



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

**TEMPERATURAS CARDINAIS E MODELAGEM DO
DESENVOLVIMENTO INICIAL DE DUAS ESPÉCIES
FLORESTAIS SOB CLIMA PRESENTE E FUTURO**

Flávia Fernanda Azevedo Fagundes

Itajubá, MG, Brasil

2023

TEMPERATURAS CARDINAIS E MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO INICIAL DE DUAS ESPÉCIES FLORESTAIS SOB CLIMA PRESENTE E FUTURO

por

Flávia Fernanda Azevedo Fagundes

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

Área de concentração/Linha de pesquisa:

Meio Ambiente e Recursos Hídricos/Clima e Sustentabilidade

Orientadora:

Prof^ª. Dra. Fabrina Bolzan Martins

**Itajubá, MG,
Brasil 2023**

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

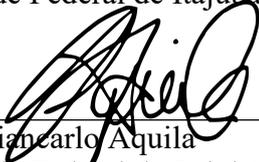
FLÁVIA FERNANDA AZEVEDO FAGUNDES

TEMPERATURAS CARDINAIS E MODELAGEM DO
DESENVOLVIMENTO INICIAL DE DUAS ESPÉCIES FLORESTAIS
SOB CLIMA PRESENTE E FUTURO

Dissertação aprovada por banca examinadora em 16 de fevereiro de 2023 conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

Banca examinadora:

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



Profº Dr. Giancarlo Aquila
Universidade Federal de Itajubá

Profº Dr. Roger Rodrigues Torres
Universidade Federal de Itajubá



Profª Dra. Vanessa da Fontoura Custódio Monteiro
Universidade do Vale do Sapucaí

Itajubá, MG,

Brasil 2023

*Dedico essa dissertação a minha família,
Antonio José, Maria Cleusa e Luiz Fernando*

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

A Deus, por tantas bênçãos, coisas e pessoas boas em minha vida, que de fato tornam cada batalha mais fácil. Aos meus pais, Antônio José e Maria Cleusa, pela oportunidade, afinal sou a primeira de toda família com uma graduação em uma Universidade Federal e agora, com um ‘quase’ título de mestrado. Sem eles nada seria possível, então, agradeço ao amor incondicional e esforço para que eu chegasse até aqui. E ao meu irmão, Luiz Fernando que é a minha pessoa favorita no mundo, meu grande incentivador. Ao meu namorado, Acássio pelo amor, respeito e admiração. Feliz em partilhar cada conquista com você.

Agradeço com todo meu coração minha orientadora, Fabrina (para mim, Mamis). Ela já sabe o quanto sou grata por tudo, nunca me canso de agradecer. E agora, não seria diferente, agradeço por cada reunião, aula, conversa, áudios (e olha que são longos kkk), correções, paciência, oportunidade e apoio. Se tem alguém que acredita no meu potencial é essa mulher, e o que eu mais desejo nessa vida é me tornar um pouquinho da profissional que ela é, dedicada, perseverante, batalhadora e muito trabalhadora. Quando eu olho para trás, só penso no quanto pude evoluir ao longo desses anos com a sua excelente orientação, então, mais uma vez, obrigada pela orientação, amizade e companheirismo.

À minha pessoa na UNIFEI e na vida, Ivana. Somos conhecidas por alguns professores como dupla inseparável e isso é um privilégio, assim como é um privilégio viver tantas coisas juntas. Ao Alysson, que sempre me ajudou na programação com paciência e perseverança, e as minhas amigas de Ensino Médio, Rafaella e Pauliana, pelo apoio incondicional nessa louca vida acadêmica.

À minha banca, Gian, Roger e Vanessa. Ao Gian, que topou de cara nos ajudar com um assunto que até para nós era novo. Mas, que sem medir esforços nos ajudou a chegar em um ótimo resultado, agradeço pela paciência, dedicação e profissionalismo. Ao Roger, um excelente professor, agradeço pela ajuda com os dados climáticos. E a Vanessa, uma querida, que me tirou todas as dúvidas com clareza e profissionalismo, sejam elas sobre as espécies ou fisiologia. É uma honra ter uma banca composta por vocês. Ao Dr. Cleber Witt Saldanha, que foi a luz para nossa ideia de estudo no capítulo III, e sempre me tirou dúvidas sobre viveiros florestais com profissionalismo, dedicação e alegria.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudo, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro aos projetos APQ-01392-13 e APQ 01258-17E, ao Instituto de Recursos Naturais (IRN) por fornecer subsídios para os experimentos e a UNIFEI e professores do POSMARH por um ensino de excelência.

RESUMO

FAGUNDES, Flávia Fernanda Azevedo. **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.

Os aumentos da temperatura do ar projetados ao longo do século XXI podem impactar na dinâmica do desenvolvimento inicial das espécies florestais, principalmente daquelas localizadas em hotspots de mudanças climáticas persistentes. Para lidar com tais ameaças é fundamental conhecer os limiares térmicos, avaliar o desenvolvimento em condições de clima presente e identificar os impactos, assim como avaliar a viabilidade financeira para produção de mudas em condições de clima futuro. Esta dissertação objetiva: i) estimar as temperaturas cardinais e o requerimento térmico, para o desenvolvimento inicial de duas espécies florestais nativas brasileiras - *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. e *Platygyamus regnellii* Benth - usando dados de múltiplas datas de semeadura, ii) calibrar e avaliar o desempenho de ambos modelos de desenvolvimento – Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) - em estimar a dinâmica do desenvolvimento inicial de ambas espécies, e, iii) identificar os possíveis impactos dos aumentos projetados da temperatura do ar na duração da fase de muda, e na viabilidade financeira para a produção de mudas das duas espécies florestais em um viveiro florestal. Para atingir os objetivos i e ii foram utilizados dados fenológicos provenientes de experimentos conduzidos ao longo de doze datas de semeadura durante os anos de 2017 e 2018 em Itajubá, Minas Gerais. As três temperaturas cardinais foram estimadas através das metodologias estatísticas apropriadas. Os dois modelos de desenvolvimento – FIL e WE – foram calibrados e avaliados para condições experimentais. Para atender o objetivo iii foram utilizados dados de 13 modelos climáticos do sistema terrestre (MST) do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP) da nova geração do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6). O modelo de desenvolvimento (FIL ou WE) que apresentou melhor desempenho para as condições experimentais foi alimentado com as saídas dos MSTs simulados para o clima presente (CP, 1995-2014), e projetados para o futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em dois cenários de forçantes radiativas (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Além disso, a viabilidade financeira para produção de mudas de ambas espécies foi analisada pelo valor presente líquido dos custos para o CP, FP e FD. A *C. antisyphilitica* se desenvolve apropriadamente entre as temperaturas de 13 °C, 20 °C e 48,4 °C e *P. regnellii* entre 13,7 °C, 21,5 °C e 43,4 °C. Para a *C. antisyphilitica* os modelos FIL e WE foram notavelmente similares na estimativa do número de folhas emitidas ao longo do tempo (NFa) e duração da fase de muda (DFM), com erro de ~3.3 folhas e 25 dias, respectivamente. Por outro lado, o modelo WE foi ligeiramente superior para *P. regnellii*, com erro inferior a 2,06 folhas (NFa) e 13,1 dias (DFM). Os aumentos projetados da temperatura do ar entre ~ 1,1 °C e ~ 4 °C para Itajubá não deverão inviabilizar a DFM das duas espécies florestais, porém, poderão gerar perdas financeiras em viveiros florestais devido a necessidade de implementação de medidas de adaptação. Semeaduras simuladas entre janeiro a junho poderão ter reduções consideráveis na DFM para ambas espécies florestais (de até 36 dias). Diferentemente, as semeaduras simuladas de julho a dezembro poderão ter pequenos aumentos na DFM (entre 1 a 10 dias). De qualquer forma, será necessário adotar medidas adaptativas para manter a qualidade e vigor das mudas no FP e FD, as quais gerarão aumentos nos custos da produção de mudas de aproximadamente 9% a 137%. Aumentos mais significativos nos custos ocorrerão nos meses de agosto a novembro, exatamente nos quais os aumentos da DFM são projetados.

Palavras-chave: Temperatura do ar, Taxa de aparecimento de folhas, Duração da fase de muda, Mudanças climáticas, Produção de mudas, Medidas adaptativas.

ABSTRACT

FAGUNDES, Flávia Fernanda Azevedo. **Cardinal temperatures and modeling of the initial development of two forest species under current and future climate.** 2023. 113 f. Master of Science (Master in Environment and Water Resources) - Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2023.

Increases in air temperature projected throughout the 21st century may impact the initial development dynamics of forest species, especially those located in persistent climate change hotspots. To deal with such threats, it is essential to know the thermal thresholds, evaluate development in current climate conditions and identify the climate change impacts, as well as assess the financial viability for seedling production in future climate conditions. This dissertation aims to: i) estimate the cardinal temperatures and the thermal requirements for the initial development of two native Brazilian forest species - *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. and *Platycyamus regnellii* Benth - using data from multiple sowing dates, ii) calibrate and evaluate the performance of both developmental models – Philochron (Phyl) and Wang and Engel (WE) - in estimating the initial development dynamics of both species, and , iii) identify the possible impacts of projected increases in air temperature on the seedling phase duration, and financial viability for the production of seedlings of the two forest species in a forest nursery. To achieve i and ii aims, phenological data from experiments conducted over twelve sowing dates during the years 2017 and 2018 in Itajubá, Minas Gerais were used. The three cardinal temperatures were estimated using appropriate statistical methods. The two development models – Phyl and WE – were calibrated and evaluated for experimental conditions. Regarding iii aim, data from 13 Earth System Models (ESM) from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP), i.e., the new generation from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) were used. The development model (Phyl or WE) that presented the best performance for the experimental conditions was fed with the ESMs outputs simulated for the current climate (CC, 1995-2014), and projected for the near future (NF, 2041-2060) and far future (FF, 2081-2100) in two radiative forcing scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). In addition, the financial viability of producing seedlings of both species was analyzed using the net present value for CC, NF and FF. *C. antisiphilitica* develops properly between temperatures of 13 °C, 20 °C and 48.4 °C and *P. regnellii* between 13.7 °C, 21.5 °C and 43.4 °C. For *C. antisiphilitica*, the Phyl and WE models were remarkably similar in estimating the cumulative leaf number (CLN), and seedling phase duration (SPD), with an error of ~3.3 leaves and 25 days, respectively. On the other hand, the WE model was slightly superior for *P. regnellii*, with an error of less than 2.06 leaves (CLN) and 13.1 days (SPD). The projected increases in air temperature between ~ 1.1 °C and ~ 4 °C for Itajubá should not make the SPD of the two forest species unfeasible. However, they could generate financial losses in forest nurseries due adaptation measures. Simulated sowing dates between January and June may have SPD reductions for both forest species (up to 36 days). On the contrary, the simulated sowing dates from July to December may have small SPD increases (between 1 and 10 days). It will be necessary to adopt adaptive measures to maintain the seedlings quality and vigor in NF and FF, which will generate increases in seedling production costs from approximately 9% to 137%. More significant increases in costs will occur from August to November, exactly when the SPD increases are projected.

Keywords: Air temperature; Leaf appearance rate; Seedling phase duration; Climate change; Seedling production; Adaptive measures.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 - Localização da área de estudo e distribuição das duas espécies florestas tropicais no Brasil (Painel A) e no estado de Minas Gerais (Painel B). Os domínios fitogeográficos (IBGE, 2014) e os dados de distribuição das espécies florestais tropicais estão disponíveis em <https://specieslink.net/>. 21

Figura 1.2 - Variação da duração do desenvolvimento inicial (em dias), temperatura mínima (T_{min} , °C), média (T , °C) e máxima (T_{max} , °C) do ar (Painel A e B), precipitação acumulada (mm data de semeadura⁻¹), radiação solar global ($Mj\ m^{-2}\ dia^{-1}$) e fotoperíodo médio (P , horas) (Painel C e D) nas diferentes datas de semeadura dos experimentos conduzidos em Itajubá. *DS com perda de repetições da *C. antisyphilitica*. 22

Figura 1.3 - Valores de quadrado médio do erro (QME) obtidos a partir das regressões entre o número de folhas emitidas na haste principal e a soma térmica acumulada, calculada com diferentes valores de temperatura base (variando entre 0 °C a 20 °C), para a *Cybistax antisyphilitica* (painel A) e *Platygyamus regnellii* (painel B). Consulte a tabela 1.1 para as datas de semeadura. 27

CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Funções de resposta à temperatura usadas no modelo do filocrono (A), dada pela soma térmica, e o modelo de Wang e Engel (B), dada pela função beta de temperatura, para estimar o número de folhas cumulativa usando as temperaturas cardinais de desenvolvimento inicial para *Cybistax antisyphilitica* ($T_b = 13\ ^\circ C$, $T_{ot} = 20\ ^\circ C$, $T_B = 48,4\ ^\circ C$) e *Platygyamus regnellii* ($T_b = 13,7\ ^\circ C$, $T_{ot} = 21,5\ ^\circ C$, $T_B = 43,4\ ^\circ C$) (Capítulo I). 46

Figura 2.2 - Datas de semeadura (DS) variação de (A – B) temperatura do ar (°C) – mínima, média e máxima, duração da fase de muda (DFM, dias), soma térmica (ST, °C dia), (C - D) precipitação acumulada (mm) e radiação solar global média ($Mj\ m^{-2}\ dia^{-1}$) durante os experimentos controlados a céu aberto em Itajubá, Minas Gerais. *DS com perda de repetições da *C. antisyphilitica*. 49

Figura 2.3 - Número de folhas acumulados (NFa) estimados versus observados pelos modelos Filocrono (FIL) (painéis A e C) e Wang e Engel (WE) (painéis B e D) e duração da fase de muda (DFM, dias) (painéis E e F) para *Cybistax antisyphilitica* (painéis A, B e E) e *Platygyamus regnellii* (painéis C, D e F). A linha contínua é a linha 1:1. O valor de BIAS é a diferença entre o DFM estimado menos o observado com dois modelos de desenvolvimento (FIL e WE). ... 54

CAPÍTULO III

Figura 3.1 - Representação esquemática das etapas de cálculo da viabilidade financeira para

produzir uma muda das espécies nativas *Cybistax antisyphilitica* e *Platycyamus regnellii* no clima presente (CP, 1995-2014) e futuro (FP, 2041-2060 e FD, 2081-2100) considerando a duração da fase de muda para cada uma das 12 datas de simulação de semeadura (ver detalhes no item 1.2.1 do Capítulo I). 77

Figura 3.2 - Validação, ciclo mensal e anual da temperatura média do ar (T, °C) simulada pelos 13 modelos climáticos do sistema terrestre do conjunto de dados do NEX-GDDP (do CMIP6), *ensemble mean* e dados observados disponibilizados por Xavier et al. (2016) para o clima atual (CP, 1995 – 2014). Os dados foram extraídos para o ponto de grade próximo à Itajubá (22°25,5'S e 45°27'W)..... 78

Figura 3.3 - Painéis A e C) Variação temporal simulada para o clima presente (CP = 1980-2004) e projetada para o clima futuro (FP = 2041-2060; FD = 2081-2100) para a temperatura média do ar para Itajubá obtida pelos 13 modelos climáticos do sistema terrestre (MSTs) do NEX-GDDP em dois cenários socioeconômicos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). As linhas em negrito (preto, laranja e vermelho) representam o *ensemble mean* dos MSTs. As linhas gradiente (cinza, laranja e vermelho) representam os dados de cada MST. Painéis B e D) Boxplot das diferenças entre clima futuro (FP e FD) e clima presente (CP) para a temperatura média do ar em dois cenários socioeconômicos (SSP2-4.5 = laranja no painel B e SSP5-8.5 = vermelho no painel D). 79

Figura 3.4 - Variação temporal duração da fase de muda (DFM, em dias) simulada para o clima presente (CP = 1995-2044) e projetada para os climas futuros (FP = 2041-2060 e FD = 2081-2100) em dois cenários socioeconômicos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) pelos 13 modelos climáticos do sistema terrestre (MSTs) para *Cybistax antisyphilitica* (A) e *Platycyamus regnellii* (B). As linhas claras (em cinza, laranja e vermelho) representam a duração da fase de muda para cada MST do NEX-GDDP, e as linhas em negrito (preto, laranja e vermelho) representam a média da DFM. 80

Figura 3.5 - Duração da fase de muda (DFM, em dias) para *Cybistax antisyphilitica* (A e B) e *Platycyamus regnellii* (C e D) simulada para o clima presente (CP, 1995–2014), projetada para o futuro próximo (FP, 2041–2060) e futuro distante (FP, 2081–2100) nos dois cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: A e C e SSP5-8.5: B e D) para as doze datas de simulação da semeadura (DS1 a DS12). As colunas verticais referem-se ao desvio padrão da DFM dos 13 MSTs do NEX-GDDP para FP (em cinza claro) e FD (em cinza escuro). 81

Figura 3.6 – Valor presente líquido (VPL, em reais) (Painéis A a D) e porcentagem de mudança (Painéis E a H) nos custos para produção de uma muda de *Cybistax antisyphilitica* (Painéis A, C, E e G) e *Platycyamus regnellii* (Painéis B, D, F e H) calculados para o clima presente (CP, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em dois cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: A, B, E e F e SSP5-8.5: C, D, G e H) para as 12 datas de simulação de semeadura. As barras verticais nos painéis A - D representam a mudança, ou seja, a diferença entre o VPL no FP e FD (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CP para cada data de simulação de semeadura. 90

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.1 - Datas de semeadura, emergência e término do desenvolvimento inicial das espécies nativas *Cybistax antisyphilitica* e *Platycyamus regnellii* durante o período no qual os experimentos foram conduzidos em Itajubá, Minas Gerais, Brasil..... 20

Tabela 1.2 - Comparação de médias para a variável filocrono ($1/a$, °C dia por folha) e taxa de desenvolvimento (a , folha por °C dia) para a *Cybistax antisyphilitica* e *Platycyamus regnellii* nas doze datas de semeadura. 28

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Desempenho dos modelos Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) em estimar o número cumulativo de folhas (NFa) nas espécies florestais nativas – *Cybistax antisyphilitica* e *Platycyamus regnellii* – Itajubá, Minas Gerais, 2017/2018. 52

CAPÍTULO III

Tabela 3.1 - Discriminação, especificação e valor (em reais, R\$) dos itens que compõem os investimentos iniciais e custos de operação para produzir uma (01) muda das espécies florestais nativas *Cybistax antisyphilitica* e *Platycyamus regnellii* no viveiro florestal. 74

Tabela 3.2 - Comparação de médias para a duração da fase de muda (DFM, em dias) para *Cybistax antisyphilitica* e *Platycyamus regnellii*, considerando as simulações realizadas para o clima presente (CP = 1995–2014) e as projeções para dois climas futuros (FP = 2041–2060, FD = 2081–2100) para as doze datas de simulação de semeadura em dois cenários socioeconômicos (SSP 2-4.5 e 5-8.5) para Itajubá. 83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a – Inclinação da regressão linear
- ANOVA – Análise de variância
- ATP – Adenosina trifosfato
- b – coeficiente linear
- CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (1999)
- CMIP – *Coupled Model Intercomparison Project*
- CMIP6 - *Coupled Models Intercomparison Project Phase 6*
- CO₂ – Dióxido de carbono
- CP – Clima presente
- DFM – Duração da fase de muda
- DS – Data de semeadura
- f(T) – Função beta de temperatura do ar
- FD – Futuro distante
- FIL – Filocrono
- FP – Futuro próximo
- i – Data de emergência
- Índice – c – Índice de desempenho
- MST – Modelo climáticos do sistema terrestre
- n – Término do desenvolvimento inicial
- NCCS – *NASA Center for Climate Simulation*
- NEX-GDDP - *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*
- NFa – Número de folhas acumulado ao longo do tempo
- NFF – Número de folhas final
- O₂ – Oxigênio
- QME – Quadrado médio do erro
- r – Correlação de Pearson
- RCP – *Representative Concentration Pathways*
- RQME – Raiz quadrada média do erro
- RT – Requerimento térmico
- RuBisCo – ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase-oxigenase
- RuBP – ribulose-1,5-bifosfato
- SSP – *Shared Socioeconomic Pathways*

ST – Soma térmica

STa – Soma térmica acumulada

STd – Soma térmica diária

T – Temperatura média do ar

TAF – Taxa diária de aparecimento de folhas

TAF_{FIL} – Taxa diária de aparecimento de folha pelo modelo Filocrono

TAF_{max} – Taxa diária máxima de aparecimento de folhas

TAF_{WE} – Taxa diária de aparecimento de folha pelo modelo Wang e Engel

Tb – Temperatura basal inferior

TB – Temperatura basal superior

Tmax – Temperatura máxima do ar

Tmin – Temperatura mínima do ar

Tot – Temperatura ótima

VPL – Valor presente líquido

WE – Wang e Engel

Δ – Valor do teste Tukey

α – Coeficiente alfa da função beta de temperatura do ar

B – Valor do teste de Bartlett

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	14
CAPÍTULO I.....	16
1.1. INTRODUÇÃO.....	16
1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
1.2.1. Desenho experimental e dados.....	20
1.2.2. Estimativa da temperatura basal inferior.....	23
1.2.3. Estimativa da temperatura ótima e filocorno.....	24
1.2.4. Estimativa da temperatura basal superior.....	24
1.3. RESULTADOS.....	25
1.4. DISCUSSÃO.....	29
1.5. CONCLUSÃO.....	33
1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
CAPÍTULO II.....	41
2.1. INTRODUÇÃO.....	41
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
2.2.1. Desenho experimental e dados.....	45
2.2.2. Modelos de desenvolvimento inicial.....	45
2.3. RESULTADOS.....	48
2.4. DISCUSSÃO.....	55
2.5. CONCLUSÃO.....	59
2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
CAPÍTULO III.....	66
3.1. INTRODUÇÃO.....	66
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	70
3.2.1. Dados e descrição do modelo de desenvolvimento da muda.....	70
3.2.2. Simulações, projeções e avaliação dos impactos na duração da fase de muda.....	71
3.2.3. Análise da viabilidade financeira.....	73
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	78
3.3.1. Validação das saídas dos modelos climáticos para o clima presente e projeções de mudanças na temperatura do ar.....	78
3.3.2. Simulação e projeções da duração da fase de muda.....	80
3.3.3. Medidas de adaptação para minimizar os impactos nas mudas e nos viveiros florestais.....	87
3.3.4. Impactos dos aumentos da temperatura do ar na viabilidade financeira para produção de mudas das duas espécies florestais nativas em viveiros florestais.....	88
3.4. CONCLUSÃO.....	92
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
CONCLUSÃO GERAL.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL.....	104
ANEXOS CAPÍTULO I.....	105
ANEXOS CAPÍTULO III.....	107

INTRODUÇÃO GERAL

A temperatura do ar é uma das variáveis chave no desenvolvimento das espécies florestais, pois atua como moderadora das reações da fotossíntese, respiração e fotorrespiração, na regulação das atividades enzimáticas, na velocidade de transporte e translocação de solutos e no balanço entre a transpiração e consumo de água do solo (FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019; SILVA et al., 2020). Portanto, os aumentos de temperatura projetados para ocorrer ao longo do século XXI podem trazer ameaças adicionais ao desenvolvimento das espécies florestais (COSTA e STRECK, 2018; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022a e 2022b) e prejuízos financeiros ao setor florestal.

