI projetada pelos modelos climáticos, em termos de desvio padrão, foi observado no FP (e nas DS3 à DS7) para a *B. forficata*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*. A maior variabilidade foi observada no FD, principalmente para *C. speciosa* e *H. chrysotrichus* (nas DS2, DS3 e DS4). Essa variabilidade pode decorrer devido as limitações inerentes à previsibilidade dos modelos climáticos (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2023a). No entanto, o uso de múltiplos modelos do NEX-GDDP-CMIP6 permite uma cobertura mais ampla de resultados potenciais, reduzindo assim as incertezas nas projeções futuras da DDI (Florêncio *et al.*, 2019; Fagundes *et al.*, 2021; Reis *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2023a). Nesse sentido, a ANOVA e a comparação de médias (Tabela 4.4) foram realizadas considerando a média dos valores de DDI dos 16 modelos climáticos.

Tabela 4.4 - Comparação de médias para a duração da fase de muda (DFM, em dias) para *Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroathus chrysotrichus*, *Handroathus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*, considerando as simulações realizadas para o clima atual (CA = 1995-2014) e as projeções para o clima futuro (FP = 2041-2060, FI = 2061-2080 e FD = 2081-2100) para as 14 datas de semeadura simuladas em três cenários socioeconômicos (SSP 2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para Itajubá.

<i>Bauhinia forficata</i>													
Datas de semeadura simuladas (DS)	CA	SSP2-4.5						SSP3-7.0					
		FP		FI		FD		FP		FI		FD	
DS1	183,2 Ed	177,6 Dc2	176,7 Eb3	175,6 Da1	177,1 Eb1	176,0 Ea2	175,4 Ca1	176,7 Eb1	175,2 Ca1	176,3 Bb2			
DS2	177,2 Dc	173,6 Ca1	173,4 Da1	172,9 Ca1	173,7 Da1	173,4 Da1	174,1 Ba2	173,3 Da1	173,3 Ba1	176,0 Bb3			
DS3	173,1 Bb	171,2 Ba1	171,2 Ba1	171,4 Ba1	171,5 Ba1	172,1 Ba2	173,8 Bb2	171,4 Ba1	172,5 Bb2	176,3 Bc3			
DS4	170,2 Aa	169,7 Aa1	170,0 Aa1	170,4 Aa1	170,2 Aa1	171,2 Ab2	173,2 Ac2	170,1 Aa1	171,9 Ab3	175,8 Bc3			
DS5	169,9 Aa	169,6 Aa1	169,8 Aa1	170,2 Aa1	169,9 Aa1	171,0 Ab2	172,9 Ac2	170,0 Aa1	171,7 Ab3	175,3 Ac3			
DS6	170,6 Aa	170,0 Aa1	170,1 Aa1	170,4 Aa1	170,3 Aa1	171,1 Aa2	172,7 Ab2	170,3 Aa1	171,6 Ab3	174,7 Ac3			
DS7	175,8 Cc	173,0 Ca1	172,4 Ca1	172,2 Ca1	172,7 Ca1	172,4 Ca1	173,2 Ab2	172,4 Ca1	172,7 Ba1	174,5 Ab3			
DS8	185,0 Fd	178,6 Ec3	177,0 Eb2	175,9 Da2	177,8 Fc2	175,6 Eb1	174,9 Ca1	177,2 Eb1	175,2 Ca1	174,9 Aa1			
DS9	189,5 Gd	181,8 Fc3	179,8 Fb3	178,1 Ea3	180,5 Gc2	177,6 Fb2	175,6 Ca2	179,7 Fc1	176,4 Db1	175,0 Aa1			
DS10	191,3 Hd	182,9 Gc3	180,8 Gb3	178,8 Ea3	181,5 Hc2	178,3 Gb2	175,8 Ca2	180,5 Gc1	176,7 Db1	174,9 Aa1			
DS11	192,1 Hd	183,4 Gc3	181,4 Gb3	179,4 Fa3	182,1 Hc2	179,0 Hb2	176,7 Da2	181,0 Gc1	177,4 Db1	176,0 Ba1			
DS12	189,3 Gd	181,6 Fc3	180,0 Fb3	178,4 Ea2	180,8 Gc2	178,4 Gb2	176,6 Da1	179,8 Fb1	177,0 Da1	176,7 Ba1			
DS13	183,1 Ed	177,7 Dc2	176,8 Eb3	175,6 Da1	177,2 Eb2	176,0 Ea2	175,5 Ca1	176,7 Eb1	175,2 Ca1	176,4 Bb2			
DS14	177,3 Dc	173,7 Ca1	173,5 Da1	172,9 Ca1	173,8 Da1	173,5 Da1	174,2 Ba2	173,4 Da1	173,3 Ba1	176,1 Bb3			
<i>Ceiba speciosa</i>													
Datas de semeadura simuladas (DS)	CA	SSP2-4.5						SSP3-7.0					
		FP		FI		FD		FP		FI		FD	
DS1	196,5 Gd	180,0 Gc3	176,9 Gb3	173,3 Fa2	177,9 Gc2	173,1 Gb2	169,8 Fa1	175,8 Fb1	169,9 Ea1	169,7 Da1			

continua... 160

... continuação

DS2	180,0 Ec	166,0 Eb2	164,9 Eb2	162,6 Da1	165,3 Eb2	163,6 Da2	163,5 Ca1	164,0 Da1	162,0 Ca1	166,2 Bb2
DS3	163,4 Cc	155,0 Ca1	154,8 Ca1	155,0 Ba1	155,8 Ca1	156,7 Ca2	160,2 Bb2	155,0 Ba1	157,5 Bb2	165,9 Bd3
DS4	153,5 Bb	149,5 Ba1	150,3 Ba1	151,5 Aa1	151,2 Ba2	153,9 Bb2	159,1 Bc2	150,8 Aa2	155,8 Bc3	165,8 Bd3
DS5	149,9 Ab	147,7 Aa1	148,8 Aa1	150,2 Ab1	149,2 Aa2	152,6 Ab2	158,0 Ac2	149,3 Aa2	154,7 Ac3	164,6 Bd3
DS6	149,6 Ab	147,4 Aa1	148,3 Aa1	149,9 Ab1	148,8 Aa2	152,0 Ab2	157,2 Ac2	149,1 Aa2	154,2 Ab3	162,7 Ac3
DS7	162,9 Cc	153,9 Ca1	153,5 Ca1	154,0 Ba1	154,4 Ca1	155,3 Ca2	158,6 Ab2	154,2 Ba1	156,4 Bb2	162,7 Ac3
DS8	201,7 Hd	178,5 Gc3	172,2 Fb3	169,1 Ea2	175,6 Fc2	167,5 Eb2	165,1 Da1	172,3 Eb1	165,8 Da1	165,2 Ba1
DS9	215,6 Jd	191,1 Hc3	184,4 Hb3	179,0 Ga3	186,3 Hc2	176,4 Hb2	169,8 Fa2	183,4 Gc1	172,2 Fb1	167,1 Ca1
DS10	222,4 Kd	196,2 Ic3	189,5 Ib3	183,3 Ia3	191,2 Jc2	180,3 Ib2	171,9 Ga2	188,0 Hc1	180,0 Gb1	167,6 Ca1
DS11	222,6 Kd	198,0 Ic3	191,7 Jb3	185,7 Ja3	193,3 Kc2	182,7 Jb2	174,2 Ha2	189,6 Hc1	177,0 Gb1	171,2 Da1
DS12	211,2 Id	190,6 Hc3	186,0 Hb3	181,1 Ha3	187,3 Ic2	179,6 Ib2	173,3 Ha2	184,1 Gc1	175,0 Gb1	169,4 Da1
DS13	191,5 Fd	176,1 Fc2	173,7 Fb3	170,2 Ea1	174,5 Fc2	170,5 Fb2	168,2 Ea1	172,6 Eb1	167,8 Da1	169,0 Da1
DS14	176,5 Dc	163,3 Db1	163,0 Db2	160,6 Ca1	163,1 Da1	162,1 Da2	162,9 Ca2	161,7 Ca1	160,7 Ca1	166,5 Bb3

Handroanthus chrysotrichus

Datas de semeadura simuladas (DS)	CA	SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
		FP	FI	FD	FP	FI	FD	FP	FI	FD
DS1	173,8 Hd	162,9 Fb1	161,7 Fb2	159,8 Ea1	162,2 Fb1	160,8 Da2	160,7 Ca1	161,4 Db1	159,6 Ba1	163,7 Bc2
DS2	156,5 Ec	151,0 Ca1	151,6 Ca1	151,9 Ca1	152,2 Ca1	154,2 Cb2	158,2 Bd2	151,7 Ba1	155,1 Ab2	164,6 Bc3
DS3	148,0 Ca	147,0 Ba1	148,4 Ba1	150,2 Bb1	148,9 Ba2	152,8 Bb2	158,7 Bc2	149,0 Aa2	155,0 Ab3	166,3 Cc3
DS4	143,1 Ba	145,1 Ab1	147,0 Ac1	149,1 Ad1	147,1 Ab2	151,8 Ac2	158,2 Bd2	147,7 Ab2	154,5 Ac3	165,6 Cd3
DS5	141,4 Aa	144,4 Ab1	146,4 Ac1	148,5 Ad1	146,5 Ab2	151,2 Ac2	157,6 Ad2	147,1 Ab2	153,9 Ac3	164,6 Bd3
DS6	141,9 Aa	144,7 Ab1	146,4 Ac1	148,5 Ad1	146,8 Ab2	150,8 Ac2	156,7 Ad2	147,3 Ab2	153,4 Ac3	162,4 Ad3
DS7	154,1 Db	150,5 Ca1	150,6 Ca1	151,5 Ca1	151,4 Ca1	153,0 Bb2	156,8 Ac2	151,3 Ba1	154,4 Ab2	161,3 Ac3
DS8	185,1 Id	168,2 Gc3	163,5 Gb2	161,3 Fa1	166,1 Gb2	160,7 Da1	159,6 Ba1	163,6 Eb1	159,6 Ba1	160,8 Aa1
DS9	196,2 Kd	176,3 Hc3	170,9 Ba3	166,8 Ga2	172,9 Hc2	165,4 Eb2	161,3 Ca1	170,5 Fc1	162,7 Cb1	160,4 Aa1
DS10	203,5 Ld	181,6 Ic3	176,1 Ib3	170,8 Ia3	177,6 Ic2	168,9 Fb2	162,4 Ca2	174,7 Gc1	164,5 Db1	159,6 Aa1
DS11	202,7 Ld	182,0 Ic3	176,8 Ib3	171,7 Ia3	178,1 Ic2	170,0 Fb2	163,7 Da2	175,3 Gc1	165,5 Db1	161,0 Aa1
DS12	192,2 Jd	176,0 Hc3	172,4 Hb3	168,6 Ha2	173,5 Hc2	168,2 Fb2	164,2 Da1	171,3 Fb1	164,9 Da1	164,2 Ba1
DS13	162,0 Gc	154,4 Ea1	154,8 Ea1	153,8 Da1	155,1 Ea1	155,7 Ca1	158,2 Bb2	154,5 Ca1	155,8 Aa1	163,3 Bb3

continua... 161

... continuação

DS14	159,5 Fc	152,7 Da1	153,3 Da1	152,9 Da1	153,6 Da1	155,1 Cb2	158,4 Bc2	153,1 Ca1	155,5 Ab2	164,4 Bd3		
Handroanthus impetiginosus												
Datas de semeadura simuladas (DS)	CA	SSP2-4.5				SSP3-7.0				SSP5-8.5		
		FP	FI	FD	FP	FI	FD	FP	FI	FD		
DS1	148,6 Hd	141,9 Fc2	141,0 Eb3	139,6 Da2	141,4 Ec1	140,0 Db2	139,0 Ca1	141,0 Ec1	138,9 Ca1	140,0 Bb2		
DS2	144,4 Fc	139,1 Eb1	138,7 Db2	137,6 Ca1	138,9 Db1	138,1 Ca1	138,2 Ba1	138,5 Da1	137,6 Ba1	139,8 Bb2		
DS3	136,6 Cb	134,4 Ba1	134,5 Ba1	134,7 Aa1	134,8 Ba1	135,5 Aa2	137,3 Ab2	134,6 Ba1	136,0 Ab2	140,1 Bc3		
DS4	133,6 Ba	133,2 Aa1	133,6 Aa1	134,1 Aa1	133,8 Aa1	135,0 Ab2	137,4 Ac2	133,8 Aa1	135,9 Ab3	140,3 Bc3		
DS5	132,6 Aa	132,8 Aa1	133,3 Ab1	133,9 Ab1	133,4 Ab1	134,8 Ac2	137,0 Ad2	133,5 Aa1	135,6 Ab3	139,7 Bc3		
DS6	132,2 Aa	132,7 Aa1	133,1 Ab1	133,7 Ab1	133,3 Ab1	134,5 Ac2	136,8 Ad2	133,4 Ab1	135,4 Ac3	139,2 Ad3		
DS7	133,2 Ba	133,1 Aa1	133,4 Aa1	133,9 Aa1	133,6 Aa1	134,6 Ab2	136,5 Ac2	133,7 Aa1	135,4 Ab3	138,7 Ac3		
DS8	143,5 Ec	137,9 Db2	136,8 Ca1	136,5 Ba1	137,3 Ca1	136,4 Ba1	136,7 Aa1	136,8 Ca1	136,6 Aa1	137,9 Ab2		
DS9	155,3 Id	144,9 Gc3	142,2 Fb3	140,6 Ea2	143,5 Fc2	140,0 Db2	138,6 Ba1	142,4 Fc1	139,3 Cb1	138,3 Aa1		
DS10	162,2 Jd	149,9 Ic3	146,9 Hb3	144,2 Ga3	148,1 Hc2	143,4 Eb2	140,1 Da2	146,8 Hc1	141,5 Db1	138,6 Aa1		
DS11	164,2 Kd	151,4 Jc3	148,5 Ib3	145,4 Ha3	149,6 Ic2	144,7 Fb2	140,8 Da2	148,0 Ic1	142,3 Db1	138,9 Aa1		
DS12	156,0 Id	146,8 Hc3	145,2 Gb3	142,8 Fa2	145,9 Gc2	143,0 Eb2	140,8 Da1	145,0 Gb1	141,2 Da1	140,6 Ba1		
DS13	145,5 Gc	139,8 Eb1	139,3 Db2	138,0 Ca1	139,5 Db1	138,8 Ca2	138,4 Ba1	139,0 Db1	137,8 Ba1	140,1 Bc2		
DS14	139,9 Db	136,3 Ca1	136,2 Ca1	135,8 Ba1	136,5 Ca1	136,5 Ba1	137,4 Ab2	136,1 Ca1	136,4 Aa1	139,6 Bb3		
Tabebuia roseoalba												
Datas de semeadura simuladas (DS)	CA	SSP2-4.5				SSP3-7.0				SSP5-8.5		
		FP	FI	FD	FP	FI	FD	FP	FI	FD		
DS1	158,2 Fd	151,4 Gc2	150,4 Gb3	148,8 Ea1	150,8 Gc1	149,3 Db2	148,2 Ca1	150,3 Fb1	148,1 Ca1	148,9 Ba1		
DS2	150,1 Dc	146,0 Da1	145,9 Da1	145,2 Ca1	146,2 Da1	145,9 Ba1	146,5 Ba2	145,8 Da1	145,6 Ba1	148,5 Bb3		
DS3	144,6 Bb	143,0 Ba1	143,2 Ba1	143,5 Aa1	143,4 Ba1	144,3 Ab2	146,2 Bc2	143,3 Ba1	144,9 Ab2	149,0 Bc3		
DS4	142,2 Aa	142,0 Aa1	142,4 Aa1	143,0 Aa1	142,6 Aa1	143,8 Ab2	146,0 Bc2	142,6 Aa1	144,6 Ab3	148,7 Bc3		
DS5	141,6 Aa	141,8 Aa1	142,2 Aa1	142,7 Ab1	142,3 Aa1	143,6 Ab2	145,7 Ac2	142,4 Aa1	144,4 Ab3	148,2 Bc3		
DS6	141,7 Aa	141,8 Aa1	142,2 Aa1	142,7 Aa1	142,3 Aa1	143,4 Ab2	145,4 Ac2	142,4 Aa1	144,2 Ab3	147,6 Ac3		

continua... 162

... continuação

DS7	143,9 Bb	142,9 Ba1	142,9 Ba1	143,3 Aa1	143,1 Ba1	143,8 Aa2	145,3 Ab2	143,2 Ba1	144,3 Aa2	147,2 Ab3
DS8	157,4 Fc	149,9 Fb3	148,0 Fa2	147,3 Da1	149,1 Fb2	146,8 Ca1	146,5 Ba1	148,1 Eb2	146,5 Ba1	147,0 Aa1
DS9	164,6 Gd	154,5 Hc3	151,9 Hb3	150,3 Fa2	153,1 Hc2	149,6 Db2	147,8 Ca1	152,1 Gc1	148,7 Cb1	147,3 Aa1
DS10	170,0 Id	158,4 Jc3	155,7 Jb3	153,0 Ha3	156,7 Jc2	152,3 Eb2	149,0 Da2	155,4 Ic1	150,3 Db1	147,4 Aa1
DS11	170,6 Id	159,0 Jc3	156,3 Jb3	153,5 Ha3	157,3 Jc2	153,0 Eb2	149,6 Da2	156,0 Ic1	150,9 Db1	148,0 Aa1
DS12	165,8 Hd	156,4 Ic3	154,4 Ib3	152,3 Ga2	155,4 Ic2	152,1 Eb2	149,7 Da1	154,2 Hc1	150,4 Db1	149,3 Ba1
DS13	151,5 Ec	147,0 Eb1	146,7 Eb1	145,9 Ca1	147,0 Ea1	146,4 Ca1	146,8 Ba2	146,6 Da1	146,0 Ba1	148,5 Bb3
DS14	147,9 Cc	144,7 Ca1	144,7 Ca1	144,4 Ba1	145,0 Ca1	145,2 Ba1	146,3 Bb2	144,6 Ca1	145,2 Aa1	148,6 Bb3

*Para detalhes das datas de semeadura simuladas, consulte a Tabela 4.1. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna (datas de semeadura simuladas), minúscula na linha (CA – clima atual, FP – futuro próximo, FI – futuro intermediário e FD – futuro distante) e número na linha (cenários socioeconômicos SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. Os valores de duração do desenvolvimento inicial (DDI) foram obtidos para cada Modelo de Circulação Geral (MCG) e os dados da tabela (dados originais) referem-se aos valores médios de DDI. No entanto, os dados do DDI não seguiram o pressuposto de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) e foram transformados pelo Ln para realização do teste (Fagundes *et al.*, 2021; Reis *et al.*, 2021). As letras (A-L; a-d) e os números (1-3) foram configurados em ordem crescente de DDI.

Pela ANOVA, houve efeito significativo para a interação períodos (CA, FP, FI e FD) x cenários socioeconômicos (SSP 2-4.5, 3-7.0 e 5-8.5) e DSs ($p \leq 0,05$) para as cinco espécies estudadas. Ou seja, há diferenças na magnitude e influência de cada efeito principal na DDI entre as espécies. Para todas as espécies, a DS exerce maior influência na DDI (valor do teste F entre 1856 e 3257), seguida pelos períodos (valor do teste F entre 97,2 e 398) e cenários de emissão (valor do teste F entre 5,2 e 131) (Apêndice 4.2). Apesar da variabilidade entre os modelos climáticos, a DDI será mais suscetível as variações interanuais de Tmed observadas entre as DSs, similar ao observado para *L. ferrea* (Fagundes *et al.*, 2021), *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* (Fagundes, 2023), e *B. orellana* (Reis *et al.*, 2021).

Quando se analisam as projeções da DDI para cada DS é possível notar maior redução (entre -1 e -55 dias), principalmente no FD e SSP5-8.5. Apesar das diferenças na magnitude e independentemente da espécie, a redução da DDI foi maior nas DS8 à DS12, simuladas entre fevereiro e junho/julho. Ao contrário, aumentos entre +1 e +24 dias foram projetados principalmente nas DS2 à DS7, simuladas entre agosto e janeiro, no FD (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) (Figura 4.6 Tabela 4.4).

Exceto para a *H. chrysotrichus*, as reduções de DDI são projetadas na maioria dos DSs, com magnitudes variando entre FP e FD (e SSPs). A *B. forficata* e *C. speciosa* apresentaram padrões semelhantes de alteração da DDI entre as DSs, com reduções da DDI projetadas em DS1, DS2, DS8 a DS13, compreendendo simulações realizadas de janeiro a junho, enquanto aumentos de DDI foram projetados das DS3 a DS6, compreendendo simulações realizadas de setembro a dezembro, nos três períodos no SSP5.8-5 (Figura 4.6 e Tabela 4.4). A *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* também apresentaram padrões semelhantes entre si, com reduções da DDI (entre -1 e -25 dias) nas DS1 DS2, DS8 à DS13 e aumentos (entre +1 a +7 dias) nas DS3 a DS7, simuladas entre setembro a janeiro. Para *H. chrysotrichus*, as três situações (I, II e III) são projetadas ao longo do século XXI nos três SSPs. Ou seja, redução do DDI em DS1, DS8 à DS12 (com simulações realizadas de fevereiro a julho), aumento da DDI em DS2 a DS7, DS13 e DS14 (simulações realizadas de agosto a janeiro) e nenhuma alteração da DDI na DS3 (FI-SSP2-4.5) e DS7 (FI-SSP5-8.5).

Em relação aos diferentes períodos e cenários, observa-se que a tendência de redução (ou aumento) na DDI se acentua nos períodos mais distantes e cenários com maior forçante radiativa. Por exemplo, para *C. speciosa* foram projetados os maiores aumentos da DDI para o FD no SSP3-7.0 (+6 a +8 dias) e SSP5-8.5 (+3 a +15 dias) e maiores reduções no SSP3-7.0 (-3 a -51 dias) e SSP5-8.5 (-10 a -55 dias), comparado ao SSP2-4.5 (-2 a -39 dias).

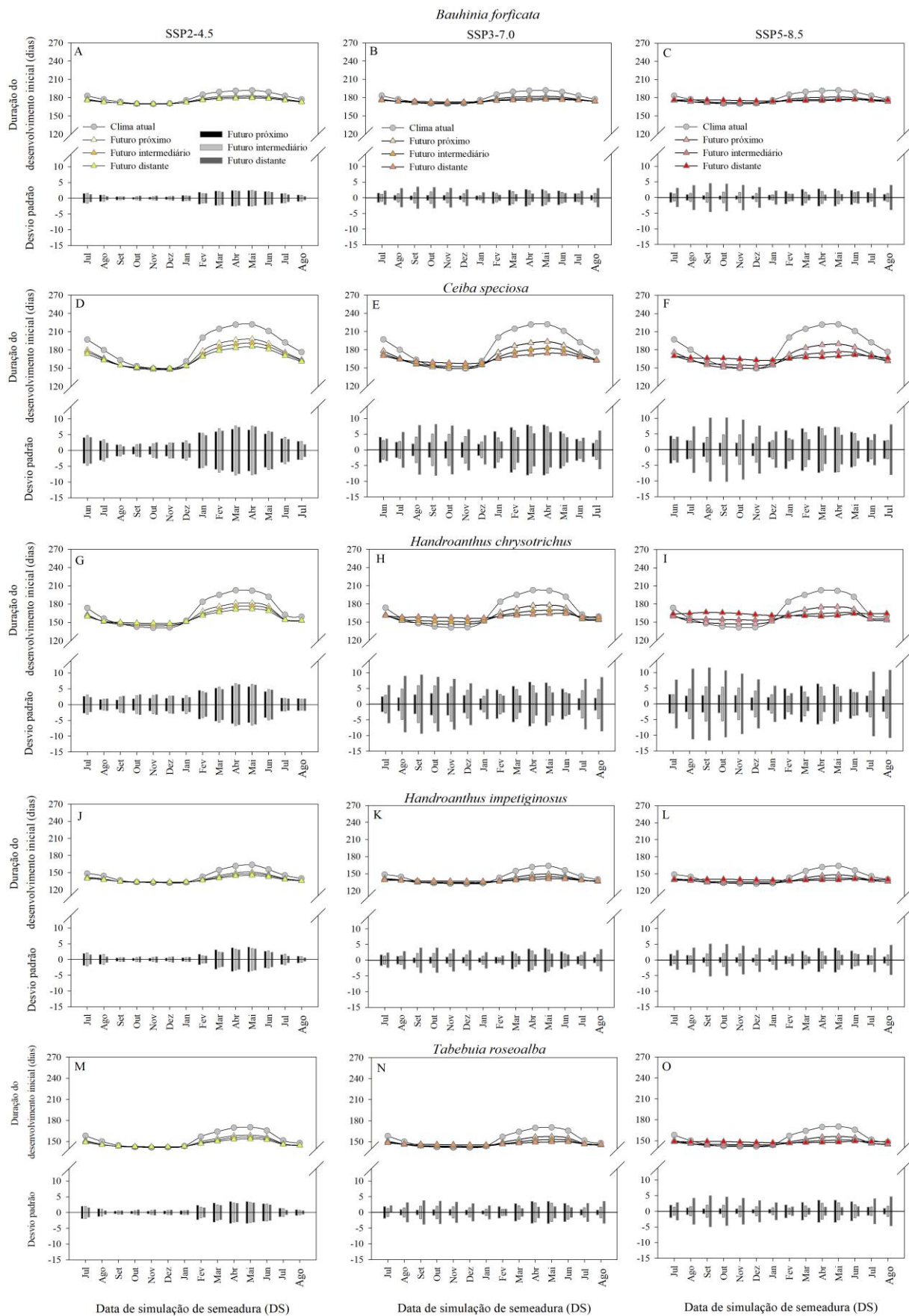


Figura 4.6 - Duração do desenvolvimento inicial (DDI, em dias) ao longo de cada data de

semeadura para *Bauhinia forficata* (painéis A, B e C), *Ceiba speciosa* (painéis D, E F), *Handroanthus chrysotrichus* (painéis G, H e I), *Handroanthus impetiginosus* (painéis J, K e L) e *Tabebuia roseoalba* (painéis M, N e O) simulada para o clima atual (1995 – 2014), e projetada para o futuro próximo (2041-2060), intermediário (2061-2080) e distante (2081- 2100) nos três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). As colunas verticais referem-se ao desvio padrão da DDI dos 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 para FP (preto), FI (cinza claro) e FD (cinza escuro).