Para investigar as respostas das espécies florestais às variações de temperatura do ar é necessário, primeiramente, definir os limiares térmicos adequados ao desenvolvimento, calibrar e avaliar os modelos de desenvolvimento para condições de clima presente, e, posteriormente, alimentar os modelos de desenvolvimento com saídas dos modelos climáticos do sistema terrestre (MSTs) projetados para o clima futuro (FAGUNDES et al., 2021). Os MST do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) constituem o estado da arte em termos de modelos climáticos (IPCC, 2021), que aplicados nos modelos de desenvolvimento possibilitam projetar a dinâmica do desenvolvimento e fornecem informações como número de folhas acumuladas na haste principal (NFA), número final de folhas (NFF) (COSTA e STRECK, 2018; FLORÊNCIO et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021) e a duração da fase de muda (DFM).

Apesar da grande importância, estudos sobre a estimativa dos limiares térmicos, calibração dos modelos de desenvolvimento, e avaliação dos impactos dos aumentos projetados da temperatura do ar são escassos para a maioria das espécies florestais, principalmente as espécies nativas que possuem menor interesse econômico. No Brasil, os poucos estudos existentes foram realizados para espécies florestais de interesse econômico, como: *Eucalyptus saligna* (Sm.), *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden) (COSTA e STRECK, 2018), *Corymbia citriodora* (Hook.) (K.D. Hill & L.A.S. Johnson), *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) (MARTINS et al., 2023), e *Psidium guajava* L. (REIS et al., 2021), e para algumas espécies nativas, como: *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg., *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz (FAGUNDES et al., 2021), *Citharexylum myrianthum* Cham. e *Bixa orellana* L. (REIS et al., 2021). Entretanto, os estudos acima mencionados não consideraram os riscos financeiros do aumento da temperatura do ar no desenvolvimento das espécies.

Dada a escassez de estudos dessa natureza e considerando a vasta diversidade de

espécies florestais, essa dissertação buscou responder três questões, todas focadas nas espécies florestais nativas *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. e *Platygyamus regnellii* Benth., que possuem grande interesse ecológico e ambiental: i) Quais são os limiares térmicos adequados para o desenvolvimento das duas espécies florestais nativas? ii) Modelos de desenvolvimento conseguem prever a dinâmica do desenvolvimento inicial (NFa, NFF e DFM) destas espécies? iii) Qual o impacto das projeções dos MSTs do CMIP6 no desenvolvimento e na viabilidade financeira para produzir mudas de ambas espécies? Para responder essas questões, a dissertação foi dividida em três capítulos. O Capítulo I teve como objetivo estimar os valores das temperaturas cardinais^[1] e o requerimento térmico, através do filocrono^[2], para o desenvolvimento inicial de duas espécies florestais nativas brasileiras usando dados de múltiplas datas de semeadura; o Capítulo II teve como objetivo calibrar e avaliar o desempenho de dois modelos de desenvolvimento – Filocrono e Wang e Engel^[3]- em estimar a dinâmica do desenvolvimento inicial, através do NFa, NFF e DFM, durante a fase de muda; e o Capítulo III teve como o objetivo identificar os possíveis impactos dos aumentos projetados da temperatura do ar na DFM e na viabilidade financeira da produção de mudas das espécies *C. antisyphilitica* e *P. regnellii* para o município de Itajubá, localizado em Minas Gerais, para o clima futuro.

^[1] Temperaturas cardinas são os limiares térmicos que delimitam o desenvolvimento das espécies florestais, sendo definidas pela temperatura basal inferior, ótima e basal superior (MARTINS et al., 2007).

^[2] Filocrono é um modelo de desenvolvimento que relaciona o número de folhas acumuladas ao longo do tempo com uma função linear de temperatura (STRECK et al., 2011).

^[3] Wang e Engel é um modelo de desenvolvimento que relaciona o número de folhas acumuladas ao longo do tempo com uma função não linear de temperatura (WANG e ENGEL, 1998).

CAPÍTULO I

PREVENDO AS TEMPERATURAS CARDINAIS E REQUISITOS TÉRMICOS PARA O DESENVOLVIMENTO INICIAL DAS DUAS ESPÉCIES FLORESTAIS NATIVAS USANDO MULTIPLAS DATAS DE SEMEADURA

1.1. INTRODUÇÃO

A temperatura do ar é a variável chave no desenvolvimento das espécies florestais tropicais, influenciando processos relacionados ao aparecimento de folhas (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a; SILVA et al., 2020; MARTINS et al., 2022c), aparecimento dos primórdios florais, flores e frutos (RAWAL et al., 2014; DILUCCHIO et al., 2018; KUMAR et al., 2019), assim como a distribuição geográfica (PIROVANI et al., 2018; SILVA et al., 2019; BAATH et al., 2020 e 2022; MARTINS et al., 2022b; FLORÊNCIO et al., 2022). Exposição (gradual ou abrupta) a temperaturas elevadas influenciam negativamente na formação das estruturas moleculares (proteínas e DNA) ou supramoleculares (membranas e cromossomos), além de causar estresses fisiológicos (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; NIEVOLA et al., 2017), limitando o balanço de carbono nas plantas (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; FAGUNDES et al., 2021; FLORÊNCIO et al., 2022). Por outro lado, exposições a baixas temperaturas podem resultar em inibição ou atraso no desenvolvimento ou levar a danos irreversíveis e/ou morte celular (HATFIELD e PRUEGER, 2015; SILVA et al., 2020; BAATH et al., 2022; MARTINS et al., 2022a e 2022c), devido a redução nas atividades enzimáticas, enrijecimento da membrana, acúmulo de espécies reativas de oxigênio e redução da fotossíntese (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; BAHUGUNA e JAGADISH, 2015). Tais impactos podem ser mais drásticos durante o desenvolvimento inicial das espécies florestais (MORIN et al., 2010; RAWAL et al., 2014; COSTA e STRECK, 2018; FLORÊNCIO et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022a e 2022c), por ser a fase mais sensível e menos tolerante às variações da temperatura do ar (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022a e 2022c).

Para prever as respostas das espécies florestais às variações de temperatura do ar é necessário, primeiramente, definir os limiares térmicos adequados para o desenvolvimento (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; SILVA et al., 2020). Três temperaturas cardinais (basal inferior – T_b , ótima – T_{ot} e basal superior – T_B) delimitam a faixa de temperatura onde ocorre o desenvolvimento (MARTINS et al., 2007;

KAMKAR et al., 2012; HATFIELD e PRUEGER, 2015; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a), sendo valores específicos de cada espécie florestal. As T_b e T_B representam, respectivamente, as temperaturas abaixo e acima das quais os processos fisiológicos e metabólicos são reduzidos, e onde praticamente não há aparecimento de novas folhas (SILVA et al., 2020; MARTINS et al., 2022a). Ou seja, valores de temperatura do ar próximos à T_b reduzem todas as reações metabólicas incluindo a fotossíntese (FERREIRA et al., 2019b; BAATH et al., 2020), enquanto próximos à T_B afetam a fluidez da membrana, metabolismo, rearranjo do citoesqueleto e leva a um aumento na relação fotorrespiração/fotossíntese (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; SLOT e WINTER, 2017). Já a T_{ot} representa a temperatura em que a taxa de desenvolvimento é máxima (HATFIELD e PRUEGER, 2015; BAATH et al., 2020), e consequentemente o aparecimento de novas folhas é maior (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; SILVA et al., 2020).

A T_b , T_{ot} e T_B são variáveis de entrada essenciais em modelos de desenvolvimento de espécies florestais tropicais (MARTINS e STRECK, 2007; MONTEIRO et al., 2014; FERREIRA et al., 2019a; MARTINS et al., 2022c), como o filocrono, que descreve o desenvolvimento pela relação entre taxa de aparecimento de folhas e soma térmica (ST , °C dia) (MARTINS e STRECK, 2007; STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2014; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022a e 2022c). Através do filocrono (°C dia por folha) é possível quantificar o requerimento térmico para atingir um estágio de desenvolvimento, além de ser usado para múltiplas finalidades, como: comparar o desenvolvimento entre espécies florestais em condições de clima presente (FERREIRA et al., 2019a; MARTINS et al., 2022a e 2022c), projetar o desenvolvimento no clima futuro (COSTA e STRECK, 2018; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021), assim como prever a duração da fase de desenvolvimento inicial em viveiros florestais e o tempo de venda das mudas (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c).

As temperaturas cardinais são estimadas por métodos estatísticos específicos, os quais utilizam dados de desenvolvimento e temperatura do ar (LAGO et al., 2009; LISBOA et al., 2012; SOUZA e MARTINS, 2014; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b). Por exemplo, o número de folhas acumuladas ao longo do tempo (N_{Fa}) durante a fase de muda é a variável mais utilizada para medir o desenvolvimento inicial em espécies florestais (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019b; SILVA et al., 2020; MARTINS et al., 2022c). Neste tipo de estudo, é mandatório que as plantas sejam submetidas à ampla gama de temperatura do ar (SINCLAIR et al., 2004; KAMKAR et al., 2012; FREITAS et al., 2017), que pode ser obtida com precisão em câmaras de ambiente controlado (BAATH

et al., 2020 e 2022). No entanto, esses sistemas impõem regimes de temperatura, radiação, fotoperíodo, vento e umidade que se desviam substancialmente das condições observadas no campo (WHITE et al., 2012; ERPEN et al., 2013; FREITAS et al., 2017; SILVA et al., 2020; MARTINS et al., 2022a). Duas opções complementares para expor as plantas a uma gama de temperaturas do ar são: i) sistema de aquecimento artificial (T-FACE) (KIMBALL, 2005; KIMBALL et al., 2008; WHITE et al., 2012), ou ii) uso de experimentos de campo com múltiplas datas de semeadura (DS) (LAGO et al., 2009; ERPEN et al., 2013; MARTINS et al., 2014; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; FREITAS e MARTINS, 2019; MARTINS et al., 2022a). Nesse sentido, a segunda opção acaba sendo bastante utilizada pelo menor custo e pela capacidade de gerar estimativas confiáveis de Tb, Tot e TB em espécies florestais (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; SILVA et al., 2020).

Apesar dos valores de Tb, Tot e TB serem essenciais em modelos de desenvolvimento e utilizados para múltiplos usos, seus valores são desconhecidos para a maioria das espécies florestais, principalmente espécies nativas, que possuem menor interesse econômico. Os escassos estudos existentes foram realizados para algumas espécies nativas brasileiras como, *Hymenolobium petraeum* Ducke, *Parkia pendula* (Willd.) Benth. ex Walp. (MONTEIRO et al., 2014), *Citharexylum myrianthum* Cham. e *Bixa orellana* L. (FERREIRA et al., 2019b), *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz (anteriormente denominada como *Caesalpinia ferrea* Mart. ex Tul.), *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. (muitas confundida com *Anadenanthera macrocarpa* [Benth.] Brenan) (SILVA et al., 2020), e espécies exóticas como *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden) e *Eucalyptus saligna* (Sm.) (MARTINS et al., 2007), *Adenanthera pavonina* (L.) e *Cassia fistula* (L.) (MONTEIRO et al., 2014), *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D Hill & L.A.S Johnson (basiônimo: *E. citriodora*) (FREITAS et al., 2017) e *Psidium guajava* L. (FERREIRA et al., 2019a).

Dentre as inúmeras espécies florestais nativas do Brasil, duas merecem atenção devido a sua importância ecológica e ambiental, *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. (Bignoniaceae; ipê-verde, ipê-caroba ou caroba-verde) e *Platygyamus regnellii* Benth. (Fabaceae, pau-pereira, mangalô ou folha-de-bolo). Ambas são encontradas nos domínios fitogeográficos Cerrado, Caatinga, Amazônia e Pantanal (Figura 1.1, item 1.2.1), que apresentam maior vulnerabilidade aos aumentos projetados de temperatura do ar (SILVA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021).

A *C. antisyphilitica* é uma espécie pioneira (ORTOLANI et al., 2008) presente nos cinco domínios fitogeográficos brasileiros (Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Amazônia, Pampa e Pantanal) (COSTA et al., 2019; LOHMANN, 2020; FREITAS et al., 2022). Possui ciclo perene,

é caducifólia, heliófila, de pequeno a médio porte, e se estabelece em solos arenosos e pedregosos e de baixa fertilidade natural (ORTOLANI et al., 2008). Por esse motivo, é recomendada para recuperação e recomposição de áreas degradadas e para fins paisagísticos, e na arborização urbana (FREITAS et al., 2011; BITTENCOURT et al., 2011; RIBEIRO et al., 2018; RIBEIRO-OLIVEIRA et al., 2019). Entretanto, como a madeira possui baixa densidade ($0,59 \text{ g/cm}^3$) e baixa resistência ao apodrecimento, é utilizada apenas na fabricação de ripas, caixotaria e pasta celulósica (ORTOLANI et al., 2008; GUILHERME et al., 2011; BITTENCOURT et al., 2011). Já sua casca é usada na medicina popular por conter lapachol, um composto natural que apresenta ação anti-inflamatória, analgésica, antibiótica, antissifilítica, antiepiléptica e antineoplásica (FREITAS et al., 2011; BITTENCOURT et al., 2011; GUILHERME et al., 2011; SALOMÃO et al., 2018; RIBEIRO-OLIVEIRA et al., 2019), além de possuir atividade larvicida contra o mosquito *Aedes aegypt* (RODRIGUES et al., 2005). *C. antisiphilitica* também possui importância ecológica, uma vez que suas flores fornecem néctar e pólen para abelhas durante a estação seca, principalmente no Cerrado (ALMEIDA et al., 2003; BITTENCOURT et al., 2011).

A *P. regnellii* é endêmica do Brasil, secundária (MOURA et al., 2016; SAUERESSIG, 2017) e presente nos domínios fitogeográficos da Mata Atlântica e Cerrado (MOURA et al., 2016; LEAL et al., 2019; MOURA, 2020). Possui ciclo perene, caducifólia, heliófila, se estabelece em solos pedregosos e de baixa fertilidade, e, portanto, é recomendada para recomposição de matas ciliares, na recuperação e restauração de áreas degradadas e também para fins paisagísticos e na arborização urbana (FERREIRA et al., 2015; SAUERESSIG, 2017; SOUZA et al., 2021). Possui madeira com elevada densidade ($0,81 \text{ g/cm}^3$), sendo utilizada para fins mobiliários, na construção civil, carpintaria e manufatura (SOUZA et al., 2021), e as flores são atrativas às abelhas (SAUERESSIG, 2017). Suas raízes e cascas possuem múltiplos usos na medicina popular contra febre, má digestão e inapetência (CURY e TOMAZELLO-FILHO 2011; SOUZA et al., 2021). Além disso, é utilizada em plantios agroflorestais em consórcio com culturas como o café (SAUERESSIG, 2017).

Dada escassez de estudos desta natureza, o desconhecimento das temperaturas cardinais e a importância ecológica e ambiental da *C. antisiphilitica* e *P. regnellii*, objetivou-se com este estudo estimar os valores de Tb, Tot e TB e o requerimento térmico, através do filocrono, para o desenvolvimento inicial dessas duas espécies florestais nativas brasileiras usando dados de múltiplas datas de semeaduras (DSs).

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. Desenho experimental e dados

Os dados de desenvolvimento utilizados neste estudo referem-se ao NFa contabilizados semanalmente desde a data da emergência (i) até a data de término do desenvolvimento inicial (n) de cada espécie florestal (Tabela 1.1). i foi considerado como a data em que 36% das sementes emergiram e estavam visíveis acima do solo, enquanto o término do desenvolvimento inicial foi considerado como o dia em que *C. antisyphilitica* atingiu NFa = 20 folhas, e *P. regnellii* atingiu NFa = 10 folhas. Ambos limiares de NFa representam o patamar ideal para a comercialização das mudas das duas espécies nativas com altura de ~40 cm (OLIVEIRA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2016). Quaisquer brotações laterais foram removidas para que apenas a haste principal se desenvolvesse (FERREIRA et al., 2019a e 2019b; MARTINS et al., 2022a).

Tabela 1.1 - Datas de semeadura, emergência e término do desenvolvimento inicial das espécies nativas *Cyristax antisyphilitica* e *Platycyamus regnellii* durante o período no qual os experimentos foram conduzidos em Itajubá, Minas Gerais.

Datas de semeadura (DS)	<i>Cyristax antisyphilitica</i>		<i>Platycyamus regnellii</i>	
	Emergência ¹ (i)	Término ² (n)	Emergência ¹ (i)	Término ² (n)
DS1, 20 de jan, 2017	17 de fev, 2017	27 de out, 2017	10 de fev, 2017	02 de jun, 2017
DS2, 20 de fev, 2017	10 de mar, 2017	17 de nov, 2017	24 de fev, 2017	10 de nov, 2017
DS3, 20 de mar, 2017	31 de mar, 2017	20 de out, 2017	24 de mar, 2017	01 de dez, 2017
DS4, 20 de abr, 2017	12 de mai, 2017	03 de nov, 2017	05 de mai, 2017	20 de out, 2017
DS5, 19 de maio, 2017	16 de jun, 2017	12 de jan, 2018	02 de jun, 2017	17 de nov, 2017
DS6, 20 de jun, 2017	07 de jul, 2017	25 de mai, 2018	14 de jul, 2017	22 de dez, 2017
DS7, 20 de jul, 2017	18 de ago, 2017	11 de mai, 2018	11 de ago, 2017	08 de dez, 2017
DS8, 29 de ago, 2017	22 de set, 2017	02 de mar, 2018	08 de set, 2017	08 de dez, 2017
DS9, 20 de set, 2017	06 de out, 2017	01 de jun, 2018	06 de out, 2017	02 de mar, 2018
DS10, 20 de out, 2017	10 de nov, 2017	13 de abr, 2018	03 de nov, 2017	19 de jan, 2018
DS11, 20 de nov, 2017	01 de dez, 2017	13 de abr, 2018	24 de nov, 2017	02 de mar, 2018
DS12, 20 de dez, 2017	*	*	29 de dez, 2017	23 de mar, 2018

¹Dia quando 36% das sementes germinaram e estavam visíveis acima do solo. ²Dia quando *Cybistax antisyphilitica* atingiu 20 folhas e *Platycomus regnellii* atingiu 10 folhas. * DS onde todas as repetições foram perdidas por motivos alheios as condições experimentais.

Os dados de NFA são provenientes de experimentos instalados a céu aberto no viveiro florestal do Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais (Figura 1.1), contabilizados em várias DSs ao longo dos anos de 2017 e 2018. Itajubá possui clima típico de monção, com duas estações bem definidas: outono/inverno secos (de abril a setembro) e primavera/verão úmido (outubro a março) (MARTINS et al., 2022c), e possui ocorrência natural das espécies *C. antisyphilitica* e *P. regnellii*.

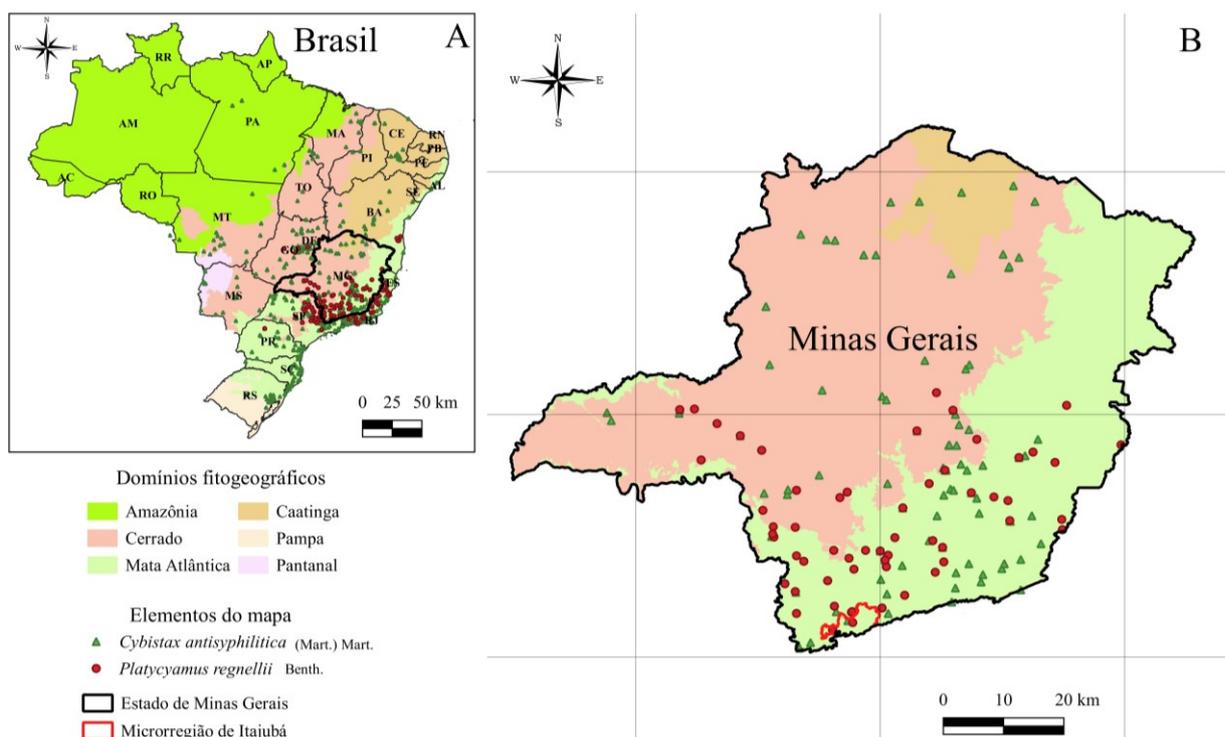


Figura 1.1 - Localização da área de estudo e distribuição das duas espécies florestais tropicais no Brasil (Painel A) e no estado de Minas Gerais (Painel B). Os domínios fitogeográficos (IBGE, 2014) e os dados de distribuição das espécies florestais tropicais estão disponíveis em <https://specieslink.net/>.

As sementes de ambas espécies foram coletadas de diferentes matrizes (isoladas) localizadas em fragmentos florestais de cidades próximas a Itajubá (Figura 1.1 B) em dois períodos distintos de dispersão (maio/outubro para *C. antisyphilitica* e agosto/setembro para *P. regnellii*) em 2016 e 2017. A fim de conservar a viabilidade das sementes, foram seguidas as recomendações de Medeiros (2001) e Lorenzi (2014) para a coleta, secagem e o armazenamento em câmara fria (entre 2 °C a 5 °C).