Quando se analisa as espécies florestais, é possível verificar que a *B. forficata* é a menos impactada pelas projeções de Tmed, com menor alteração, ou seja menor redução (entre -1 e -16 dias) e aumento (entre +1 e +6 dias) da DDI, sendo seguida pela *T. roseoalba* (entre -23 a +7 dias) e *H. impetiginosus* (entre -25 a +7 dias). Do contrário, *C. speciosa* e *H. chrysotrichus* apresentaram maiores alterações na DDI, e, portanto, possuem maior sensibilidade aos aumentos projetados de Tmed. Para a *C. speciosa*, foram projetadas reduções maiores (menos intensas), entre -1 (FP e SSP2-4.5) e -55 dias (FD e SSP5-8.5), e aumentos um pouco menores (até +15 dias) na DDI (Tabela 4.4), enquanto para a *H. chrysotrichus* foram projetadas reduções menores, de -1 (FP e SSP2-4.5) a -44 dias (FD e SSP5-8.5), e aumentos ligeiramente maiores (até +23 dias).

Como a DDI depende do acúmulo térmico diário, que é metabolicamente ajustado pelas plantas para ocorrer dentro dos limiares térmicos (Tb, Tot e TB) (Bahuguna; Jagadish 2015; Ferreira *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2023b), qualquer modificação na Tmed altera a STd (FIL) e $f(T)$ (WE) e, conseqüentemente, altera TAF e DDI (Fagundes *et al.*, 2021; 2024a; Martins *et al.*, 2023a, 2023b; Martins; Streck 2007). Portanto, as reduções na DDI simuladas em DSs com projeções de temperaturas mais amenas (janeiro a julho), mesmo em cenários mais quentes (FD e SSP5-8.5) (Figura 4.6 e Tabela 4.4), podem ter ocorrido devido a um aumento na frequência de valores projetados de Tmed próximos a Tot das espécies florestais estudadas (20,3°C a 21,5°C). Por exemplo, para a *C. speciosa*, considerando as DSs com as maiores reduções de DDI, houve ~141 dias (85,5%) na DS8, ~124 dias (74,2%) na DS9 e ~119 dias (71,2%) na DS10 em que os valores de Tmed projetados estavam próximos do Tot (21 °C). Em temperaturas ideais, a STd (Equação 4.1) e a $f(T)$ (Equação 4.3) são máximas e, portanto, a TAF está próxima da TAFmax (Martins *et al.*, 2023a, 2023b; Fagundes *et al.*, 2024a; Reis *et al.*, 2021), acelerando o desenvolvimento da plântula e diminuindo a DDI (de -1 a -55 dias).

A redução da DDI nas DS8 a DS13 pode ser vantajosa para as cinco espécies uma vez que uma taxa de desenvolvimento mais rápida pode melhorar a capacidade competitiva e a

sobrevivência das mudas no campo (Martins *et al.*, 2023b; Reis *et al.*, 2021), além de favorecer a aquisição de tolerância para suportar melhor os aumentos de Tmed nos meses subsequentes (Fagundes *et al.*, 2021; Reis *et al.*, 2021). O efeito de temperaturas ótimas na melhoria do desenvolvimento inicial em projeções de aumento de Tmed foi observado em espécies florestais tropicais, como *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. (Fagundes *et al.*, 2021), *Bixa orellana* L. (Reis *et al.*, 2021), *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. e *Platycyamus regnellii* Benth (Fagundes, 2023), que são nativas do Brasil, e *Psidium guajava* L. (Reis *et al.*, 2021), nativa da América do Sul. Apesar desse resultado benéfico, é mais comum (e esperado) que os aumentos de Tmed resultem em aumentos da DDI.

Por outro lado, em cenários (FD e SSP5-8.5) e épocas (DS3= setembro a DS6 = dezembro) mais quentes, foi projetado aumento da DDI para todas as espécies. Exatamente onde as projeções de temperaturas são mais intensas para Itajubá, podendo chegar a 6 °C em setembro no FD (Alves *et al.*, 2020). O aumento da DDI pode estar associado a ocorrências mais frequentes de Tmed projetada (Figura 4.5) mais próximas da TB das espécies (~40°C). Em temperaturas supraótimas (>Tot), a STd e $f(T)$ tendem a zero, levando a uma redução na TAF em comparação com a TAFmax, o que, por sua vez, aumenta a DDI (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2022b, 2023a; Martins; Streck, 2007; Reis *et al.*, 2021). Atrasos no desenvolvimento inicial devido a temperaturas acima do ideal também foram observados em outras espécies florestais, como *Citharexylum myrianthum* Cham. (Reis *et al.*, 2021), *Libidibia férrea* (Mart. ex Tul.) LP Queiroz (Fagundes *et al.*, 2021), ambas nativas do Brasil, e espécies comerciais exóticas como *Corymbia citriodora* (Hook.) (K.D. Hill & L.A.S. Johnson) e *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) (Martins *et al.*, 2023b).

Incertezas nas projeções de DDI podem ocorrer devido I) limitações de previsibilidade dos modelos climáticos (Fagundes *et al.*, 2021) e II) capacidade dos modelos de simular a DDI (Fagundes *et al.*, 2024a; Florêncio *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2022). Para minimizar o item I, foi considerado o conjunto de múltiplos modelos climáticos do NEX-GDDP, seguindo recomendações de Dias *et al.* (2024), Fagundes *et al.* (2021) e Thrasher *et al.* (2022). Já o erro associado ao item II pode estar associado aos erros cumulativos na estimativa do NFA, principalmente acima de 5 folhas (Figura 4.2), que resultaram em erros entre 11,9 dias (*B. forficata*) e 32,3 dias (*H. impetiginosus*) pelo modelo WE, e ~ 26 dias (*C. speciosa* e *H. chrysotrichus*) pelo modelo FIL.

Superestimativas (subestimativas) no NFA pelos modelos FIL e WE geraram subestimativa (superestimativa) na DDI ao longo das DSs. As superestimativas da NFA são

causadas por um aumento da TAF ao longo do tempo, resultando no ciclo de desenvolvimento mais rápido e, consequentemente menor DDI (Fagundes *et al.*, 2021; Martins; Streck, 2007; Martins *et al.*, 2023b). Isso pode ocorrer devido (Fagundes *et al.*, 2021; 2024; Ferreira *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2022): I) à menor capacidade dos modelos de capturar o desenvolvimento em DSs mais frias ($T_{med} \cong T_b$), e II) menor capacidade do modelo em simular menores valores de TAF causada pela redução da velocidade de germinação ou perdas de viabilidade das sementes ao longo do tempo. Por outro lado, subestimativas do NFA podem ocorrer devido a redução da TAF em condições de T_{med} próxima à T_b (ou TB) (Martins *et al.*, 2022; Martins; Streck, 2007).

Questões práticas relacionadas a perda de viabilidade das sementes ao longo do tempo, especialmente da *H. impetiginosus* (nas DS7 e DS8), pode ter reduzido a velocidade de emergência, germinação e a TAF, contribuindo para a menor precisão do FIL (RQME = ~2,3 folhas e 52,4 dias) e WE (RQME = ~1,50 folhas e 32,3 dias). Para evitar danos maiores a viabilidade das sementes das espécies estudadas, foram seguidos rigorosamente os protocolos de armazenamento para condições mais próximas das ideais (câmara fria, $T_{med} \sim 2,9 - 5,0$ °C e umidade relativa ~ 50,0 %) (Fowler; Martins, 2001), além de coletar as sementes em 2 ou mais períodos de dispersão (Tabela 1.1).

Padrões semelhantes nas estimativas do NFA e DDI pelo FIL e WE foram observados para o desenvolvimento inicial de *P. guajava* (Ferreira *et al.*, 2019), *C. myrianthum* (Martins *et al.*, 2022), *A. peregrina* (Fagundes *et al.*, 2021), *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* (Fagundes *et al.*, 2024a). Erros entre 1,5 e 4 folhas na estimativa da NFA e entre 5,9 e 29,1 dias na estimativa da DDI são comuns em espécies florestais nativas (Fagundes *et al.*, 2024a; Martins *et al.*, 2022). No entanto, um erro máximo de 30- 35 dias pode ser tolerado ao estimar a DDI para espécies florestais (Fagundes *et al.*, 2021; Fagundes *et al.*, 2024a). Portanto, o erro associado ao item II foi mínimo para *B. forficata* com o modelo WE (RQME= 1,14 folhas e 11,9 dias), dentro do esperado para *H. chrysotrichus* pelo modelo FIL (RQME= 1,41 folhas e 23 dias) e *T. roseoalba* pelo WE (RQME= 1,32 folhas e 25,2 dias) e próximo ao tolerável *C. speciosa* (pelo modelo FIL, RQME = 1,30 folhas e 29,8 dias) e *H. impetiginosus* (pelo modelo WE, RQME = 1,50 folhas e 32,3 dias). Portanto, as incertezas na DDI projetadas para *C. speciosa* e *H. impetiginosus* no clima futuro ainda são observadas no presente estudo.

Todas as etapas deste estudo, como calibração dos coeficientes (a e TAF_{max}), avaliação e escolha do modelo mais preciso, geram informações práticas importantes e ao mesmo tempo são necessárias para identificar os impactos das projeções climáticas no desenvolvimento

(Fagundes *et al.*, 2024a; Martins *et al.*, 2022; Reis *et al.*, 2021). Por exemplo, os valores de ‘ a ’ e ‘TAFmax’ (Tabela 4.2) são usados para comparar as exigências térmicas e os padrões de desenvolvimento entre as espécies florestais (Martins *et al.*, 2023b; Martins; Streck, 2007). Nesse sentido, a *C. speciosa* ($1/a = \sim 121$ °C dia folha⁻¹ e TAFmax = 0,0811 folha dia⁻¹) e *H. chrysotrichus* ($1/a = 115$ °C dia folha⁻¹ e TAFmax = 0,0953 folha dia⁻¹) emitem folhas mais rapidamente e demoram menos tempo (menor número de dias) para atingir o término do desenvolvimento inicial comparada a *B. forficata* ($1/a = 179,5$ °C dia folha⁻¹ e TAFmax = 0,0597 folhas dia⁻¹), *H. impetiginosus* ($1/a = 147,0$ °C dia folha⁻¹ e TAFmax = 0,0767 folha dia⁻¹) e *T. roseoalba* ($1/a = 143$ °C dia folha⁻¹ e TAFmax = 0,0716 folha dia⁻¹).

Embora não seja uma prática comum em viveiros florestais, os coeficientes ‘ a ’ ou ‘TAFmax’, podem ser usados para substituir práticas menos precisas, como análises visuais, ou métodos destrutivos como o índice de qualidade de Dickson (Dickson *et al.*, 1960; Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2023b). Essa abordagem também permite determinar a DDI e identificar o momento ideal para práticas silviculturais essenciais, como a rustificação e o plantio definitivo (Fagundes *et al.*, 2024a). Além de aprimorar a precisão na produção de mudas, o uso desses modelos pode ter implicações ecológicas e práticas interessantes. A otimização do desenvolvimento inicial das plantas favorece a adaptação das mudas ao campo, reduzindo o estresse pós-transplante e aumentando a taxa de sobrevivência das mudas no campo (Costa; Streck, 2018; Reis *et al.*, 2021). Em um contexto de mudanças climáticas, a capacidade de prever com maior exatidão as exigências térmicas das espécies pode contribuir para a seleção de genótipos mais tolerantes às variações ambientais, auxiliando a produção sustentável de mudas e a eficiência dos programas de restauração ecológica. Assim, a integração desses modelos no manejo de viveiros pode melhorar a qualidade das mudas e fortalecer estratégias de conservação e mitigação dos impactos climáticos futuros.

4.3.3 Medidas adaptativas para lidar com os impactos das projeções de temperatura no desenvolvimento inicial

As espécies estudadas são importantes representantes da flora brasileira que ao mesmo tempo enfrentam ameaças devido a pressões climáticas e antropogênicas (Lima *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2019). *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* são classificadas como quase ameaçadas, enquanto *H. chrysotrichus* é considerada vulnerável pela IUCN (2021), principalmente devido à exploração insustentável de madeira e à redução populacional. Além disso, a perda de habitat, intensificada por incêndios florestais, expansão agrícola e conversão de áreas naturais em pastagens (Silva *et al.*, 2019), tem contribuído para o declínio dessas e de outras espécies, como

a *B. forficata*, *C. speciosa*.

Diante da vulnerabilidade dessas espécies e dos possíveis impactos das projeções climáticas no desenvolvimento inicial das cinco espécies, foi realizada uma análise detalhada da literatura para identificar as medidas de adaptação mais eficientes para o cultivo dessas espécies em viveiro. Como as respostas das espécies ao longo do século XXI variam entre as DSs, as estratégias de adaptação devem ser ajustadas de acordo com cada resposta. Para as DSs em que são projetados aumentos na DDI, especialmente entre DS2 à DS7 (agosto a janeiro), recomenda-se a alteração das datas de semeadura e regulação do microclima no viveiro, por meio do controle artificial da temperatura, umidade e luminosidade (Costa; Streck, 2018; Florêncio *et al.*, 2019; Reis *et al.*, 2021). Além disso, será essencial otimizar as práticas de manejo para assegurar que as mudas atinjam o vigor adequado para a comercialização, incluindo: I) uso de recipientes de maior volume, II) aplicação de fertilizantes de liberação controlada, III) aumento da frequência na aplicação de tratamentos fitossanitários, como inseticidas e fungicidas, e IV) intensificação da irrigação (Costa; Streck, 2018; Fagundes, 2023; Florêncio *et al.*, 2022; Reis *et al.*, 2021).

Por outro lado, nas DSs onde são projetadas reduções da DDI, especialmente entre DS8 e DS12, simuladas entre fevereiro e junho/julho, não são necessárias alterações das datas de semeadura ou do aumento do volume do recipiente, pois nessas DSs as espécies se desenvolvem mais rápido. No entanto, são recomendados o uso de fertilizantes de liberação controlada, aumento da irrigação e da frequência de aplicações de inseticidas e fungicidas (Fagundes, 2023; Martins *et al.*, 2023b; Reis *et al.*, 2021).

Para o controle artificial do microclima do viveiro são sugeridas a utilização de tela de sombreamento (50%) acoplado com irrigação (Costa; Streck, 2018; Reis *et al.*, 2021), visando reduzir a temperatura da folha e perdas por evapotranspiração. Porém, ambas medidas podem aumentar os custos de produção de mudas. Como os aumentos de T_{med} projetados em todas as DSs (Figura 4.5) elevam a demanda evaporativa, haverá necessidade de irrigar pelo menos 9 mm dia⁻¹ (no período futuro) em Itajubá (Alves *et al.*, 2020), em todas DSs. No entanto, o aumento da irrigação eleva a suscetibilidade a doenças foliares e à podridão radicular, principalmente por origem fúngica (Lopes; Michereff, 2018; Martins *et al.*, 2023b). Em mudas de *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. rosealba* cultivadas em viveiros, foram relatadas ocorrências de *Corynespora cassiicola* (mancha-alvo), *Apiospharia guaranítica* (doença de crosta marrom) e *Oidium* spp. (oídio) (Carvalho, 2003, 2006; Moreira; Arco-Verde, 1998). Assim, torna-se imprescindível o controle eficaz desses patógenos, com a

aplicação de fungicidas de amplo espectro, como os dos grupos químicos estrobilurina, triazol e enxofre (Andrade, 2009; Nouhra *et al.*, 2021; Viana *et al.*, 2018). No entanto, tal medida implica em custos adicionais, impactando a produção e a comercialização das mudas (Fagundes *et al.*, 2021).

No que se refere ao controle de doenças e pragas, independentemente das projeções de aumento ou redução da DDI, estratégias de controle deverão ser intensificadas, pois os aumentos de temperatura favorecem a proliferação de pragas e eleva a vulnerabilidade das plantas a surtos e infestações (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2022). Sob condições de estresse térmico, mudas de *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* em viveiros são particularmente susceptíveis a ataques de pragas como *Aleurothrixus* spp. (mosca branca), *Coccus* spp. (cochonilhas), *Toxoptera* spp. (pulgão), *Trioza tabebuiae* (psilídeo do ipê), *Oligonychus* spp. (ácaros); *Bradysia* spp., *Sciara* spp., e *Scythropochroa* spp. (moscas-de-viveiro), *Agrotis ipsilon*, *Nomophila* spp., *Spodoptera* spp. (lagartas), *Gryllus* spp. (grilos) e *Neocurtilla* spp. (paquinhãs) (Carvalho, 2003, 2006; Lemes; Zanuncio, 2021). O controle dessas pragas é crucial, uma vez que a maioria dessas espécies de insetos são hospedeiros de vírus causadores de doenças em plantas (Lemes; Zanuncio, 2021). Como estratégias de controle biológico, são recomendadas a introdução de potenciais inimigos naturais como predadores ou parasitoides (Florêncio *et al.*, 2022; Lemes; Zanuncio, 2021), ou aumentar a frequência de aplicação de inseticidas/acaricidas de amplo espectro, como os dos grupos químicos alcalóides quinolizidínicos (origem vegetal) e cetoenol (Andrade, 2009; Andrade *et al.*, 2020).

Todas as medidas de adaptação mencionadas são aplicáveis a viveiros florestais e podem orientar tomadas de decisão mais resilientes às mudanças climáticas (Florêncio *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2023b).

4.4. CONCLUSÃO

Ambos os modelos - Filocrono e Wang e Engel - foram capazes de estimar adequadamente o número de folhas acumuladas (NFA) para as cinco espécies. No entanto, os erros cumulativos na estimativa do NFA resultaram em estimativas menos precisas para a duração do desenvolvimento inicial. O filocrono teve melhor desempenho para *C. speciosa* (RQME = 1,30 folhas e 29,8 dias) e *H. chrysotrichus* (RQME = 1,41 folhas e 23,0 dias), enquanto o Wang e Engel teve melhor desempenho para *B. forficata* (RQME = 1,14 folhas e 11,9 dias), *H. impetiginosus* (RQME = 1,50 folhas e 32,3 dias) e *T. roseoalba* (RQME = 1,32 folhas e 25,2 dias).

Os aumentos de temperatura do ar projetados ao longo do século 21 (entre ~ 1,3°C no futuro próximo (2041-2060) a 4,5 °C no futuro distante (2081-2100)) irão modificar o desenvolvimento e a duração do desenvolvimento inicial das cinco espécies florestais, com magnitudes de mudanças distintas entre as espécies, datas de semeadura, períodos, e cenários socioeconômicos. Entre os efeitos principais, a data de semeadura exerce maior influência sobre a duração do desenvolvimento inicial de todas as espécies. As datas de semeadura projetadas de agosto a janeiro no hemisfério sul podem aumentar a duração, enquanto as datas de semeadura projetadas de fevereiro a junho/julho podem reduzir a duração do desenvolvimento inicial.

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.; CEREZO-MOTA, R.; TIPPETT, M.K.; GUTOWSKI JR., W.J.; ALFARO, E.J.; HIDALGO, H.G.; VICHOT-LLANO, A.; CAMPBELL, J.D.; KAMIL, S.; RASHID, I.U.; SYLLA, M.B.; STEPHENSON, T.S.; 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>.
- 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>.
- ANDRADE, D.J.; ROCHA, C.M.; MATOS, S.T.S.; ZANARDI, O.Z. Oxymatrine-based bioacaricide as a management tool against *Oligonychus ilicis* (McGregor) (Acari: Tetranychidae) in coffee. **Crop Protection**, v.134, p. 105182, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105182>.
- ANDRADE, J.S. **Acaricidas para o manejo de Tetranychus urticae em mamoeiro: toxicidade e resistência no norte do Espírito Santo**. 2009. 76 f. Dissertação (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2009.
- ARNOLD, C.Y. Maximum-minimum temperatures as a basis for computing heat units. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v.76, p.682-692, 1960.
- 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>.
- BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A.M.; GHINI, R. **Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa Meio Ambiente. 2017. 488 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1077623>. Acesso em: 23

out. 2024.

BORMA, L.S.; COSTA, M.H.; ROCHA, H.R.; ARIEIRA, J.; NASCIMENTO, N.C.C.; JARAMILLO-GIRALDO, C.; AMBROSIO, G.; CARNEIRO, R.G.; VENZON, M.; NETO, A.F.; VAN DER HOFF, R.; OLIVEIRA, B.F.A.; RAJÃO, R.; NOBRE, C.A. Beyond Carbon: The Contributions of South American Tropical Humid and Subhumid Forests to Ecosystem Services. **Reviews of Geophysics**, v.60, p.e2021RG000766, 2022. <https://doi.org/10.1029/2021RG000766>.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas. 2003. 1.039 p. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras, v. 1). Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 06 mar. 2024.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas. 2006. 627 p. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras, v. 2). Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 06 mar. 2024.

DELGADO-BAQUERIZO, M.; GUERRA, C. A.; CANO-DÍAZ, C.; EGIDI, E.; WANG, J. T.; EISENHAUER, N.; SINGH, B. K.; MAESTRE, F. T. The proportion of soil-borne pathogens increases with warming at the global scale. **Nature Climate Change**, v.10, p.550-554, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0759-3>.

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>.

DICKSON, A.; LEAF, A.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry Chronicle**, v.36, p.10-13, 1960. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>.

FABER A.H.; ØRSTED M.; EHLERS B.K. Application of the thermal death time model in predicting thermal damage accumulation in plants. **Journal of Experimental Botany**, v.75, p.3467–3482, 2024. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae096>.

FAGUNDES, F.F.A. **Temperaturas cardinais e modelagem do desenvolvimento inicial de duas espécies florestais sob clima presente e futuro**. 2023. 113 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; REIS, F.Y.S. COSTA, H.F. Modeling the initial development dynamics for two native Brazilian forest tree species. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v.97, p.295-308, 2024a. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad044>

FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; REIS, F.Y.S.; COSTA, H.F. Predicting temperature ranges for the initial development of two native Brazilian tree species using multiple sowing dates. **Forest Ecology and Management**, v.562, p.121912, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121912>.

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, M.C.; MARTINS, F.B.; FLORÊNCIO, G.W.L.; PASIN, L.A.A.P. Cardinal temperatures and modeling of vegetative development in guava. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.819-825, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n11p819-825>.

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>.

FLORÊNCIO, G.W.L.; MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; PEREIRA, R.A.A. Impacts of climatic changes on the vegetative development of olive crops in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.641-647, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n9p641-647>.

FOWLER, J.A.P.; MARTINS, E.G. **Manejo de sementes de espécies florestais**. Colombo, PR: Embrapa Florestas. 2001. 76 p. (Documentos, 58). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/289390>. Acesso em: 24 abr. 2022.

GILMORE JUNIOR, E.C.; ROGERS, J.S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, v.50, p.611-615, 1958. <https://doi.org/10.2134/agronj1958.00021962005000100014x>.

INOUE, D.W. Climate change and phenology. **WIREs Climate Change**, v.13, p.e764, 2022. <https://doi.org/10.1002/wcc.764>.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Summary for Policymakers**. In: **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p.1-34, 2023. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.

IUCN - International Union for Conservation of Nature. **The IUCN Red List of Threatened Species 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.iucnredlist.org>. Acesso em: 13 jan. 2024.

LEMES, P.G.; ZANUNCIO, J.C. **Novo Manual de Pragas Florestais Brasileiras**. Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. 996 p. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/novo-manual-de-pragas-florestais-brasileiras/Novo_Manual_de_Pragas_Florestais_Brasileiras.pdf. Acesso em: 06 jan. 2025.