Os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado com as sementes da *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* semeadas em vasos de polietileno branco de 11L, em doze DS (Tabela 1.1) instaladas em intervalos de aproximadamente 30 dias em cinco repetições (= vasos), totalizando 10 vasos por DS. O uso de múltiplas DSs garante que as plantas se desenvolvam em condições mais próximas às reais de campo (FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019b; SILVA et al., 2020; MARTINS et al., 2022a e 2022c) e em diferentes condições meteorológicas, especialmente temperatura do ar (Figura 1.2). Tais condições são requisitos importantes na estimativa da T_b , T_{ot} e T_B (ROSA et al., 2009; WHITE et al., 2012; MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019a e 2019b) e filocrono (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022a).

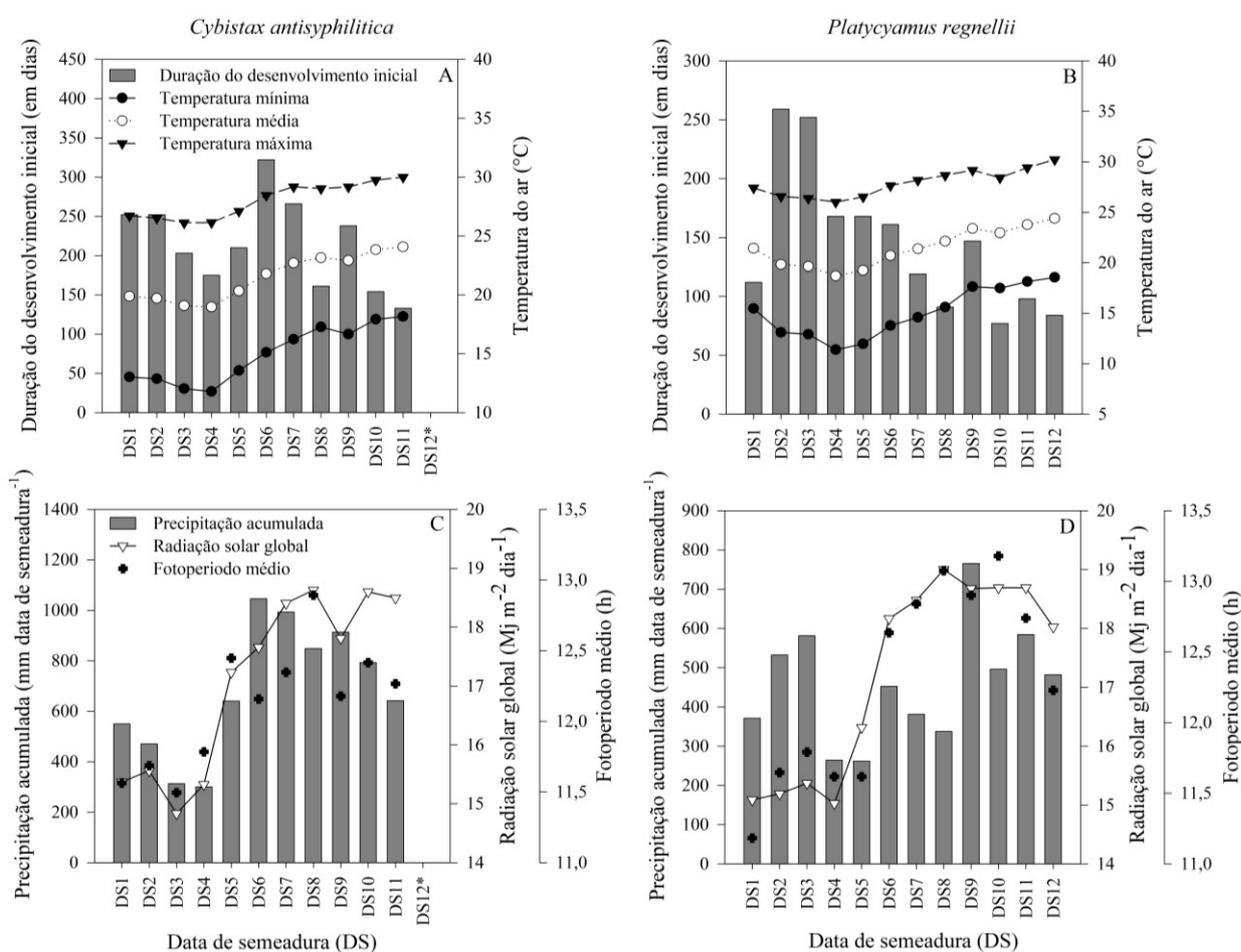


Figura 1.2 - Variação da duração do desenvolvimento inicial (em dias), temperatura mínima (T_{min} , °C), média (T , °C) e máxima (T_{max} , °C) do ar (Painel A e B), precipitação acumulada (mm data de semeadura⁻¹), radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹) e fotoperíodo médio (P, horas) (Painel C e D) nas diferentes datas de semeadura dos experimentos conduzidos em Itajubá. *DS com perda de repetições da *C. antisiphilitica*.

Os vasos foram preenchidos com o horizonte “A” moderado de um Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2018), coletado em Itajubá. As análises químicas indicaram acidez elevada (pH em H₂O = 5), baixa quantidade de cálcio (0,16 cmolc dm⁻³) e magnésio trocáveis (0 cmolc dm⁻³), baixos teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio e elevados teores de cobre, ferro, manganês e zinco (MEHLICH, 1953). Por isso, foram realizadas correções no solo para aumentar a fertilidade e reduzir a acidez. As correções seguiram a recomendação da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG, 1999). Aos 40-50 dias antes da instalação de cada DS a acidez e a fertilidade foram corrigidas com a aplicação (em cada vaso) de 17,63 g de carbonato de cálcio (CaCO₃), 5,88 g de carbonato de magnésio (MgCO₃), 8,86 g de superfosfato simples (18%), 1,52 g de cloreto de potássio (60%) e 2,28 g sulfato de amônia. A segunda correção foi realizada aos 90 dias após a emergência com aplicação de 0,76 g de cloreto de potássio e 1,14 g de sulfato de amônio em cada vaso. Assim, as plantas se desenvolveram em condições ótimas de fertilização. Além disso, exceto nos dias de chuva foram realizadas irrigações diárias no período vespertino, aplicando a quantidade de água perdida pela evapotranspiração.

1.2.2. Estimativa da temperatura basal inferior

Para estimar a T_b foi utilizada a metodologia do menor valor do quadrado médio do erro (QME) (SINCLAIR et al., 2004) considerando as cinco DSs de menor valor de temperatura do ar (T_{min} , T e T_{max}) e que ao mesmo tempo apresentaram maior duração da fase de desenvolvimento inicial (dias entre i e n) (Tabela 1.1 e Figura 1.2) (MARTINS et al., 2012; MARTINS et al., 2014; FREITAS et al., 2017; SILVA et al., 2020). Tal metodologia consiste no ajuste de regressões lineares simples (equação 1.1) entre o N_{Fa} e a soma térmica acumulada (STa , °C dia⁻¹) (equação 1.2), ajustadas para cada espécie e DS. Nesse ajuste foi considerado o N_{Fa} médio obtido pelas cinco repetições (FREITAS et al., 2017; SILVA et al., 2020; MARTINS et al., 2022a):

$$N_{Fa} = a \cdot STa + b \quad (1.1)$$

$$STa = \sum_i^n (T - T_b), \text{ se } T \leq T_b, \text{ então } T = T_b \quad (1.2)$$

Em que: N_{Fa} = número de folhas acumuladas ao longo do tempo (desde i a n); a = inclinação da regressão linear (folhas por °C dia); STa = soma térmica acumulada (°C dia); b = coeficiente linear; T = temperatura média diária do ar (°C) obtida pela estação meteorológica automática localizada na área experimental, T_b = temperatura base (°C) usando uma série de valores (0 °C a 20 °C, com incrementos de +0,5 °C), i = data de emergência (Tabela 1.1); n = data de término

do desenvolvimento inicial (Tabela 1.1).

Para cada espécie e DS, foram ajustadas 40 regressões lineares (equação 1.1), sendo uma para cada valor de T_b (desde 0°C à $20^{\circ}\text{C} + 0,5^{\circ}\text{C}$), conforme recomendações de Sinclair et al. (2004), Martins et al. (2007), Freitas et al. (2017) e Silva et al. (2020). Dessa forma, o valor da T_b para cada DS foi obtido pela regressão com o menor valor de QME, enquanto que o valor da T_b de cada espécie foi obtido pela média aritmética dos valores de T_b das cinco DSs (MARTINS et al., 2012; FREITAS et al., 2017; SILVA et al., 2020).

1.2.3. Estimativa da temperatura ótima e filocrono

A Tot foi estimada seguindo as recomendações propostas por Lisboa et al. (2012), Freitas et al. (2017) e Ferreira et al. (2019a) e envolve duas etapas: i) primeiro obtém o filocrono para cada espécie, repetição e DS (DS1 a DS12), e ii) identifica a DS em que ocorre o menor valor de filocrono. Na etapa i, o filocrono é obtido pelo inverso do coeficiente angular ($1/a$) da regressão linear entre o NFA e STa (equação 1.1), calculado com a T_b estimada previamente. Na prática, o valor do filocrono indica o requerimento térmico necessário ($^{\circ}\text{C}$ dia por folha) para o aparecimento de folhas na haste principal (STRECK et al., 2011; FAGUNDES et al., 2021). Ou seja, quanto menor (maior) o valor do filocrono, menor (maior) a quantidade de energia requerida pela planta para emitir uma folha (MARTINS e STRECK, 2007; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; MARTINS et al., 2022a e 2022c), e conseqüentemente, maior (menor) a taxa de desenvolvimento inicial.

Na etapa ii, para identificar a DS em que ocorre o menor valor de filocrono, isto é, a maior taxa de desenvolvimento, os valores do filocrono foram submetidos a análise de variância (ANOVA) considerando 12 DS x 2 espécies florestais. Posteriormente, a média dos valores de filocrono foram comparados pelo teste Scott-Knott ($p = 0,05$). O valor da Tot de cada espécie foi obtido pela média aritmética da T da DS em que ocorreu o maior desenvolvimento, isto é, a DS de menor valor de filocrono (LISBOA et al., 2012; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; SILVA et al., 2020).

1.2.4. Estimativa da temperatura basal superior

A TB de cada espécie foi estimada utilizando dados das duas DSs que apresentam, simultaneamente, maior valor de T e maior duração de desenvolvimento inicial (dias entre i e n) (Tabela 1.1 e Figura 1.2). A TB é estimada considerando 10 condições (A à J) através da

equação (LIMA e SILVA, 2008; MARTINS et al., 2014; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; SILVA et al., 2020):

$$TB = \frac{A + B \pm \sqrt{C \cdot (D + E + F + G + H + I)}}{J}, \text{ sendo:} \quad (1.3)$$

$$\begin{cases} A = N_b \cdot TM_a \cdot TM_b - N_b \cdot TM_b \cdot Tm_a \\ B = -N_a \cdot TM_a \cdot TM_b + N_a \cdot TM_a \cdot Tm_b \\ C = (-TM_a + Tm_a) \cdot (-TM_b + Tm_b) \\ D = N_a \cdot Tm_b^2 \cdot N_b - 2 \cdot Tm_b \cdot N_a \cdot N_b \cdot Tb - Tm_b \cdot Tm_a \cdot N_a^2 \\ E = -Tm_b \cdot TM_a \cdot N_a^2 + N_b^2 \cdot TM_a \cdot Tm_b - Tm_a \cdot N_b^2 \cdot Tm_b + 2 \cdot Tm_b \cdot N_a^2 \cdot Tb \\ F = Tm_a \cdot N_a^2 \cdot TM_b - 2 \cdot N_b^2 \cdot TM_a \cdot Tb - 2 \cdot N_a^2 \cdot TM_b \cdot Tb \\ G = TM_a \cdot N_a^2 \cdot TM_b + Tm_a^2 \cdot N_b \cdot N_a - 2 \cdot Tm_a \cdot N_b \cdot N_a \cdot Tb \\ H = 2 \cdot Tm_a \cdot N_b^2 \cdot Tb + 2 \cdot N_a \cdot TM_b \cdot N_b \cdot Tb + 2 \cdot N_b \cdot TM_a \cdot N_a \cdot Tb \\ I = -2 \cdot N_b \cdot TM_a \cdot N_a \cdot TM_b + N_b^2 \cdot TM_a \cdot TM_b - Tm_a \cdot N_b^2 \cdot TM_b \\ J = -N_a \cdot TM_b + N_a \cdot Tm_b + N_b \cdot TM_a - N_b \cdot Tm_a \end{cases} \quad (1.4)$$

Em que: os índices *a* e *b* referem-se as duas datas de semeadura de maior temperatura e duração de desenvolvimento inicial; N_a e N_b = duração, em dias, entre a data de emergência (*i*) e término do desenvolvimento inicial (*n*); TM_a e TM_b = temperatura máxima do ar (°C) média de *a* e *b*, respectivamente; Tm_a e Tm_b = temperatura mínima do ar (°C) média de *a* e *b*, respectivamente.

1.3. RESULTADOS

O uso de múltiplas DSs permitiu que as espécies florestais se desenvolvessem em diferentes condições meteorológicas (Figura 1.2). De maneira geral, os valores de temperatura variaram entre 3,6 °C (mínima absoluta) a 34,6 °C (máxima absoluta), radiação solar global entre 2,6 Mj m⁻² dia⁻¹ a 29,8 Mj m⁻² dia⁻¹ e fotoperíodo entre 10,6 h a 13,4 h. Além disso, houve variação da precipitação acumulada entre as DSs, com menor precipitação acumulada nas DS4 e DS5 (~264 mm) e maior na DS6 (1046 mm). Cabe ressaltar que, durante o período de condução dos experimentos, a precipitação acumulada foi de 1.673,7 mm, valor acima da média climatológica para Itajubá (de 1.440 mm) (REBOITA et al., 2015). Tais variações, principalmente da temperatura do ar, são um requisito importante para a estimativa confiável da T_b , T_{ot} e TB (SINCLAIR et al., 2004; WHITE et al., 2012; MARTINS et al., 2014; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; SILVA et al., 2020) e filocrono (FAGUNDES et al, 2021; MARTINS et al., 2022a).

As diferentes condições meteorológicas também influenciaram a velocidade de aparecimento das folhas e a duração da fase de desenvolvimento inicial (dias entre *i* e *n*), sendo possível escolher apropriadamente as DSs para serem usadas na estimativa da T_b e TB . As plantas que se desenvolveram durante as DS1 a DS5, quando os valores de temperatura do ar (T_{min} , T e T_{max}) eram mais baixos, desenvolveram-se mais lentamente, e tiveram maior

duração de desenvolvimento inicial. Tais condições justificam a seleção das DS1 a DS5 para a estimativa da Tb da *C. antisyphilitica* (duração ~218 dias e 19,6 °C de T), e das DS2 a DS5 para *P. regnellii* (duração ~212 dias e 19,3 °C de T). Na DS1 a *P. regnellii* se desenvolveu rapidamente, atingindo o término da fase de desenvolvimento inicial aos 112 dias, além disso a T (21,4 °C) foi superior às demais DSs (2 a 5). Por isso, a DS1 não foi utilizada na estimativa da Tb da *P. regnellii* visto que na DS1 não ocorreu simultaneamente menor T e maior duração de desenvolvimento inicial. De forma análoga, porém, oposta as plantas que se desenvolveram nas DS7, DS9 e DS11 foram submetidas aos maiores valores de temperatura do ar (T e Tmax) e apresentaram maior duração de desenvolvimento inicial (Figure 1.2). Por isso, a DS7 e DS9 foram escolhidas para a estimativa da TB da *C. antisyphilitica* (duração ~252 dias) e as DS9 e DS11 para TB da *P. regnellii* (duração ~123 dias).

Quanto à estimativa da Tb, todas as regressões lineares entre N_{Fa} e S_{Ta} apresentaram valores elevados de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{adj} \geq 0,73$ para ambas espécies) (Anexo 1.1 e 1.2), valores baixos de QME ($< 1,4027$ para *C. antisyphilitica* e 0,3504 para *P. regnellii*) e coeficientes angulares significativos ($p \leq 0,05$). O uso de diferentes valores de Tb gerou diferentes valores de S_{Ta}, que por sua vez influenciou os ajustes entre N_{Fa} e S_{Ta} e os valores de QME (Figura 1.3). Tal variação é uma característica desejável à estimativa da Tb pelo método do QME (SINCLAIR et al., 2004; MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017; SILVA et al., 2020). Além disso, houve variação entre os valores de Tb estimados entre as DSs para ambas espécies (Figura 1.3 A e B). Para *C. antisyphilitica* na DS1, o menor valor de QME (0,7975) foi para a Tb de 16 °C, na DS2 o menor valor de QME (0,4923) foi para Tb de 5.5 °C, na DS3 (0,2102) foi para Tb de 12.5 °C, e nas DS4 (0,5326) e DS5 (1,4027) foi para Tb de 15.5 °C. Dessa forma, a Tb estimada para *C. antisyphilitica* foi 13 °C, obtida pela média aritmética das Tb's das DS1 a DS5. Considerando o *P. regnellii*, o menor valor de QME encontrado na DS2 (0,1844) foi para Tb de 13,5 °C, na DS3 (0,1688) foi para a Tb de 16,5 °C, na DS4 (0,3504) foi para a Tb de 11 °C e na DS5 (0,2119) para a Tb de 0 °C. Como a *P. regnellii* é uma espécie endêmica do Brasil e restrita às latitudes de -8° a -26° (MOURA, 2020), valores estimados de Tb ≤ 4 °C não são considerados factíveis e confiáveis (FERREIRA et al., 2019b; SILVA et al., 2020).

Além disso, como os métodos utilizados na estimativa da Tb, incluindo o método do QME, são estatísticos, é normal haver (pequenas) diferenças entre a temperatura estimada e a fisiológica de cada espécie (SINCLAIR et al., 2004; LAGO et al., 2009, SOUZA e MARTINS, 2014; FREITAS et al., 2017; SILVA et al., 2020). Por isso, é importante verificar se os valores estimados de Tb estão dentro da faixa de temperaturas observadas pelas estações

meteorológicas nas DSs (FERREIRA et al., 2019a) e se são coerentes com as observações fenológicas medidas no experimento (MARTINS et al., 2019). Valores não factíveis de T_b e muito abaixo da temperatura do ar registrada no campo (SOUZA e MARTINS, 2014) já foram estimados através de métodos como, o menor coeficiente de variação, desvio padrão em dias (LAGO et al., 2009; FERREIRA et al., 2019a) e menor QME (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017). Em todos os casos, os valores não factíveis de T_b foram desconsiderados, sendo comum a exclusão de valores de T_b inferior ao limiar de 4 °C em espécies florestais que se distribuem naturalmente em locais clima tropical e subtropical (MARTINS et al., 2007; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; FREITAS et al., 2017; SILVA et al., 2020). Por esse motivo, o valor estimado de $T_b = 0$ °C na DS5 não foi considerado na média aritmética para a obtenção da T_b para *P. regnellii*, seguindo as recomendações de Lago et al. (2009), Freitas et al. (2017), Ferreira et al. (2019a e 2019b) e Silva et al. (2020). Com isso, o valor de T_b estimado para *P. regnellii* foi 13,7°C.

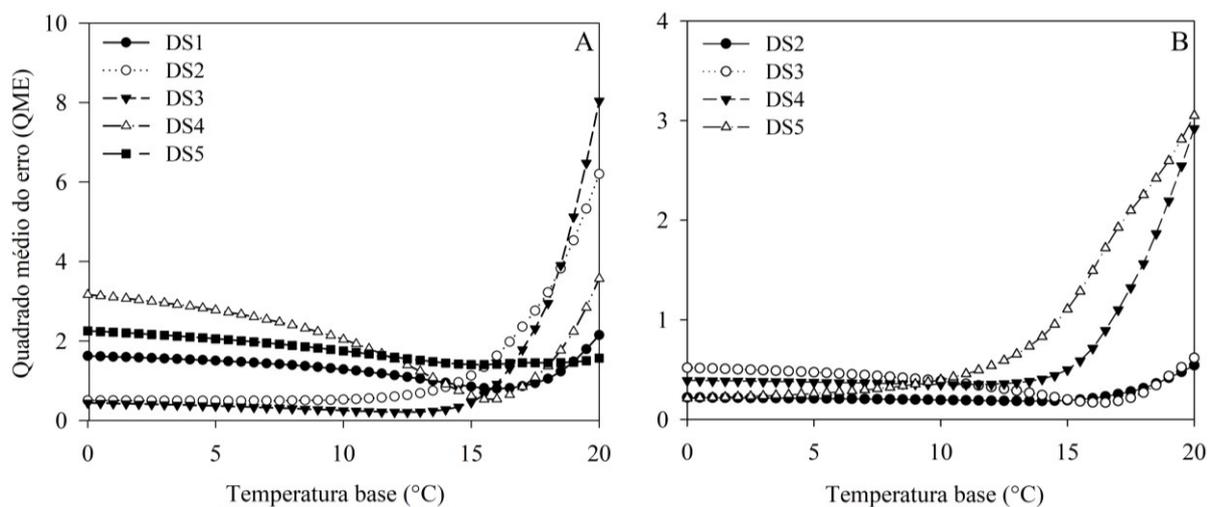


Figura 1.3 - Valores de quadrado médio do erro (QME) obtidos a partir das regressões entre o número de folhas emitidas na haste principal e a soma térmica acumulada, calculada com diferentes valores de temperatura base (variando entre 0 °C a 20 °C), para a *Cybistax antisiphilitica* (painel A) e *Platycyamus regnellii* (painel B). Consulte a tabela 1.1 para as datas de semeadura.

As etapas para a estimativa da Tot envolvem a obtenção do filocrono ($1/a$) para cada espécie, repetição e DS, ANOVA e comparação de médias para identificar a DS onde ocorre o menor valor de filocrono. A interação entre as DSs e espécies florestais foi significativa ($p \leq 0,05$). Houve diferença na magnitude e influência de cada DS no filocrono (e taxa de desenvolvimento) das duas espécies florestais (Tabela 1.2). Isso demonstra que a temperatura do

ar influencia o Nfa de ambas espécies, e, portanto, a recomendação de Lisboa et al. (2012) pode ser empregada na estimativa da Tot usando múltiplas DSs.

Menores valores de filocrono para uma determinada DS indicam que menos energia é requerida para o aparecimento de folhas (STRECK et al., 2011; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c), o que resulta em emissão mais rápida de folhas devido a maior taxa de desenvolvimento (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c), e menor duração (em dias) para completar a fase de desenvolvimento inicial (MARTINS et al., 2022a). Em outras palavras, o menor requerimento térmico e maior taxa de desenvolvimento ocorre quando a temperatura do ar é próxima à Tot da espécie. Analisando somente a *C. antisiphilitica*, as DSs que possuem menor valor de filocrono são DS2 (i=março), DS3 (i=abril), DS4 (i=maio), DS5 (i=junho) e DS10 (i=novembro) (Tabela 1.2). Ou seja, durante estas DSs, o requerimento térmico da *C. antisiphilitica* é menor, uma vez que as mudas se desenvolvem em condições de temperatura do ar próximas à Tot. Dessa forma, a Tot estimada para *C. antisiphilitica* é de 20 °C. De forma análoga, o menor valor de filocrono para a *P. regnellii* ocorreu na DS5 (i=junho) e DS10 (i=novembro), e, portanto, a Tot estimada para *P. regnellii* é de 21,5 °C.