LIMA, R.A.F.; DAUBY, G.; GASPER, A.L.; FERNÁNDEZ, E.P.; VIBRANS, A.C.; OLIVEIRA, A.A.; PRADO, P.I.; SOUZA, V.C.; SIQUEIRA, M.F.; STEEGE, H. Comprehensive conservation assessments reveal high extinction risks across Atlantic Forest trees. *Science*, v.383, p.219-225, 2024. <https://doi.org/10.1126/science.abq509>.

LOPES, U.P.; MICHEREFF, S.J. **Desafios do manejo de doenças radiculares causadas por fungos**. 1. ed. Recife: EDUFRPE, 2018. 208p. Disponível em: [https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1095701/1/LivroCORRIGIDO](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1095701/1/LivroCORRIGIDO%20DesafiosManejoDoencasRadiculares.pdf) DesafiosManejoDoencasRadiculares.pdf. Acesso em: 12 out. 2024.

MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; FAGUNDES, F.F.A.; FLORÊNCIO, G.W.L. Thermal and photoperiodic requirements of the seedling stage of three tropical forest species. *Journal of Forestry Research*, v.34, p.209-220, 2023a. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01530-0>.

MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; FLORÊNCIO, G.W.L. Agrometeorological models for predicting seedlings development of two native forest species. *Scientia Agricola*, v.79, p.e20200192, 2022. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0192>.

MARTINS, F.B.; FLORÊNCIO, G.W.L.; FERREIRA, M.C.; FAGUNDES, F.F.A.; FREITAS, C.H. Predicting seedling development for two commercial forest species under current and future climates: A multi-model assessment. *Forest Ecology and Management*, v.537, p.120929, 2023b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120929>.

MARTINS, F.B.; PEREIRA, R.A.A.; PINHEIRO, M.V.M.; ABREU, M.C. Desenvolvimento foliar em duas cultivares de oliveira estimado por duas categorias de modelos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, p.505-514, 2014. <https://doi.org/10.1590/0102-778620140020>.

MARTINS, F.B.; STRECK, N.A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, n.8, p.1091-1100, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800005>.

MEMMOTT, J.; CRAZE, P.G.; WASER, N.M.; PRICE, M.V. Global warming and the disruption of plant-pollinator interactions. *Ecology Letters*, v.8, p.710-717, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01061.x>.

MENDONÇA, G.C.; CHICHORRO, J.F.; MENDONÇA, A.R.; GUIMARÃES, L.A.O.P. Avaliação silvicultural de dez espécies nativas da Mata Atlântica. *Ciência Florestal*, v.27, p.277-290, 2017. <https://doi.org/10.5902/1980509826466>.

MOREIRA, M.A.B.; ARCO-VERDE, M.F. **Controle de pragas e doenças em viveiros florestais**. Embrapa Roraima, 1998. 5p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/688479/1/cot00198vivmar.pdf> . Acesso em: 28 nov. 2024.

NOUHRA, G.; POLONI, N.M.; PEREIRA, F.D.; GOES, A. Eficiência de trifloxistrobina e tebuconazole, em formulação comercial, associados a fungicidas protetores no controle da mancha marrom de Alternária em tanger “Murcott”. *Summa phytopathologica*, v.47, p.122-125, 2021. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/245415>.

O'NEILL, B.C.; KRIEGLER, E.; EBI, K.L.; KEMP-BENEDICT, E.; RIAHI, K.; ROTHMAN, D.S.; VAN RUIJVEN, B.J.; VAN VUUREN, D.P.; BIRKMANN, J.; KOK, K.; LEVY, M.; SOLECKI, W. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v.42, p.169-180, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>.

OGILVIE, J.E.; GRIFFIN, S.R.; GEZON, Z.J.; INOUE, B.D.; UNDERWOOD, N.; INOUE, D.W.; IRWIN, R.E. Interannual bumble bee abundance is driven by indirect climate effects on floral resource phenology. **Ecology Letters**, v.20, p.1507–1515, 2017. <https://doi.org/10.1111/ele.12854>

ONU. - Organização das Nações Unidas. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 17 maio 2023.

PIAO, S.; LIU, Q.; CHEN, A.; JANSSENS, I.A.; FU, Y.; DAI, J.; LIU, L.; LIAN, X.; SHEN, M.; ZHU, X. Plantphenology and global climate change: Current progresses and challenges. **Global Change Biology**, v.25, p.1922–1940, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>.

PIVELLO, V.R.; ROCHA, R.M., VITULE, J.R.S.; BRAGA, R.R.; BROWN, G.G.; CASTRO, C.F.; CRUZ NETO, C.C.; FRANCO, A.S.; HERINGER, G.; MAGALHÃES, A.L.B.; MIRANDA, R.J.; MORMUL, R.P.; OLIVEIRA, I.; SAULINO, H.H.L.; SILVA MATOS, D.M. Capítulo 4: Impactos de espécies exóticas invasoras sobre as Contribuições da Natureza para as Pessoas (CNP), o Desenvolvimento Sustentável e a boa qualidade de vida. In: DECHOUM, M.S., JUNQUEIRA, A.O.R., ORSI, M.L. (Org.). **Relatório Temático sobre Espécies Exóticas Invasoras, Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos**. 1a Ed. São Carlos: Editora Cubo, 2024. p.133-184. <https://doi.org/10.4322/978-65-00-87228-6.cap4>

REIS, F.Y.S. MARTINS, F.B.; TORRES, R.R.; FLORÊNCIO, G.W.L.; CASSEMIRO, J.M.; MONTEIRO, V.F.C.; FERREIRA, M.C. Climate change impact on the initial development of tropical forest species: a multi-model assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, v.145, p.533–547, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03646-5>.

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.; 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.; BAUMSTARK, 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>.

ROSA, H.T.; WALTER, L.C.; STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M. Métodos de soma térmica e datas de semeadura na determinação de filocrono de cultivares de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p. 1374-1382, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001100002>.

SCOTT, A.J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v.30, p.507–512, 1974.

SILVA, A.P.M.; SCHWEIZER, D.; MARQUES, H.R.; TEIXEIRA, A.M.C.; SANTOS, T.V.M.; SAMBUICHI, R.H.R.; BADARI, C.G.; GAUDARE, U.; BRANCALION, P.H.S. Can current native tree seedling production and infrastructure meet an increasing forest restoration demand in Brazil? **Restoration Ecology**, v.25, p.509-515, 2016. <https://doi.org/10.1111/rec.12470>.

SILVA, J.M.C; RAPINI, A.; BARBOSA, L.C.F.; TORRES, R.R. Extinction risk of narrowly distributed species of seed plants in Brazil due to habitat loss and climate change. **PeerJ**, v.7, p.e7333, 2019. <https://doi.org/10.7717/peerj.7333>.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical Methods**, 8th ed. Iowa State University Press, Ames, 1989. 503p.

STRECK, N.A.; BOSCO, L.C.; LAGO, I. Simulating leaf appearance in rice. **Agronomy Journal**, v.100, p.490-501, 2008. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0156>

STRECK, N.A.; LAGO, I.; OLIVEIRA, F.B.; HELDWEIN, A.B.; AVILA, L.A.; BOSCO, L.C. Modeling the development of cultivated rice and weedy red rice. **Biological Engineering Transactions**, v.54, n.1, p.371-384, 2011. <https://doi.org/10.13031/2013.36234>.

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>.

TUKEY, J.W. **Exploratory data analysis**. Reading: Addison-Wesley, 1977. 688 p.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, **COP 21 Climate Agreement** (UNFCCC, Paris). 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2025.

VIANA, F.M.P.; CARDOSO, J.E.; MARTINS, M.V.V.; OOTANI, M.A. Enxofre versus acibenzolar-s-methyl no controle do oídio do cajueiro. **Summa Phytopathologica**, v.44, p.400-401, 2018. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/188409>.

VIEIRA, R.F.; CAMILLO, J.; CORADIN, L. **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: Região Centro-Oeste**. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade. Brasília: MMA. 2018. 1.160 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1073295/especies-nativas-da-flora-brasileira-de-valor-economico-atual-ou-potencial-plantas-para-o-futuro-regiao-centro-oeste>. Acesso em: 05 abr. 2023.

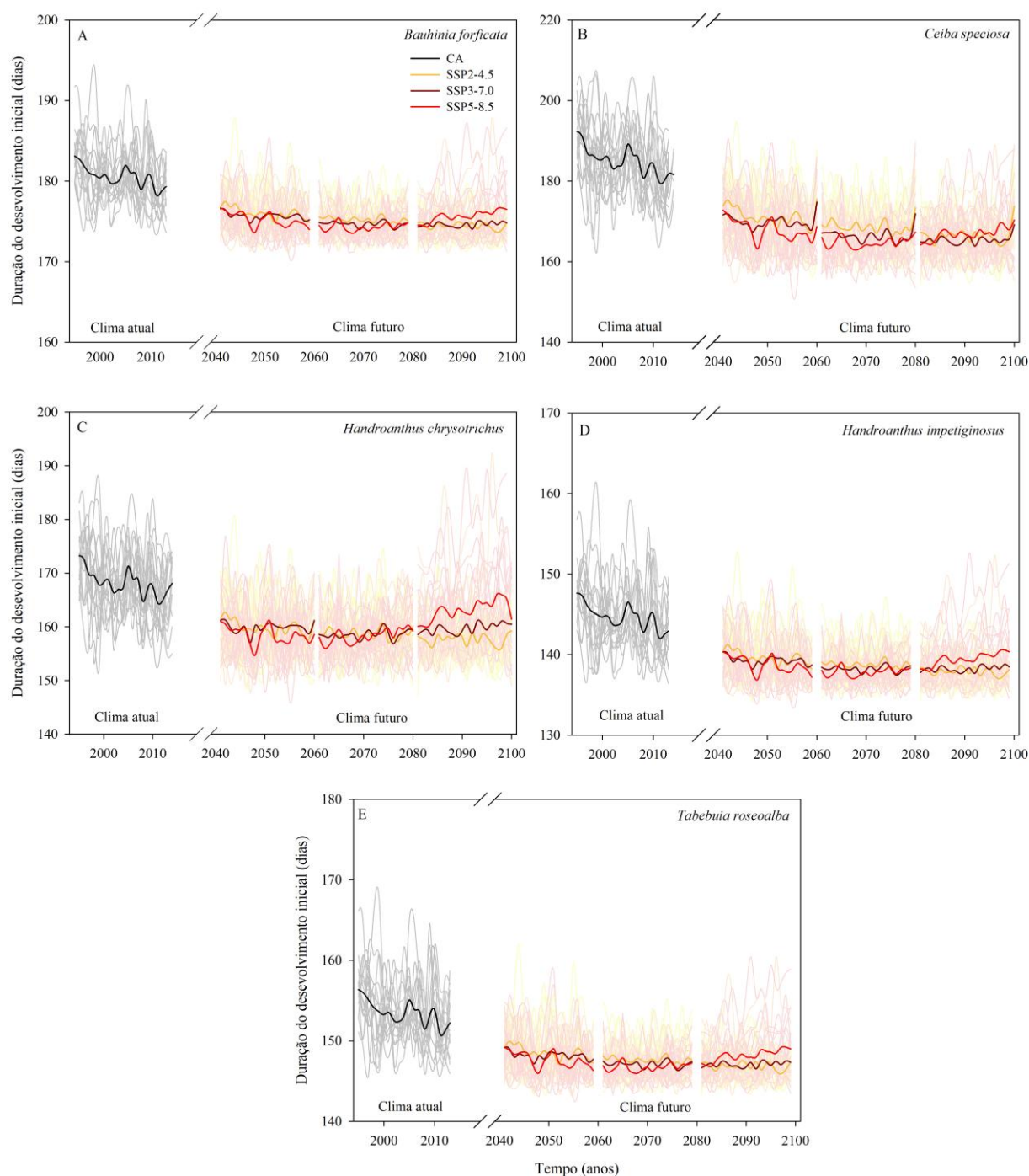
WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v.58, p.1-24, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(98\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(98)00028-6).

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v.36, p.2644–2659, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.

ZHOU, C.WU, S.; LI, C.; QUAN, W.; WANG, A. Response Mechanisms of Woody Plants to High-Temperature Stress. **Plants**, v.12, p.3643, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12203643>.

ZHOU, G.; WANG, Q. A new nonlinear method for calculating growing degree days. **Scientific reports**, v.8, p.10149, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28392-z>.

APÊNDICES DO CAPÍTULO IV



Apêndice 4.1 - Variação temporal da duração desenvolvimento inicial (DDI, em dias) simulada para o clima atual (CA = 1995-2014) e projetada para o clima futuro (FP = 2041-2060, FI = 2061-2080 e FD = 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4. 5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) por 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 para *Bauhinia forficata* (painel A), *Ceiba speciosa* (painel B), *Handroanthus chrysotrichus* (painel C), *Handroanthus impetiginosus* (painel D) e *Tabebuia roseoalba* (painel E). As linhas cinza, amarelo, laranja e

vermelho mais claras representam a DDI para cada modelo climático e as linhas em negrito preto, laranja, marrom e vermelho representam a média da DDI dos modelos climáticos.

Apêndice 4.2 – Valores do teste-F obtidos da ANOVA para as espécies florestais estudadas.

Teste F calculado			
Espécie florestal	Datas de semeadura	Período	Cenário socioeconômico (SSP)
<i>B. forficata</i>	2145,35	239,81	17,40
<i>C. speciosa</i>	3257,67	397,83	130,86
<i>H. chrysotrichus</i>	1859,51	97,23	55,47
<i>H. impetiginosus</i>	1855,91	139,65	5,25
<i>T. roseoalba</i>	2078,62	172,36	8,47

ANEXOS DO CAPÍTULO IV

Anexo 4.1 - Lista de modelos do NEX-GDDP (CMIP6) utilizados nas simulações e projeções do desenvolvimento inicial das cinco espécies florestais estudadas e seus respectivos centros desenvolvedores.

Modelos de Circulação Geral (MCGs)	Centro desenvolvedor
ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Organisation and Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science (CSIRO-ARCCSS). Austrália
ACCESS-ESM1-5	Commonwealth Scientific and Industrial Organisation (CSIRO). Austrália
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Environment and Climate Change Canada (CCCma). Canadá
CMCC-ESM2	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC). Itália
EC-Earth3 EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth consortium. Europa
GFDL-ESM4	National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA-GFDL). Princeton, EUA
INM-CM4-8 INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics, Russian Academy of Science. Rússia
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). França.
MIROC6	Japan Agency of Marine-Earth Science Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, and RIKEN Center for Computational Science. Japão
MPI-ESM1-2-HR MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M). Alemanha
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute. Japão
NorESM2-LM NorESM2-MM	NorESM Climate Modeling Consortium. Noruega

Adaptado de Dias *et al.* (2024)

CAPÍTULO V

IMPACTOS DAS MEDIDAS ADAPTATIVAS NA VIABILIDADE FINANCEIRA DA PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS NATIVAS

5.1. INTRODUÇÃO

A crise climática e o aumento progressivo da temperatura do ar exigem ações urgentes para conter o aquecimento e minimizar os impactos nos ecossistemas naturais. Para enfrentar esse desafio, a 21ª Conferência das Partes (COP-21) propôs o Acordo de Paris, com o objetivo de estabilizar o aquecimento global em 1,5 °C e abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). Para alcançar esse objetivo, cada país deve definir suas próprias metas por meio da Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). No caso do Brasil, uma das principais metas é a restauração e reflorestamento de ~12 milhões de hectares de florestas até 2030 (Brasil, 2017).

O plantio de mudas é a técnica mais utilizada na restauração de florestas, sendo amplamente adotada na recuperação ecológica de florestas tropicais. No entanto, essa abordagem tende a ser mais onerosa quando comparada a outras técnicas de restauração (Freire *et al.*, 2022; Marques *et al.*, 2022). Diante dos compromissos ambientais assumidos pelo Brasil, que exigem uma alta capacidade de produção de mudas de espécies nativas, torna-se essencial investir em estratégias que aumentem a eficiência e a viabilidade econômica desse processo, de forma a garantir a sustentabilidade e o alcance das metas de restauração em larga escala.

Além disso, os aumentos projetados de temperatura representam um risco adicional ao desenvolvimento das mudas (Costa; Streck, 2018; Fagundes *et al.*, 2021), devido a sua maior sensibilidade e menor tolerância a variabilidade térmica e eventos extremos (Martins *et al.*, 2023a). Ou seja, os aumentos de até 6 °C projetados para várias regiões do Brasil (Dias *et al.*, 2024; Florêncio *et al.*, 2022) podem comprometer a capacidade competitiva, qualidade e taxas de sobrevivência das mudas no campo (Fagundes *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2023b; Reis *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, a adoção de medidas eficazes de adaptação será essencial para reduzir os impactos negativos e produzir mudas com maior qualidade e vigor (Costa; Streck, 2018; Martins *et al.*, 2023b; Reis *et al.*, 2021). Estratégias como a seleção de espécies mais tolerantes ao calor, escolha do recipiente adequado para as mudas, melhorias nas condições nutricionais, ajustes na irrigação, implementação de sombreamento adequado, e controle de

pragas e doenças serão essenciais para garantir a resiliência das mudas e o sucesso dos projetos de restauração em um contexto de aquecimento global (Fagundes, 2023; Reis *et al.*, 2021).

No entanto, tais medidas podem impactar os custos de produção nos viveiros, colocando em risco a viabilidade financeira do setor e comprometendo as metas de restauração em larga escala. Assim, torna-se fundamental avaliar o custo-benefício dessas estratégias e buscar inovações que aliem eficiência produtiva e sustentabilidade econômica.

O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade financeira da produção de mudas de cinco espécies florestais nativas amplamente recomendadas para restauração florestal: *Bauhinia forficata* Link, *Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna, *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos e *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith, considerando as medidas de adaptação necessárias ao longo do século XXI, baseada no Valor Presente Líquido (VPL).

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Cálculo da viabilidade financeira para produzir uma muda

O cálculo de viabilidade financeira para a produção de mudas das cinco espécies estudadas foi baseado no Valor Presente Líquido (VPL), calculado com base nos investimentos iniciais e nos custos de operação. Foram excluídas desta análise receitas advindas das vendas das mudas, e custos relacionados a materiais permanentes para a instalação e manutenção do viveiro, administração, salários e outros gastos indiretos. Essa escolha metodológica é justificada por quatro motivos principais (Jonsson, 2011; Silva *et al.*, 2016): I) minimizar as incertezas que não podem ser projetadas de forma confiável a longo prazo, como flutuações de mercado, precificação e mudanças nas políticas ambientais; II) alta imprevisibilidade na estimativa de receitas futuras e preços de mercado; III) falta de dados sobre a comercialização das mudas no clima futuro; e IV) receitas altamente voláteis e influenciadas por políticas econômicas. Além disso, optamos por considerar a produção de somente uma muda, uma vez que as espécies nativas possuem produção descontínua e sazonal de mudas, as quais dependem da época de dispersão, qualidade fisiológica e fitossanitária das sementes (Parisi *et al.*, 2019). Além disso, a perda de viabilidade das sementes ao longo do tempo e dificuldades no armazenamento contribuem para a descontinuidade da produção de mudas (Fagundes *et al.*, 2021; Fagundes, 2023).

Para alinhar este estudo à realidade dos viveiros florestais brasileiros, foram consultadas fontes especializadas e viveiros da região para obter informações sobre insumos e técnicas de

produção. Com base nessas consultas foram considerados como investimentos iniciais: recipiente (tubete + bandeja ou recipiente biodegradável), substrato comercial e fertilizante de liberação controlada. No caso do recipiente biodegradável, seu valor inclui os custos de aquisição da máquina de produção e o material necessário (papel biodegradável), convertidos para o valor unitário. Já os custos operacionais abrangem despesas com energia elétrica para irrigação por aspersão, produtos inseticidas e fungicidas, além da taxa de depreciação e manutenção da máquina de produção dos recipientes biodegradáveis. Todos os valores foram obtidos a partir de uma pesquisa de preço realizada entre novembro e dezembro de 2024 (Tabela 5.1).

Neste estudo, o VPL foi escolhido como métrica financeira porque fornece resultados de valor monetário que podem ser intercomparáveis em diferentes escalas temporais (Brealey *et al.*, 2018; Bonfatti Junior *et al.*, 2019), ideal para estudos de mudanças climáticas e é fortemente indicado para análises no setor florestal (Almeida *et al.*, 2017; Soares *et al.*, 2003).

O VPL foi simulado para o clima atual (CA, 1995-2014) e projetado para três períodos futuros - próximo (FP, 2041-2060), intermediário (FI, 2061-2080) e distante (FD, 2081-2100) - em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para cada data de semeadura (DS1 a DS12) (Tabela 5.2) e para cada espécie (*B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*), considerando os fluxos de caixa, que representam todas as saídas monetárias referentes aos investimentos iniciais e valores mensais dos custos operacionais para a produção de uma muda (Gitman, 2010; Sviech; Mantovan, 2013):

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - FC_0 \quad (5.1)$$

em que: VPL = Valor Presente Líquido (nesse estudo é um valor negativo, pois considera apenas os custos para a produção de 1 muda, excluindo as receitas); n = número de meses entre $t_i = 1$ à n ; t = tempo (em meses) da duração do desenvolvimento inicial, obtido desde $t = i$ (data de emergência) a n = data em que o término do desenvolvimento inicial é atingido (Tabela 5.2); FC_t = fluxo de caixa (saídas monetárias referentes aos custos de operação) no período t ; r = taxa de juros, considerada como 12,25% a.a. em dezembro de 2024 (BCB, 2024); FC_0 = investimento inicial (compreendendo recipiente, substrato comercial e fertilizante de liberação controlada).

O passo a passo do cálculo do VPL pode ser visualizado na Figura 5.1.

Tabela 5.1 – Descrição, especificação e valor (R\$, em reais) dos itens que compõem os investimentos iniciais e custos de operação para produzir 01 muda das espécies florestais *Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba* em viveiro florestal.

Descrição dos itens	Especificações	Custo unitário ^A (R\$)	Fator de conversão para produção de 1 muda ^B	Referência	Especificação convertida para 01 muda ^C	Custo por muda ^D (R\$)
Investimento inicial						
Tubete de 120 cm³	1000 unidades	210,00	-	Santos <i>et al.</i> (2000); Viégas (2015)	1 tubete	0,2100
Bandeja para tubetes de 120 cm³	unidade = 96 células	20,00	-		1 célula	0,2100
Recipiente biodegradável (ø 50 mm)*	papel biodegradável + custo de aquisição da máquina	246.560,00	1.000.000 de mudas	Schorn; Formento (2003); Viégas (2015)	1 muda	0,2466
Substrato comercial	saco de 20 kg	34,00	volume do tubete	Abreu <i>et al.</i> (2017); Monteiro <i>et al.</i> (2019)	0,045 kg por tubete	0,0765
					0,1104 kg por recipiente biodegradável	0,1877
Fertilizante de liberação controlada NPK (18-05-09)	25 kg	808,40	0,0065 kg de NPK (18-05-09) por tubete de 120 cm³	Tonetto (2018)	0,0065 kg por tubete	0,2102
			0,0065 kg de NPK (18-05-09) por pote Ellepot®		0,008 kg por pote Ellepot®	0,2587
Custos de operação						
Energia elétrica para irrigação (aspersor com vazão de 200L/h)	1KW hora ⁻¹	0,80	Área de 1 tubete: 0,001075 m²	Tonetto (2018)	0,00003235 h (para irrigar 6 mm dia ⁻¹)	0,000026
					0,00004837 h (para irrigar 9 mm dia ⁻¹)	0,000039

continua... 185

... continuação

			Área de 1 pote Ellepot®: 0,001963 m ²		0,00008835 h (para irrigar 9 mm dia ⁻¹)*	0,000071
Inseticida sistêmico	recipiente de 1 litro	177,80	0,04 L (diluição em 20 L de água, para 10.000 mudas)	Andrade (2009); Andrade <i>et al.</i> (2020); Nouhra <i>et al.</i> (2021); Tonetto (2018); Viana <i>et al.</i> (2018)	0,000004	0,000711
Inseticida e acaricida de contato*	recipiente de 1 litro	269,00	0,04 L (diluição em 20 L de água, para 10.000 mudas)		0,000004	0,001076
Fungicida e acaricida de contato	saco de 1 kg	55,00	0,06 kg (diluição em 20 L de água, para 10.000 mudas)		0,000006	0,000330
Fungicida mesostêmico e sistêmico*	recipiente de 1 litro	200,00	0,1 L (diluição em 20 L de água, para 10.000 mudas)		0,00001	0,002000
Depreciação da máquina modelo H111 *	vida útil da máquina ~ 20 anos (240 meses)	180.000,00	1.000.000 de mudas	Löfsten (2000); Miranda <i>et al.</i> (2021)	R\$ 750,00	0,000750
Manutenção da máquina modelo H111*	1 ano	15.300,00	1.000.000 de mudas		R\$ 1.275,00	0,001275

^APesquisa de preço realizada entre novembro e dezembro de 2024 para as especificações de cada item. ^Bfator de conversão para transformar o item em uma unidade unitária correspondente a 01 muda. ^CFertilizante: obtido por regra de três entre fator de conversão para NPK (18-05-09) e volume do tubete (120 cm³) ou recipiente biodegradável (294,5 cm³); inseticidas e fungicidas: obtidos por regra de três entre fator de conversão e 01 muda; e energia elétrica: obtido por regra de três entre fator de conversão e quantidade de irrigação (6 mm dia⁻¹ no clima atual ou 9 mm dia⁻¹ no clima futuro) por área do tubete (0,001075 m²) ou recipiente biodegradável (0,001963 m²). ^DInvestimentos iniciais: substrato - obtido por regra de três entre valor unitário e fator de conversão (volume do tubete ou recipiente biodegradável); tubete - obtido pela razão entre especificação (1000) e valor unitário; bandeja - obtido pela especificação (96) e valor unitário; fertilizante NPK (18-05-09): obtido por regra de três entre o valor unitário (saco de 20 kg) e a especificação convertida para 01 muda; custos de operação: inseticidas - obtidos por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda; fungicidas - obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda; energia elétrica - obtido pela multiplicação entre o valor unitário (R\$ 0,80) e o tempo de irrigação diária, considerando 6mm dia⁻¹ no clima atual (0,00003235 h) e 9 mm dia⁻¹ no clima futuro (0,00004837 h se uso do tubete ou 0,00008835 h se uso do recipiente biodegradável); depreciação da máquina modelo H111 produtora de recipientes biodegradáveis - obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda; o custo de manutenção preventiva considerou-se 8,5 % ao ano (média entre 5% e 12% do valor inicial do equipamento por ano). *Itens considerados somente no clima futuro.

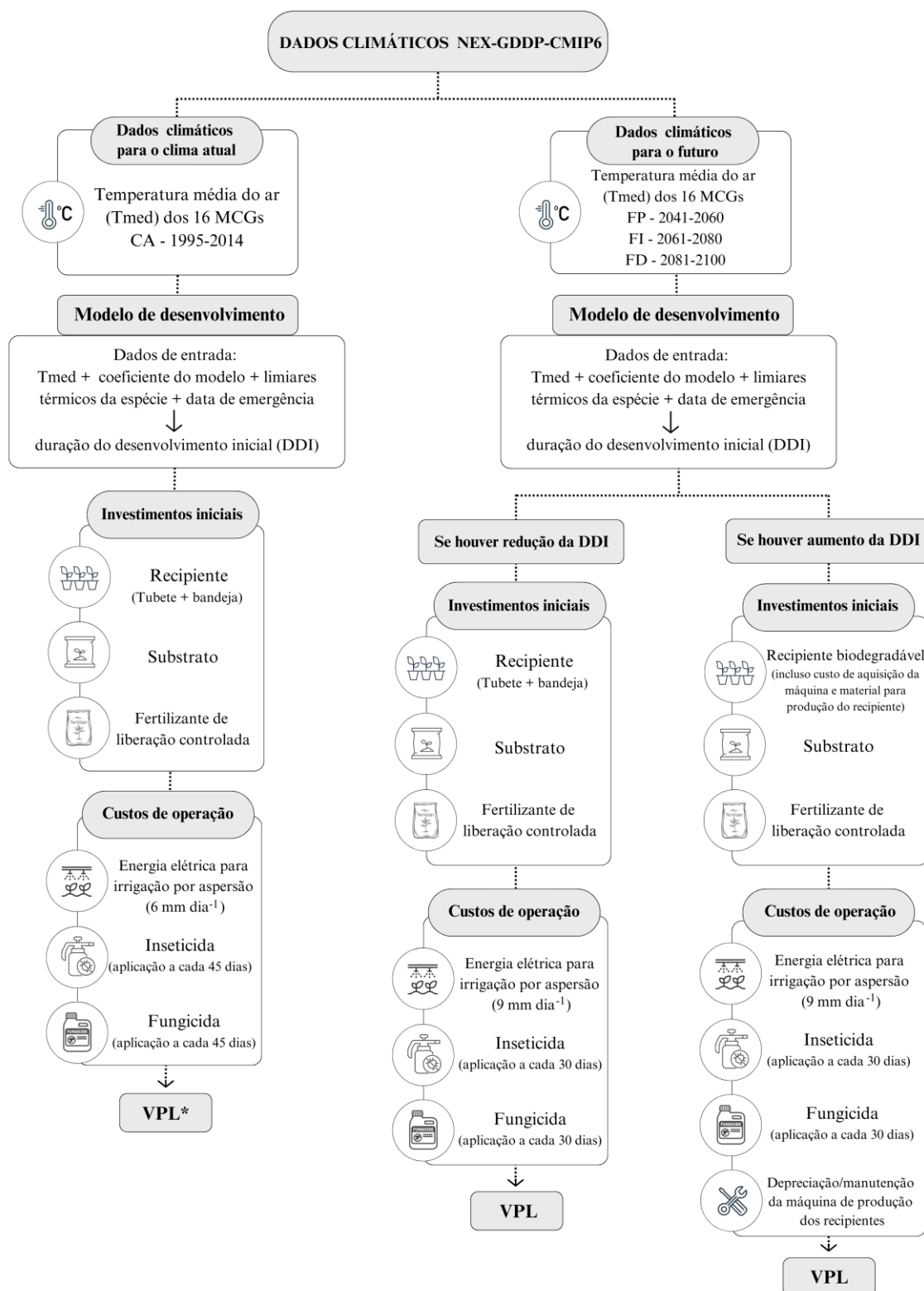


Figura 5.1 – Representação esquemática das etapas de cálculo da viabilidade financeira para produzir uma muda de *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* no clima atual (CA, 1995-2014) e futuro próximo (FP, 2041-2060), intermediário (FI, 2061-2080) e distante (FD, 2081-2100) considerando a duração do desenvolvimento inicial (DDI) para cada uma das 12 datas de simulação de semeadura. *VPL = Valor Presente Líquido.

Tabela 5.2 - Datas de semeadura (DS), emergência e duração do desenvolvimento inicial (DDI, dias) para as cinco espécies florestais nativas (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*) usadas para simular o Valor Presente Líquido (VPL) no clima atual (CA -1995-2014) e projetar no futuro próximo (FP, 2041-2060), intermediário (FI, 2061-2080) e distante (FD, 2081-2100) nos três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Os valores de DDI referem-se a média (*ensemble mean*) dos valores de DDI simulados e projetados pelos 16 modelos climáticos do NEX-GGDP-CMIP6 (Capítulo IV).

Bauhinia forficata													
Data de semeadura			Data de emergência	CA	SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
					FP	FI	FD	FP	FI	FD	FP	FI	FD
DS1*	19 junho	07 julho	183	178	177	176	177	176	175	177	175	176	
DS2*	13 julho	04 agosto	177	174	174	173	174	173	174	173	173	176	
DS3	16 agosto	02 setembro	173	171	171	171	172	172	174	171	173	176	
DS4	16 setembro	17 outubro	170	170	170	170	170	171	173	170	172	176	
DS5	17 outubro	01 novembro	170	170	170	170	170	171	173	170	172	175	
DS6	14 novembro	24 novembro	171	170	170	170	170	171	173	170	172	175	
DS7	16 dezembro	26 dezembro	176	173	172	172	173	172	173	172	173	175	
DS8	17 janeiro	30 janeiro	185	179	180	176	178	176	175	177	175	175	
DS9	15 fevereiro	27 fevereiro	189	182	180	178	181	178	176	180	176	175	
DS10	15 março	22 março	191	183	181	179	182	178	176	181	177	175	
DS11	17 abril	05 maio	192	183	181	179	182	179	177	181	177	176	
DS12	16 maio	05 junho	189	182	180	178	181	178	177	180	177	177	
Ceiba speciosa													
Data de semeadura			Data de emergência	CA	SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
					FP	FI	FD	FP	FI	FD	FP	FI	FD
DS1*	19 junho	07 julho	192	176	174	170	175	171	168	173	168	169	
DS2*	13 julho	04 agosto	177	163	163	161	163	162	163	162	161	167	
DS3	16 agosto	02 setembro	163	155	155	155	156	157	160	155	158	166	
DS4	16 setembro	07 outubro	154	150	150	152	151	154	159	151	156	166	
DS5	17 outubro	27 outubro	150	148	149	150	149	153	158	149	155	165	
DS6	14 novembro	28 novembro	150	147	148	150	149	152	157	149	154	163	
DS7	16 dezembro	23 dezembro	163	154	154	154	154	155	159	154	156	163	
DS8	17 janeiro	27 janeiro	202	179	172	169	176	168	165	172	166	165	
DS9	15 fevereiro	22 fevereiro	216	191	184	179	186	176	170	183	172	167	
DS10	15 março	22 março	222	196	190	183	191	180	172	188	180	168	
DS11	17 abril	28 abril	223	198	192	186	193	183	174	190	177	171	
DS12	16 maio	02 junho	211	191	186	181	187	180	173	184	175	169	
Handroanthus chrysotrichus													
Data de semeadura			Data de emergência	CA	SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
					FP	FI	FD	FP	FI	FD	FP	FI	FD
DS1*	19 junho	07 agosto	162	154	155	154	155	156	158	155	156	163	

... continuação

DS2*	13 julho	14 agosto	159	153	153	153	154	155	158	153	155	164
DS3	16 agosto	23 setembro	148	147	148	150	149	153	159	149	155	166
DS4	16 setembro	21 outubro	143	145	147	149	147	152	158	148	155	166
DS5	17 outubro	07 novembro	141	144	146	149	147	151	158	147	154	165
DS6	14 novembro	05 dezembro	142	145	146	148	147	151	157	147	153	162
DS7	16 dezembro	02 janeiro	154	151	151	151	151	153	157	151	154	161
DS8	17 janeiro	06 fevereiro	185	168	164	161	166	161	160	164	160	161
DS9	15 fevereiro	01 março	196	176	171	167	173	165	161	170	163	160
DS10	15 março	12 abril	204	182	176	171	178	169	162	175	165	160
DS11	17 abril	02 maio	203	182	177	172	178	170	164	175	165	161
DS12	16 maio	07 junho	192	176	172	169	173	168	164	171	165	164

Handroanthus impetiginosus

Data de semeadura			Data de emergência	CA	SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
					FP	FI	FD	FP	FI	FD	FP	FI	FD
DS1*	19 junho	28 julho	145	140	139	138	140	139	138	139	138	140	
DS2*	13 julho	18 agosto	140	136	136	136	137	136	137	136	136	140	
DS3	16 agosto	09 setembro	137	134	135	135	135	136	137	135	136	140	
DS4	16 setembro	10 outubro	134	133	134	134	134	135	137	134	136	140	
DS5	17 outubro	01 novembro	133	133	133	134	133	135	137	134	136	140	
DS6	14 novembro	28 novembro	132	133	133	134	133	135	137	133	135	139	
DS7	16 dezembro	23 dezembro	133	133	133	134	134	135	137	134	135	139	
DS8	17 janeiro	01 fevereiro	143	138	137	137	137	136	137	137	137	138	
DS9	15 fevereiro	01 março	155	145	142	141	144	140	139	142	139	138	
DS10	15 março	31 março	162	150	147	144	148	143	140	147	142	139	
DS11	17 abril	05 maio	164	151	148	145	150	145	141	148	142	139	
DS12	16 maio	23 junho	156	147	145	143	146	143	141	145	141	141	

Tabebuia roseoalba

Data de semeadura			Data de emergência	CA	SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
					FP	FI	FD	FP	FI	FD	FP	FI	FD
DS1*	19 junho	04 agosto	152	147	147	146	147	146	147	147	146	149	
DS2*	13 julho	21 agosto	148	145	145	144	145	145	146	145	145	149	
DS3	16 agosto	16 setembro	145	143	143	144	143	144	146	143	145	149	
DS4	16 setembro	18 outubro	142	142	142	143	143	144	146	143	145	149	
DS5	17 outubro	07 novembro	142	142	142	143	142	144	146	142	144	148	
DS6	14 novembro	05 dezembro	142	142	142	143	142	143	145	142	144	148	
DS7	16 dezembro	28 dezembro	144	143	143	143	143	144	145	143	144	147	
DS8	17 janeiro	08 fevereiro	157	150	148	147	149	147	146	148	147	147	
DS9	15 fevereiro	01 março	165	154	152	150	153	150	148	152	149	147	
DS10	15 março	06 abril	170	158	156	153	157	152	149	155	150	147	
DS11	17 abril	10 maio	171	159	156	154	157	153	150	156	151	148	
DS12	16 maio	12 junho	166	156	154	152	155	152	150	154	150	149	

Os valores da DDI foram obtidos usando os modelos de desenvolvimento calibrados e avaliados no capítulo IV, considerando aquele modelo mais adequado para cada espécie: modelo Filocrono para *C. speciosa* e *H. chrysotrichus*; modelo Wang Engel para *B. forficata*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*. Os valores no corpo da tabela referem-se aos valores médios da duração do desenvolvimento inicial (*ensemble mean*) simulados para o CA e projetados para os três períodos futuros (FP, FI e FD nos três SSPs) pelos 16 modelos climáticos do NEX-GGDP-CMIP6 (Capítulo IV). *Por brevidade, foram considerados somente 12 datas de semeadura, excluindo

aquelas semeadas entre junho/2022 e julho/2022 (Tabela 4.1).

5.2.2 Avaliação da viabilidade financeira e sensibilidade para produzir uma muda no clima futuro

Para avaliar a viabilidade financeira para produzir uma muda no clima futuro foi considerada as mudanças e a porcentagem de mudança nos valores do VPL calculado para o CA, FP, FI e FD (nos três SSPs) em cada data de semeadura (DS1 a DS12) e para cada espécie florestal. Neste estudo, o termo ‘mudança’ se refere a diferença do VPL projetado no FP, FI e FD (e SSPs), menos os respectivos valores de VPL simulado para CA, e a porcentagem de mudança refere-se a razão entre a mudança em cada período futuro e o VPL no CA (Fagundes, 2023).

Para elucidar o impacto de cada item do investimento inicial e custos de operação no VPL, foi realizada uma análise de sensibilidade, com o objetivo de identificar os itens com maiores (menores) variações. Para isso, cada componente dos investimentos iniciais (recipiente tradicional (tubete + bandeja), recipiente biodegradável, substrato e fertilizante) e dos custos de operação (eletricidade para irrigação por aspersão, inseticida, fungicida, depreciação e manutenção da máquina para fabricar o recipiente biodegradável) foi ajustado em $\pm 10\%$, seguindo recomendações de Lazzerini *et al.* (2022) e Ribeiro *et al.* (2019). Essa análise de sensibilidade foi realizada usando os valores médios de duração do desenvolvimento inicial para cada espécie, considerando cada data de semeadura dentro de cada intervalo de tempo (CA, FP, FI, FD) no SSP3-7.0, por representar a condição intermediária entre os três SSPs usados nesse estudo.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vale ressaltar que este estudo representa a primeira avaliação sobre o impacto das medidas de adaptação para mitigar o aquecimento global na viabilidade financeira da produção de mudas de *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* usando os modelos climáticos de alta resolução do NEX-GDDP-CMIP6.

Os aumentos de temperatura do ar projetados pelos 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6, entre 1,3°C (FP no SSP2-4.5) e 4,5 °C (FD no SSP5-8.5) para Itajubá (Figura 4.5), poderão alterar a duração do desenvolvimento inicial das cinco espécies, com reduções entre -1 e -54 dias, e aumentos entre +1 a +24 dias (Tabela 5.3)

Tabela 5.3 - Diferença (em dias) entre a duração do desenvolvimento inicial (DDI) projetada no futuro próximo (FP, 2041-2060), intermediário (FI, 2061-2080) e distante (FD, 2081 - 2100) e a DDI simulada para o clima atual (1995 – 2014) para as espécies florestais estudadas (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus* e *Tabebuia roseoalba*) nos três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5).

Cenário socioeconômico	Período	Data de semeadura											
		DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
Bauhinia forficata													
SSP2-4.5	FP	-5	-3	-2	0	0	-1	-3	-6	-7	-8	-9	-7
	FI	-6	-3	-2	0	0	-1	-4	-5	-9	-10	-11	-9
	FD	-7	-4	-2	0	0	-1	-4	-9	-11	-12	-13	-11
SSP3-7.0	FP	-6	-3	-1	0	0	-1	-3	-7	-8	-9	-10	-8
	FI	-7	-4	-1	1	1	0	-4	-9	-11	-13	-13	-11
	FD	-8	-3	1	3	3	2	-3	-10	-13	-15	-15	-12
SSP5-8.5	FP	-6	-4	-2	0	0	-1	-4	-8	-9	-10	-11	-9
	FI	-8	-4	0	2	2	1	-3	-10	-13	-14	-15	-12
	FD	-7	-1	3	6	5	4	-1	-10	-14	-16	-16	-12
Ceiba speciosa													
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
SSP2-4.5	FP	-16	-14	-8	-4	-2	-3	-9	-23	-25	-26	-25	-20
	FI	-18	-14	-8	-4	-1	-2	-9	-30	-32	-32	-31	-25
	FD	-22	-16	-8	-2	0	0	-9	-33	-37	-39	-37	-30
SSP3-7.0	FP	-17	-14	-7	-3	-1	-1	-9	-26	-30	-31	-30	-24
	FI	-21	-15	-6	0	3	2	-8	-34	-40	-42	-40	-31
	FD	-24	-14	-3	5	8	7	-4	-37	-46	-50	-49	-38
SSP5-8.5	FP	-19	-15	-8	-3	-1	-1	-9	-30	-33	-34	-33	-27
	FI	-24	-16	-5	2	5	4	-7	-36	-44	-42	-46	-36
	FD	-23	-10	3	12	15	13	0	-37	-49	-54	-52	-42
Handroanthus chrysotrichus													
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
SSP2-4.5	FP	-8	-6	-1	2	3	3	-3	-17	-20	-22	-21	-16
	FI	-7	-6	0	4	5	4	-3	-21	-25	-28	-26	-20
	FD	-8	-6	2	6	8	6	-3	-24	-29	-33	-31	-23
SSP3-7.0	FP	-7	-5	1	4	6	5	-3	-19	-23	-26	-25	-19
	FI	-6	-4	5	9	10	9	-1	-24	-31	-35	-33	-24
	FD	-4	-1	11	15	17	15	3	-25	-35	-42	-39	-28
SSP5-8.5	FP	-7	-6	1	5	6	5	-3	-21	-26	-29	-28	-21
	FI	-6	-4	7	12	13	11	0	-25	-33	-39	-38	-27
	FD	1	5	18	23	24	20	7	-24	-36	-44	-42	-28

continua...

... continuação

		<i>Handroanthus impetiginosus</i>											
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
SSP2-4.5	FP	-5	-4	-3	-1	0	1	0	-5	-10	-12	-13	-9
	FI	-6	-4	-2	0	0	1	0	-6	-13	-15	-16	-11
	FD	-7	-4	-2	0	1	2	1	-6	-14	-18	-19	-13
SSP3-7.0	FP	-5	-3	-2	0	0	1	1	-6	-11	-14	-14	-10
	FI	-6	-4	-1	1	2	3	2	-7	-15	-19	-19	-13
	FD	-7	-3	0	3	4	5	4	-6	-16	-22	-23	-15
SSP5-8.5	FP	-6	-4	-2	0	1	1	1	-6	-13	-15	-16	-11
	FI	-7	-4	-1	2	3	3	2	-6	-16	-20	-22	-15
	FD	-5	0	3	6	7	7	6	-5	-17	-23	-25	-15
		<i>Tabebuia roseoalba</i>											
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
SSP2-4.5	FP	-5	-3	-2	0	0	0	-1	-7	-11	-12	-12	-10
	FI	-5	-3	-2	0	0	0	-1	-9	-13	-14	-15	-12
	FD	-6	-4	-1	1	1	1	-1	-10	-15	-17	-17	-14
SSP3-7.0	FP	-5	-3	-2	1	0	0	-1	-8	-12	-13	-14	-11
	FI	-6	-3	-1	2	2	1	0	-10	-15	-18	-18	-14
	FD	-5	-2	1	4	4	3	1	-11	-17	-21	-21	-16
SSP5-8.5	FP	-5	-3	-2	1	0	0	-1	-9	-13	-15	-15	-12
	FI	-6	-3	0	3	2	2	0	-10	-16	-20	-20	-16
	FD	-3	1	4	7	6	6	3	-10	-18	-23	-23	-17

Em azul: projeções de redução da DDI; em branco: sem alteração na DDI; em laranja: projeções de aumento da DDI nos três SSPs para cada espécie florestal e em cada data/mês de semeadura.

Conforme mostrado no capítulo IV, para as cinco espécies florestais são projetadas reduções mais intensas da DDI (em magnitude e frequência) comparada aos aumentos, com padrões ligeiramente distintos entre as datas de semeadura, períodos e SSPs. Aumentos na DDI foram projetados nas DS (3 a 6) simuladas entre agosto/setembro e novembro/dezembro, enquanto reduções foram projetadas nas demais DSs (1, 2, 7 a 12) simuladas entre fevereiro e julho.

Embora as reduções projetadas da DDI sejam mais intensas do que os aumentos para a maioria das datas de semeadura (Tabela 5.3), a implementação de medidas adaptativas será fundamental para manter a qualidade das mudas e a viabilidade técnica e financeira dos viveiros. Essas medidas devem ser ajustadas conforme a data de semeadura e o período (CA, FP, FI, FD), influenciando assim os itens considerados no cálculo do VPL. Nas datas de semeadura onde são projetados aumentos da DDI, são necessários o uso de recipientes de maior volume, a aplicação de fertilizantes de liberação controlada, o aumento da frequência de tratamentos fitossanitários com inseticidas e fungicidas e a intensificação da irrigação (Costa; Streck, 2018; Fagundes, 2023; Florêncio *et al.*, 2022; Reis *et al.*, 2021). Nas datas de semeadura onde são projetadas reduções da DDI, não é necessário o aumento do volume do recipiente. No

entanto, são recomendados o uso de fertilizantes de liberação controlada, aumento da irrigação e da frequência de aplicações de inseticidas e fungicidas (Fagundes, 2023; Martins *et al.*, 2023b; Reis *et al.*, 2021).

Assim, no CA foram considerados no cálculo do VPL os itens mais usados pelos viveiristas consultados: I) recipiente (tubete e bandeja) com volume de 120 cm³; II) substrato a base de casca de pinus, pó de coco, vermiculita, calcário; III) fertilizante de liberação controlada NPK (formulação 18-05-09); IV) energia elétrica para irrigação por aspersores com vasão de 200L/h e aplicação de 6 mm dia⁻¹ (~ 0,002 minutos dia⁻¹), representando um custo energético de R\$ 0,000026 por tubete dia⁻¹, e V) aplicação de inseticida/acaricida Matrine® (grupo químico: alcalóides quinolizidínicos) e fungicida Kumulus® (grupo químico: enxofre - inorgânico) em intervalos de 45 dias (Alves *et al.*, 2020; Andrade *et al.*, 2020; Tonetto; 2018; Viana *et al.*, 2018).

Nos períodos futuros (FP, FI e FD e SSPs) e nas datas de semeadura com projeções de aumento da DDI (DS3 a DS6) foram considerados os investimentos iniciais: recipiente biodegradável Ellepot® produzido a partir de uma máquina especializada que compacta um cilindro de papel especial e biodegradável com o substrato (Apremavi, 2024; Ellepot, 2024), substrato (casca de pinus, pó de coco, vermiculita, calcário), fertilizante de liberação controlada NPK (18-05-09); e os custos de operação: energia elétrica para irrigação por aspersores com vasão de 200L/h e aplicação de 9 mm dia⁻¹, representando um custo de R\$ 0,000071 por recipiente dia⁻¹ (~ 0,005 minutos dia⁻¹) (Alves *et al.*, 2020; Tonetto; 2018); custos de depreciação (obtidos pela razão entre o valor da máquina e sua vida útil (em meses), convertido para 01 muda) e manutenção (8,5 % ao ano do valor inicial do equipamento, convertido para 01 muda) da máquina para produção do recipiente biodegradável.

Ainda nos períodos futuros, porém nas datas de semeadura com projeções de redução da DDI (DS1, DS7 a DS12) foram considerados como investimentos iniciais: recipiente (tubete e bandeja) com volume de 120 cm³, substrato (casca de pinus, pó de coco, vermiculita, calcário), e fertilizante de liberação controlada NPK (18-05-09), e como custos de operação: energia elétrica para irrigação por aspersores com vasão de 200L/h e aplicação de 9 mm dia⁻¹, representando um custo de R\$ 0,000039 por tubete dia⁻¹ (~ 0,003 minutos dia⁻¹) (Alves *et al.*, 2020; Tonetto; 2018). Em todas as datas de semeaduras no FP, FI e FD (nos três SSPs) foram considerados a aplicação de inseticida/acaricida Oberon® (grupo químico: cetoenol) e fungicida Nativo® (grupos químicos: estrobilurina e triazol), ambos de amplo espectro (Andrade, 2009; Nuhra *et al.*, 2021) em intervalos de 30 dias. Independentemente do período,

é importante destacar que os custos com energia elétrica foram mantidos constantes, e obtidos pela multiplicação da potência da bomba de irrigação (3677,45 Watts), número de dias, tempo de irrigação (horas dia⁻¹) e valor do kWh de energia para área rural da região, considerado como R\$ 0,80/kWh (Cemig, 2024).