Tabela 1.2 - Comparação de médias para a variável filocrono ($1/a$, °C dia por folha) e taxa de desenvolvimento (a , folha por °C dia) para a *Cybistax antisiphilitica* e *Platycyamus regnellii* nas doze datas de semeadura.

Datas de semeadura (DS)	<i>Cybistax antisiphilitica</i>	<i>Platycyamus regnellii</i>
	Filocrono (taxa de desenvolvimento)	Filocrono (taxa de desenvolvimento)
DS1	95,20 (0,0105) Ba	163,58 (0,0061) Cb
DS2	61,05 (0,0164) Aa	178,00 (0,0056) Cb
DS3	59,78 (0,0167) Aa	186,30 (0,0054) Cb
DS4	51,88 (0,0193) Aa	94,80 (0,0105) Bb
DS5	69,67 (0,0144) Aa	65,82 (0,0152) Aa
DS6	157,67 (0,0063) Cb	99,75 (0,0100) Ba
DS7	142,62 (0,0070) Cb	90,92 (0,0110) Ba
DS8	87,08 (0,0115) Ba	83,25 (0,0120) Ba
DS9	96,78 (0,0103) Ba	106,27 (0,0094) Ba
DS10	71,65 (0,0140) Aa	71,59 (0,0140) Aa
DS11	76,95 (0,0130) Ba	94,50 (0,0106) Ba
DS12	-	82,08 (0,0122) Ba
Média geral (\pm desvio padrão)	88,2 (\pm 33,9) a	109,7 (\pm 41,8) b

Consulte a tabela 1.1 para as datas de semeadura. Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna (datas de semeadura) e minúsculas na linha (espécies) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$). Os valores demonstrados na tabela referem-se aos dados originais. Porém, os dados foram transformados (\ln filocrono) por

não atenderem ao pressuposto de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) (FREITAS et al., 2017; SILVA et al., 2020; REIS et al., 2021). A taxa de desenvolvimento refere-se ao inverso do filocrono. As letras (A à C, a ou b) foram dispostas em ordem crescente de filocrono.

Comparando as duas espécies, independentemente da DS, a *P. regnellii* possui maior filocrono (109,7 °C dia por folha) comparada a *C. antisiphilitica* (88,2 °C dia por folha). Porém, o desenvolvimento mais lento da *P. regnellii* ocorreu somente nas DS1 a DS3. Portanto, nestas DSs a *P. regnellii* é mais tardia e atinge o término da fase de desenvolvimento inicial mais lentamente, enquanto a *C. antisiphilitica* é mais precoce. Do contrário, a *C. antisiphilitica* se desenvolveu mais lentamente somente nas DS6 e DS7, com filocrono ~150 °C dia por folha, resultando em maior duração de desenvolvimento inicial da *C. antisiphilitica* (~294 dias) (Tabela 1.1).

Com relação à TB, os valores estimados foram 48,4 °C para a *C. antisiphilitica* e 43,4 °C para *P. regnellii*. Apesar de ambos valores serem maiores que a temperatura máxima absoluta durante o período de condução dos experimentos (34,6 °C), podem ser consideradas coerentes. As razões são: i) o uso de múltiplas DSs aumenta a confiabilidade na estimativa de TB, pois garante que as espécies se desenvolvam sob ampla variação de temperatura do ar e em condições mais próximas aquelas medidas no campo (WHITE et al., 2012); ii) foram utilizados dados das duas DSs com maior temperatura (T e Tmax) e duração da fase de desenvolvimento inicial (FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b); iii) valores elevados de TB (entre 40 °C e 55 °C) são esperados em espécies florestais tropicais (FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a; SILVA et al., 2020), pois representam o limiar máximo de temperatura, acima do qual ocorrem danos aos processos metabólicos das plantas (FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021).

1.4. DISCUSSÃO

Os processos responsáveis pelo aparecimento de folhas, como diferenciação de primórdios foliares e divisão celular, dependem das atividades enzimáticas (PARENT e TARDIEU, 2012; WHITE et al., 2012; BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; MARTINS et al., 2022a), que por sua vez são dependentes da temperatura do ar (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010). Ou seja, a ação combinada de diferentes enzimas em ciclos metabólicos, cascatas de sinalização e em reações redox é perturbada quando a temperatura é alterada (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; PERDOMO et al., 2017; SLOT e WINTER, 2017), especialmente acima das temperaturas supra-ótimas (entre Tot e TB). Nestas

condições, a velocidade de aparecimento de folhas é menor, e menos folhas novas são emitidas (COSTA e STRECK, 2018; FLORÊNCIO et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021).

Isso ocorre, pois, todas as reações metabólicas, incluindo a fotossíntese, são ajustadas para ocorrerem dentro dos limiares térmicos delimitados pela T_b , T_{ot} e T_B (BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; HARTFIELD e PRUEGER, 2015; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; BAATH et al., 2020; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c). Apesar da base fisiológica das temperaturas cardinais não ser totalmente conhecida (WHITE et al., 2012; HARTFIELD e PRUEGER, 2015), os processos que governam o desenvolvimento, como o aparecimento de folhas e a duração da fase de desenvolvimento inicial, são intrinsicamente associados a elas (PARENT e TARDIEU, 2012; WHITE et al., 2012; HARTFIELD e PRUEGER, 2015; BAATH et al., 2022; MARTINS et al., 2022a e 2022c). Portanto, os valores de temperaturas cardinais estimadas neste estudo para *C. antisiphilitica* ($T_b = 13,0$ °C, $T_{ot} = 20$ °C e $T_B = 48,4$ °C) e *P. regnellii* ($T_b = 13,7$ °C, $T_{ot} = 21,5$ °C e $T_B = 43,4$ °C), descrevem os limiares em que ambas espécies conseguem se desenvolver apropriadamente nas condições reais de campo. Além disso, são dados de entrada fundamentais em modelos de desenvolvimento (FERREIRA et al., 2019a e 2019b; MARTINS et al., 2022a), especialmente em estudos sobre mudanças climáticas (MORIN et al., 2010; FREITAS et al., 2017; SILVA et al., 2020; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al. 2022a).

Com relação a T_b , as diferenças entre os valores estimados para cada DS em ambas espécies (Figura 1.3) são comuns de ocorrer em métodos que se baseiam nas condições reais de campo, como aqueles que utilizam múltiplas DSs (MARTINS et al., 2007; LAGO et al., 2009; ERPEN et al., 2013; MONTEIRO et al., 2014; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; SILVA et al., 2020). Tais diferenças também foram observadas por Martins et al. (2007), Freitas et al. (2017), Ferreira et al. (2019a), e Silva et al. (2020) na estimativa da T_b em espécies florestais tropicais. Os valores estimados para o desenvolvimento inicial da *C. antisiphilitica* (13,0 °C) e *P. regnellii* (13,7 °C) foram próximos aos valores de outras espécies florestais tropicais, como: *A. pavonina* (15 °C), *C. fistula* (16,4 °C), *H. petraeum* (14,5 °C), *P. pendula* (14,6 °C) (MONTEIRO et al., 2014), *E. urophylla* (10 °C) (FREITAS et al., 2017), *C. myrianthum* (11,4 °C), *B. orellana* (12 °C) (Ferreira et al., 2019b), *L. ferrea* (12,8 °C), *A. peregrina* (10,3 °C) (SILVA et al., 2020), e *Dipteryx alata* Vogel (10 °C) (BORELLA et al., 2020).

Quando a temperatura do ar é próxima (ou menor) a T_b ocorre redução nas atividades enzimáticas, enrijecimento da membrana, acúmulo de espécies reativas de oxigênio e redução da fotossíntese (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; BAHUGUNA e JAGADISH, 2015). Isso

leva à inibição ou lentidão nos processos relacionados ao aparecimento de folhas, resultando em atraso no aparecimento de novas folhas e aumento da duração da fase de desenvolvimento inicial (FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022a). Foi exatamente o que ocorreu nas DS2 e DS3 (Figura 1.2). Em ambas DSs houve maior número de dias em que a T_{min} (~144 dias) e T (~44 dias) foram próximas (ou menores) que a T_b , resultando em maior duração da fase de muda, especialmente para a *P. regnellii* (~255 dias). Além disso, próximo à T_b as mudas restringem outros processos como o crescimento e a biomassa das raízes, reduzindo o volume do sistema radicular e conseqüentemente a absorção de água e nutrientes (NIEVOLA et al., 2017; ABREU et al., 2022). Portanto, a combinação dessas alterações inibe a emissão de folhas e o desenvolvimento radicular, podendo impactar negativamente a qualidade das mudas em viveiros florestais (FERREIRA et al., 2019a).

Do contrário, quando a temperatura do ar é próxima das T_{ots} estimadas para a *C. antisiphilitica* (20 °C) e *P. regnellii* (21,5 °C), maior a taxa de desenvolvimento e velocidade de aparecimento de folhas, e menor a duração (em dias) para completar a fase de desenvolvimento inicial de ambas as espécies. Por exemplo, na DS10 houve boa parte dos dias em que a T foi próxima a T_{ot} da *C. antisiphilitica* (46 dias) e *P. regnellii* (64 dias), repercutindo na redução da duração da fase de desenvolvimento inicial de ambas espécies (154 e 77 dias, respectivamente) (Figura 1.2). Esse padrão é similar ao reportado para *L. ferrea* e *A. peregrina* (FAGUNDES et al., 2021), *P. guajava* (MARTINS et al., 2022a), *C. myrianthum* e *B. orellana* (MARTINS et al., 2022c) e *E. urophylla* (FREITAS et al., 2017). Quando a temperatura do ar é próxima à T_{ot} a atividade carboxilase da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase-oxigenase (RuBisCo) é favorecida pela maior solubilidade do CO_2 ao O_2 (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010), que por sua vez aumenta a capacidade fotossintética e, conseqüentemente, a fotossíntese líquida (BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; PERDOMO et al., 2017; REIS et al., 2021), resultando em maior velocidade de aparecimento de folhas (PARENT e TARDIEU, 2012; FAGUNDES et al., 2021). Ambos valores de T_{ot} estimados neste estudo (20 e 21,5 °C) estão próximos à T_{ot} de desenvolvimento inicial da *A. pavonina* (24,4 °C), *C. fistula* (24,9 °C), *H. petraeum* (24,9 °C), *P. pendula* (25,1 °C) (MONTEIRO et al., 2014), *Ficus insipida* Willd. (23,9 °C), *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb. (25,9 °C), *Calophyllum longifolium* L. (24,9 °C) (SLOT e WINTER 2017), *L. ferrea* (20,7 °C) e *A. peregrina* (23 °C) (SILVA et al., 2020). Ou seja, na maioria das espécies florestais tropicais, a taxa de desenvolvimento é máxima entre 20 °C e 25 °C.

Com relação a T_b , os valores estimados para *C. antisiphilitica* (48,4 °C) e *P. regnellii* (43,4 °C) representam o limiar máximo absoluto, acima do qual o desenvolvimento é nulo

(RUELLAND e ZACHOWSKI 2010; MARTINS et al., 2014; HARTFIELD e PRUEGER 2015; FREITAS et al., 2017). Ambos valores estão dentro do range esperado para espécies tropicais (entre 39 °C a 46 °C) (KOSITSUP et al., 2009; SLOT et al., 2016; SLOT e WINTER, 2017). Além disso, são próximos aos valores estimados para *P. pendula* (40,1 °C) (MONTEIRO et al., 2014), *B. orellana* (46,4 °C) (FERREIRA et al., 2019b), *L. ferrea* (46,3 °C), *A. peregrina* (45,5 °C) (SILVA et al., 2020), *C. citriodora* (41,3 °C) e *E. urophylla* (40,5 °C) (FREITAS et al., 2017), e *Eucalyptus globulus* Labill. (40,0 °C) (SANDS e LANDSBERG, 2002). Em temperaturas supra-ótimas todo o maquinário fotossintético é afetado, pois ocorre (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; MATHUR et al., 2014; NIEVOLA et al., 2017; PERDOMO et al., 2017; BAATH et al., 2020): 1) o favorecimento da atividade oxigenase da RuBisCo com aumento da razão fotorrespiração/fotossíntese; 2) inibição da atividade de transporte de elétrons, síntese de ATP e regeneração da ribulose-1,5-bifosfato (RuBP), limitando a fixação de CO₂; 3) aumento do consumo de energia ou esqueletos carbonados, elevando os custos de manutenção celular. Além disso, à medida que o déficit de pressão de vapor aumenta (com o aumento da T e Tmax), os estômatos fecham, reduzindo a concentração interna de carbono e a perda de calor latente da folha (FAGUNDES et al., 2021; ABREU et al., 2022; MARTINS et al., 2022a), o que contribui para a redução da fotossíntese líquida (PERDOMO et al., 2017; REIS et al., 2021). Portanto, valores de T (ou Tmax) próximos da TB comprometem o aparecimento de folhas novas e aumentam a duração da fase de desenvolvimento inicial. Tal padrão, foi observado por Morin et al. (2010), Costa e Streck (2018), Fagundes et al. (2021), e Reis et al. (2021) em espécies florestais tropicais submetidas a temperaturas supra-ótimas.

Os valores de filocrono das duas espécies ao longo das diferentes DSs (entre 52 e 186 °C dia por folha) é maior que a maioria das espécies florestais tropicais, como *C. myrianthum* (~35 °C dia por folha), *B. orellana* (~47 °C dia por folha), *P. guajava* (~40 °C dia por folha) (MARTINS et al., 2022a), *L. ferrea* (~47 °C dia por folha) (FAGUNDES et al., 2021), *E. saligna* (30,7 °C por folha) e *E. grandis* (32,0 °C dia por folha) (MARTINS et al. 2007), *C. citriodora* (38,2 °C dia por folha) (FREITAS e MARTINS 2019), *A. pavonina* (11,40 °C dia por folha), *C. fistula* (19,54 °C dia por folha), *H. petraeum* (26,54 °C dia por folha) and *P. pendula* (30,30 °C dia por folha) (MONTEIRO et al., 2014), exceto a *A. peregrina* (171,5 °C dia por folha) (FAGUNDES et al., 2021). Quando se analisa o filocrono, espera-se que o menor (maior) valor de filocrono, i.e., menor (maior) requerimento térmico, resulte em menor (maior) duração da fase de desenvolvimento inicial (MARTINS et al., 2014; COSTA e STRECK, 2018; FLORÊNCIO et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022a). Esse padrão

ocorreu na maioria das DSs, como por exemplo na DS4 e DS10 (e DS6 e DS7) da *C. antisiphilitica* e DS10 (DS2 e DS3) da *P. regnellii*. Porém, em algumas DSs o menor valor de filocrono não resultou em menor duração da fase de desenvolvimento inicial. Por exemplo, considerando a *C. antisiphilitica* as DS2 e DS3 apresentaram menor filocrono (~60 °C dia por folha) com duração de ~230 dias, enquanto a DS11 apresentou maior filocrono (~77 °C dia por folha) com duração de 133 dias. Esse padrão também ocorreu nas DS5 e DS11 da *P. regnellii*, corroborando com a escolha destas DSs para a estimativa da Tb e TB de ambas espécies.

Nesse sentido, é importante mencionar, que o valor do filocrono é intrinsecamente relacionado ao método de cálculo da STa (e ST) (ROSA et al., 2009; FREITAS e MARTINS, 2019; MARTINS et al., 2022a). Ou seja, cada método de cálculo de ST pode resultar em diferentes valores de acúmulo térmico (ou STa), especialmente quando a temperatura do ar é acima da Tot (ou próxima da TB), alterando os valores de filocrono. Portanto, o método de STa que considera as três temperaturas cardinais é o mais adequado para espécies florestais tropicais (MARTINS et al., 2022a), reforçando a importância da estimativa das três temperaturas cardinais (Tb, Tot e TB) e da inserção destas temperaturas na estimativa do filocrono. Além disso, a abordagem do filocrono é mais adequada para quantificar o desenvolvimento inicial (e NFa) comparada aos dias do calendário civil (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022a), que é comumente utilizada para determinar o término do desenvolvimento inicial, e o momento da venda das mudas nos viveiros florestais (MARTINS et al., 2007, 2022a e 2022c).

Como qualquer modificação da temperatura pode alterar o desenvolvimento inicial, a *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* podem não ser capazes de tolerar os aumentos projetados de temperatura do ar, reduzindo ou inibindo o aparecimento de folhas, aumentando a duração da fase de mudas, e impactando em maior custo de manutenção das mudas nos viveiros florestais. Assim, os próximos estudos devem avaliar os impactos das mudanças climáticas utilizando modelos de desenvolvimento que sejam alimentados com as temperaturas cardinais estimadas neste estudo (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; MARTINS et al., 2022a e 2022c), assim como com as saídas dos modelos climáticos (FLORÊNCIO et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021).

1.5. CONCLUSÃO

As temperaturas cardinais de desenvolvimento inicial estimadas para a *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. foram 13 °C (Tb), 20 °C (Tot) e 48,4 °C (TB) e para a *Platygyamus regnellii* Benth. foram 13,7 °C (Tb), 21,5 °C (Tot) e 43,4 °C (TB). Apesar da *Cybistax*

antisiphilitica apresentar, em média, maior duração da fase de muda (~215 dias), necessita acumular menos energia (88,2 °C dia por folha) para o desenvolvimento comparada a *Platygyamus regnellii* (109,7 °C dia por folha com ~145 dias).

Ambas espécies florestais se desenvolveram diferentemente ao longo das datas de semeadura, demonstrando que possuem taxas de desenvolvimento diferentes sob mesmas condições de campo, e que as temperaturas cardinais podem ser estimadas através do uso de múltiplas datas de semeadura.

1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. C.; SOARES, A. A. V.; FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B. Transpiration and growth responses by Eucalyptus species to progressive soil drying. **Journal of Forestry Research**, v.33, n.1, p.1-15, 2022.

ALMEIDA, D.; MARCHINI, L. C.; SODRÉ, G. S.; ÁVILA, M. d'; ARRUDA, C. M. F. **Plantas visitadas por abelhas e polinização**. ESALQ - Divisão de Biblioteca e Documentação, 2003.

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.

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, n.1, p.143-152, 2022.

BAHUGUNA, R. N.; JAGADISH, K. S. V. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v.111, p.83-90, 2015.

BITTENCOURT, N. S.; PEREIRA, E. J.; SÃO-THIAGO, P. S.; SEMIR, J. The reproductive biology of *Cybistax antisyphilitica* (Bignoniaceae), a characteristic tree of the South American savannah-like Cerrado vegetation. **Flora**, v.206, p.872-886, 2011.

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, n.5, p.1-15, 2020.

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. p. 289-302, 1999.

COSTA, D. B.; STRECK, N. A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciência Florestal**, v.28, n.2, p.1263-1279, 2018.

COSTA, S.; LOHMANN, L. G.; BURIL, M. T. Flora of Pernambuco, Brazil: Tabebuia alliance and tribe Jacarandae (Bignoniaceae). **Biota Neotropica**, v.19, n.4, p.e20190737, 2019.

CURY, G.; TOMAZELLO-FILHO, M. Caracterização e descrição da estrutura anatômica do lenho de seis espécies arbóreas com potencial medicinal. **Revista Brasileira de Plantas Medicináveis**, v.13, n.3, p.311-318, 2011.

DI LUCCHIO, L. M.; FENSHOLT, R.; MARKUSSEN, B.; RÆBILD, A. Leaf phenology of thirteen African origins of baobab (*Adansonia digitata* (L.)) as influenced by daylength and water availability. **Ecology and Evolution**, v.8, p.11261-11272, 2018.

ERPEN, L.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; LANGNER, J. A.; WINCK, J. E. M.; GABRIEL, L. F. Estimativa das temperaturas cardinais e modelagem do desenvolvimento vegetativo em batata-doce. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1230-1238, 2013.

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.

FERREIRA, M. C.; COSTA, S. M. L.; PASIN, L. A. A. Uso de Resíduos da Agroindústria de Bananas na Composição de Substratos para Produção de Mudanças de Pau Pereira. **Nativa**, v.3, p.120-124, 2015.

FERREIRA, M. C.; MARTINS, F. B.; FLORENCIO, G. W. L. Cardinal temperatures and modeling the vegetative development of seedlings of guava. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.11, p.819-825, 2019b.

FERREIRA, M. C.; MARTINS, F. B.; FLORENCIO, 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, n.1, p.1-9, 2019a.

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, n.9, p.641-647, 2019.

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.

FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B. Thermal requirements and photoperiod influence in the leaf development of two forest species. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.4, p.e20190013, 2019.

FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n.5, p.283-292, 2017.

FREITAS, F. M.; NASCIMENTO, A. R. T.; SANCHES, M. C. Can morpho-physiological responses to natural light conditions in *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. explain its widespread occurrence in Brazilian Savannas? **Flora**, v.286, p.151990, 2022.

FREITAS, M. N.; SANTANA, D. G.; CAMARGO, R. Conservação de sementes de ipê-verde (*Cybistax Antisyphilitica* Mart.) por armazenamento à vácuo. **Revista Verde**, v.6, n.4, p.142-148, 2011.

GUILHERME, F. A. G.; SALGADO, A. A.; COSTA, E. A.; ZORTÉA, M. Fenologia de *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. (Bignoniaceae) na região urbana de Jataí, Goiás. **Bioscience Journal**, v.27, n.1, p.138-147, 2011.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v.10, p.4-10, 2015.

KAMKAR, B.; AL-ALAHMADI, M. J.; MAHDAVI-DAMGHANI, A.; VILLALOBOS, F. J., 2012. Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds to germinate using non-linear regression models **Industrial Crops and Products**, v.35, n.1, p.192-198, 2012.

- KIMBALL, B. A. Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming. **Global Change Biology**, v.11, p.2041-2056, 2005.
- KIMBALL, B. A.; CONLEY, M. M.; WANG, S.; LIN, X.; LUO, C.; MORGAN, J.; SMITH, D. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. **Global Change Biology**, v.14, p.309-320, 2008.
- KOSITSUP, B.; MONTPIED, P.; KASEMSAP, P.; THALER, P.; AMÉGLIO, T.; DREYER, E. Photosynthetic capacity and temperature responses of photosynthesis of rubber trees (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) acclimate to changes in ambient temperatures. **Trees**, v.23, p.357–365, 2009.
- KUMAR, M.; KALRA, N.; KHAITER, P.; RAVINDRANATH, N. H.; SINGH, V.; SINGH, H.; SHARMA, S.; RAHNAMAYAN, S. PhenoPine: A simulation model to trace the phenological changes in *Pinus roxburghii* in response to ambient temperature rise. **Ecological Modelling**, v.404, p.12-20, 2019.
- LAGO, I.; STRECK, N. A.; CARVALHO, M. P.; FAGUNDES, L. K.; PAULA, G. M.; LOPES, S. J. Estimativa da temperatura base do subperíodo emergência-diferenciação da panícula em arroz cultivado e arroz vermelho. **Revista Ceres**, v.56, n.3, p.288-295, 2009.
- LEAL, C. M.; BORGES, R. M.; SIMAS, R. C.; COSTA, F. N.; LEITÃO, G. G. A New Tetraglycosylated Flavonoid from Leaves of *Platycyamus regnellii* Benth. Isolated by High-Speed Countercurrent Chromatography. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v.30, n.12, p.2561-2566, 2019.
- LIMA, E. P.; SILVA, E. L. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro arábico em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.3, p.266-273, 2008.
- 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, n.9, p.1556-1562, 2012.
- LOHMANN, L.G. *Cybistax* in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB114028/>> Acesso em: 13 Mar. 2022.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Instituto Plantarum, Nova Odessa. p. 352, 2014.
- MARTINS, F. B.; BENASSI, R. B.; TORRES, R. R.; BRITO NETO, F. A. Impacts of 1.5°C and 2°C global warming on Eucalyptus plantations in South America. **Science of the Total Environment**, v.825, p.153820, 2022b.
- 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.33, p.1-12, 2022a.
- 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, n.4, p.e20200192, 2022c.