Quando se analisam os valores de VPL é possível notar que as alterações na DDI (Figura 4.6) e a adoção de medidas adaptativas gerará pequeno impacto sobre a viabilidade financeira para a produção de mudas das cinco espécies estudadas no clima futuro (Figuras 5.2 a 5.6, Apêndices 5.1 a 5.5). De maneira geral, são projetados ligeiros aumentos no VPL entre ~ 0,2 % (R\$ 0,0016) a 3,5 % (R\$ 0,0254), demonstrando que os itens que compõe os investimentos iniciais e os custos de operação exercem pouca influência nos valores de VPL (até 3,5%).

Quando se analisa as datas de semeadura onde são projetados aumentos da DDI (DS3 = agosto a DS6 = novembro), a adoção de medidas de adaptação será responsável por um aumento no VPL entre 0,2 a 0,8%, representando um custo adicional de R\$0,0016 a R\$0,0060 para produzir uma muda. Esses valores são semelhantes entre as espécies e SSPs. Além disso, mesmo diante de maiores aumentos na DDI, o impacto financeiro em termos de VPL, permanece relativamente pequeno. Por exemplo, para a *H. chrysotrichus*, o maior aumento projetado na DDI (até 24 dias no FD e SSP5-8.5) (Tabela 5.3) resulta em um aumento de 0,8% no VPL, enquanto menores aumentos (até ~7 dias) para *H. impetiginosus* e *T. roseoalba* (no FD e SSP5-8.5) geram um impacto de ~0,5% no VPL.

Por outro lado, quando se analisa as datas de semeadura com projeção de redução da DDI (Tabela 5.3) - DS1, DS2, DS7 a DS12 (dezembro a julho) - é possível observar um aumento maior nos custos para a produção de uma muda, comparado as datas com projeções de aumento da DDI. Esse padrão é similar entre as espécies, períodos e SSPs. Por exemplo, as reduções projetadas na DDI para *C. speciosa* e *H. chrysotrichus* (de -1 a -44 dias) e para *B. forficata* (entre -1 a -16 dias) resultaram em aumentos no VPL entre ~2,3% (~R\$ 0,016) a ~3,5% (~R\$ 0,0254) no FD e SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente (Figuras 5.2, 5.3 e 5.4).

Em todas as espécies estudadas, os custos foram mais elevados (entre 2,3% a 3,5%) nas datas de semeadura com redução da DDI e menores (entre 0,2 a 0,8%) nas datas com aumento da DDI, com magnitudes ligeiramente diferentes entre as datas de semeadura, períodos e SSPs. Entre as espécies, a *B. forficata* apresentou o maior aumento no VPL (entre 3 e 3,5%) nas datas de semeadura com redução da DDI, enquanto a *H. impetiginosus* apresentou os menores aumentos (2,2 a 2,7%). Já a *C. speciosa* apresentou o menor aumento no VPL nas datas com aumento da DDI (entre 0,2 a 0,7%).

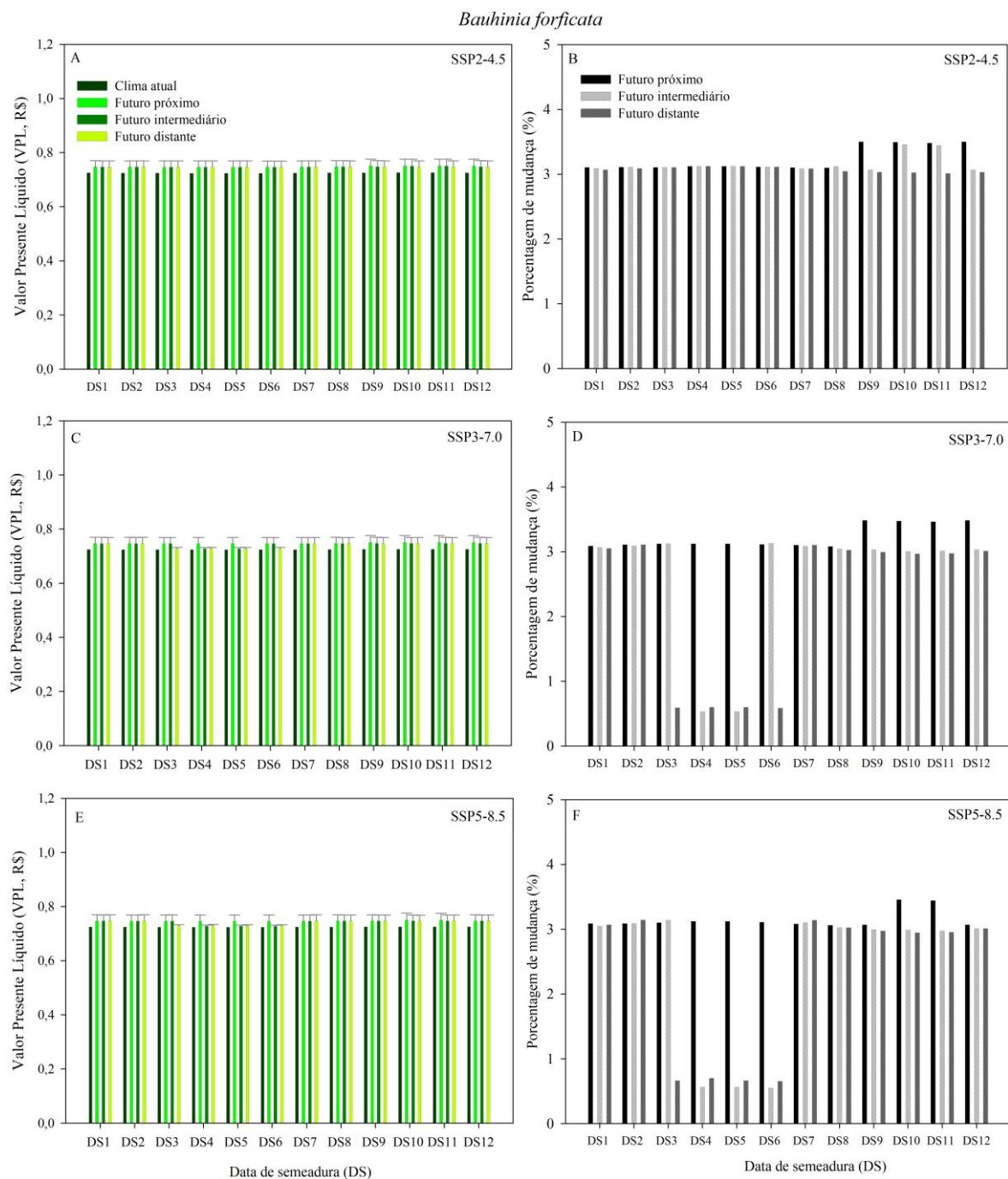


Figura 5.2 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Bauhinia forficata* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.

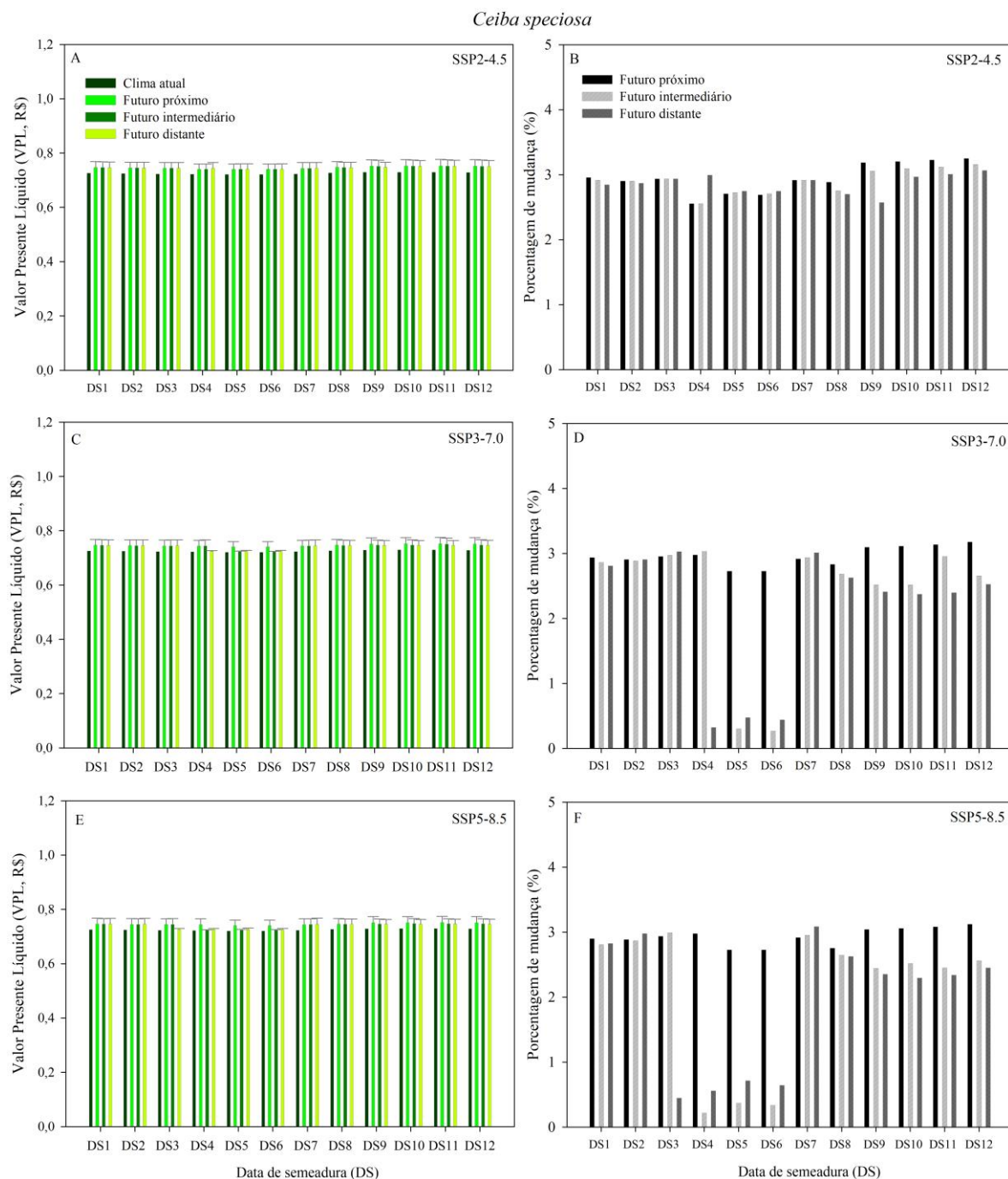


Figura 5.3 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Ceiba speciosa* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.

Handroanthus chrysotrichus

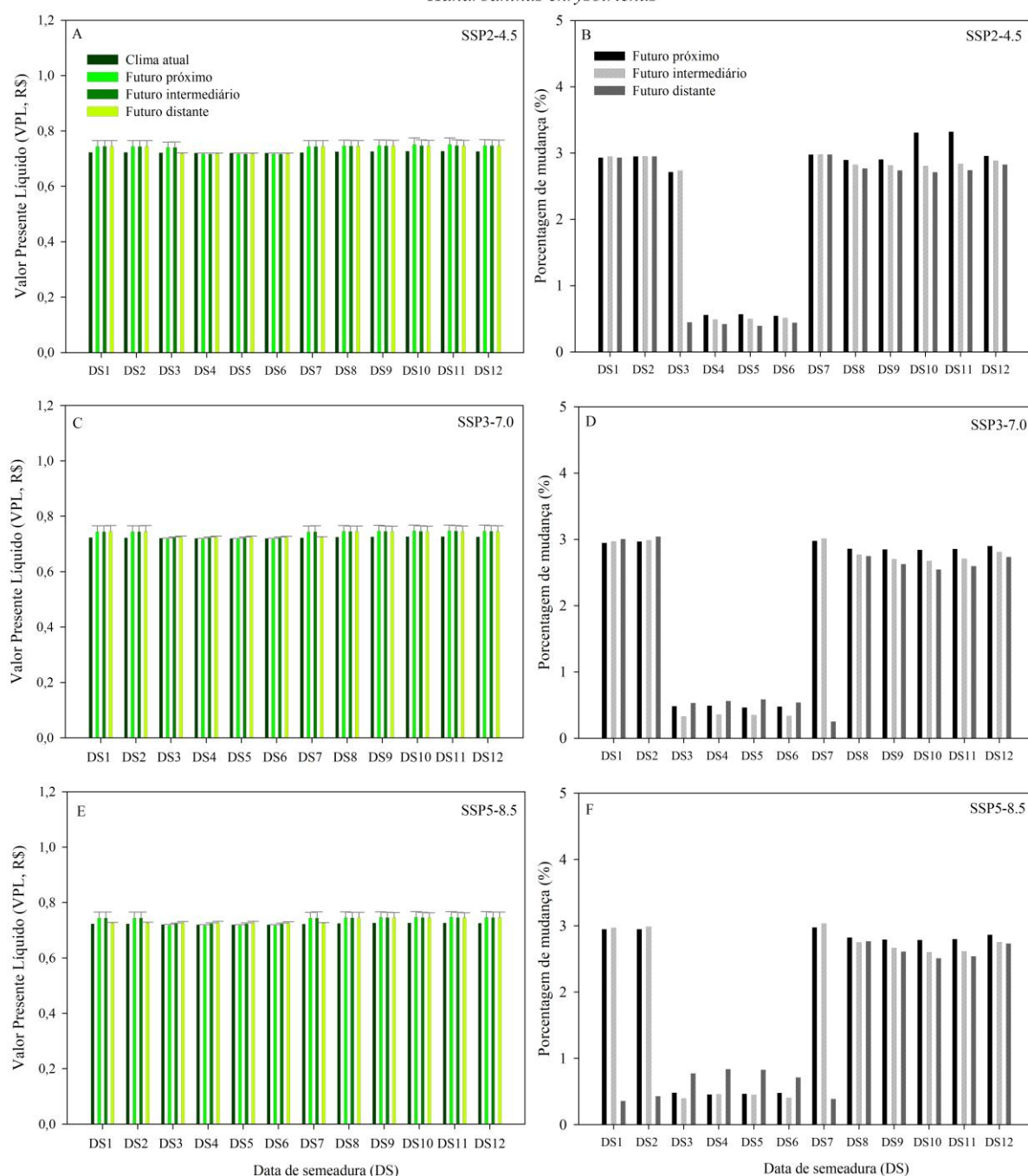


Figura 5.4 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Handroanthus chrysotrichus* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.

Handroanthus impetiginosus

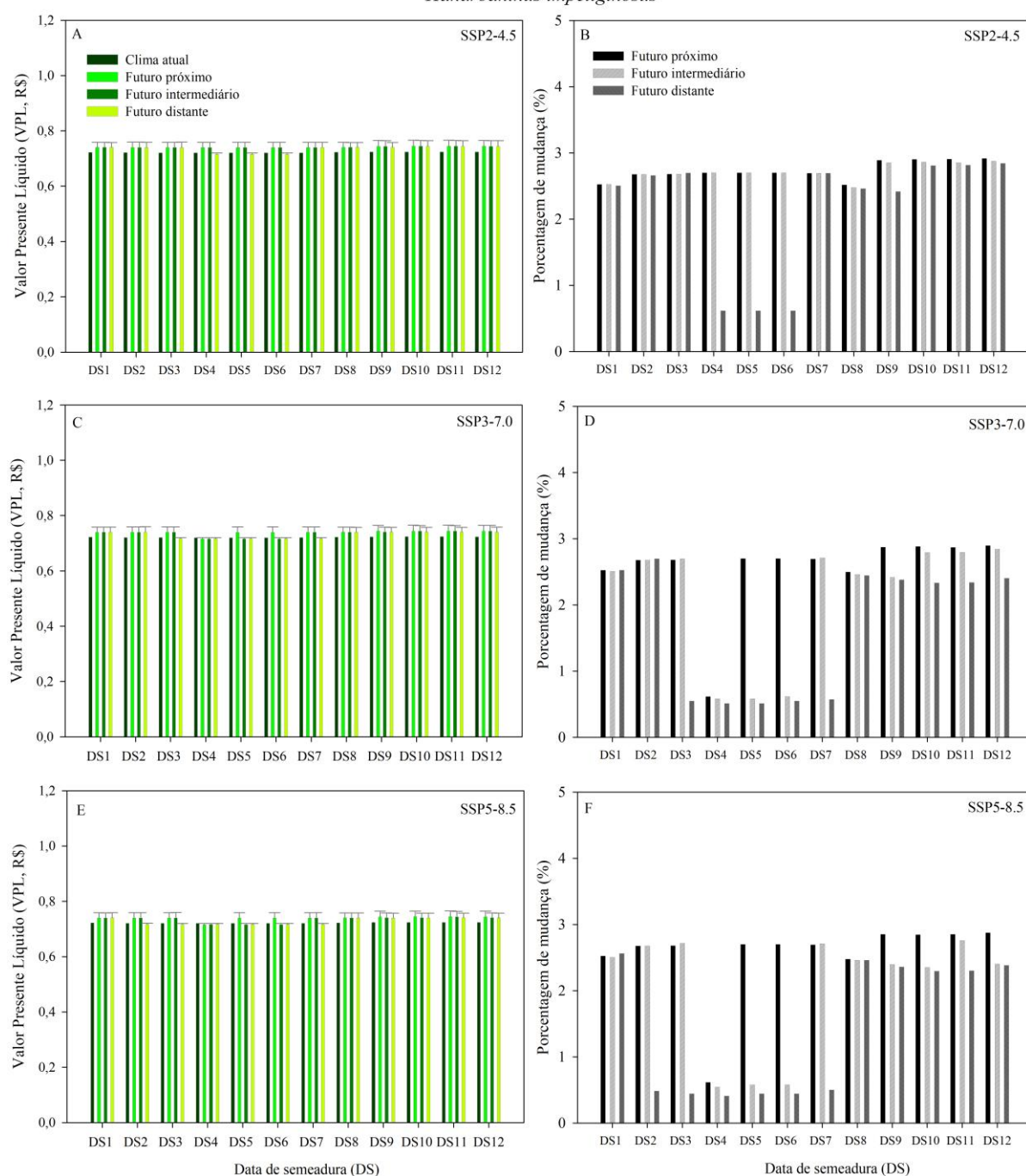


Figura 5.5 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Handroanthus impetiginosus* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.

Tabebuia roseoalba

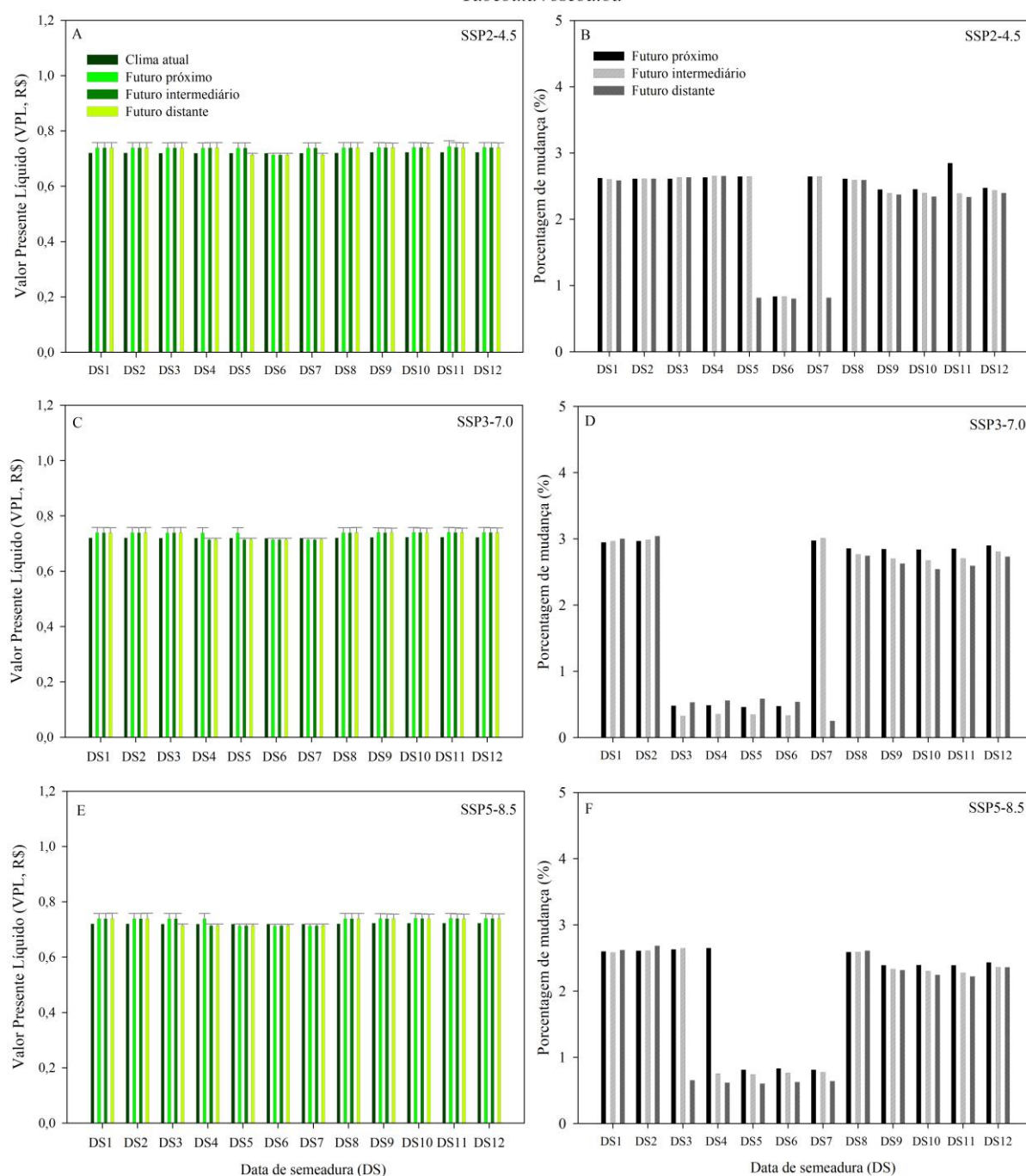


Figura 5.6 - Valor presente líquido (VPL, em R\$) (painéis A, C e E) e porcentagem de mudança (painéis B, D e F) nos custos para produção de uma muda de *Tabebuia roseoalba* calculados para o clima atual (CA, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060), futuro intermediário (FI, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: painéis A e B, SSP3-7.0: painéis C e D, e SSP5-8.5: painéis E e F) para as 12 datas de semeadura. As barras verticais nos painéis A, C e E representam a mudança dada pela diferença entre o VPL no FP, FI e FD (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CA para cada data de semeadura.

Os padrões observados neste estudo diferem totalmente com os encontrados por Fagundes (2023), que identificou aumentos nos custos para produzir uma muda de *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. e *Platygyamus regnellii* Benth variando de ~9% nas datas com redução da DDI até 137% nas datas com aumento da DDI. Diferentemente do esperado, este estudo indica que uma maior DDI não necessariamente leva a custos mais elevados, assim como a redução da DDI não implica em menor custos de produção.

Para elucidar esse comportamento, foi realizada a análise de sensibilidade para cada componente dos investimentos iniciais e custos de operação (Figura 5.7). Como os padrões observados foram semelhantes em todas as espécies, períodos e SSPs, por brevidade, optou-se por mostrar a análise de sensibilidade média para o clima atual (painel A), e futuro (FP, FI e FD no SSP3-7.0) considerando as datas de semeadura com redução (painel B) e aumento (painel C) da DDI.

No clima atual os custos mais elevados (barras horizontais maiores) estão associados a gastos com recipientes (tubete + bandeja), fertilizante de liberação controlada e substrato, (Figura 5.7, painel A). Os custos de operação, principalmente aplicação de fungicidas e inseticidas não tiveram impacto significativo no VPL. Esses resultados destacam a forte dependência de insumos básicos na fase inicial de produção, enquanto os gastos com energia elétrica para irrigação tiveram o menor impacto, e os defensivos (inseticidas e fungicidas) não tiveram nenhum impacto no VPL.

Nos períodos futuros (FP, FI e FD) e nas datas de semeadura com redução na DDI (Figura 5.7, painel B), os impactos dos custos são similares ao clima atual (tubete, bandeja, fertilizante de liberação controlada e substrato). No entanto, observa-se um aumento do impacto dos custos de operação (em ordem decrescente de impacto): energia, fungicida e inseticida. Ainda no período futuro, porém para as datas de semeadura com aumento da DDI (Figura 5.7, painel C), os itens recipiente biodegradável, fertilizante de liberação controlada e substrato são os responsáveis pelos maiores impactos no VPL. Ou seja, nas DS3 a DS6, o aumento do volume do recipiente biodegradável aumenta a quantidade de substrato, sem alterar a quantidade do fertilizante, que é uma vantagem da adoção desta medida de adaptação. No entanto, esses custos apresentam uma variação ligeiramente menor (menor tamanho da barra vertical) quando comparados ao cenário de redução da DDI (e ao clima atual). Isso indica que o uso do recipiente biodegradável, além de ser uma alternativa sustentável e ambientalmente adequada é viável economicamente. Assim, a substituição dos recipientes tradicionais, como tubete e bandeja, pelo recipiente biodegradável não representa um impacto significativo nos investimentos

iniciais para a produção de mudas.