MARTINS, F. B.; FERREIRA, M. C.; SILVA, L. F. O.; RAMALHO, V. R. M.; GONÇALVES, E. D. Temperatura do ar no desenvolvimento reprodutivo de cultivares de oliveira. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.34, n.2, p.179-190, 2019.

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 modelo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.4, p.505-514, 2014.

MARTINS, F. B.; REIS, D. F.; PINHEIRO, M. V. M. Temperatura base e filocrono em duas cultivares de oliveira. **Ciência Rural**, v.42, n.11, p.1975-1981, 2012.

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, n.3, p.373-381, 2007.

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.

MATHUR, S.; AGRAWAL, D.; JAJOO, A. Photosynthesis: response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.137, p.116-126, 2014.

MEDEIROS, A. D. S. **Armazenamento de sementes de espécies florestais nativas**. Embrapa Florestas. p.24, 2001.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄**. North Carolina Department of Agriculture, Raleigh, p.195, 1953.

MONTEIRO, E. B.; DA SILVA, C. C.; DA SILVA, A. C.; DE 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.

MORIN, X.; ROY, J.; SONIÉ, L.; CHUINE, I. Changes in leaf phenology of three European oak species in response to experimental climate change. **New Phytologist**, v.186, p.900-910, 2010.

MOURA, T. M.; LEWIS, G. P.; TOZZI, A. M. G. A. A revision of the South American genus *Platygyamus* Benth. (Leguminosae). **Kew Bulletin**, v.9, p.1-7, 2016.

MOURA, T.M. 2020. *Platygyamus* in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB29815>>. Acesso em: 13 Mar. 2022.

NIEVOLA, C. C.; CARVALHO, C. P.; CARVALHO, V.; RODRIGUES, E. Rapid responses of plants to temperature changes. **Temperature**, v.4, n.4, p.371-405, 2017.

OLIVEIRA, M. C. de; OGATA, R. S.; ANDRADE, G. A. de; SANTOS, D. S.; SOUZA, R. M.; GUIMARÃES, T. G.; SILVA JUNIOR, 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. p.124, 2016.

OLIVEIRA, M. C. de; PEREIRA, D. J. de S.; RIBEIRO, J. F. **Viveiro e produção de mudas de algumas espécies arbóreas nativas do cerrado**. Embrapa Cerrado: Planaltina. p. 85, 2011.

- ORTOLANI, F. A.; MATAQUEIRO, M. F.; MORO, J. R.; MORO, F. V.; DAMIÃO FILHO, C.F. Morfo-anatomia de plântulas e número cromossômico de *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. (Bignoniaceae). **Acta Botanica Brasilica**, v.22, n.2, p.345-353, 2008.
- PARENT, B.; TARDIEU, F. Temperature responses of developmental processes have not been affected by breeding in different ecological areas for 17 crop species. **New Phytologist**, v.94, p.760-774, 2012.
- 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.490, 2017.
- PIROVANI, D. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; JESUS JÚNIOR, W. C.; MACHUCA, M. A. H.; SANTOS, G. M. A. D. A.; SILVA, S. F.; ALMEIDA, S. L. H.; PELUZIO, T. O.; EUGENIO, F. C.; MOREIRA, T. R.; ALEXANDRE, R. S.; SANTOS, A. R. Climate change impacts on the suitability area of forest species. **Ecological Indicators**, v.95, p.405-416, 2018.
- RAWAL, D. S.; KASEL, S.; KEATLEY, M. R.; APONTE, C.; NITSCHKE, C. R. Environmental effects on growth phenology of co-occurring Eucalyptus species. **International Journal of Biometeorology**, v.58, n.4, p.427-442, 2014.
- REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.17, p.206-226, 2015.
- 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.
- RIBEIRO, C. L.; GRABAI, J.; BORG, M.; HOFFMANN, P. M.; VELAZCO, S. J. E. Manual de cultivo *Cybistax antisiphilitica* (Bignoniaceae) (Mart.) Mart. **Boletim Chauá**, n.14, Curitiba, 2018.
- RIBEIRO-OLIVEIRA, J. P.; SANTANA, D. G.; LOBO, G. A. Ipê-verde *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. **Nota técnica**, v.11, n.1, p.1-6, 2019.
- RODRIGUES, A. M.; PAULA, J. E.; ROBLLOT, F.; FOURNET, A.; ESPÍNDOLA, L. S. Larvicidal activity of *Cybistax antisiphilitica* against *Aedes aegypti* larvae. **Fitoterapia**, v.76, p.755-757, 2005.
- 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, n.11, p.1374-1382, 2009.
- RUPELLAND, E.; ZACHOWSKI, A. How plants sense temperature. *Environ. Exp. Bot.* 69, 225-232, 2010.
- SAGE, R. F.; KUBIEN, D. S. The temperature response of C3 and C4 photosynthesis. **Plant, Cell & Environment**, v.30, p.1086-1106, 2007.

- SALOMÃO, N. A.; SANTOS, I. R. I.; JOSE, S. C. B. R.; PADILHA, L. S.; MUNDIM, R. C. **Criopreservação de sementes de *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. - Bignoniaceae.** Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2018.
- 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.
- 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.** Revista Amp. Embrapa, Brasília, 2018.
- SAUERESSIG, D. Árvores nativas. Editora Plantas do Brasil. p.432, 2017.
- 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**, v7, p.e7333, 2019.
- SILVA, L. V.; REIS, F. Y. S.; MARTINS, F. B.; CASSEMIRO, J. M. Desenvolvimento vegetativo de *Cesalpineia ferrea* e *Anadenanthera macrocarpa*: I - estimativa das temperaturas cardinais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.1, p.23-33, 2020.
- SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE, J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, n.1, p.171-178, 2004.
- SLOT, M.; GARCIA, M. N.; WINTER, K. Temperature response of CO₂ exchange in three tropical tree species. **Functional Plant Biology**, v.43, n.5, p.468-478, 2016.
- SLOT, M.; WINTER, K. Photosynthetic acclimation to warming in tropical forest tree seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v.68, n.9, p.2275-2284, 2017.
- SOUZA, G. F. D.; LEITE, G. L. D.; SILVA, F. W. S.; SILVA, J. L.; SAMPAIO, R. A.; TEIXEIRA, G. L.; SOARES, M. A.; ZANUNCIO, J. C. Bottom-up effects on arthropod communities in *Platycyamus regnellii* (Fabaceae) fertilized with dehydrated sewage sludge. **Revista Colombiana de Entomologia**, v.47, n.1, p.e8943, 2021.
- SOUZA, P. M. B.; MARTINS, F. B. Estimativa da temperatura basal inferior para as cultivares de oliveira Grappolo e Maria da Fé. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, p.307-313, 2014.
- STRECK, N. A.; LAGO, I.; OLIVEIRA, F. B.; HELDWEIN, A. B.; DE 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.
- WHITE, J. W.; KIMBALL, B. A.; WALL, G. W.; OTTMAN, M. J. Cardinal temperatures for wheat leaf appearance as assessed from varied sowing dates and infrared warming. **Field Crops Research**, v.137, n.20, p.213-220, 2012.

CAPÍTULO II

MODELANDO A DINÂMICA DO DESENVOLVIMENTO INICIAL PARA DUAS ESPÉCIES FLORESTAIS NATIVAS BRASILEIRAS

2.1. INTRODUÇÃO

O crescimento e o desenvolvimento das plantas são processos independentes que podem ocorrer simultaneamente ou não (HODGES, 1991; STRECK et al., 2011; DAMBREVILLE et al., 2015). Enquanto o crescimento envolve o aumento irreversível das dimensões físicas dos órgãos, como área, comprimento, largura, altura, volume, densidade, massa e diâmetro, 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 até a senescência da planta (SINCLAIR et al., 2004; STRECK et al., 2011; SOLTANI e SINCLAIR, 2012; DAMBREVILLE et al., 2015). Modelos de crescimento e desenvolvimento possuem estruturas e níveis de complexidade diferentes, e são alimentados por variáveis (ou funções) distintas. Por exemplo, os modelos de crescimento estimam a taxa de crescimento dos diferentes compartimentos da planta (raízes, caule e folhas) incluindo variáveis como água, nutrientes, luz, radiação, temperatura e umidade. Os modelos de desenvolvimento estimam a taxa de desenvolvimento da planta nas diferentes fases (emissão de folhas) (XUE et al., 2004; ERPEN et al., 2013; ROSA et al., 2015) por funções de temperatura, fotoperíodo e vernalização (HODGES, 1991; WANG e ENGEL, 1998; STRECK et al., 2003, 2007 e 2008). Em comum, ambos modelos necessitam ser calibrados e validados para condições experimentais/locais (FERREIRA et al., 2019; KUMAR et al., 2019; FREITAS et al., 2020; FAGUNDES et al., 2021) devido à dependência genética e ambiental dos coeficientes (STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2022b).

Nesse sentido, os modelos de desenvolvimento relacionam a idade fisiológica e aparência morfológica da planta (WANG e ENGEL, 1998; SOLTANI e SINCLAIR, 2012). Nas espécies florestais tropicais a idade fisiológica é dada por funções de temperatura do ar (KAMKAR et al., 2012; MONTEIRO et al., 2014; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022a e 2022b), enquanto a aparência fisiológica é contabilizada pela emissão de órgãos, como o número de folhas (FAGUNDES et al., 2021; FERREIRA et al., 2019; MARTINS e STRECK, 2007), flores e frutos (KUMAR et al., 2019). O número de folhas é um excelente parâmetro utilizado na determinação do desenvolvimento inicial, que se refere a fase de muda das espécies (MARTINS e STRECK, 2007; MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019; MARTINS et

al., 2022b). Após calibrados, os modelos de desenvolvimento fornecem informações importantes sobre a dinâmica do desenvolvimento, como o número de folhas acumulados ao longo do tempo (NFa), o número de folhas final (NFF) (MARTINS and STRECK, 2007; MARTINS et al., 2014; COSTA e STRECK, 2018; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b), que integrados no tempo, fornecem a duração da fase de muda (DFM). Informações sobre NFa, NFF e DFM podem ser úteis no planejamento e tomada de decisão de curto prazo em viveiros florestais, como escolha e escalonamento de épocas mais indicadas à semeadura, duração do período de rusticidade (GROSSNICKLE e MACDONALD, 2018; MARTINS et al., 2022a e 2022b), aplicações de tratamentos silviculturais para controle de pragas (MARTINS e STRECK, 2007; MORIN et al., 2010), e venda das mudas (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Além disso, através dos modelos de desenvolvimento é possível obter informações de longo prazo, e analisar as respostas das espécies em cenários de mudanças climáticas (MORIN et al., 2010; PARENT e TARDIEU, 2012; COSTA e STRECK, 2018; FLORÊNCIO et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021).

Dois modelos têm sido utilizados para estimar o desenvolvimento de espécies florestais: o Filocrono (FIL) e o Wang e Engel (WE) (MARTINS e STRECK, 2007; FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021). O FIL estima o desenvolvimento através da relação entre a taxa de aparecimento de folhas (TAF) e a função linear de temperatura denominada soma térmica (ST, °C dia) (STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2014; LANGNER et al., 2018; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). O modelo WE estima o desenvolvimento pela multiplicação entre a TAF e a função não linear de temperatura, denominada função beta (f(T)) (WANG e ENGEL, 1998; STRECK et al., 2008, 2011; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Apesar do FIL ser mais simples por considerar a ST e apresentar menor número de coeficientes (XUE et al., 2004; STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2014), ele apresenta algumas desvantagens. A maior desvantagem é devido a existência de diferentes métodos de cálculo de ST, os quais podem gerar resultados diferentes a partir dos mesmos dados de entrada (STRECK et al., 2008; ZHOU e WANG, 2018; MARTINS et al., 2002a). Além disso, quando a temperatura do ar está próxima aos limiares térmicos adequados para o desenvolvimento (T_b e T_B) ou da ótima (T_{ot}) (STRECK et al., 2003; XUE et al., 2004; STRECK et al., 2008, 2011; ZHOU e WANG, 2018; MARTINS et al., 2014), a ST não apresenta boa performance. Já o WE considera a função beta, que possui maior aderência com as temperaturas cardinais (T_b , T_{ot} e T_B), principalmente quando são frequentes os casos em que a temperatura do ar é próxima a T_b ou acima da T_{ot} (ERPEN et al., 2013; STRECK et al., 2011; ZHOU e WANG, 2018), além de abranger uma ampla gama de regimes de temperatura

(XUE et al., 2004; MARTINS et al., 2014).

Apesar das diferenças entre os dois modelos, ambos são capazes de estimar coerentemente o desenvolvimento de espécies florestais. Por exemplo, o modelo FIL foi preciso na estimativa do desenvolvimento inicial da *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg, enquanto o modelo WE foi superior para *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz (FAGUNDES et al., 2021), e *Citharexylum myrianthum* Cham. (MARTINS et al., 2022b), o que demonstra que a superioridade de ambos modelos (FIL e WE) é atrelada ao genótipo, e, portanto, dependente de cada espécie florestal (MARTINS e STRECK, 2007; MONTEIRO et al., 2014; FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Infelizmente, estudos sobre calibração e avaliação de modelos de desenvolvimento são escassos em espécies florestais. Os poucos estudos existentes foram realizados para poucas espécies florestais exóticas, como *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden) e *Eucalyptus saligna* (Sm.) (MARTINS e STRECK, 2007), *Adenanthera pavonina* (L.) e *Cassia fistula* (L.) (MONTEIRO et al., 2014), *Psidium guajava* L. (FERREIRA et al., 2019), e nativas, como *Hymenolobium petraeum* Ducke, *Parkia pendula* (Willd.) Benth. ex Walp. (MONTEIRO et al., 2014), e *Bixa orellana* L. (MARTINS et al., 2022b). Portanto, o desempenho dos modelos FIL e WE ainda é desconhecida para a maioria das espécies florestais, mesmo com o potencial de uso de ambos modelos de desenvolvimento.

Estudos recentes vêm demonstrando que as mudanças nos padrões climáticos podem impactar na qualidade e sobrevivência das mudas em curto e longo prazo (FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022a). Os impactos serão ainda mais drásticos nas espécies nativas brasileiras que estão localizadas em hotspots de mudanças climáticas persistentes, como o estado de Minas Gerais (SILVA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; FLORÊNCIO et al., 2022). Portanto, estudos que forneçam informações sobre a dinâmica do desenvolvimento (NFa, NFF e DFM) das espécies nativas são essenciais, para calibrar e avaliar os modelos em condições de clima presente, e prever as respostas das espécies em cenários climáticos futuros (FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022a e 2022b).

Nesse contexto, dentre as inúmeras espécies florestais, duas merecem atenção especial: a *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. (Bignoniaceae; ipê-verde, ipê-caroba ou caroba-verde), e *Platycyamus regnellii* Benth. (Fabaceae, pau-pereira, mangalô ou folha-de-bolo). Ambas espécies são nativas do Brasil e estão naturalmente distribuídas nos domínios fitogeográficos Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Amazônia e Pantanal (Figura 1.1 – Capítulo I, item 1.2.1), os quais apresentam maior vulnerabilidade devido a perda de biodiversidade no clima futuro (SILVA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021). Além disso, as duas espécies têm papel

importante como reparador ecológico, pois se estabelecem em solos arenosos, pedregosos e de baixa fertilidade, podendo ser utilizadas com sucesso em programas de restauração e reflorestamentos (ORTOLANI et al., 2008; BITTENCOURT et al., 2011; SOUZA et al., 2021; FREITAS et al., 2022).

A *C. antisyphilitica* é uma espécie pioneira (ORTOLANI et al., 2008) com ampla distribuição na América do sul, desde o território subamazônico do Brasil até o Paraguai, Bolívia e algumas partes da região mais seca da encosta amazônica dos Andes peruanos (FREITAS et al., 2022). No Brasil a espécie está naturalmente distribuída nos seis domínios fitogeográficos brasileiros (Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Amazônia, Pampa e Pantanal) (COSTA et al., 2019; LOHMANN, 2020; FREITAS et al., 2022), e em diferentes tipos de formações vegetais, como florestas tropicais semidecíduais e cerrado *sensu stricto*, ou com maior cobertura de dossel na Mata Atlântica (FREITAS et al., 2022). Dentre os usos, a espécie possui destaque na medicina popular, devido ao composto natural, lapachol, que apresenta múltiplas ações (anti-inflamatória, analgésica, antibiótica, antissifilítica, antiepiléptica e antineoplásica) (FREITAS et al., 2011; BITTENCOURT et al., 2011). Além disso, a *C. antisyphilitica* possui importante função ecológica, principalmente no Cerrado, fornecendo néctar e pólen para abelhas durante a estação seca (ALMEIDA et al., 2003; BITTENCOURT et al., 2011).

A *P. regnellii* é endêmica do Brasil, secundária (MOURA et al., 2016; SAUERESSIG, 2017), com distribuição natural restrita nos domínios fitogeográficos da Mata Atlântica e Cerrado (MOURA, 2020) e principalmente nas florestas semidecíduais de altitude (SOUZA et al., 2021). A espécie é utilizada na construção civil, carpintaria e fins mobiliários devido a elevada densidade da madeira ($0,81 \text{ g/cm}^3$) (SOUZA et al., 2021). As raízes e cascas são usadas na medicina popular, com ação contra a má digestão, úlcera, gastrite e inapetência (CURY e TOMAZELLO-FILHO 2011; SOUZA et al., 2021). Além de ser usada para fins ornamentais, paisagísticos e em plantios agrosilvipastoris (FERREIRA et al., 2015; SAUERESSIG, 2017; SOUZA et al., 2021).

Considerando a escassez de estudos dessa natureza e a importância ecológica e ambiental das espécies *C. antisyphilitica* e *P. regnellii*, este estudo calibrou e avaliou o desempenho de ambos modelos de desenvolvimento - FIL e WE - em estimar a dinâmica do desenvolvimento inicial, através do NFa, NFF e DFM, durante a fase de muda.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Desenho experimental e dados

Os dados de NFa, NFF e DFM são provenientes de experimentos instalados a céu aberto no viveiro florestal do Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais (Figura 1.1 B - Capítulo I, item 1.2.1), conforme protocolo experimental e dados descrito no Capítulo I desta dissertação no item 1.2.1.

2.2.2. Modelos de desenvolvimento inicial

Os dois modelos utilizados nesse estudo (FIL e WE) estimam o desenvolvimento inicial em três etapas (MARTINS e STRECK, 2007; FAGUNDES et al., 2021, MARTINS et al., 2022b): i) calcula o NFa, em escala diária, pelo somatório da TAF desde a data de emergência (i) até o término do desenvolvimento inicial (n) (Tabela 1.1 – Capítulo I, item 1.2.2), ii) calcula o NFF pelo somatório do NFa diário, e obtém a data em que $NFF = n$; iii) obtém a DFM pela duração, em dias, entre i e n. O NFF é o limiar de comercialização das mudas da *C. antisiphilitica* (NFF = 20 folhas) e *P. regnellii* (NFF = 10 folhas), e, portanto, refere-se ao término do desenvolvimento inicial.

No modelo FIL, a TAF diária é dada por (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022a e 2022b):

$$TAF_{FIL} = a \cdot ST \quad (2.1)$$

Em que: TAF_{FIL} = taxa diária de aparecimento de folha pelo modelo FIL (folhas dia⁻¹); a = é o coeficiente angular da regressão linear entre TAF e a ST (folhas por °C dia) que representa a taxa média de desenvolvimento sendo específico para cada espécie; STd = soma térmica diária (°C dia), calculada por (LANGNER et al., 2018; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022a e 2022b):

$$STd = \begin{cases} 0, & \text{quando } T < T_b \text{ ou } T > T_B \\ (T - T_b), & \text{quando } T_b \leq T \leq T_{ot} \\ \frac{(T_{ot} - T_b) \cdot (T_B - T)}{(T_B - T_{ot})}, & \text{quando } T_{ot} < T \leq T_B \end{cases} \quad (2.2)$$

Em que: T = temperatura média diária do ar da estação meteorológica automática localizada na área experimental; T_b , T_{ot} e T_B = temperaturas cardinais (basal inferior, ótima e basal superior, respectivamente) de desenvolvimento inicial. As temperaturas cardinais para *C. antisiphilitica* são $T_b = 13$ °C, $T_{ot} = 20$ °C, $T_B = 48,4$ °C e para *P. regnellii* são $T_b = 13,7$ °C, $T_{ot} = 21,5$ °C, $T_B = 43,4$ °C (Capítulo I). As temperaturas cardinais e a representação da ST estão

demonstradas na Figura 2.1 A.

No modelo WE, o TAF é calculado por (STRECK et al., 2011; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b):

$$TAF_{WE} = TAF_{max} \cdot f(T) \quad (2.3)$$

Em que: TAF_{WE} = taxa diária de aparecimento de folha pelo modelo WE (folhas dia⁻¹), = TAF_{max} = taxa máxima diária de aparecimento de folhas (folhas dia⁻¹), que é específica para cada espécie (ver detalhes no item 2.2.3); $f(T)$ = função de resposta de temperatura beta (de 0 a 1) dada por (WANG e ENGEL, 1998; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b):

$$f(T) = \begin{cases} 0, & \text{quando } T < T_b \text{ ou } T > T_B \\ \frac{2(T-T_b)^\alpha(T_{Tot}-T_b)^\alpha - (T-T_b)^{2\alpha}}{(T_{Tot}-T_b)^{2\alpha}}, & \text{quando } T_b \leq T \leq T_B \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \ln 2 / \ln[(T_B - T_b)/(T_{Tot} - T_b)] \quad (2.5)$$

Em que: T, T_b, T_{tot} e T_B já foram mencionados anteriormente, e α = é o coeficiente da f(T). As temperaturas cardinais e a representação da f(T) estão demonstradas na Figura 2.1 B.