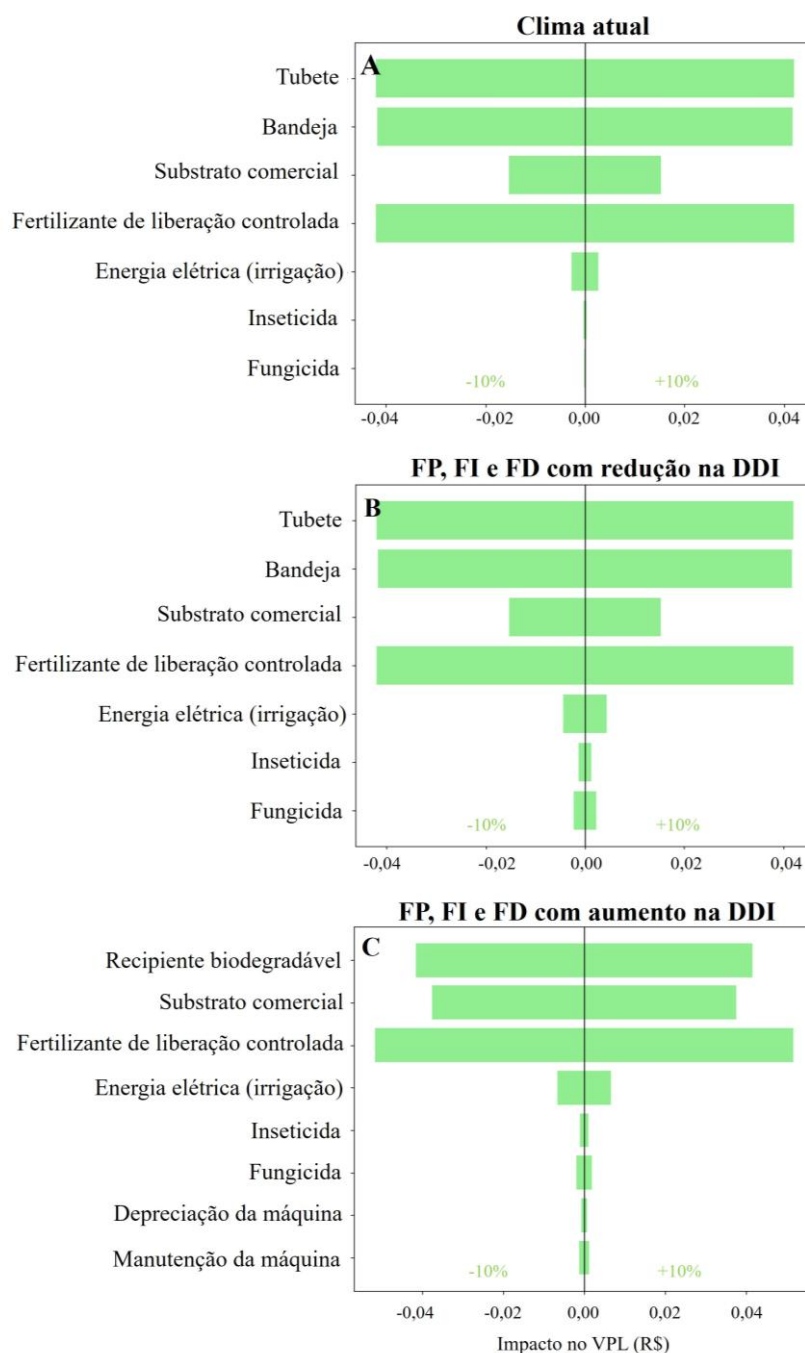


Figura 5.7 – Análise de sensibilidade de cada componente dos investimentos iniciais (recipiente, substrato, fertilizante) e dos custos de operação (energia elétrica, inseticida, fungicida, depreciação e manutenção da máquina de produção dos recipientes biodegradáveis - quando aplicável) no clima atual (1995-2014, painel A), e nos períodos futuros (2041-2100) no cenário socioeconômico intermediário (SSP3-7.0) com redução (painel B) e aumento (painel C) projetado da duração do desenvolvimento inicial (DDI).

Com relação ao substrato, dado seu impacto no VPL no clima atual e futuro, é recomendável o uso de formulações sustentáveis e de baixo custo, como aquelas à base de resíduos orgânicos. Recipientes de maior volume são recomendados quando há maior DDI, e portanto maior permanência das mudas nos viveiros florestais para favorecer o desenvolvimento radicular e a distribuição mais uniforme das raízes no substrato (Chaves Junior, 2022; Oliveira *et al.*, 2011).

Nesse sentido, entre os recipientes biodegradáveis, destaca-se o recipiente com denominação comercial Ellepot®, uma inovação recentemente introduzida no mercado brasileiro. Esse sistema utiliza uma lâmina de papel biodegradável que permite o crescimento de raízes laterais sem alterar a arquitetura natural do sistema radicular das mudas. Além disso, oferece uma opção de volume maior que os recipientes tradicionais ($>120\text{ cm}^3$) e é composto por fibras de celulose, com tempo de decomposição variando entre 5 e 18 meses após o plantio. O recipiente biodegradável elimina a necessidade de recipientes plásticos, como saquinhos ou tubetes, permitindo o plantio direto sem remoção da embalagem. Isso reduz a deformação das raízes e melhora a taxa de sobrevivência de mudas mais sensíveis (Apremavi, 2024; Nogueira, 2023; Viégas, 2015). Além de ser uma solução sustentável, essa tecnologia pode gerar renda adicional por meio da comercialização de recipientes biodegradáveis para outros viveiristas.

Outra vantagem é a possibilidade de alugar as máquinas de produção por períodos determinados, reduzindo a necessidade de altos investimentos iniciais. Apesar de ter um custo inicial mais alto comparado aos tubetes reutilizáveis, ela vem ganhando adesão entre viveiristas no Brasil devido às suas vantagens operacionais e comerciais. Entre os viveiristas consultados neste estudo, um deles utiliza essa tecnologia desde 2019, produzindo ~1 milhão de mudas por ano. Com base nos resultados deste estudo, esta tecnologia é indicada para substituir as embalagens plásticas tradicionais no clima atual e futuro.

Embora o fertilizante de liberação controlada exerça impacto no VPL no clima atual e futuro, seu uso já é amplamente adotado em viveiros devido à sua eficiência. Esse insumo libera os nutrientes gradualmente, garantindo que as necessidades nutricionais das mudas sejam atendidas durante todo o tempo de permanência no viveiro (Irfan *et al.*, 2017; Tonetto, 2018). Quando combinado com substrato de alta qualidade, pode contribuir para reduzir a DDI, e minimizar as perdas de nutrientes por lixiviação e volatilização. Além disso, seu uso otimiza o crescimento das mudas promovendo aumentos na área foliar e no diâmetro do coleto, resultando em maior vigor e qualidade (Oliveira *et al.*, 2021).

Já os gastos com energia elétrica no período futuro decorrente da intensificação da irrigação (9 mm dia⁻¹) representam um pequeno aumento nos custos de operação dado o maior consumo de eletricidade. No entanto, essa estratégia é fundamental em todas as datas de semeadura para repor a quantidade de água perdida por evapotranspiração, projetada para atingir 40 mm mês⁻¹ em Itajubá no FD (Alves *et al.*, 2020). Além disso, os gastos com inseticidas e fungicidas também terão impacto no VLP no clima futuro devido ao aumento da frequência de aplicação, necessário para mitigar a maior incidência (e abundância) de pragas e doenças projetados ao longo do século XXI (Dias *et al.*, 2024; Florêncio *et al.*, 2022; Mota *et al.*, 2023). Nesse sentido, o aumento da temperatura pode triplicar a abundância relativa de pragas (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2020) e favorecer sua multiplicação, dispersão e redução do intervalo entre gerações (Bettioli *et al.*, 2017). Adicionalmente, o aumento da umidade decorrente da intensificação da irrigação prolongará a duração do molhamento foliar, criando condições favoráveis ao desenvolvimento e infecção por patógenos (Santos *et al.*, 2013) como fungos *Cylindrocladium* spp., *Fusarium* spp. e *Rhizoctonia solani* (Parisi *et al.*, 2019).

Os aumentos projetados no VPL entre 0,2%, que representa ~R\$ 0,0016, a 3,5%, que representa ~R\$ 0,0254 por muda, podem ser melhor visualizados quando extrapolados para uma produção anual. Por exemplo, considerando um viveiro próximo à região de estudo (Figura 1.2) que produz ~ 400.000 mil mudas por ano de diferentes espécies nativas brasileiras (Refloresta, 2024), esses aumentos refletem um aumento anual entre R\$ 640,00 e R\$ 10.160,00 ao longo do século XXI. Já para um viveiro com produção de ~1.000.000 mudas por ano (Apremavi, 2024), esse aumento pode variar entre R\$ 1.600,00 e R\$ 25.400,00 por ano. Esses valores podem ser ainda maiores quanto maior for a produção.

É importante destacar que o VPL foi calculado excluindo os custos com materiais permanentes para instalação e manutenção dos viveiros (exceto para a tecnologia Ellepot®, cujo o custo da máquina foi considerado), bem como despesas administrativas e salários, e assumindo um valor constante para o kWh de energia elétrica nos períodos futuros. Além disso, as receitas geradas com a comercialização das mudas não foram consideradas, uma vez que a demanda por mudas está intrinsecamente ligada ao mercado madeireiro, que sofre influência das mudanças climáticas e fatores externos, como políticas econômicas e ambientais. Tais influências podem gerar flutuações imprevisíveis na produção de madeira, impactando os preços das mudas, e consequentemente as receitas dos viveiros. Assim, a exclusão das receitas do cálculo do VPL foi uma escolha metodológica para minimizar incertezas adicionais nas projeções financeiras nos períodos futuros. Portanto, os custos reais e as perdas financeiras

podem ser ainda maiores aos encontrados neste estudo, podendo influenciar a viabilidade financeira e o retorno dos investimentos no viveiro (Fagundes, 2023).

Os resultados deste estudo, apesar de terem sido conduzidos em uma escala local e focados nas espécies nativas *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*, geraram informações relevantes para a gestão de riscos climáticos em empreendimentos florestais. Esses achados podem ser aplicados em iniciativas de restauração florestal e orientar estratégias sustentáveis e economicamente viáveis para a produção de mudas, contribuindo para a resiliência do setor frente às mudanças climáticas.

Para estudos futuros, recomenda-se investigar novas estratégias de adaptação, especialmente aquelas voltadas para mitigar o estresse térmico, assim como ampliar a análise dos investimentos iniciais e dos custos de operação, incluindo a adoção de insumos e técnicas ecologicamente sustentáveis, como substratos à base de resíduos orgânicos, produção própria de microrganismos eficientes e uso de fertilizantes orgânicos de base animal. Além disso, é relevante comparar diferentes modelos de produção de mudas, desde viveiros altamente tecnificados até aqueles voltados em práticas sustentáveis e baseados em princípios ecológicos. Por essa abordagem será possível avaliar a viabilidade financeira em contextos distintos de manejo das mudas e estrutura produtiva.

5.4 CONCLUSÃO

A adoção de medidas de adaptação para lidar com as projeções de aumento da temperatura para Itajubá e região (até 4,5 °C no final do século) causará pequeno impacto na viabilidade financeira para a produção de mudas das cinco espécies florestais nativas estudadas (*B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*). Os impactos no valor presente líquido serão dependentes dos padrões e magnitudes de alteração da duração do desenvolvimento inicial, sendo maior quando há redução da duração do desenvolvimento inicial. Aumentos projetados no valor presente líquido entre 0,2% a 3,5% para a produção de uma muda são decorrentes do recipiente, substrato, intensificação da irrigação e aumento da frequência da aplicação de fungicidas.

No futuro, a escolha adequada de tecnologias e insumos será determinante para minimizar os impactos negativos do aumento de temperatura e manter a viabilidade financeira dos viveiros florestais. Nesse sentido, a substituição de recipientes plásticos por recipientes biodegradáveis e o uso de fertilizantes de liberação controlada se destacam como alternativas promissoras para a sustentabilidade e competitividade do setor.

5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A.H.M.; LELES, P.S.S.; MELO, L.A.; OLIVEIRA, R.R.; FERREIRA, D.H.A.A. Caracterização e potencial de substratos formulados com biossólido na produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* Raddi. e *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos. **Ciência Florestal**, v.27, p.1179-1190, 2017. <https://doi.org/10.5902/1980509830300>.
- ALMEIDA, L.H.F.; CORDEIRO, S.A.; PEREIRA, R.S.; COUTO, L.C.; LACERDA, K.W.S. Viabilidade econômica da produção de caju (*Anacardium occidentale* L.). **Nativa**, v.5, p.9-15, 2017. <https://doi.org/10.31413/nativa.v5i1.4115>.
- 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>.
- ANDRADE, D.J.; ROCHA, C.M.; MATOS, S.T.S.; ZANARDI, O.Z. Oxymatrine-based bioacaricide as a management tool against *Oligonychus ilicis* (McGregor) (Acari: Tetranychidae) in coffee. **Crop Protection**, v.134, p. 105182, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105182>.
- ANDRADE, J.S. **Acaricidas para o manejo de Tetranychus urticae em mamoeiro: toxicidade e resistência no norte do Espírito Santo**. 2009. 76 f. Dissertação (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2009.
- APREMAVI – Associação de Preservação do Meio Ambiente e da Vida. **Viveiro Jardim das Florestas**. 2024. Disponível em: <https://apremavi.org.br/institucional/viveiro/#conheca-o-viveiro>. Acesso em: 06 nov. 2024.
- BCB - Banco Central do Brasil. **Taxas de juros básicas – Histórico**. 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 02 jan. 2025.
- BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A.M.; GHINI, R. **Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa Meio Ambiente. 2017. 488 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1077623>. Acesso em: 26 fev. 2025.
- BONFATTI JUNIOR, E.A.; LENGOWSKI, E.C.; ARTNER, L.M. Avaliação econômica da produção de mudas de erva-mate. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.18, p.22-27, 2019. Disponível em: <https://saber.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/21086>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Planaveg: Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa**. Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério da Educação. Brasília, DF: MMA, 2017. 73p.
- BREALEY, R.A.; MYERS, S.C.; ALLEN, F. **Princípios de Finanças Corporativas**. 12ª edição. AMGH, 2018. 885p.
- CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Valores de tarifas e serviços**. 2024.

Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 10 dez. 2024.

CHAVES JUNIOR, E.A.; PAIVA SOBRINHO, S.; LUZ, P.B. Volume de recipientes e formulações de substrato na produção de mudas de *Adenanthera pavonina* L. **Scientia Plena**, v.18, p.110201, 2022.

COSTA, D.B.; STRECK, N.A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciência Florestal**, v.28, p.1263–1279, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509833378>.

DELGADO-BAQUERIZO, M.; GUERRA, C.A.; CANO-DÍAZ, C.; EGIDI, E.; WANG, J.T.; EISENHAUER, N.; SINGH, B.K.; MAESTRE, F.T. The proportion of soil-borne pathogens increases with warming at the global scale. **Nature Climate Change**, v.10, p.550-554, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0759-3>.

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>.

ELLE POT®. **Produtos**. 2024. Disponível em: <https://www.ellepot.com/pt/produtos/>. Acesso em: 04 nov. 2024.

FAGUNDES, F.F.A. **Temperaturas cardinais e modelagem do desenvolvimento inicial de duas espécies florestais sob clima presente e futuro**. 2023. 113 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

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. **Environment Experimental Botany**, v.192, p.104662, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104662>.

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>.

FREIRE, J.M., ROMANO, I.S., SOUZA, M.V.S.C.; GAROFOLO, A.C.S.; SILVEIRA FILHO, T.B. Forest Seedlings Supply for Restoration of the Atlantic Forest in Rio de Janeiro, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v.29, p. e20210058, 2022. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0058>.

GITMAN, L.J. **Princípios da Administração Financeira**. 12 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 775p.

IRFAN, S.A.; RAZALI, R.; KUSHAARI, K.; MANSOR, N.; AZEEM, B.; VERSYPT, A.N.F. A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers. **Journal of Controlled Release**, v.271, p.45-54, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.12.017>.

JONSSON, R. Trends and Possible Future Developments in Global Forest-Product Markets - Implications for the Swedish Forest Sector. **Forests**, v.2, p.147-167, 2011. <https://doi.org/10.3390/f2010147>.

LAZZERINI, G.; MANZINI, J.; LUCCHETTI, S.; NIN, S.; NICESE, F.P. Greenhouse Gas Emissions and Carbon Sequestration from Conventional and Organic Olive Tree Nurseries in Tuscany, Italy. **Sustainability**, v.14, p.16526, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142416526>.

LÖFSTEN, H. Measuring maintenance performance – in search for a maintenance productivity index. **International Journal of Production Economics**, v.63, p.47-58, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00245-X](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00245-X).

MARQUES, M.C.; CALVI, G.P.; PRITCHARD, H.W.; FERRAZ, I.D.K. Behind the forest restoration scene: a socio-economic, technical-scientific and political snapshot in Amazonas, Brazil. **Acta Amazonica**, v.52, p.1-12, 2022. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202100372>.

MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; FAGUNDES, F.F.A.; FLORÊNCIO, G.W.L. Thermal and photoperiodic requirements of the seedling stage of three tropical forest species. **Journal of Forestry Research**, v.34, p.209-220, 2023a. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01530-0>.

MARTINS, F.B.; FLORÊNCIO, G.W.L.; FERREIRA, M.C.; FAGUNDES, F.F.A.; FREITAS, C.H. Predicting seedling development for two commercial forest species under current and future climates: A multi-model assessment. **Forest Ecology and Management**, v.537, p.120929, 2023b. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120929>.

MIRANDA, A.G.; GANDRA, J.J.C.; MIRANDA, A.A.; DURRANT, S.F.; NETO, J.C.M.; MIRANDA, A.A. Depreciação de máquinas e equipamentos usando os métodos linha, cole, percentagem constante e Caires. **Brazilian Journal of Development**, v.7, p.13736-13753, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-136>.

MONTEIRO, A.B.; BAMBERG, A.L.; PEREIRA, I.S.; STÖCKER, C.M.; TIMM, L.C. Características físico-hídricas de substratos formulados com lodo de esgoto na produção de mudas de acácia-negra. **Ciência Florestal**, v.29, p.1428-1435, 2019. <https://doi.org/10.5902/1980509834590>.

MOTA, J.D.S.; BARBOSA, L.R.; MARCHIORO, C.A. Climate change impacts the risk of invasion of eucalypt pests in Brazil. **Agricultural and Forest Entomology**, p.1-14, 2023. <https://doi.org/10.1111/afe.12599>.

NOGUEIRA, R.D. **Produção de mudas clonais de eucalipto nos sistemas Ellepots e tubetes associada ao AIB**. 2023. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2023.

NOUHRA, G.; POLONI, N.M.; PEREIRA, F.D.; GOES, A. Eficiência de trifloxistrobina e tebuconazole, em formulação comercial, associados a fungicidas protetores no controle da mancha marrom de Alternária em tangor ‘Murcott’. **Summa phytopathologica**, v.47, p.122-125, 2021. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/245415>.

OLIVEIRA, A.B.; MEDEIROS FILHO, S.; BEZERRA, A.M.E. Tempo de cultivo e tamanho do recipiente na formação de mudas de *Copernicia hospita*. **Acta Scientiarum. Agronomy**,

v.33, p.533–538, 2011. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i3.5443>.

OLIVEIRA, V.P.; MENDES, R.S; MARTINS, W.B.R.; SANTOS, E.A.; ARAÚJO, D.G.; GAMA, M.A.P. Desenvolvimento e qualidade de mudas de *Parkia gigantocarpa* Ducke (Fabaceae) em função de fertilizante de liberação controlada. **Scientia Plena**, v.17, p.090201, 2021. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.090201>.

PARISI, J.J.D.; SANTOS, A.F.D.; BARBEDO, C.J. Patologia de sementes florestais: danos, detecção e controle, uma revisão. **Summa Phytopathologica**, v.45, p.129–133, 2019. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/188545>.

REFLORESTA. **Viveiros Florestais**. 2024. Disponível em: <https://www.refloresta.org.br/viveiros-florestais>. Acesso em 06 dez. 2024.

REIS, F.Y.S. MARTINS, F.B.; TORRES, R.R.; FLORÊNCIO, G.W.L.; CASSEMIRO, J.M.; MONTEIRO, V.F.C.; FERREIRA, M.C. Climate change impact on the initial development of tropical forest species: a multi-model assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, v.145, p.533–547, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03646-5>.

RIBEIRO, F.W.; RODRIGUES, C.C; ARAÚJO, M.S.; SILVA, A.C.; MATOS, F.S. Custos de produção e rentabilidade econômica do cultivo da mandioca em Goiás. **Revista Verde**, v.14, p.104-110, 2019. <https://doi.org/10.18378/rvads.v14i1.5961>.

SANTOS, C.B; LONGHI, S.J.; HOPPE, J.M.; MOSCOVICH, F.A. Efeito do volume de tubetes e tipos de substratos na qualidade de mudas de *Cryptomeria japonica* (L.F.) D. Don. **Ciência Florestal**, v.10, p.1-15, 2000. <https://doi.org/10.5902/19805098466>.

SANTOS, G.R.; LEÃO, E.U.; GONÇALVES, C.G.; CARDON, C.H. Manejo da adubação potássica e da irrigação no progresso de doenças fúngicas e produtividade da melancia. **Horticultura Brasileira**, v.31, p.36-44, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000100006>.

SCHORN, L.A.; FORMENTO, S. **Silvicultura II: Produção de Mudas Florestais**. Blumenau: Universidade Regional de Blumenau. CCT: Centro de Ciências Tecnológicas. 2003. 55p. Disponível em: <https://www.ufrb.edu.br/biblioteca/documentos/category/18-sementes-e-viveiros-florestais>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SILVA, A.P.M.; SCHWEIZER, D.; MARQUES, H.R.; TEIXEIRA, A.M.C.; SANTOS, T.V.M.; SAMBUICHI, R.H.R.; BADARI, C.G.; GAUDARE, U.; BRANCALION, P.H.S. Can current native tree seedling production and infrastructure meet an increasing forest restoration demand in Brazil? **Restoration Ecology**, v.25, p.509-515, 2016. <https://doi.org/10.1111/rec.12470>.

SOARES, T.L.; CARVALHO, R.M.M.A.; VALE, A.B. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**; v.27, p. 689-694, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622003000500011>.

SVIECH, V.; MANTOVAN, E.A. Análise de investimentos: controvérsias na utilização da TIR e VPL na comparação de projetos. **Percursos**, v.1, p.1-28, 2013. <http://dx.doi.org/10.21902/RevPercursos.2316-7521.v1i13.657>

TONETTO, T.S. **Produção de sementes, de mudas em viveiro e cultivo a campo de *Acca sellowiana* (O. Berg) Burret: uma abordagem técnica e econômica.** 2018. 231 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, **COP 21 Climate Agreement** (UNFCCC, Paris). 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2024.

VIANA, F.M.P.; CARDOSO, J.E.; MARTINS, M.V.V.; OOTANI, M.A. Enxofre versus acibenzolar-s-methyl no controle do oídio do cajueiro. **Summa Phytopathologica**, v.44, p.400-401, 2018. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/188409>.

VIÉGAS, L.B. **Viabilidade do recipiente biodegradável na produção de mudas florestais nativas.** 2015. 157f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

APÊNDICES DO CAPÍTULO V

Apêndice 5.1 - Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Bauhinia forficata* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.