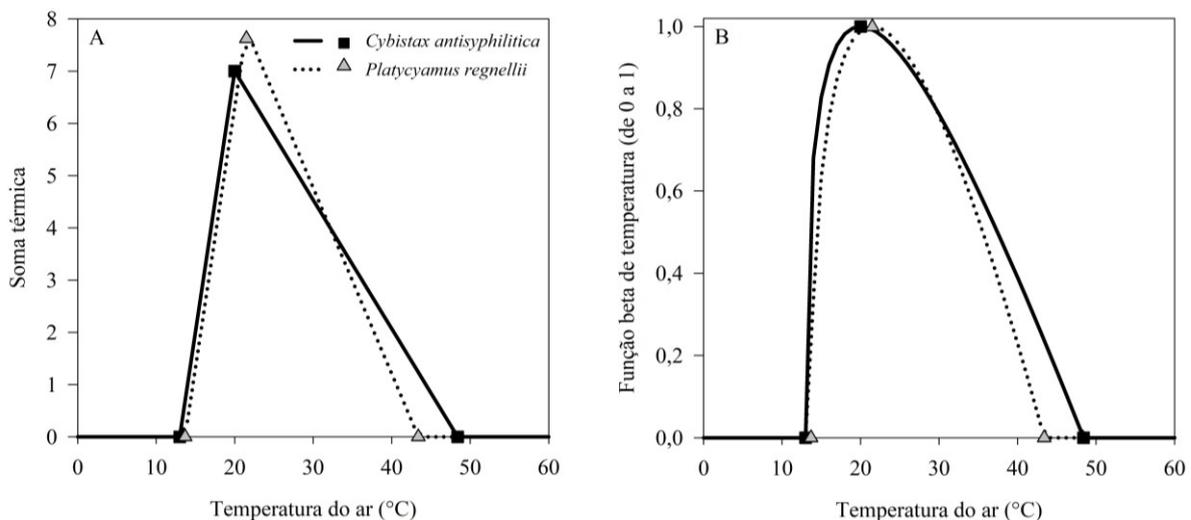


Figura 2.1 - Funções de resposta à temperatura usadas no modelo do filocrono (A), dada pela soma térmica, e o modelo de Wang e Engel (B), dada pela função beta de temperatura, para estimar o número de folhas cumulativa usando as temperaturas cardinais de desenvolvimento inicial para *Cybistax antisiphilitica* ($T_b = 13$ °C, $T_{ot} = 20$ °C, $T_B = 48,4$ °C) e *Platycyamus regnellii* ($T_b = 13,7$ °C, $T_{ot} = 21,5$ °C, $T_B = 43,4$ °C) (Capítulo I).

2.2.3. Calibração dos coeficientes dos modelos de desenvolvimento inicial

Para calibrar os coeficientes dos modelos FIL (coeficiente 'a') e WE (TAF_{max}) foi seguida as recomendações de Martins e Streck (2007), Ferreira et al. (2019), Fagundes et al. (2021) e Martins et al. (2022b) usando os dados independentes de NFA das DS1 a DS5. O

coeficiente ‘a’ do modelo FIL foi calibrado por uma série de regressões lineares entre NFa e ST acumulada, ajustadas para cada DS e espécie florestal. O coeficiente ‘a’ de cada espécie foi obtido pela média aritmética dos coeficientes angulares dessas regressões (STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Já o coeficiente TAF_{max} do modelo WE foi estimado por uma série de regressões não lineares ajustadas através dos mínimos quadrados ordinários entre NFa em função do $f(T)$ acumulado para cada DS e espécie florestal. O valor de TAF_{max} foi considerado como o valor obtido da regressão com menor valor de quadrado médio do erro (QME) (MARTINS et al., 2014; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Para os ajustes não lineares foi utilizada a variante Gauss-Newton considerando o método dos mínimos quadrados ordinários.

2.2.4. Avaliação do desempenho dos modelos de desenvolvimento inicial

A avaliação do desempenho dos modelos FIL e WE foi realizada por duas etapas: i) comparação entre o NFa estimado e observado pelos dois modelos com dados independentes das DS6 a DS12, e ii) comparação entre a DFM estimada e observada pelos dois modelos. Na etapa i, as estatísticas utilizadas foram raiz do quadrado médio do erro (RQME), error médio (BIAS), índice de desempenho (índice-c), além dos testes de Bartlett e Tukey ($p = 0,05$). Os valores de RQME, BIAS e índice-c foram obtidos por (MONTEIRO e MARTINS, 2019; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b):

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (2.6)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n E_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (2.7)$$

$$\text{índice - c} = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O}_i) \cdot (E_i - \bar{E}_i)}{\{[\sum (O_i - \bar{O}_i)^2] \cdot [\sum (E_i - \bar{E}_i)^2]\}^{0,5}} \right] \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{\sum (|E_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{E}_i|)^2} \right] \right\} \quad (2.8)$$

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 observados de NFa, \bar{O} = média dos valores observados de NFa; n = número de dados.

Com relação ao índice-c, o critério de interpretação para avaliar seu desempenho é: $> 0,85$: representa desempenho excelente; $0,76 < c < 0,85$: representa desempenho muito bom; $0,66 < c < 0,75$: representa bom desempenho; $0,61 < c < 0,65$: representa desempenho razoável; $0,51 < c < 0,60$: representa mau desempenho; $0,41 < c < 0,50$: representa desempenho muito ruim e $c \leq 0,40$: representa desempenho extremamente ruim (MONTEIRO e MARTINS, 2019).

O teste Bartlett foi usado para testar a homogeneidade da variância entre os valores de

NFa observados e estimados por ambos os modelos. Foram testadas as hipóteses H_0 = variâncias homogêneas ($p \geq 0,05$) versus H_1 = variâncias heterogêneas ($p < 0,05$), por (SNEDECOR e COCHRAN, 1989):

$$B = \frac{(\sum vi) \ln\left(\frac{\sum vi Si^2}{\sum vi}\right) - \sum vi \ln Si^2}{1 + \left\{\sum\left(\frac{1}{vi}\right) - 1\right\} / \{3(K-1)\}} \quad (2.9)$$

Em que: B = valor do teste de Bartlett, $vi = n - 1$ e n = número de dados, Si^2 = variância entre NFa observado e NFa previsto (para cada modelo e espécie), $K = 2$, que se referem a dados agrupados observados e estimados.

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 diferem 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 NFa estimado ($p < 0,05$), considerando Tukey (1977):

$$\Delta = q \sqrt{\frac{QME}{n}} \quad (2.10)$$

Em que: Δ = valor do teste Tukey, $q = (2; n - 1)$, QME = quadrado médio do erro, n = número de dados.

Na etapa ii, foram usados os testes de Bartlett e Tukey nos valores de DFM observados e estimados pelos modelos FIL e WE. O modelo de desenvolvimento que apresentou melhor estimativa de NFa, dada pelo menor valor de RQME e BIAS, maior valor de índice-c, homogeneidade de variância ($p \geq 0,05$) e médias iguais ($p \geq 0,05$), e melhor estimativa da DFM, foi considerado o melhor modelo de estimativa da dinâmica do desenvolvimento inicial de cada espécie.

2.3. RESULTADOS

O conjunto de dados usados para calibrar (DS1 a DS5) e avaliar (DS6 a DS12), ambos modelos de desenvolvimento foram conduzidos em DSs que apresentaram variação das condições meteorológicas (Figura 2.2). De maneira geral, os valores de temperatura do ar variaram entre 3,6°C (mínima absoluta) a 34,6°C (máxima absoluta), radiação solar global entre 2,6 $Mj m^{-2} dia^{-1}$ a 29,8 $Mj m^{-2} dia^{-1}$ e a precipitação acumulada variou entre as DSs, com menor precipitação acumulada nas DS4 a DS5 (~264 mm) e maior na DS6 (1046 mm). A precipitação acumulada ao longo das 12 DS (1.673,7 mm) foi acima da climatologia anual de 1.440 mm (REBOITA et al., 2015). Ou seja, durante a condução do experimento não foram observadas

condições meteorológicas atípicas com relação a precipitação. Tais variações entre as diferentes DSs, principalmente da temperatura do ar, são requisitos imperativos, pois geram conjuntos de dados robustos de NFA, e confiabilidade na calibração e avaliação dos modelos de desenvolvimento inicial (WHITE et al., 2012; MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b).

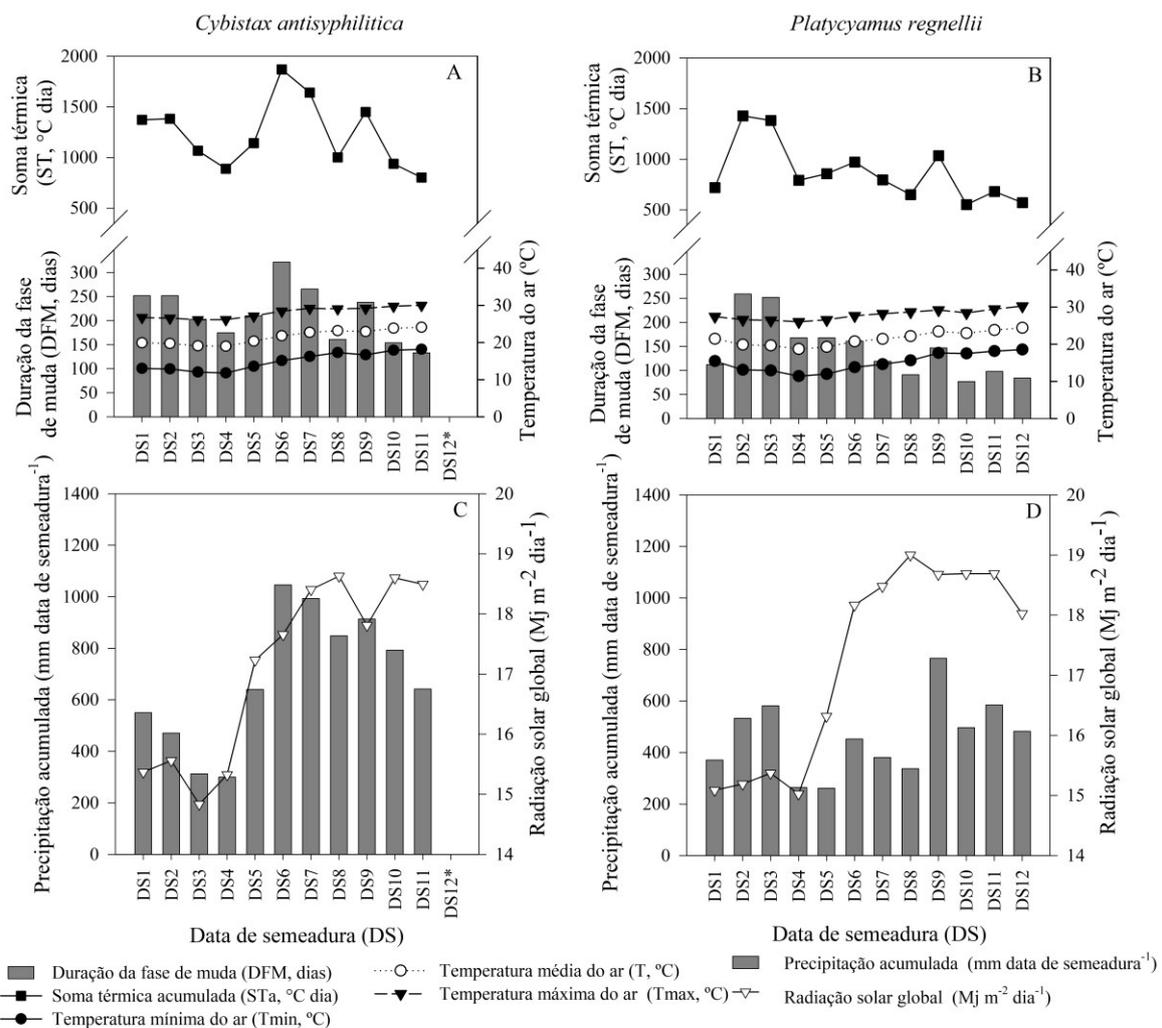


Figura 2.2 - Datas de semeadura (DS) variação de (A – B) temperatura do ar (°C) – mínima, média e máxima, duração da fase de muda (DFM, dias), soma térmica (ST, °C dia), (C - D) precipitação acumulada (mm) e radiação solar global média (MJ m⁻² dia⁻¹) durante os experimentos controlados a céu aberto em Itajubá, Minas Gerais. *DS com perda de repetições da *C. antisiphilitica*.

Houve diferença entre os valores de coeficientes de calibração ('a' e TAF_{max}) encontrados para as duas espécies florestais. Quanto maior o valor de 'a' e TAF_{max} mais precoce é a espécie, indicando menor ciclo de desenvolvimento inicial (duração em dias) (STRECK et

al. 2011; MARTINS et al. 2022b) e antecipação da finalização da DFM (COSTA e STRECK, 2018; FAGUNDES et al. 2021; MARTINS et al. 2022b). O valor de a foi de 0,0158 folhas por °C dia para *C. antisiphilitica* e 0,0091 folhas por °C dia para *P. regnellii*. O significado biológico do coeficiente a do modelo FIL é dado pelo inverso de a , ou seja, 63,29 °C dia por folha (1/0,0158) para *C. antisiphilitica*, e 109,89 °C dia por folha (1/0,0091) para *P. regnellii*, os quais representam o requerimento térmico (RT) necessário para a emissão de uma folha (MARTINS e STRECK, 2007; FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Ao usar esta abordagem, o acúmulo de RT necessário para finalizar a fase de muda (NFF = 20 folhas para *C. antisiphilitica* e NFF = 10 folhas *P. regnellii*) varia de, aproximadamente 1.098,9°C dia (*P. regnellii*) a 1.265,8 °C dia (*C. antisiphilitica*). Para *C. antisiphilitica* este acúmulo térmico foi próximo dos valores obtidos nas condições de campo das DS1 a DS3, DS5 e DS8 (Figura 2.2 A), porém, nas DS4, DS10 e DS11 foi menor, em torno de 877 °C dia, e maior nas DS6, DS7 e DS9, ~1.754°C dia. Para *P. regnellii* somente as DS6 e DS9 (Figura 2.2 B) apresentaram acúmulo térmico próximo a 1.098,9 °C dia. Nas DS1, DS4, DS5, DS7, DS8, DS10 a DS12, o acúmulo térmico foi menor (~ 703 °C dia) e nas DS2 e DS3 foi maior (~1.405 °C dia).

O valor do coeficiente TAF_{max} do modelo WE foi de 0,0923 folha dia⁻¹ para *C. antisiphilitica* e 0,0741 folha dia⁻¹ para *P. regnellii*. Ambos valores representam a taxa de máxima de emissão de folhas em 1 dia, que ocorre quando a temperatura do ar é igual (ou próxima) à Tot de desenvolvimento (STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2022a e 2022b). Em outras palavras, quanto maior a TAF_{max} , maior é a velocidade de emissão das folhas, e menor a DFM (em dias). Isso significa que usando esta abordagem, a menor DFM varia de, aproximadamente, 135 dias para a *P. regnellii* a 216 dias para *C. antisiphilitica*. Para *C. antisiphilitica* essa DFM foi semelhante a DS3, DS5 e DS9 (Figura 2.2 A), que tiveram o maior número de dias (~120 dias) com valores de T mais próximos da Tot da espécie (20 °C). Nas demais DSs essa abordagem apresentou diferenças que variaram de -83 dias (DS11) a +106 dias (DS6) para o término do desenvolvimento inicial (NFF = 20 folhas). Especialmente na DS6, a *C. antisiphilitica* levou 322 dias para atingir a fase de muda, provavelmente em consequência da perda de viabilidade das sementes usadas na DS6. Mesmo seguindo fielmente o protocolo de conservação das sementes, o lote usado na instalação das DS6 e DS7 estava armazenado por 8 - 9 meses, e pode ter perdido o potencial de germinação e vigor das sementes, com redução na taxa de desenvolvimento e aumento da DFM da *C. antisiphilitica*. Para *P. regnellii*, a DFM estimada pelo TAF_{max} (135 dias) foi semelhante nas condições de campo da DS9 (Figura 2.2 B), porém nas demais DSs, a duração apresentou diferenças, variando de -57

dias (DS10) a +125 dias (DS2).

Os dois modelos (FIL e WE) foram capazes de estimar com precisão a DFM para ambas as espécies, com baixos valores de RQME (0,94 folhas a 5,13 folhas), BIAS (-0,54 a 0,49) e valores moderados a muito altos de índice-c (0,67 a 0,97) (Tabela 2.1). Entre as DSs, o desempenho dos dois modelos também foi bastante similar, principalmente para a *C. antisyphilitica*. Por exemplo, na DS9 (*C. antisyphilitica*) o modelo FIL teve RQME ~1,7 folhas e o modelo WE teve RQME ~ 1,4 folhas com índice-c > 0,98, que representa excelente performance. Para a *P. regnellii* o modelo WE foi ligeiramente superior na estimativa da NFa, principalmente nas DS6, DS7 e DS9 (Tabela 2.1). Em algumas DSs, ambos modelos tiveram pior performance. Para *C. antisyphilitica* a pior performance ocorreu na DS6 e DS7 com maiores valores de RQME (~5 folhas) e BIAS. Justamente nessas DSs, a *C. antisyphilitica* se desenvolveu mais lentamente, ou seja, bem abaixo do padrão esperado da TAF_{max} (0,0923 folha $dia^{-1} = \sim 216$ dias). Por outro lado, a pior performance para *P. regnellii* ocorreu nas DS10 e DS12 (RQME ~3 folhas), em que o desenvolvimento foi acima do padrão esperado da $TAFR_{max}$ (0,0741 folhas $dia^{-1} = 135$ dias).

Independente da espécie florestal, os pressupostos de normalidade e homogeneidade não foram violados simultaneamente pelos dois modelos na maioria das DSs, exceto na DS6 e DS11 da *C. antisyphilitica* e DS10 da *P. regnellii*. O teste de Bartlett mostrou que a variância entre o NFa observado e estimado pelos modelos FIL e WE não foi significativa ($p > 0,05$). Esta resposta é desejável na escolha do modelo mais apropriado para descrever o desenvolvimento inicial em espécies florestais (MARTINS e STRECK, 2007; FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Além disso, o teste Tukey mostrou que na maioria das DSs, exceto na DS6 e DS7 para *C. antisyphilitica* e nas DS10 e DS12 para *P. regnellii*, não houve diferença significativa entre a média do NFa observado e estimado pelos dois modelos (FIL e WE).

Tabela 2.1 - Desempenho dos modelos Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) em estimar o número cumulativo de folhas (NFa) nas espécies florestais nativas – *Cybistax antisyphilitica* e *Platycyamus regnellii* – Itajubá, Minas Gerais, 2017/2018.

Datas de semeadura (DS)	Modelo	RQME (folhas)	BIAS	índice-c ⁽¹⁾	p-valor ⁽²⁾	NFa _{obs}	NFa _{est} ⁽³⁾
<i>Cybistax antisyphilitica</i>							
DS6	FIL	5,03	0,34	0,88	0,00*	10,56	14,20*
	WE	4,70	0,36	0,89	0,01*		14,31*
DS7	FIL	5,13	0,49	0,84	0,02*	8,70	13,00*
	WE	3,97	0,38	0,88	0,06 ^{ns}		12,01*
DS8	FIL	1,34	-0,09	0,96	0,76 ^{ns}	8,88	8,07 ^{ns}
	WE	1,98	-0,18	0,94	0,45 ^{ns}		7,31 ^{ns}
DS9	FIL	1,75	0,05	0,96	0,23 ^{ns}	11,13	11,68 ^{ns}
	WE	1,37	-0,04	0,97	0,48 ^{ns}		10,66 ^{ns}
DS10	FIL	3,43	-0,24	0,89	0,06 ^{ns}	9,95	7,56 ^{ns}
	WE	4,10	-0,31	0,85	0,03*		6,90 ^{ns}
DS11	FIL	3,29	-0,24	0,86	0,04*	8,40	6,43 ^{ns}
	WE	3,77	-0,30	0,82	0,02*		5,93 ^{ns}
DS12*	FIL	-	-	-	-	-	-
	WE	-	-	-	-	-	-
Média	FIL	3,33	0,05	0,90	0,19 ^{ns}	9,76	11,06 ^{ns}
	WE	3,32	-0,02	0,89	0,17 ^{ns}		10,46 ^{ns}
<i>Platycyamus regnellii</i>							
DS6	FIL	1,89	-0,30	0,86	0,87 ^{ns}	5,55	3,89*
	WE	0,95	0,01	0,95	0,42 ^{ns}		5,54 ^{ns}
DS7	FIL	2,31	-0,37	0,82	0,17 ^{ns}	5,50	3,46*
	WE	1,42	-0,21	0,92	0,47 ^{ns}		4,35 ^{ns}
DS8	FIL	2,97	-0,47	0,73	0,06 ^{ns}	5,60	2,98*
	WE	2,49	-0,39	0,79	0,15 ^{ns}		3,40 ^{ns}
DS9	FIL	1,49	-0,19	0,91	0,42 ^{ns}	5,93	4,80 ^{ns}
	WE	1,01	-0,09	0,94	0,82 ^{ns}		5,42 ^{ns}
DS10	FIL	3,43	-0,53	0,68	0,02*	5,46	2,56*
	WE	3,05	-0,47	0,72	0,04*		2,89*
DS11	FIL	2,37	-0,37	0,82	0,13 ^{ns}	5,60	3,53*
	WE	2,27	-0,35	0,84	0,16 ^{ns}		3,61 ^{ns}
DS12	FIL	3,71	-0,55	0,67	0,02*	5,90	2,68*
	WE	3,24	-0,48	0,72	0,06 ^{ns}		3,09*
Média	FIL	2,60	-0,40	0,79	0,24 ^{ns}	5,66	3,57*
	WE	2,06	-0,29	0,84	0,30 ^{ns}		4,30*

⁽¹⁾ Critério de classificação para o índice-c é: > 0,85: representa desempenho excelente; 0,76 < c < 0,85: representa desempenho muito bom; 0,66 < c < 0,75: representa bom desempenho; 0,61 < c < 0,65: representa desempenho razoável; 0,51 < c < 0,60: representa mau desempenho; 0,41 < c < 0,50: representa desempenho muito ruim e c ≤ 0,40: representa desempenho extremamente ruim (MONTEIRO e MARTINS, 2019). ⁽²⁾ p - valor = valor de probabilidade do teste de Bartlett (que compara a variância entre o número de folhas acumuladas observado e estimado para cada modelo - FIL e WE). A hipótese nula (ns) para o teste de Bartlett é variâncias homogêneas (p ≥ 0,05) e a hipótese alternativa

(*) é variâncias heterogêneas ($p < 0,05$). ⁽³⁾ Média do número de folhas acumulados (compara a média entre número de folhas acumuladas observado e estimado para cada modelo - FIL e WE). A hipótese nula (ns) para o teste de Tukey é média iguais ($p \geq 0,05$) e a hipótese alternativa (*) é média diferentes ($p < 0,05$). * DS com perda de repetições da *C. antisiphilitica*.

A Figura 2.3 (A-D) mostra os valores de Nfa estimados versus observados considerando as DSs independentes (DS6 a DS12). É notável a similaridade na estimativa do Nfa entre os dois modelos ao longo das DSs para as duas espécies florestais. Apesar disso, o WE erra ligeiramente menos que o FIL para *C. antisiphilitica* (RQME = 3,31 folhas), principalmente nas DS6, DS7 e DS9 (Tabela 2.1), assim como para a *P. regnellii* (RQME = 2,06 folhas) em todas as DSs. Ainda para a *P. regnellii*, o modelo FIL subestima o Nfa em todas as DSs, com valores sempre abaixo da linha 1:1.