<i>Bauhinia forficata</i>												
Clima atual (1995 - 2014)												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
2	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
3	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
4	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
5	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
6	-0,0039	-0,0036	-0,0032	-0,0029	-0,0029	-0,0030	-0,0035	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
7	-0,0003	-	-	-	-	-	-	-0,0005	-0,0009	-0,0010	-0,0011	-0,0009
VPL (-R\$)²	0,7249	0,7243	0,7240	0,7237	0,7237	0,7238	0,7242	0,7250	0,7254	0,7256	0,7257	0,7254
Futuro próximo (2041-2060) no SSP2-4.5												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073

continua... 210

... continuação

6	-0,0071	-0,0065	-0,0061	-0,0059	-0,0059	-0,0059	-0,0063	-0,0072	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0034	-0,0035	-0,0035	-0,0034
VPL (-R\$)²	0,7474	0,7468	0,7464	0,7463	0,7463	0,7463	0,7467	0,7475	0,7508	0,7509	0,7509	0,7508
Mudança (R\$)³	0,0225	0,0225	0,0225	0,0226	0,0226	0,0225	0,0225	0,0225	0,0254	0,0253	0,0253	0,0254
% de mudança⁴	3,1053	3,1074	3,1030	3,1228	3,1228	3,1100	3,1017	3,0985	3,4995	3,4924	3,4798	3,4995
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0069	-0,0065	-0,0061	-0,0059	-0,0059	-0,0059	-0,0062	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0032	-0,0032	-
VPL (-R\$)²	0,7472	0,7468	0,7464	0,7463	0,7463	0,7463	0,7466	0,7476	0,7476	0,7506	0,7506	0,7476
Mudança (R\$)³	0,0224	0,0225	0,0225	0,0226	0,0226	0,0225	0,0223	0,0226	0,0222	0,0251	0,0250	0,0222
% de mudança⁴	3,0867	3,1074	3,1030	3,1228	3,1228	3,1100	3,0831	3,1170	3,0664	3,4558	3,4431	3,0664
Futuro distante (2081-2100) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073

continua... 211

... continuação

5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0068	-0,0063	-0,0061	-0,0059	-0,0059	-0,0059	-0,0062	-0,0068	-0,0071	-0,0072	-0,0072	-0,0071
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VPL (-R\$)²	0,7471	0,7467	0,7464	0,7463	0,7463	0,7463	0,7466	0,7471	0,7474	0,7475	0,7475	0,7474
Mudança (R\$)³	0,0222	0,0224	0,0225	0,0226	0,0226	0,0225	0,0223	0,0221	0,0220	0,0219	0,0218	0,0220
% de mudança⁴	3,0682	3,0889	3,1030	3,1228	3,1228	3,1100	3,0831	3,0429	3,0294	3,0226	3,0100	3,0294
Futuro próximo (2041-2060) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0069	-0,0065	-0,0062	-0,0059	-0,0059	-0,0059	-0,0063	-0,0071	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0032	-0,0034	-0,0034	-0,0032
VPL (-R\$)²	0,7472	0,7468	0,7466	0,7463	0,7463	0,7463	0,7467	0,7474	0,7506	0,7508	0,7508	0,7506
Mudança (R\$)³	0,0224	0,0225	0,0226	0,0226	0,0226	0,0225	0,0225	0,0223	0,0253	0,0252	0,0251	0,0253
% de mudança⁴	3,0867	3,1074	3,1215	3,1228	3,1228	3,1100	3,1017	3,0800	3,4812	3,4741	3,4614	3,4812
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073

continua... 212

... continuação

4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0068	-0,0063	-0,0062	-0,0106	-0,0106	-0,0061	-0,0062	-0,0068	-0,0071	-0,0071	-0,0072	-0,0071
VPL (-R\$)²	0,7471	0,7467	0,7466	0,7275	0,7275	0,7464	0,7466	0,7471	0,7474	0,7474	0,7475	0,7474
Mudança (R\$)³	0,0222	0,0224	0,0226	0,0038	0,0038	0,0226	0,0223	0,0221	0,0220	0,0218	0,0218	0,0220
% de mudança⁴	3,0682	3,0889	3,1215	0,5284	0,5284	3,1285	3,0831	3,0429	3,0294	3,0041	3,0100	3,0294
Futuro distante (2081-2100) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0066	-0,0065	-0,0113	-0,0111	-0,0111	-0,0111	-0,0063	-0,0066	-0,0068	-0,0068	-0,0069	-0,0069
VPL (-R\$)²	0,7470	0,7468	0,7283	0,7280	0,7280	0,7280	0,7467	0,7470	0,7471	0,7471	0,7472	0,7472
Mudança (R\$)³	0,0221	0,0225	0,0043	0,0043	0,0043	0,0042	0,0225	0,0219	0,0217	0,0215	0,0216	0,0218
% de mudança⁴	3,0497	3,1074	0,5931	0,5965	0,5965	0,5840	3,1017	3,0244	2,9924	2,9671	2,9730	3,0109
Futuro próximo (2041-2060) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0, 0073	-0,0073

continua... 213

... continuação

5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0069	-0,0063	-0,0061	-0,0059	-0,0059	-0,0059	-0,0062	-0,0069	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0032	-0,0032	-
VPL (-R\$)²	0,7472	0,7467	0,7464	0,7463	0,7463	0,7463	0,7466	0,7472	0,7476	0,7506	0,7506	0,7476
Mudança (R\$)³	0,0224	0,0224	0,0225	0,0226	0,0226	0,0225	0,0223	0,0222	0,0222	0,0251	0,0250	0,0222
% de mudança⁴	3,0867	3,0889	3,1030	3,1228	3,1228	3,1100	3,0831	3,0614	3,0664	3,4558	3,4431	3,0664
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0066	-0,0063	-0,0063	-0,0108	-0,0108	-0,0108	-0,0063	-0,0066	-0,0068	-0,0069	-0,0069	-0,0069
VPL (-R\$)²	0,7470	0,7467	0,7467	0,7278	0,7278	0,7278	0,7467	0,7470	0,7471	0,7472	0,7472	0,7472
Mudança (R\$)³	0,0221	0,0224	0,0227	0,0041	0,0041	0,0040	0,0225	0,0219	0,0217	0,0217	0,0216	0,0218
% de mudança⁴	3,0497	3,0889	3,1401	0,5625	0,5625	0,5500	3,1017	3,0244	2,9924	2,9856	2,9730	3,0109
Futuro distante (2081-2100) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073

continua... 214

... continuação

5	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0068	-0,0068	-0,0119	-0,0119	-0,0116	-0,0116	-0,0066	-0,0066	-0,0066	-0,0066	-0,0068	-0,0069
VPL (-R\$)²	0,7471	0,7471	0,7287	0,7287	0,7285	0,7285	0,7470	0,7470	0,7470	0,7470	0,7471	0,7472
Mudança (R\$)³	0,0222	0,0228	0,0048	0,0051	0,0048	0,0047	0,0227	0,0219	0,0216	0,0214	0,0214	0,0218
% de mudança⁴	3,0682	3,1445	0,6612	0,6987	0,6646	0,6521	3,1388	3,0244	2,9738	2,9486	2,9545	3,0109

DS = data de semeadura (grifado em azul: projeção de redução da duração do desenvolvimento inicial; em branco: sem alteração na duração do desenvolvimento inicial; em laranja: projeção de aumento da duração do desenvolvimento inicial); ¹Descrição do fluxo de caixa (coluna período): 0 = investimento inicial (substrato, recipiente, fertilizante de liberação controlada), 1 a 7 = custos de operação (irrigação, inseticida e fungicida), todos contabilizados em intervalos de 30 dias desde a data de emergência até a data de término do desenvolvimento inicial (variáveis entre as datas de simulação de semeadura, períodos e cenários socioeconômicos). ²VPL é um valor negativo pois considera apenas custos para produzir uma muda, excluindo as receitas. ³O termo mudança refere-se a diferença entre o VPL no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para o clima atual para cada DS. ⁴A % de mudança refere-se a razão entre a mudança no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (nos três SSPs) e o VPL do clima atual.

Apêndice 5.2 - Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Ceiba speciosa* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.

<i>Ceiba speciosa</i>												
Clima atual (1995 - 2014)												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
2	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
3	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
4	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
5	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
6	-0,0039	-0,0036	-0,0023	-0,0014	-	-	-0,0023	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
7	-0,0011	-	-	-	-	-	-	-0,0021	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0016	-0,0022	-0,0023	-0,0011
VPL (-R\$)²	0,7257	0,7243	0,7231	0,7223	0,7209	0,7209	0,7231	0,7265	0,7288	0,7293	0,7294	0,7283
Futuro próximo (2041-2060) no SSP2-4.5												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0071	-0,0069	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0068	-0,0049	-0,0038	-	-	-	-0,0036	-0,0072	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0046	-0,0054	-0,0056	-0,0046

continua... 216

... continuação

VPL (-R\$)²	0,7471	0,7453	0,7443	0,7407	0,7404	0,7403	0,7441	0,7475	0,7520	0,7526	0,7529	0,7520
Mudança (R\$)³	0,0214	0,0210	0,0212	0,0184	0,0195	0,0194	0,0211	0,0210	0,0232	0,0234	0,0235	0,0237
% de mudança⁴	2,9545	2,9035	2,9338	2,5541	2,7074	2,6886	2,9153	2,8839	3,1864	3,2028	3,2268	3,2489
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0072	-0,0071	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0065	-0,0049	-0,0038	-	-	-	-0,0036	-0,0062	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0036	-0,0045	-0,0048	-0,0039
VPL (-R\$)²	0,7468	0,7453	0,7443	0,7407	0,7406	0,7404	0,7441	0,7466	0,7510	0,7518	0,7521	0,7513
Mudança (R\$)³	0,0212	0,0210	0,0212	0,0184	0,0197	0,0195	0,0211	0,0200	0,0223	0,0226	0,0227	0,0230
% de mudança⁴	2,9175	2,9035	2,9338	2,5541	2,7262	2,7074	2,9153	2,7545	3,0587	3,0934	3,1174	3,1575
Futuro distante (2081-2100) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0059	-0,0046	-0,0038	-0,0034	-	-	-0,0036	-0,0058	-0,0072	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0035	-0,0039	-0,0032

continua... 217

... continuação

VPL (-R\$)²	0,7463	0,7451	0,7443	0,7439	0,7407	0,7407	0,7441	0,7462	0,7475	0,7509	0,7513	0,7506
Mudança (R\$)³	0,0206	0,0208	0,0212	0,0216	0,0198	0,0198	0,0211	0,0196	0,0187	0,0216	0,0219	0,0223
% de mudança⁴	2,8434	2,8664	2,9338	2,9933	2,7450	2,7450	2,9153	2,6990	2,5726	2,9657	3,0080	3,0662
Futuro próximo (2041-2060) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0072	-0,0072	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0066	-0,0049	-0,0039	-0,0032	-	-	-0,0036	-0,0068	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0039	-0,0046	-0,0049	-0,0041
VPL (-R\$)²	0,7470	0,7453	0,7444	0,7437	0,7406	0,7406	0,7441	0,7471	0,7513	0,7520	0,7522	0,7514
Mudança (R\$)³	0,0213	0,0210	0,0213	0,0215	0,0197	0,0197	0,0211	0,0205	0,0226	0,0227	0,0229	0,0231
% de mudança⁴	2,9360	2,9035	2,9524	2,9747	2,7262	2,7262	2,9153	2,8284	3,0952	3,1116	3,1357	3,1758
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0061	-0,0048	-0,0041	-0,0036	-0,0059	-0,0056	-0,0038	-0,0056	-0,0068	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0035	-

continua... 218

... continuação

VPL (-R\$)²	0,7464	0,7452	0,7445	0,7441	0,7231	0,7228	0,7443	0,7460	0,7471	0,7476	0,7509	0,7476
Mudança (R\$)³	0,0208	0,0209	0,0215	0,0219	0,0022	0,0019	0,0212	0,0195	0,0183	0,0184	0,0215	0,0193
% de mudança⁴	2,8619	2,8849	2,9710	3,0305	0,3007	0,2665	2,9338	2,6805	2,5173	2,5167	2,9533	2,6531
Futuro distante (2081-2100) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0056	-0,0049	-0,0045	-0,0074	-0,0072	-0,0069	-0,0044	-0,0052	-0,0059	-0,0062	-0,0065	-0,0063
VPL (-R\$)²	0,7460	0,7453	0,7449	0,7246	0,7243	0,7241	0,7448	0,7456	0,7463	0,7466	0,7468	0,7467
Mudança (R\$)³	0,0204	0,0210	0,0219	0,0023	0,0034	0,0032	0,0218	0,0191	0,0175	0,0173	0,0175	0,0184
% de mudança⁴	2,8064	2,9035	3,0267	0,3190	0,4716	0,4374	3,0081	2,6250	2,4068	2,3694	2,3938	2,5240
Futuro próximo (2041-2060) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0072	-0,0072	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0063	-0,0048	-0,0038	-0,0032	-	-	-0,0036	-0,0062	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0035	-0,0042	-0,0045	-0,0036
VPL (-R\$)²	0,7467	0,7452	0,7443	0,7437	0,7406	0,7406	0,7441	0,7466	0,7509	0,7516	0,7518	0,7510

continua... 219

... continuação

Mudança (R\$)³	0,0210	0,0209	0,0212	0,0215	0,0197	0,0197	0,0211	0,0200	0,0222	0,0223	0,0225	0,0227
% de mudança⁴	2,8989	2,8849	2,9338	2,9747	2,7262	2,7262	2,9153	2,7545	3,0404	3,0569	3,0809	3,1210
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0056	-0,0046	-0,0042	-0,0067	-0,0064	-0,0061	-0,0039	-0,0054	-0,0062	-0,0073	-0,0069	-0,0066
VPL (-R\$)²	0,7460	0,7451	0,7447	0,7238	0,7236	0,7233	0,7444	0,7458	0,7466	0,7476	0,7472	0,7470
Mudança (R\$)³	0,0204	0,0208	0,0216	0,0016	0,0027	0,0024	0,0213	0,0192	0,0178	0,0184	0,0179	0,0187
% de mudança⁴	2,8064	2,8664	2,9896	0,2167	0,3691	0,3349	2,9524	2,6435	2,4436	2,5167	2,4491	2,5609
Futuro distante (2081-2100) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0058	-0,0055	-0,0093	-0,0093	-0,0090	-0,0085	-0,0049	-0,0052	-0,0055	-0,0056	-0,0061	-0,0058
VPL (-R\$)²	0,7462	0,7459	0,7263	0,7263	0,7260	0,7255	0,7453	0,7456	0,7459	0,7460	0,7464	0,7462
Mudança (R\$)³	0,0205	0,0216	0,0032	0,0040	0,0051	0,0046	0,0223	0,0191	0,0171	0,0167	0,0171	0,0178

continua...

... continuação

% de mudança⁴	2,8249	2,9776	0,4454	0,5579	0,7109	0,6425	3,0824	2,6250	2,3515	2,2957	2,3386	2,4503
DS = data de semeadura (grifado em azul: projeção de redução da duração do desenvolvimento inicial; em branco: sem alteração na duração do desenvolvimento inicial; em laranja: projeção de aumento da duração do desenvolvimento inicial); ¹ Descrição do fluxo de caixa (coluna período): 0 = investimento inicial (substrato, recipiente, fertilizante de liberação controlada), 1 a 8 = custos de operação (irrigação, inseticida e fungicida), todos contabilizados em intervalos de 30 dias desde a data de emergência até a data de término do desenvolvimento inicial (variáveis entre as datas de simulação de semeadura, períodos e cenários socioeconômicos). ² VPL é um valor negativo pois considera apenas custos para produzir uma muda, excluindo as receitas. ³ O termo mudança refere-se a diferença entre o VPL no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para o clima atual para cada DS. ⁴ A % de mudança refere-se a razão entre a mudança no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (nos três SSPs) e o VPL do clima atual.												

Apêndice 5.3 - Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Handroanthus chrysotrichus* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.

<i>Handroanthus chrysotrichus</i>												
Clima atual (1995 - 2014)												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
2	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
3	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
4	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
5	-0,0029	-0,0029	-0,0027	-0,0022	-0,0020	-0,0021	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
6	-0,0022	-0,0019	-	-	-	-	-0,0014	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
7	-	-	-	-	-	-	-	-0,0005	-0,0015	-0,0023	-0,0022	-0,0011
VPL (-R\$)²	0,7230	0,7227	0,7207	0,7203	0,7201	0,7202	0,7223	0,7250	0,7260	0,7267	0,7266	0,7257
Futuro próximo (2041-2060) no SSP2-4.5												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0069	-0,0116	-0,0113	-0,0116	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0036	-0,0035	-	-	-	-	-0,0032	-0,0056	-0,0068	-0,0073	-0,0073	-0,0068
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0034	-0,0034	-

continua... 222

... continuação

VPL (-R\$)²	0,7441	0,7440	0,7403	0,7163	0,7160	0,7163	0,7437	0,7460	0,7471	0,7508	0,7508	0,7471
Mudança (R\$)³	0,0212	0,0213	0,0196	0,0040	0,0041	0,0039	0,0215	0,0210	0,0211	0,0241	0,0241	0,0214
% de mudança⁴	2,9280	2,9478	2,7144	0,5576	0,5670	0,5450	2,9747	2,8947	2,9040	3,3094	3,3221	2,9545
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0071	-0,0121	-0,0119	-0,0119	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0038	-0,0035	-	-	-	-	-0,0032	-0,0051	-0,0061	-0,0068	-0,0069	-0,0062
VPL (-R\$)²	0,7443	0,7440	0,7404	0,7168	0,7165	0,7165	0,7437	0,7455	0,7464	0,7471	0,7472	0,7466
Mudança (R\$)³	0,0213	0,0213	0,0197	0,0035	0,0036	0,0037	0,0215	0,0205	0,0204	0,0204	0,0206	0,0209
% de mudança⁴	2,9466	2,9478	2,7332	0,4885	0,4980	0,5105	2,9747	2,8206	2,8115	2,8032	2,8343	2,8804
Futuro distante (2081-2100) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0126	-0,0126	-0,0124	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0036	-0,0035	-	-	-	-	-0,0032	-0,0046	-0,0055	-0,0061	-0,0062	-0,0058

continua... 223

... continuação

VPL (-R\$)²	0,7441	0,7440	0,7175	0,7173	0,7173	0,7170	0,7437	0,7451	0,7459	0,7464	0,7466	0,7462
Mudança (R\$)³	0,0212	0,0213	0,0032	0,0030	0,0028	0,0032	0,0215	0,0200	0,0199	0,0197	0,0199	0,0205
% de mudança⁴	2,9280	2,9478	0,4476	0,4195	0,3944	0,4415	2,9747	2,7650	2,7375	2,7108	2,7419	2,8249
Futuro próximo (2041-2060) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0126	-0,0121	-0,0121	-0,0121	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0038	-0,0036	-	-	-	-	-0,0032	-0,0054	-0,0063	-0,0071	-0,0071	-0,0063
VPL (-R\$)²	0,7443	0,7441	0,7173	0,7168	0,7168	0,7168	0,7437	0,7458	0,7467	0,7474	0,7474	0,7467
Mudança (R\$)³	0,0213	0,0214	0,0035	0,0035	0,0033	0,0034	0,0215	0,0207	0,0207	0,0206	0,0207	0,0210
% de mudança⁴	2,9466	2,9664	0,4821	0,4885	0,4635	0,4760	2,9747	2,8577	2,8485	2,8402	2,8528	2,8989
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0039	-0,0038	-0,0059	-0,0056	-0,0054	-0,0054	-0,0035	-0,0046	-0,0052	-0,0058	-0,0059	-0,0056

continua... 224

... continuação

VPL (-R\$)²	0,7444	0,7443	0,7231	0,7228	0,7226	0,7226	0,7440	0,7451	0,7456	0,7462	0,7463	0,7460
Mudança (R\$)³	0,0214	0,0216	0,0023	0,0026	0,0025	0,0024	0,0218	0,0200	0,0196	0,0194	0,0197	0,0204
% de mudança⁴	2,9652	2,9850	0,3259	0,3549	0,3460	0,3333	3,0119	2,7650	2,7005	2,6738	2,7049	2,8064
Futuro distante (2081-2100) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0042	-0,0042	-0,0074	-0,0072	-0,0072	-0,0069	-0,0069	-0,0045	-0,0046	-0,0048	-0,0051	-0,0051
VPL (-R\$)²	0,7447	0,7447	0,7246	0,7243	0,7243	0,7241	0,7241	0,7449	0,7451	0,7452	0,7455	0,7455
Mudança (R\$)³	0,0217	0,0220	0,0038	0,0040	0,0042	0,0039	0,0018	0,0199	0,0191	0,0185	0,0188	0,0198
% de mudança⁴	3,0024	3,0408	0,5311	0,5602	0,5855	0,5386	0,2508	2,7465	2,6265	2,5445	2,5940	2,7324
Futuro próximo (2041-2060) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0126	-0,0124	-0,0121	-0,0121	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0038	-0,0035	-	-	-	-	-0,0032	-0,0051	-0,0059	-0,0066	-0,0066	-0,0061

continua... 225

... continuação

VPL (-R\$)²	0,7443	0,7440	0,7173	0,7170	0,7168	0,7168	0,7437	0,7455	0,7463	0,7470	0,7470	0,7464
Mudança (R\$)³	0,0213	0,0213	0,0035	0,0033	0,0033	0,0034	0,0215	0,0205	0,0203	0,0202	0,0203	0,0208
% de mudança⁴	2,9466	2,9478	0,4821	0,4540	0,4635	0,4760	2,9747	2,8206	2,7930	2,7847	2,7973	2,8619
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0039	-0,0038	-0,0064	-0,0064	-0,0061	-0,0059	-0,0036	-0,0045	-0,0049	-0,0052	-0,0052	-0,0052
VPL (-R\$)²	0,7444	0,7443	0,7236	0,7236	0,7233	0,7231	0,7441	0,7449	0,7453	0,7456	0,7456	0,7456
Mudança (R\$)³	0,0214	0,0216	0,0028	0,0033	0,0032	0,0029	0,0219	0,0199	0,0193	0,0189	0,0190	0,0200
% de mudança⁴	2,9652	2,9850	0,3943	0,4575	0,4486	0,4018	3,0305	2,7465	2,6635	2,5999	2,6125	2,7509
Futuro distante (2081-2100) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-0,0085	-0,0087	-0,0093	-0,0093	-0,0090	-0,0082	-0,0080	-0,0046	-0,0045	-0,0045	-0,0046	-0,0051

continua... 226

... continuação

VPL (-R\$)²	0,7255	0,7258	0,7263	0,7263	0,7260	0,7253	0,7251	0,7451	0,7449	0,7449	0,7451	0,7455
Mudança (R\$)³	0,0026	0,0031	0,0056	0,0060	0,0059	0,0051	0,0028	0,0200	0,0189	0,0182	0,0184	0,0198
% de mudança⁴	0,3557	0,4272	0,7704	0,8339	0,8251	0,7097	0,3873	2,7650	2,6080	2,5075	2,5385	2,7324

DS = data de semeadura (grifado em azul: projeção de redução da duração do desenvolvimento inicial; em branco: sem alteração na duração do desenvolvimento inicial; em laranja: projeção de aumento da duração do desenvolvimento inicial); ¹Descrição do fluxo de caixa (coluna período): 0 = investimento inicial (substrato, recipiente, fertilizante de liberação controlada), 1 a 7 = custos de operação (irrigação, inseticida e fungicida), todos contabilizados em intervalos de 30 dias desde a data de emergência até a data de término do desenvolvimento inicial (variáveis entre as datas de simulação de semeadura, períodos e cenários socioeconômicos). ²VPL é um valor negativo pois considera apenas custos para produzir uma muda, excluindo as receitas. ³O termo mudança refere-se a diferença entre o VPL no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para o clima atual para cada DS. ⁴A % de mudança refere-se a razão entre a mudança no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (nos três SSPs) e o VPL do clima atual.

Apêndice 5.4 – Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Handroanthus impetiginosus* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.