Quando se analisa a DFM estimada pelos modelos FIL e WE em ambas espécies (Figura 2.3 E e F), exatamente na DS onde houve subestimativa (superestimativa) do Nfa (Tabela 2.1 e Figura 2.3 A-D) houve superestimativa (subestimativa) da DFM, com magnitude proporcional ao RQME e BIAS. Por exemplo, para a *C. antisiphilitica* a maior superestimativa do Nfa nas DS6 e DS7, gerou maior subestimativa no DFM pelo modelo FIL (-96 e -55 dias) e WE (-91 e -36 dias) (Figura 2.3 E). Do contrário, a menor subestimativa do Nfa na DS8, acarretou menor superestimativa do DFM pelo modelo FIL (+39 dias) e WE (+58 dias) (Figura 2.3 E). Subestimativas do Nfa são promovidas pelo decréscimo da TAF no tempo (MARTINS e STRECK, 2007; STRECK et al., 2011; FERREIRA et al., 2019), resultando em menor velocidade de emissão de folhas e alongamento do ciclo de desenvolvimento influenciando na maior DFM (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Apesar do FIL e WE terem erros baixos e aceitáveis na estimativa do Nfa (~3,3 folhas), ambos não conseguiram estimar com a mesma precisão a DFM da *C. antisiphilitica*, com RQME de ~25 dias para ambos modelos (Figura 2.3 E). Porém, pelo teste Tukey não foi detectada diferença significativa entre as médias da DFM estimada e observada pelo FIL ($p = 0,887$) e WE ($p = 0,723$). Ou seja, apesar do erro ~25 dias na estimativa da DFM (Figura 2.3 E), ambos modelos não diferem da média da DFM observada para a *C. antisiphilitica*.

Padrão similar ocorreu para as estimativas da Nfa e DFM para *P. regnellii*, porém com menor magnitude de erro entre os modelos (FIL e WE) e DSs (DS6 a DS12) (Tabela 2.1). Ou seja, a subestimativa do Nfa em todas as DSs, influenciou na superestimativa do DFM, exceto pelo modelo WE nas DS6 e DS9. Nesta espécie, apesar de ambos modelos serem semelhantes na estimativa da Nfa (Figura 2.3 A-D), o modelo WE errou menos na estimativa da DFM (entre -4 a 55 dias) que o FIL (entre + 3 a 77 dias) em todas as DSs. Consequentemente, o erro na estimativa da DFM ao longo das DSs foi menor pelo modelo WE (RQME = 13 dias) comparado

ao modelo FIL (RQME = ~20 dias). O teste Tukey não mostrou diferença entre as médias de DFM observado e estimado pelo modelo WE ($p = 0,073$), enquanto pelo modelo FIL o resultado foi oposto ($p = 0,004$).

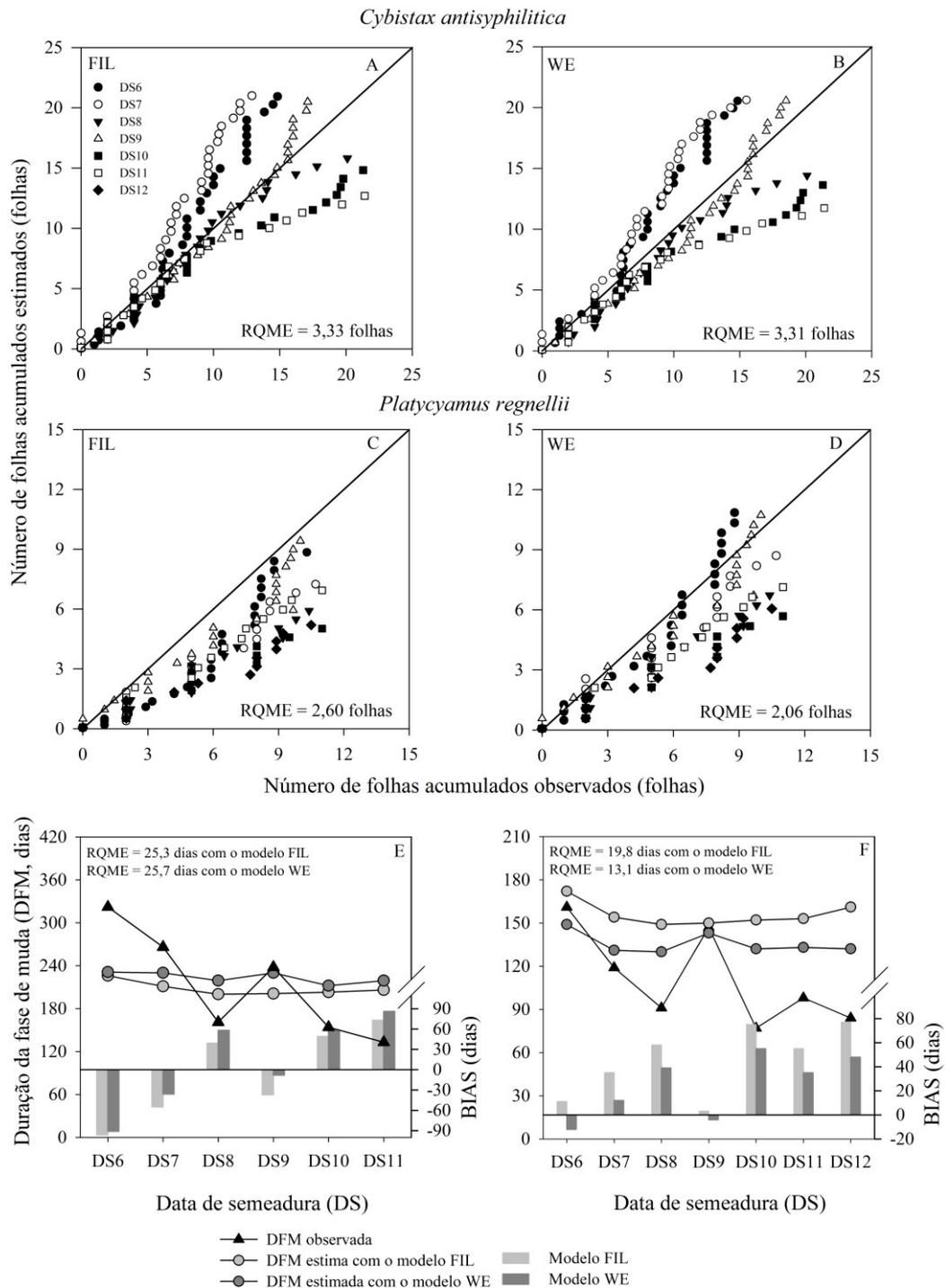


Figura 2.3 - Número de folhas acumulados (NFA) estimados versus observados pelos modelos Filocrono (FIL) (painéis A e C) e Wang e Engel (WE) (painéis B e D) e duração da fase de muda (DFM, dias) (painéis E e F) para *Cybistax antisiphilitica* (painéis A, B e E) e *Platycyamus*

regnellii (painéis C, D e F). A linha contínua é a linha 1:1. O valor de BIAS é a diferença entre o DFM estimado menos o observado com dois modelos de desenvolvimento (FIL e WE).

É importante salientar que não há definição sobre o limite de erro aceitável na estimativa de DFM em espécies florestais nativas. Mesmo assim, erros inferiores a 15 dias são aceitos e esperados, enquanto um erro máximo de até 30 dias na estimativa da DFM pode ser tolerado em espécies florestais (FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Apesar da similaridade dos dois modelos, o modelo WE foi ligeiramente superior na estimativa do NFa de ambas espécies (RQME = 2,60 folhas para *C. antisyphilitica* e RQME = 3,31 folhas para *P. regnellii*) e conseguiu estimar melhor a DFM da *P. regnellii* (RQME = 13,1 dias), assim como a DFM da *C. antisyphilitica* (RQME = 25,7 dias).

2.4. DISCUSSÃO

Modelos de desenvolvimento relacionam a idade fisiológica das plantas com a sua aparência morfológica, sendo que em espécies florestais tropicais, a idade fisiológica é melhor descrita por funções de resposta à temperatura do ar (FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022a e 2022b). Outras funções de resposta como o fotoperíodo não devem ser incluídas nos modelos de desenvolvimento, uma vez que a fase de muda da maioria das espécies florestais tropicais não é responsiva ao fotoperíodo (RAWAL et al., 2015; FREITAS e MARTINS, 2019; MARTINS et al., 2022b). Portanto, como a temperatura do ar impulsiona o NFa e a DFM da *C. antisyphilitica* e *P. regnellii*, é fortemente recomendado o uso de modelos que estimam a dinâmica do desenvolvimento em função da T (FREITAS et al., 2017; UHLMANN et al., 2017; FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2022b). Nesse estudo, as diferentes condições meteorológicas entre as DSs (Figura 2.2), principalmente relacionada à T, foram importantes na avaliação da robustez dos modelos (FIL e WE) na estimativa do NFa (NFF) e DFM sob diferentes condições ambientais daquelas usadas na calibração (MARTINS e STRECK, 2007; FERREIRA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b).

Calibrar os coeficientes (a e TAF_{max}), avaliar o desempenho, e escolher o modelo mais preciso para estimar a NFa (NFF) e DFM, são passos necessários para quantificar os impactos das projeções climáticas no desenvolvimento de espécies florestais (COSTA e STRECK, 2018; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021). Além disso, especialmente a etapa de calibração dos coeficientes, gera informações práticas importantes que podem ser utilizadas pelos

viveiristas para comparar requerimento térmico entre espécies florestais (MONTEIRO et al., 2014; MARTINS et al., 2022b), comparar padrões de desenvolvimento entre espécies florestais (MARTINS e STRECK, 2007; MARTINS et al., 2022a), verificar as épocas de plantio mais adequadas (MARTINS e STRECK, 2007; FAGUNDES et al., 2021), e determinar o melhor momento para a venda das mudas (FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2022a). Por exemplo, ao determinar corretamente o tempo de venda, os viveiros podem garantir que as mudas atinjam tamanho adequado de mercado e vigor para venda (FAGUNDES et al., 2021), reduzindo assim as perdas financeiras (MARTINS et al., 2023).

Nesse sentido, os coeficientes calibrados para *C. antisiphilitica* ($1/a = 63,29$ °C dia por folha pelo modelo FIL e $TAF_{max} = 0,0923$ folhas dia⁻¹ pelo modelo WE) e para *P. regnellii* ($1/a = 109,89$ °C dia por folha - FIL e $TAF_{max} = 0,0741$ folha dia⁻¹ - WE) indicam que ambas espécies florestais emitem folhas mais lentamente e demoram mais tempo (maior número de dias) para atingir o final da fase de muda comparada a outras espécies florestais. Como exemplo, espécies nativas como: *L. ferrea* ($1/a = 46,4$ °C dia por folha e $LAR_{max} = 0,1829$ folhas dia⁻¹) (FAGUNDES et al., 2021), *C. myrianthum* ($1/a = 33,3$ °C dia por folha e $TAF_{max} = 0,1867$ folhas dia⁻¹), *B. orellana* ($1/a = 49,26$ °C dia por folha e $TAF_{max} = 0,1125$ folhas dia⁻¹) (MARTINS et al., 2022b) e *H. petraeum* e *P. pendula* ($1/a$ entre 26,72 °C dia por folha a 30,30 °C dia por folha) (MONTEIRO et al., 2014), além de espécies exóticas como: *E. grandis* ($1/a = 30,9$ °C dia por folha e $TAF_{max} = 0,4107$ folhas dia⁻¹), *E. saligna* ($1/a = 32,2$ °C dia folha⁻¹ e $TAF_{max} = 0,3180$ folhas dia⁻¹) (MARTINS e STRECK, 2007), *A. pavonina* e *C. fistula* ($1/a$ entre 10,40 °C dia por folha a 19,54 °C dia por folha) (MONTEIRO et al., 2014), e *P. guajava* ($1/a = 43,10$ °C dia por folha e $TAF_{max} = 0,1086$ folhas dia⁻¹) (FERREIRA et al., 2019) possuem maiores valores de coeficientes a e TAF_{max} . Isso significa que as espécies acima mencionadas emitem folhas mais rapidamente e tem menor ciclo de desenvolvimento inicial comparada a *C. antisiphilitica* e *P. regnellii*. Além disso, caso a *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* sejam expostas a maior período de tempo em condições meteorológicas adversas, próxima à T_b ou acima da T_{ot} , elas podem reduzir ainda mais a TAF e aumentar a DFM.

Os dois modelos (FIL e WE) estimaram com precisão o N_{Fa} (e N_{FF}) para ambas espécies, com desempenho bom à excelente (índice-c > 0,67) e erros baixos (no geral o RQME < 3,3 folhas) (Tabela 2.2 e Figura 2.3 A-D). No entanto, subestimativa no N_{Fa} pelos modelos FIL e WE geraram superestimativa no DFM ao longo das DSs, exceto para a *C. antisiphilitica* nas DS6 e DS7 (e DS9). Justamente nestas duas DSs, ambos modelos superestimaram a N_{Fa}, principalmente acima de 5 folhas, e subestimaram a DFM em ~93 dias. As superestimativas da N_{Fa} são promovidas por um aumento da TAF ao longo do tempo, resultando em um ciclo de

desenvolvimento mais rápido, com antecipação da finalização da fase de muda e menor DFM (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b). Superestimativas na NFa podem ser causadas por: i) incapacidade dos modelos em captar o desenvolvimento em DSs mais frias ou com maior ocorrência de T próxima à Tb, ou entre Tb e Tot (MARTINS and STRECK, 2007; MARTINS et al., 2014; STRECK et al., 2011; FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2022b), e ii) menor habilidade dos modelos em simular menor TAF, ocasionado pela menor velocidade de desenvolvimento no campo, devido a redução do poder germinativo ou perda de viabilidade das sementes (FAGUNDES et al., 2021). Nas DS6 e DS7, a redução da qualidade fisiológica, germinação e vigor de sementes da *C. antisiphilitica* após 6 a 8 meses de armazenamento (MELO, 2009; RIBEIRO et al., 2018; RIBEIRO-OLIVEIRA et al., 2019) pode ter afetado a velocidade de germinação, o desenvolvimento inicial, e contribuído para a superestimativa da NFa (e subestimativa da DFM) (FREITAS et al., 2011, BUENO et al., 2019). Além disso, a *C. antisiphilitica* possui sementes não longevas e com baixo teor de reserva, que normalmente é consumido, devido a respiração aeróbica (FREITAS et al., 2011; SALOMÃO et al., 2018) durante o período de armazenamento. Portanto, deteriorações e redução da qualidade das sementes ocorrem, mesmo seguindo estritamente os protocolos de armazenamento das sementes. De qualquer forma, para evitar maiores danos à germinação e desenvolvimento da *C. antisiphilitica* nas demais DSs, foram realizadas coletas de sementes em dois períodos diferentes de dispersão (entre maio e outubro de 2016 e 2017).

A notável similaridade entre os modelos FIL e WE na estimativa da NFa para a *C. antisiphilitica* também foi verificada na estimativa da DFM ao longo das DSs (Figura 2.3 E). Os erros cumulativos gerados na estimativa da NFa, principalmente acima de 10 folhas (Figura 2.3 A e B), repercutiram em erros na estimativa da DFM de 25,3 dias pelo modelo FIL, e 25,7 dias pelo modelo WE. Padrão similar na estimativa da NFa (e DFM) por ambos modelos foram observados por Ferreira et al. (2019) para mudas de *P. guajava*, Martins et al. (2022b) para *B. orellana* e por Fagundes et al. (2021) para *A. peregrina*. Ou seja, erros entre 1,5 a 4 folhas na estimativa da NFa, e entre 5,9 a 29,1 dias na estimativa da DFM são comuns de ocorrer em espécies florestais nativas. Apesar disso, pode ser tolerado um erro máximo de 30 dias na estimativa da DFM (FAGUNDES et al., 2021).

Com relação a *P. regnellii* (Figura 2.3 C, D e F) ambos modelos subestimaram a NFa em praticamente todas as DSs, gerando superestimativa da DFM (Figura 2.3 F), exceto na DS6 e DS9 pelo modelo WE. A subestimativa da NFa ocorreu devido a diminuição da TAF ao longo do tempo, resultando em um ciclo de desenvolvimento mais longo e em superestimativa da DFM, exceto na DS6 e DS9 (pelo modelo WE). Portanto, erros cumulativos na estimativa do

NFa, desde a emissão das primeiras folhas, somados ao longo dos dias de desenvolvimento foliar, resultaram em erros de 19,8 dias (modelo FIL) e 13,1 dias (modelo WE) na estimativa DFM. Ou seja, apesar de ambos modelos estimarem a NFa com precisão, o modelo WE foi superior na estimativa da DFM entre as DSs, não diferindo da DFM observada ($p = 0,073$). A ligeira vantagem do modelo WE na estimativa da DFM é que ele simula melhor a TAF e NFa em condições de T próximas a T_b , T_{ot} e T_B (STRECK et al., 2003; ERPEN et al., 2013; MARTINS e STRECK, 2007; MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019). Ou seja, nestas condições, a $f(t)$ do modelo WE é mais flexível (WANG e ENGEL, 1998; XUE et al., 2004; MARTINS e STRECK, 2007; REIS et al., 2021) comparado ao RT do modelo FIL, que tem uma quebra inflexível, principalmente próximo à T_{ot} (MARTINS e STRECK; STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2022b).

Erro menor que 12-15 dias são desejáveis na estimativa da DFM em espécies florestais (MARTINS et al., 2022b), pois não impacta significativamente nas datas de término do desenvolvimento inicial e plantio das mudas (MARTINS e STRECK, 2007; MONTEIRO et al., 2014; FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2022b). Além disso, RQME = 13,1 dias obtido pelo modelo WE para a *P. regnellii* foi próximo ao erro encontrado na estimativa da DFM de outras espécies florestais, como *L. ferrea* (RQME = 9,2 dias) (FAGUNDES et al., 2021) e *B. orellana* (RQME = 12,3 dias) (MARTINS et al., 2022b), e maior que *Corymbia citriodora* (Hook.) (K.D. Hill & L.A.S. Johnson) (RQME = 6,3 dias), *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) (RQME = 6,2 dias) (MARTINS et al., 2023), e *C. myrianthum* (5,9 dias) (MARTINS et al., 2022b). Portanto, o modelo WE deve ser escolhido por representar melhor a dinâmica do desenvolvimento inicial (NFa, NFF e DFM) da *P. regnellii* comparado ao FIL.

Embora estudos sobre o uso de modelos de desenvolvimento FIL e WE, sejam escassos para espécies florestais, ambos tem sido usados para prever a TAF e NFa em várias culturas em todo o mundo, incluindo o Brasil, por exemplo, trigo (WANG e ENGEL, 1998; XUE et al., 2004); soja (BEXAIRA et al., 2021), milho (LANGNER et al., 2018), arroz (STRECK et al., 2011), batata doce (ERPEN et al., 2013), cultivares de oliveira (MARTINS et al., 2014; FLORÊNCIO et al., 2019), morango (ZEIST et al., 2019), e culturas ornamentais como o *gradiolus* (UHLMANN et al., 2017). Com relação as espécies florestais, os poucos estudos foram realizados para espécies de interesse comercial como *E. grandis* e *E. saligna* (MARTINS e STRECK, 2007), *E. urophylla* e *C. citriodora* (MARTINS et al., 2023), além da *A. peregrina*, *L. ferrea* (FAGUNDES et al., 2021), *C. myrianthum* (MARTINS et al., 2022b), todas espécies nativas do Brasil, *B. orellana* (MARTINS et al., 2022b) e *P. guava* (FERREIRA et al., 2019), ambas nativas da America do sul e Central. Algumas razões para a escassez de estudos em

espécies florestais incluem: i) ciclo de desenvolvimento longo comparado às culturas anuais, mesmo considerando a fase de desenvolvimento inicial; ii) dados fenológicos indisponíveis ou de baixa qualidade (COSTA e STRECK, 2018; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022b), iii) questões práticas como, tempo reduzido de dispersão de sementes (uma ou duas vezes por ano), perda de viabilidade ao longo do tempo (MELO, 2009; FAGUNDES et al., 2021), problemas com armazenamento de sementes, excesso de patógenos ou impurezas nos lotes de sementes (SCALON et al., 1993; SALOMÃO et al., 2018; RIBEIRO-OLIVEIRA et al., 2019), e dificuldade de germinação. Todas razões acima mencionadas dificultam a instalação e condução de experimentos para a calibração dos coeficientes (a e TAF_{max}) e avaliação dos modelos de desenvolvimento (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022b).

Estudos dessa natureza são importantes para compreender o padrão de desenvolvimento inicial de espécies florestais nativas, melhorar a modelagem de espécies florestais (MARTINS e STRECK, 2007; MARTINS et al., 2022b), e projetar o desenvolvimento em condições de clima futuro (COSTA e STRECK, 2018; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021). Os resultados deste estudo também têm aplicações práticas conforme previamente mencionados. Além disso, apesar de ainda não ser uma prática comum nos viveiros florestais do Brasil, a adoção de modelos de desenvolvimento para determinar a DFM e o ponto de venda das mudas é recomendável (MARTINS et al., 2022b). Inclusive, os modelos de desenvolvimento podem substituir práticas menos precisas, como análises visuais, ou métodos destrutivos como o índice de qualidade de Dickson (DICKSON et al., 1960; BINOTTO et al., 2010; ELOY et al., 2013; GROSSNICKLE e MACDONALD, 2018).

2.5. CONCLUSÃO

Os modelos de desenvolvimento - Filocrono e Wang e Engel - utilizados neste estudo foram capazes de estimar a dinâmica do desenvolvimento inicial, número de folhas acumulado e duração da fase de muda para *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. e *Platycomus regnellii* Benth. No entanto, os erros cumulativos na estimativa do número de folhas acumulado resultaram em estimativas menos precisas da duração da fase de muda, especialmente para *Cybistax antisiphilitica*. Ambos modelos de desenvolvimento foram notavelmente similares na estimativa da NFa e DFM para a *Cybistax antisiphilitica*, com erro de ~3,3 folhas e 25 dias, respectivamente. Por outro lado, o modelo Wang e Engel foi ligeiramente superior para *Platycomus regnellii*, com RQME inferior a 2,06 folhas (NFa) e 13,1 dias (DFM).

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D.; MARCHINI, L. C.; SODRÉ, G. S.; ÁVILA, M. d'; ARRUDA, C. M. F. **Plantas visitadas por abelhas e polinização**. ESALQ - Divisão de Biblioteca e Documentação, 2003.

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.

BEXAIRA, K. P.; STRECK, N. A.; ZANON, A. J.; TAGLIAPIETRA, E. L.; RICHTER, G. L.; WEBER, P. S. Calibration and validation of a node appearance model in soybean crop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.25, p.361-371, 2021.