<i>Handroanthus impetiginosus</i>												
Clima atual (1995 - 2014)												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
2	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
3	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
4	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
5	-0,0024	-0,0019	-0,0016	-0,0013	-0,0012	-0,0011	-0,0012	-0,0022	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0015	-0,0022	-0,0024	-0,0016
VPL (-R\$)²	0,7205	0,7200	0,7197	0,7195	0,7194	0,7193	0,7194	0,7203	0,7223	0,7230	0,7232	0,7224
Futuro próximo (2041-2060) no SSP2-4.5												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0059	-0,0054	-0,0051	-0,0049	-0,0049	-0,0085	-0,0049	-0,0056	-0,0066	-0,0073	-0,0073	-0,0069
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0032	-
VPL (-R\$)²	0,7393	0,7388	0,7385	0,7384	0,7384	0,7133	0,7384	0,7391	0,7400	0,7407	0,7437	0,7403
Mudança (R\$)³	0,0189	0,0188	0,0188	0,0189	0,0190	0,0060	0,0190	0,0188	0,0177	0,0177	0,0206	0,0179

continua... 228

... continuação												
% de mudança ⁴	2,6215	2,6107	2,6119	2,6318	2,6448	0,8344	2,6448	2,6096	2,4475	2,4522	2,8468	2,4723
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0058	-0,0054	-0,0052	-0,0051	-0,0049	-0,0085	-0,0049	-0,0055	-0,0062	-0,0069	-0,0071	-0,0066
VPL (-R\$)²	0,7392	0,7388	0,7387	0,7385	0,7384	0,7133	0,7384	0,7389	0,7396	0,7403	0,7404	0,7400
Mudança (R\$)³	0,0188	0,0188	0,0189	0,0191	0,0190	0,0060	0,0190	0,0187	0,0173	0,0173	0,0173	0,0176
% de mudança ⁴	2,6026	2,6107	2,6307	2,6507	2,6448	0,8344	2,6448	2,5908	2,3911	2,3959	2,3892	2,4347
Futuro distante (2081-2100) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0056	-0,0054	-0,0052	-0,0051	-0,0087	-0,0087	-0,0087	-0,0055	-0,0061	-0,0065	-0,0066	-0,0063
VPL (-R\$)²	0,7391	0,7388	0,7387	0,7385	0,7135	0,7135	0,7135	0,7389	0,7395	0,7399	0,7400	0,7398
Mudança (R\$)³	0,0186	0,0188	0,0189	0,0191	0,0058	0,0058	0,0058	0,0187	0,0171	0,0169	0,0169	0,0173
% de mudança ⁴	2,5838	2,6107	2,6307	2,6507	0,8124	0,7999	0,8124	2,5908	2,3724	2,3396	2,3329	2,3972
Futuro próximo (2041-2060) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12

... continuação

0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0059	-0,0055	-0,0052	-0,0051	-0,0049	-0,0085	-0,0087	-0,0055	-0,0065	-0,0071	-0,0073	-0,0068
VPL (-R\$)²	0,7393	0,7389	0,7387	0,7385	0,7384	0,7133	0,7135	0,7389	0,7399	0,7404	0,7407	0,7402
Mudança (R\$)³	0,0189	0,0189	0,0189	0,0191	0,0190	0,0060	0,0058	0,0187	0,0175	0,0175	0,0175	0,0177
% de mudança⁴	2,6215	2,6296	2,6307	2,6507	2,6448	0,8344	0,8124	2,5908	2,4287	2,4146	2,4267	2,4535
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0058	-0,0054	-0,0054	-0,0090	-0,0090	-0,0090	-0,0090	-0,0054	-0,0059	-0,0063	-0,0066	-0,0063
VPL (-R\$)²	0,7392	0,7388	0,7388	0,7138	0,7138	0,7138	0,7138	0,7388	0,7393	0,7398	0,7400	0,7398
Mudança (R\$)³	0,0188	0,0188	0,0191	0,0057	0,0056	0,0055	0,0056	0,0185	0,0170	0,0168	0,0169	0,0173
% de mudança⁴	2,6026	2,6107	2,6495	0,7903	0,7778	0,7653	0,7778	2,5720	2,3536	2,3208	2,3329	2,3972
Futuro distante (2081-2100) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073

continua... 230

... continuação

4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0056	-0,0055	-0,0055	-0,0095	-0,0095	-0,0095	-0,0095	-0,0058	-0,0058	-0,0059	-0,0061	-0,0061
VPL (-R\$)²	0,7391	0,7389	0,7389	0,7143	0,7143	0,7143	0,7143	0,7392	0,7392	0,7393	0,7395	0,7395
Mudança (R\$)³	0,0186	0,0189	0,0192	0,0052	0,0051	0,0050	0,0051	0,0189	0,0169	0,0164	0,0163	0,0170
% de mudança⁴	2,5838	2,6296	2,6684	0,7212	0,7087	0,6962	0,7087	2,6285	2,3348	2,2646	2,2579	2,3596
Futuro próximo (2041-2060) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0058	-0,0054	-0,0052	-0,0051	-0,0087	-0,0085	-0,0087	-0,0055	-0,0062	-0,0069	-0,0071	-0,0066
VPL (-R\$)²	0,7392	0,7388	0,7387	0,7385	0,7135	0,7133	0,7135	0,7389	0,7396	0,7403	0,7404	0,7400
Mudança (R\$)³	0,0188	0,0188	0,0189	0,0191	0,0058	0,0060	0,0058	0,0187	0,0173	0,0173	0,0173	0,0176
% de mudança⁴	2,6026	2,6107	2,6307	2,6507	0,8124	0,8344	0,8124	2,5908	2,3911	2,3959	2,3892	2,4347
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0056	-0,0054	-0,0054	-0,0093	-0,0093	-0,0090	-0,0090	-0,0055	-0,0058	-0,0062	-0,0062	-0,0061
VPL (-R\$)²	0,7391	0,7388	0,7388	0,7140	0,7140	0,7138	0,7138	0,7389	0,7392	0,7396	0,7396	0,7395
Mudança (R\$)³	0,0186	0,0188	0,0191	0,0054	0,0053	0,0055	0,0056	0,0187	0,0169	0,0166	0,0165	0,0170

continua... 231

... continuação

% de mudança ⁴	2,5838	2,6107	2,6495	0,7558	0,7432	0,7653	0,7778	2,5908	2,3348	2,3021	2,2767	2,3596
Futuro distante (2081-2100) no SSP5-8.5												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0059	-0,0059	-0,0103	-0,0103	-0,0103	-0,0100	-0,0100	-0,0056	-0,0056	-0,0058	-0,0058	-0,0061
VPL (-R\$) ²	0,7393	0,7393	0,7150	0,7150	0,7150	0,7148	0,7148	0,7391	0,7391	0,7392	0,7392	0,7395
Mudança (R\$) ³	0,0189	0,0193	0,0047	0,0044	0,0044	0,0045	0,0046	0,0188	0,0167	0,0162	0,0161	0,0170
% de mudança ⁴	2,6215	2,6861	0,6551	0,6175	0,6050	0,6270	0,6396	2,6096	2,3161	2,2458	2,2204	2,3596

DS = data de semeadura (grifado em azul: projeção de redução da duração do desenvolvimento inicial; em branco: sem alteração na duração do desenvolvimento inicial; em laranja: projeção de aumento da duração do desenvolvimento inicial); ¹Descrição do fluxo de caixa (coluna período): 0 = investimento inicial (substrato, recipiente, fertilizante de liberação controlada), 1 a 7 = custos de operação (irrigação, inseticida e fungicida), todos contabilizados em intervalos de 30 dias desde a data de emergência até a data de término do desenvolvimento inicial (variáveis entre as datas de simulação de semeadura, períodos e cenários socioeconômicos). ²VPL é um valor negativo pois considera apenas custos para produzir uma muda, excluindo as receitas. ³O termo mudança refere-se a diferença entre o VPL no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para o clima atual para cada DS. ⁴A % de mudança refere-se a razão entre a mudança no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (nos três SSPs) e o VPL do clima atual.

Apêndice 5.5 - Fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL, em R\$), mudança e porcentagem de mudança (%) nos custos para produção de uma muda de *Tabebuia roseoalba* calculado para o clima atual (1995-2014), futuro próximo (2041-2060), futuro intermediário (2061-2080) e futuro distante (2081-2100) em três cenários socioeconômicos (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura (DS). Para informações das datas de semeadura, consulte a Tabela 5.2.

<i>Tabebuia roseoalba</i>												
Clima atual (1995 - 2014)												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
2	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
3	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
4	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039	-0,0039
5	-0,0029	-0,0027	-0,0024	-0,0021	-0,0021	-0,0021	-0,0023	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0029
6	-0,0012	-	-	-	-	-	-	-0,0017	-0,0025	-0,0029	-0,0030	-0,0026
VPL (-R\$)²	0,7221	0,7207	0,7205	0,7202	0,7202	0,7202	0,7204	0,7225	0,7232	0,7237	0,7238	0,7233
Futuro próximo (2041-2060) no SSP2-4.5												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0069	-0,0066	-0,0063	-0,0062	-0,0062	-0,0062	-0,0063	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0036	-0,0042	-0,0044	-0,0039
VPL (-R\$)²	0,7403	0,7400	0,7398	0,7396	0,7396	0,7396	0,7398	0,7407	0,7441	0,7447	0,7448	0,7444

continua... 233

... continuação	0,0182	0,0193	0,0193	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0182	0,0209	0,0210	0,0210	0,0211
Mudança (R\$)³												
% de mudança⁴	2,5233	2,6768	2,6779	2,6979	2,6979	2,6979	2,6908	2,5158	2,8897	2,9001	2,9059	2,9141
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0069	-0,0066	-0,0063	-0,0062	-0,0062	-0,0062	-0,0063	-0,0071	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0034	-0,0039	-0,0039	-0,0036
VPL (-R\$)²	0,7403	0,7400	0,7398	0,7396	0,7396	0,7396	0,7398	0,7404	0,7439	0,7444	0,7444	0,7441
Mudança (R\$)³	0,0182	0,0193	0,0193	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0179	0,0206	0,0207	0,0206	0,0208
% de mudança⁴	2,5233	2,6768	2,6779	2,6979	2,6979	2,6979	2,6908	2,4783	2,8526	2,8630	2,8502	2,8769
Futuro distante (2081-2100) no SSP2-4.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0068	-0,0065	-0,0065	-0,0111	-0,0111	-0,0111	-0,0063	-0,0069	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0035	-0,0036	-0,0034
VPL (-R\$)²	0,7402	0,7399	0,7399	0,7158	0,7158	0,7158	0,7398	0,7403	0,7407	0,7440	0,7441	0,7439

... continuação

Mudança (R\$)³	0,0181	0,0192	0,0194	0,0044	0,0044	0,0044	0,0194	0,0178	0,0175	0,0203	0,0204	0,0205
% de mudança⁴	2,5045	2,6580	2,6967	0,6141	0,6141	0,6141	2,6908	2,4595	2,4140	2,8073	2,8131	2,8398
Futuro próximo (2041-2060) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0069	-0,0066	-0,0063	-0,0111	-0,0062	-0,0062	-0,0063	-0,0072	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0035	-0,0041	-0,0041	-0,0038
VPL (-R\$)²	0,7403	0,7400	0,7398	0,7158	0,7396	0,7396	0,7398	0,7406	0,7440	0,7445	0,7445	0,7443
Mudança (R\$)³	0,0182	0,0193	0,0193	0,0044	0,0194	0,0194	0,0194	0,0180	0,0208	0,0209	0,0208	0,0209
% de mudança⁴	2,5233	2,6768	2,6779	0,6141	2,6979	2,6979	2,6908	2,4971	2,8711	2,8815	2,8687	2,8955
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0068	-0,0066	-0,0065	-0,0113	-0,0113	-0,0111	-0,0065	-0,0069	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0034	-0,0035	-0,0034
VPL (-R\$)²	0,7402	0,7400	0,7399	0,7160	0,7160	0,7158	0,7399	0,7403	0,7407	0,7439	0,7440	0,7439
Mudança (R\$)³	0,0181	0,0193	0,0194	0,0042	0,0042	0,0044	0,0195	0,0178	0,0175	0,0202	0,0202	0,0205

continua... 235

... continuação

% de mudança⁴	2,5045	2,6768	2,6967	0,5796	0,5796	0,6141	2,7097	2,4595	2,4140	2,7887	2,7945	2,8398
Futuro distante (2081-2100) no SSP3-7.0												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0069	-0,0068	-0,0119	-0,0119	-0,0119	-0,0116	-0,0116	-0,0068	-0,0071	-0,0072	-0,0073	-0,0073
VPL (-R\$)²	0,7403	0,7402	0,7165	0,7165	0,7165	0,7163	0,7163	0,7402	0,7404	0,7406	0,7407	0,7407
Mudança (R\$)³	0,0182	0,0194	0,0039	0,0037	0,0037	0,0039	0,0041	0,0176	0,0172	0,0169	0,0169	0,0174
% de mudança⁴	2,5233	2,6956	0,5481	0,5105	0,5105	0,5450	0,5701	2,4408	2,3765	2,3317	2,3377	2,4013
Futuro próximo (2041-2060) no SSP5-8.5												
Período (meses)¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0069	-0,0066	-0,0063	-0,0111	-0,0062	-0,0062	-0,0063	-0,0071	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0034	-0,0038	-0,0039	-0,0036
VPL (-R\$)²	0,7403	0,7400	0,7398	0,7158	0,7396	0,7396	0,7398	0,7404	0,7439	0,7443	0,7444	0,7441
Mudança (R\$)³	0,0182	0,0193	0,0193	0,0044	0,0194	0,0194	0,0194	0,0179	0,0206	0,0206	0,0206	0,0208
% de mudança⁴	2,5233	2,6768	2,6779	0,6141	2,6979	2,6979	2,6908	2,4783	2,8526	2,8444	2,8502	2,8769
Futuro intermediário (2061-2080) no SSP5-8.5												

continua... 236

... continuação

Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0068	-0,0066	-0,0066	-0,0116	-0,0113	-0,0113	-0,0065	-0,0069	-0,0072	-0,0073	-0,0073	-0,0073
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0032	-
VPL (-R\$)²	0,7402	0,7400	0,7400	0,7163	0,7160	0,7160	0,7399	0,7403	0,7406	0,7407	0,7437	0,7407
Mudança (R\$)³	0,0181	0,0193	0,0196	0,0039	0,0042	0,0042	0,0195	0,0178	0,0173	0,0170	0,0200	0,0174
% de mudança⁴	2,5045	2,6768	2,7156	0,5450	0,5796	0,5796	2,7097	2,4595	2,3952	2,3504	2,7574	2,4013
Futuro distante (20812100) no SSP58.5												
Período (meses) ¹	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,7050	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,6547	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050	-0,7050
1	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
2	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
3	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
4	-0,0073	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0129	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073	-0,0073
5	-0,0072	-0,0126	-0,0126	-0,0126	-0,0124	-0,0124	-0,0121	-0,0069	-0,0069	-0,0069	-0,0071	-0,0072
VPL (-R\$)²	0,7406	0,7173	0,7173	0,7173	0,7170	0,7170	0,7168	0,7403	0,7403	0,7403	0,7404	0,7406
Mudança (R\$)³	0,0185	0,0035	0,0032	0,0029	0,0032	0,0032	0,0036	0,0178	0,0171	0,0166	0,0166	0,0172
% de mudança⁴	2,5608	0,4821	0,4446	0,4069	0,4415	0,4415	0,5011	2,4595	2,3577	2,2942	2,3002	2,3825

DS = data de semeadura (grifado em azul: projeção de redução da duração do desenvolvimento inicial; em branco: sem alteração na duração do desenvolvimento inicial; em laranja: projeção de aumento da duração do desenvolvimento inicial); ¹Descrição do fluxo de caixa (coluna período): 0 = investimento inicial (substrato, recipiente, fertilizante de liberação controlada), 1 a 6 = custos de operação (irrigação, inseticida e fungicida), todos contabilizados em intervalos de

30 dias desde a data de emergência até a data de término do desenvolvimento inicial (variáveis entre as datas de simulação de semeadura, períodos e cenários socioeconômicos). ²VPL é um valor negativo pois considera apenas custos para produzir uma muda, excluindo as receitas. ³O termo mudança refere-se a diferença entre o VPL no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para o clima atual para cada DS. ⁴A % de mudança refere-se a razão entre a mudança no futuro próximo, futuro intermediário e futuro distante (nos três SSPs) e o VPL do clima atual.

CONCLUSÃO GERAL

O Capítulo I abordou a influência de variáveis meteorológicas, período de maturação, dispersão e armazenamento sobre a viabilidade das sementes das seis espécies florestais (*Bauhinia forficata*, *Ceiba speciosa*, *Handroanthus chrysotrichus*, *Handroanthus impetiginosus*, *Tabebuia rosea* e *Tabebuia roseoalba*). As seis espécies apresentam padrões distintos de viabilidade de sementes em termos de porcentagem de emergência, índice de velocidade de emergência, tempo médio de emergência e velocidade média de emergência. As sementes de *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus*, *T. rosea* e *T. roseoalba* são mais sensíveis ao tempo de armazenamento, com redução da viabilidade proporcional ao aumento do tempo de armazenamento. Além disso, as variações da temperatura do ar, fotoperíodo, radiação solar e umidade relativa do ar influenciam diretamente a maturação fisiológica e emergência das sementes das seis espécies florestais. As amostras de sementes provenientes das regiões mais quentes, com maior fotoperíodo e radiação solar e menor umidade relativa apresentaram melhor desempenho na emergência. As menores variáveis de emergência foram observadas em amostras onde a maturação fisiológica ocorreu em períodos mais frios e úmidos.

O Capítulo II apresenta a primeira escala BBCH adaptada para descrever o desenvolvimento inicial das cinco espécies nativas: *B. forficata*, *C. speciosa*, *H. chrysotrichus*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*. A escala fenológica BBCH foi adaptada e acoplada à imagens para identificar dois estágios de desenvolvimento principal: 0 (germinação) e 1 (desenvolvimento foliar) e 12 subestágios (códigos 00-09 a 110). As espécies atingiram o subestágio 110 (10ª folha visível no caule principal), que é o patamar de término do desenvolvimento inicial, com aproximadamente 171 dias (*H. chrysotrichus*), 184 dias (*C. speciosa*) e ~ 190 dias (*B. forficata*, *H. impetiginosus* e *T. roseoalba*), havendo diferenças na duração dos subestágios (00 a 110) em todas as espécies. A escala proposta para as cinco espécies tem aplicações práticas, fornecendo informações úteis para a padronização e otimização das técnicas silviculturais, além de ser uma ferramenta útil na avaliação das alterações climáticas no desenvolvimento dessas espécies.

No Capítulo III foram estimados os limiares e exigências térmicas para o desenvolvimento inicial das cinco espécies florestais nativas. A temperatura base (Tb), ótima (Tot) e superior (TB) para *B. forficata* foram: Tb = 10,6 °C, Tot = 21,5 °C e TB = 43,9 °C; para *C. speciosa* foram Tb = 12 °C, Tot = 21 °C e TB = 42,8 °C; para *H. chrysotrichus* foram Tb = 11,4 °C, Tot = 20,3 °C e TB = 41,9 °C; para *H. impetiginosus* foram Tb = 12,6 °C, Tot = 21,1 °C e TB = 42,6 °C e para *T. roseoalba* Tb = 12,2 °C, Tot = 21,2 °C e TB = 43,4 °C. A *B.*

forficata possui a maior amplitude térmica de desenvolvimento (10,6 a 43,9 °C) e ao mesmo tempo necessita acumular maior energia (224,4 °C dia folha⁻¹, $\pm$ DP 19) para emitir uma folha, enquanto *C. speciosa* possui menor filocrono (160,5 °C dia folha⁻¹, $\pm$ DP 34,1) e, consequentemente, menor exigência térmica comparada as demais espécies estudadas.

Já o capítulo IV, concentrou os esforços em calibrar e avaliar o desempenho dos modelos de desenvolvimento Filocrono e Wang e Engel em estimar o desenvolvimento inicial das cinco espécies, além de identificar os impactos dos aumentos da temperatura do ar projetados na duração do desenvolvimento inicial e propor medidas adaptativas para lidar com tais impactos. Ambos os modelos - Filocrono e Wang e Engel - foram capazes de estimar adequadamente o número de folhas acumuladas (NFA) para as cinco espécies. No entanto, os erros cumulativos na estimativa do NFA resultaram em estimativas menos precisas para a duração do desenvolvimento inicial. O filocrono teve melhor desempenho para *C. speciosa* (RQME = 1,30 folhas e 29,8 dias) e *H. chrysotrichus* (RQME = 1,41 folhas e 23 dias), enquanto o Wang e Engel teve melhor desempenho para *B. forficata* (RQME = 1,14 folhas e 11,9 dias), *H. impetiginosus* (RQME = 1,50 folhas e 32,3 dias) e *T. roseoalba* (RQME = 1,32 folhas e 25,2 dias). São projetados aumentos na temperatura do ar (entre +1,3 e +4,5 °C) e tendências heterogêneas no desenvolvimento das espécies (-55 a +24 dias) para Itajubá ao longo do século XXI. Independentemente da espécie, período e cenário, nas datas de semeadura de agosto a janeiro no hemisfério sul são projetados aumentos da duração do desenvolvimento inicial (até +24 dias), enquanto as datas de semeadura de fevereiro a julho são projetadas reduções da duração do desenvolvimento inicial (até -55 dias).

Por fim, o Capítulo V apresentou a viabilidade financeira para produção de uma muda das cinco espécies no clima futuro, considerando as projeções de aumentos de temperatura e medidas de adaptação. A viabilidade financeira será pouco impactada com a adoção de medidas adaptativas para garantir a qualidade e o vigor das mudas das cinco espécies no futuro. São projetados aumentos no Valor Presente Líquido entre ~ 0,2% a 3,5%, sendo maior quando há redução da duração do desenvolvimento inicial. Os aumentos projetados para a produção de uma muda são decorrentes do recipiente, substrato, intensificação da irrigação e aumento da frequência da aplicação de fungicidas. No futuro, a escolha adequada de tecnologias e insumos será determinante para minimizar os impactos negativos do aumento de temperatura e manter a viabilidade financeira dos viveiros florestais. Nesse sentido, a substituição de recipientes plásticos por recipientes biodegradáveis e o uso de fertilizantes de liberação controlada se destacam como alternativas promissoras para a sustentabilidade e competitividade do setor.

As metodologias adotadas nos cinco capítulos proporcionam uma análise abrangente do comportamento fenológico do desenvolvimento inicial das cinco espécies florestais e uma projeção dos desafios futuros para o cultivo dessas espécies. Em estudos futuros recomenda-se:

- Quanto à análise da influência de fatores na viabilidade das sementes das espécies florestais: incluir observações fenológicas detalhadas do estágio reprodutivo, avaliar o estado fitossanitário dos frutos e sementes durante o período de maturação fisiológica, além de considerar as variáveis meteorológicas durante a emergência das sementes.
- Quanto à descrição da escala fenológica de desenvolvimento inicial das espécies florestais: novos estudos devem ser realizados acoplando as necessidades meteorológicas, como temperatura, radiação solar, fotoperíodo ou níveis de sombreamento em cada subestágio de desenvolvimento.
- Quanto à análise da viabilidade financeira da produção de mudas, recomenda-se investigar novas estratégias de adaptação, especialmente aquelas voltadas para mitigar o estresse térmico, assim como ampliar a análise dos investimentos iniciais e dos custos de operação, incluindo a adoção de insumos e técnicas ecologicamente sustentáveis, como substratos à base de resíduos orgânicos, produção própria de microrganismos eficientes e uso de fertilizantes orgânicos de base animal. Além disso, é relevante comparar diferentes modelos de produção de mudas, desde viveiros altamente tecnificados até aqueles voltados em práticas sustentáveis e baseados em princípios ecológicos. Por essa abordagem será possível avaliar a viabilidade financeira em contextos distintos de manejo das mudas e estrutura produtiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL

- ALVES, F.J.B.; FREIRE, A.L.O. Crescimento inicial e qualidade de mudas de ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC) Mattos) produzidas em diferentes substratos. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v.13, p.195-202, 2017. <https://doi.org/10.30969/acsa.v13i3.877>.
- 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>.
- BATISTA, A.; CALMON, M.; LUND, S.; ASSAD, L.; PONTES, C.; BIDERMAN, R. **Investimento em reflorestamento com espécies nativas e sistemas agroflorestais no Brasil: uma avaliação econômica**. São Paulo: WRI Brasil, 2021. 90p. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wribrasil_verena_por_baixa_final.pdf. Acesso

13 fev. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa – PLANAVEG**. Brasília, DF: MMA, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbio/dflo/plano-nacional-de-recuperacao-da-vegetacao-nativa-planaveg>. Acesso em: 14 fev. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa 2025-2028 – PLANAVEG**. Brasília, DF: MMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbio/dflo/plano-nacional-de-recuperacao-da-vegetacao-nativa-planaveg>. Acesso em: 14 fev. 2025.

COSTA, D.B.; STRECK, N.A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciência Florestal**, v.28, p.1263–1279, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509833378>.

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. 47, p.1-11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118365>.

FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; REIS, F.Y.S.; COSTA, H.F. Predicting temperature ranges for the initial development of two native Brazilian tree species using multiple sowing dates. **Forest Ecology and Management**, v.562, p.121912, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121912>.

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>.

GRISCOM, B.W.; ADAMS, J.; ELLIS, P.W.; HOUGHTON, R.A.; LOMAX, G.; MITEVA, D.A.; SCHLESINGER, W.H.; SHOCH, D.; SIIKAMÄKI, J.V.; SMITH, P.; WOODBURY, P.; ZGANJAR, C.; BLACKMAN, A.; CAMPARI, J.; CONANT, R.T.; DELGADO, C.; ELIAS, P.; GOPALAKRISHNA, T.; HAMSIK, M.R.; HERRERO, M.; KIESECKER, J.; LANDIS, E.; LAESTADIUS, L.; LEAVITT, S.M.; MINNEMEYER, S.; POLASKY, S.; POTAPOV, P.; PUTZ, F.E.; SANDERMAN, J.; SILVIUS, M.; WOLLENBERG, E.; FARGIONE, J. Natural climate solutions. **PNAS**, v.114, p.11645-1650, 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>.

MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.; XAVIER, R.G.; RIBEIRO, G.T.S.; FAGUNDES, F.F.A.; REIS, F.Y.S.; COSTA, H.F.; BORGES, B.O. Phenological description and thermal time requirements for the seedling phase of three Brazilian native forest species. **Annals of Applied Biology**, v.184, p.259-274, 2024. <https://doi.org/10.1111/aab.12875>.

REIS, F.Y.S.; MARTINS, F.B.; TORRES, R.R.; FLORENCO, G.W.L.; CASSEMIRO, J.M.; MONTEIRO, V.F.C.; FERREIRA, M.C. Climate change impact on the initial development of tropical forest species: a multi-model assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, v.1, p.1-15, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03646-5>.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, **COP 21 Climate**

Agreement (UNFCCC, Paris). 2015. Disponível em:
<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2025.