BINOTTO, A. F.; LÚCIO, A. D.; LOPES, S. J. Correlations between growth variables and the Dickson quality index in forest seedlings. **Cerne**, v.16, p.457-464, 2010.

BITTENCOURT, N. S.; PEREIRA, E. J.; SÃO-THIAGO, P. S.; SEMIR, J. The reproductive biology of *Cybistax antisyphilitica* (Bignoniaceae), a characteristic tree of the South American savannah-like Cerrado vegetation. **Flora**, v.206, p.872-886, 2011.

BUENO, A. M.; COSTA, R. B.; CUNHA, P. P.; XIMENES, P. A.; LIMA, M. L. Influência do tratamento térmico e regime de luz e temperatura na germinação de sementes de ipê-verde (*Cybistax antisyphilitica*). **Revista Uniaraguaia**, v.14, n.2, p.39-45, 2019.

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. p. 289-302, 1999.

COSTA, D. B.; STRECK, N. A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciência Florestal**, v.28, n.2, p.1263-1279, 2018.

COSTA, S.; LOHMANN, L. G.; BURIL, M. T. Flora of Pernambuco, Brazil: Tabebuia alliance and tribe Jacarandae (Bignoniaceae). **Biota Neotropica**, v.19, n.4, p.e20190737, 2019.

CURY, G.; TOMAZELLO-FILHO, M. Caracterização e descrição da estrutura anatômica do lenho de seis espécies arbóreas com potencial medicinal. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.13, n.3, p.311-318, 2011.

DAMBREVILLE, A.; LAURI, P. E.; NORMAND, F.; GUÉDON, Y. Analysing growth and development of plants jointly using developmental growth stages. **Annals of Botany**, v.115, n.1, p.93-105, 2015.

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.

ELOY, E.; CARON B. O.; SCHMIDT, D.; BEHLING, A.; SCHWERS, L.; ELLI, E. F. Avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando parâmetros morfológicos. **Floresta**, v.43, p.373-384, 2013.

ERPEN, L.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; LANGNER, J. A.; WINCK, J. E. M.; GABRIEL, L. F. Estimativa das temperaturas cardinais e modelagem do desenvolvimento

vegetativo em batata-doce. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1230-1238, 2013.

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.

FERREIRA, M. C.; COSTA, S. M. L.; PASIN, L. A. A. Uso de Resíduos da Agroindústria de Bananas na Composição de Substratos para Produção de Mudanças de Pau Pereira. **Nativa**, v.3, p.120-124, 2015.

FERREIRA, M. C.; MARTINS, F. B.; FLORENCIO, G. W. L. Cardinal temperatures and modeling the vegetative development of seedlings of guava. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.11, p.819-825, 2019.

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, n.9, p.641-647, 2019.

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.

FREITAS, C. H.; ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Adaptation, calibration and evaluation of a simple agrometeorological model for wood Eucalyptus productivity estimation. **European Journal of Forest Research**, v.139, n.5, p.759-776, 2020.

FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B. Thermal requirements and photoperiod influence in the leaf development of two forest species. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.4, p.e20190013, 2019.

FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n.5, p.283-292, 2017.

FREITAS, F. M.; NASCIMENTO, A. R. T.; SANCHES, M. C. Can morpho-physiological responses to natural light conditions in *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. explain its widespread occurrence in Brazilian Savannas? **Flora**, v.286, p.151990, 2022.

FREITAS, M. N.; SANTANA, D. G.; CAMARGO, R. Conservação de sementes de ipê-verde (*Cybistax Antisyphilitica* Mart.) por armazenamento à vácuo. **Revista Verde**, v.6, n.4, p.142-148, 2011.

GROSSNICKLE, S. C.; MACDONALD, J. E. Why seedlings grow: influence of plant attributes. **New Forests**, v.49, p.1-34, 2018.

HODGES, T. **Predicting Crop Phenology**. CRC Press. 1991.

KAMKAR, B.; AL-ALAHMADI, M. J.; MAHDAVI-DAMGHANI, A.; VILLALOBOS, F. J. Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds to germinate using non-linear regression models **Industrial Crops and Products**, v.35, n.1, p.192-198, 2012.

KUMAR, M.; KALRA, N.; KHAITER, P.; RAVINDRANATH, N. H.; SINGH, V.; SINGH, H.; SHARMA, S.; RAHNAMAYAN, S. PhenoPine: A simulation model to trace the phenological changes in *Pinus roxburghii* in response to ambient temperature rise. **Ecological Modelling**, v.404, p.12-20, 2019.

LANGNER, J. A.; STRECK, N. A.; DURIGON, A.; SILVA, S. D.; LAGO, I.; DALMAGO, G. Q.; REINIGER, L. R. S.; SCHEFFEL, L. G.; POERSCH, A. H. Observed and estimated leaf appearance of landrace and improved maize cultivars. **Ciência Rural**, v.48, n.1, p.1-9, 2018.

LOHMANN, L.G. *Cybistax* in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB114028/>> Acesso em: 13 Mar. 2022.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Instituto Plantarum, Nova Odessa. p. 352, 2014

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.33, p.1-12, 2022a.

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, n.4, p.e20200192, 2022b.

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*, 2023 (prelo).

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 modelo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.4, p.505-514, 2014.

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.

MEDEIROS, A. D. S. **Armazenamento de sementes de espécies florestais nativas**. Embrapa Florestas. p.24, 2001.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄**. North Carolina Department of Agriculture, Raleigh, p.195, 1953.

MELO, P. R. B. **Qualidade fisiológica e armazenamento de sementes de ipê-verde** (*Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart.). 2009. 136 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

MONTEIRO, A. F. M.; MARTINS, F. B. Global Solar Radiation Models in Minas Gerais, Southeastern Brazil. **Advances in Meteorology**, v.2019, p.1-17, 2019.

MONTEIRO, E. B.; DA SILVA., C. C.; DA SILVA, A. C.; DE 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.

MORIN, X.; ROY, J.; SONIÉ, L.; CHUINE, I. Changes in leaf phenology of three European oak species in response to experimental climate change. **New Phytologist**, v.186, p.900-910, 2010.

MOURA, T. M.; LEWIS, G. P.; TOZZI, A. M. G. A. A revision of the South American genus *Platycyamus* Benth. (Leguminosae). **Kew Bulletin**, v.9, p.1-7, 2016.

MOURA, T. M. 2020. *Platycyamus* in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB29815>>. Acesso em: 13 Mar. 2022.

OLIVEIRA, M. C. de; OGATA, R. S.; ANDRADE, G. A. de; SANTOS, D. S.; SOUZA, R. M.; GUIMARÃES, T. G.; SILVA JUNIOR, 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. p.124, 2016.

OLIVEIRA, M. C. de; PEREIRA, D. J. de S.; RIBEIRO, J. F. **Viveiro e produção de mudas de algumas espécies arbóreas nativas do cerrado**. Embrapa Cerrado: Planaltina. p. 85, 2011.

ORTOLANI, F. A.; MATAQUEIRO, M. F.; MORO, J. R.; MORO, F. V.; DAMIÃO FILHO, C.F. Morfo-anatomia de plântulas e número cromossômico de *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. (Bignoniaceae). **Acta Botanica Brasilica**, v.22, n.2, p.345-353, 2008.

PARENT, B.; TARDIEU, F. Temperature responses of developmental processes have not been affected by breeding in different ecological areas for 17 crop species. **New Phytologist**, v.94, p.760-774, 2012.

RAWAL, D. S.; KASEL, S.; KEATLEY, M. R.; NITSCHKE, C. R. Climatic and photoperiodic effects on flowering phenology of select eucalypts from south eastern Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.15, p.231-242, 2015.

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.

RIBEIRO, C. L.; GRABAI, J.; BORG, M.; HOFFMANN, P. M.; VELAZCO, S. J. E. Manual de cultivo *Cybistax antisyphilitica* (Bignoniaceae) (Mart.) Mart. **Boletim Chauá**, n.14, Curitiba, 2018.

RIBEIRO-OLIVEIRA, J. P.; SANTANA, D. G.; LOBO, G. A. Ipê-verde *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. **Nota técnica**, v.11, n.1, p.1-6, 2019.

ROSA, H. T.; WALTER, L. C.; STRECK, N. A.; CARLI, C.; RIBAS, G. G.; MARCHESAN, E. Simulação do crescimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul pelo modelo SimulArroz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.12, p.1159–1165, 2015.

SALOMÃO, N. A.; SANTOS, I. R. I.; JOSE, S. C. B. R.; PADILHA, L. S.; MUNDIM, R. C. **Criopreservação de sementes de *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. - Bignoniaceae**. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2018.

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**. Revista Amp. Embrapa, Brasília, 2018.

SAUERESSIG, D. **Árvores nativas**. Editora Plantas do Brasil. p.432, 2017.

SCALON, S. P. Q.; ALVARENGA, A. A.; DAVIDE, A. C. Influência do substrato, temperatura, umidade e armazenamento sobre a germinação de sementes de pau pereira (*Platycyamus regnellii* Benth). **Revista Brasileira de Sementes**, v.15, n.1, p.143-146, 1993.

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**, v7, p.e7333, 2019.

SILVA, L. V.; REIS, F. Y. S.; MARTINS, F. B.; CASSEMIRO, J. M. Desenvolvimento vegetativo de *Cesalpineia ferrea* e *Anadenanthera macrocarpa*: I - estimativa das temperaturas cardinais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.1, p.23-33, 2020.

SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE, J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, n.1, p.171-178, 2004.

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

SOLTANI, A.; SINCLAIR, T. R. **Modeling physiology of crop development, growth and yield**. CAB International, Wallingford, UK, 2012.

SOUZA, G. F. D.; LEITE, G. L. D.; SILVA, F. W. S.; SILVA, J. L.; SAMPAIO, R. A.; TEIXEIRA, G. L.; SOARES, M. A.; ZANUNCIO, J. C. Bottom-up effects on arthropod communities in *Platycyamus regnellii* (Fabaceae) fertilized with dehydrated sewage sludge. **Revista Colombiana de Entomologia**, v.47, n.1, p.e8943, 2021.

STRECK, N. A.; BOSCO, L. C.; LAGO, I. Simulating leaf appearance in rice. **Agronomy Journal**, v.100, n.3, p.490-501, 2008.

STRECK, N. A.; LAGO, I.; OLIVEIRA, F. B.; HELDWEIN, A. B.; DE 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.

STRECK, N. A.; PAULA, F. L. M.; BISOGNIN, D. A.; HELDWEIN, A. B.; DELLAI, J. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, v.142, p.1-11, 2007.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.; STEPHEN, B. P. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.115, p.139-150, 2003.

TUKEY, J. W. **Exploratory Data Analysis**. Addison-Wesley series in behavioral science. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977.

UHLMANN, L. O.; STRECK, N. A.; BECKER, C. C.; SCHWAB, N. T.; BENEDETTI, R. P.;

CHARÃO, A. S.; RIBEIRO, B. S. M. R.; SILVEIRA, W. B.; BACKES, F. A. A. L.; ALBERTO, C. M.; MUTTONI, M.; PAULA, G. M.; TOMIOZZO, R.; BOSCO, L. C.; BECKER, D. PhenoGlad: A model for simulating development in Gladiolus. **European Journal of Agronomy**, v.82, p.33-49, 2017.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v.58, n.1, p.1-24, 1998.

WHITE, J. W.; KIMBALL, B. A.; WALL, G. W.; OTTMAN, M. J. Cardinal temperatures for wheat leaf appearance as assessed from varied sowing dates and infrared warming. **Field Crops Research**, v.137, n.20, p.213-220, 2012.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. Predicting leaf appearance in field grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, v.175, n.3, p.261-270, 2004.

ZEIST, A. R.; RESENDE, J. T. V.; LIMA FILHO, R. B.; GABRIEL, A.; HENSCHER, J. M.; SILVA, I. F. L. Phenology and agronomic components of first and second-cycle strawberry. **Horticultura Brasileira**, v.37, p.29-34, 2019.

ZHOU, G.; WANG, Q. A new nonlinear method for calculating growing degree days. **Scientific Reports**, v.8, p.10149, 2018.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO INICIAL E VIABILIDADE FINANCEIRA PARA PRODUÇÃO DE MUDAS DE DUAS ESPÉCIES FLORESTAIS NATIVAS BRASILEIRAS SOB CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ATUAIS E FUTURAS

3.1. INTRODUÇÃO

Algumas regiões brasileiras, sobretudo o estado de Minas Gerais, são consideradas hotspots de mudanças climáticas persistentes com projeções de aumento de temperatura do ar de até +6°C ao longo do século XXI (CHOU et al., 2014; TORRES e MARENGO, 2014; LYRA et al., 2018; LLOPART et al., 2020; MARTINS et al., 2020; FLORENCIO et al., 2022). Minas Gerais apresenta grande vulnerabilidade, pois: i) está inserido nos domínios fitogeográficos da Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga (Figura 1.1 – Capítulo I, item 1.2.1), exatamente os quais sofrerão as maiores reduções em área e biodiversidade de espécies florestais causadas pelas mudanças climáticas (SILVA et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021); e ii) onde são projetados aumentos intensos na temperatura do ar (SANTOS et al., 2017; REBOITA et al., 2018; MARTINS et al., 2020; REIS et al., 2021). Além disso, Minas Gerais possui a maior área plantada com espécies florestais dentre os estados brasileiros, e sua economia é voltada para o setor florestal (FAGUNDES et al., 2021; FLORENCIO et al., 2022; MARTINS et al., 2022a).

Dentre as inúmeras espécies florestais, a *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. (Bignoniaceae) conhecida popularmente como ipê-verde, ipê-caroba ou caroba-verde, e *Platyramus regnellii* Benth. (Fabaceae) conhecida popularmente como pau-pereira, mangalô ou folha-de-bolo são nativas do Brasil e ocorrem naturalmente nos três domínios fitogeográficos (Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga), além da Amazônia e Pantanal (LOHMANN, 2020; MOURA, 2020) (Figura 1 – Capítulo I, item 1.2.1).

A *C. antisiphilitica* é originária da região tropical da América do Sul (GENTRY, 1992) distribuída naturalmente nos seis domínios fitogeográficos brasileiros (Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Amazônia, Pampa e Pantanal) (COSTA et al., 2019; LOHMANN, 2020; FREITAS et al., 2022). A espécie possuiu atributos paisagísticos, medicinais e forrageiros, sendo usada na arborização, florestamento e recuperação de áreas degradadas (ORTOLANI et al., 2008; BITTENCOURT et al., 2011; COSTA et al., 2019; LOHMANN, 2020; FREITAS et al., 2022). Suas folhas e cascas possuem o composto orgânico lapachol, responsável pelo amplo espectro de atividades terapêuticas e farmacológicas (ORTOLANI et al., 2008; BITTENCOURT et al., 2011). Apesar da madeira não ser resistente ao apodrecimento é usada na carpintaria, caixotaria, na fabricação de ripas e pasta celulósica (BITTENCOURT et al., 2011). Além disso, a espécie

possui importância ecológica, pois fornece néctar e pólen para as abelhas durante a estação seca (ALMEIDA et al., 2003; BITTENCOURT et al., 2011), e apresenta plasticidade fenotípica, podendo se aclimatar à ambientes iluminados e com diferentes condições de sombreamento (FREITAS et al., 2022).

A *P. regnellii* é endêmica do Brasil (MOURA et al., 2016; SAUERESSIG, 2017), possui distribuição natural restrita aos domínios fitogeográficos Mata Atlântica e Cerrado (MOURA, 2020), os quais atualmente sofrem grandes ameaças climáticas, e pressões antropogênicas por uso e ocupação do solo (SILVA et al., 2019). Essa espécie possui grande importância econômica e ecológica, sua madeira é excepcionalmente durável sendo utilizada na construção civil, na fabricação de móveis de alta qualidade, e na carpintaria (FERREIRA et al., 2015; SAUERESSIG, 2017; SOUZA et al., 2021), suas raízes e cascas são usadas na medicina popular contra a má digestão, úlcera, gastrite e inapetência (CURY e TOMAZELLO-FILHO 2011; SAMPAIO, 2014; SOUZA et al., 2021). Por se adaptar a solos arenosos, pedregosos, e pobres em nutrientes, é recomendada para recuperação de áreas degradadas (SAUERESSIG, 2017; SOUZA et al., 2021). Além disso, a espécie também apresenta plasticidade fenotípica à ambientes iluminados e sombreados (SCALON e AVARENGA, 1993; SAMPAIO, 2014).

Os aumentos contínuos da temperatura do ar (LYRA et al., 2018; LLOPART et al., 2020; TORRES et al., 2021; FLORÊNCIO et al., 2022) podem tornar-se uma ameaça ao desenvolvimento das espécies florestais, especialmente durante o estágio inicial, representado pela fase de muda (COSTA e STRECK, 2018; MORIN et al., 2018; FLORÊNCIO et al., 2019; MOON e SOLOMON, 2019; FAGUNDES et al., 2021; JAGADISH et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022a). Durante a fase de muda, as espécies florestais exibem alta sensibilidade e baixa tolerância a variabilidade da temperatura do ar e suas flutuações (DEAL e HENIKOFF, 2010; MORIN et al., 2010; RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; MARTINS et al., 2022a), uma vez que possuem menor capacidade de aclimatar aos aumentos crescentes de temperatura do ar (MATHUR et al., 2014; NIEVOLA et al., 2017; COSTA e STRECK, 2018; REIS et al., 2021). Por sua vez, tais condições podem impactar a capacidade competitiva e sobrevivência das mudas nos viveiros florestais (WILLIAMS e DUMROESE 2014; REIS et al. 2021; MARTINS et al., 2022a) e, o desempenho das mudas no campo (MARTINS et al., 2023). Portanto, estudos que proporcionem um maior entendimento das respostas do desenvolvimento de uma espécie florestal às condições climáticas podem orientar os produtores na seleção de boas práticas florestais e silviculturais para otimizar a produção de mudas (MARTINS et al., 2022a), além de reduzir possíveis perdas financeiras futuras.

Quando a temperatura do ar está acima da temperatura ótima (Tot) é considerada como estresse térmico, e perturba a homeostase celular levando ao retardo no desenvolvimento e até mesmo à morte em condições extremas (MATHUR et al., 2014; NIEVOLA et al., 2017). Isso ocorre, pois altas temperaturas influenciam negativamente a formação de estruturas moleculares (proteínas e DNA) e supramoleculares (membranas e cromossomos), além de causar estresses fisiológicos (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; NIEVOLA et al., 2017), limitando o balanço de carbono das plantas (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; FAGUNDES et al., 2021; FLORÊNCIO et al., 2022). Em relação à fotossíntese, o aumento da temperatura do ar causa um aumento da relação fotorrespiração/fotossíntese (SAGE, 2002; SLOT e WINTER, 2017), principalmente em espécies pertencentes ao metabolismo C3, como *C. antisyphilitica* e *P. regnellii*. Isto ocorre, devido ao favorecimento da atividade oxigenase da ribulose 1,5-bifosfato carboxilase-oxigenase (RuBisCo) pela maior solubilidade do O₂ em relação ao CO₂ (SAGE, 2002; RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010). Além disso, sob altas temperaturas e à medida que o déficit de pressão de vapor aumenta, ocorre o fechamento dos estômatos, reduzindo a concentração interna de carbono no mesófilo foliar e a perda de calor latente (DEVI e REDDY, 2018; FAGUNDES et al., 2021), o que contribui para o aumento da fotorrespiração e diminuição da fotossíntese líquida (REIS et al., 2021; ABREU et al., 2022).

Para projetar as respostas do desenvolvimento das mudas de espécies florestais aos aumentos da temperatura do ar, as saídas dos modelos climáticos do sistema terrestre (MSTs) devem ser inseridos nos modelos de desenvolvimento da muda. Os MSTs do conjunto *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP) derivam das saídas geradas pelo *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) com *downscaling* estatístico (THRASHER et al., 2022). Ou seja, conjunto de dados NEX-GDDP possui escala mais refinada, sendo ideal para estudos climáticos em escala local (FAGUNDES et al., 2021; THRASHER et al., 2022). É importante salientar que os MSTs do NEX-GDDP do CMIP6 são a nova geração de modelos climáticos. Tais MSTs combinam cenários socioeconômicos - *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), com os cenários de forçantes radiativas - *Representative Concentration Pathways* (RCPs), e simulam melhor as respostas do sistema terrestre em relação aos forçamentos antropogênicos (RIAHI et al., 2017; ALMAZROUI et al., 2021).

As saídas dos MSTs do NEX-GDDP quando aplicadas nos modelos de desenvolvimentos projetam a dinâmica do desenvolvimento e fornecem informações como o número de folhas acumulados ao longo do tempo (NFa), o número de folhas final (NFF)

(MARTINS e STRECK, 2007; MARTINS et al., 2014; COSTA e STRECK, 2018), e no caso de viveiros florestais, a duração da fase de muda (DFM) (FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022c). Isso é factível, porque os modelos de desenvolvimento quantificam a dinâmica do desenvolvimento pela estimativa da taxa de aparecimento de folhas (TAF), através de funções de temperatura do ar (MARTINS e STRECK, 2007; STRECK et al., 2011, 2013; MARTINS et al., 2014; UHLMANN et al., 2017; FERREIRA et al., 2019b; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c). Dentre os modelos de desenvolvimento de muda existentes, o modelo de Wang e Engel (WANG e ENGEL, 1998) tem sido bastante utilizado, pois considera uma função não linear de temperatura denominada função beta ($f(T)$) (WANG e ENGEL, 1998; STRECK et al., 2011; FERREIRA et al., 2019b; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c). A $f(T)$ se ajusta bem em diferentes condições (e regimes) de temperatura do ar, especialmente próxima às temperaturas cardinais (T_b , temperatura basal inferior; T_{ot} , temperatura ótima, e T_B , temperatura basal superior) (MARTINS et al., 2007; STRECK et al., 2003 e 2011; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; SILVA et al., 2020). Como os coeficientes do modelo WE e os valores de T_b , T_{ot} e T_B são específicos de cada espécie florestal (MARTINS e STRECK, 2007; FREITAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2019a e 2019b), é mandatório primeiramente conhecer as temperaturas cardinais, calibrar e avaliar o modelo de desenvolvimento, para então alimentar o modelo WE com dados dos MSTs (FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c e 2023).

Apesar dos modelos de desenvolvimento apresentarem uma abordagem de escala local, eles fornecem informações úteis para o manejo das mudas no clima presente e clima futuros (FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022c) e para reduzir possíveis perdas financeiras futuras para os viveiros florestais. Mesmo com tais aplicações, este tipo de estudo ainda é escasso para espécies florestais. No Brasil, os poucos estudos existentes foram realizados para espécies florestais de interesse econômico, como: *Eucalyptus saligna* (Sm.), *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden) (COSTA e STRECK, 2018), *Corymbia citriodora* (Hook.) (K.D. Hill & L.A.S. Johnson), *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) (MARTINS et al., 2023), e *Psidium guajava* L. (REIS et al., 2021), e para algumas espécies nativas, como: *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg., *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz (FAGUNDES et al., 2021), *Citharexylum myrianthum* Cham., e *Bixa orellana* L. (REIS et al., 2021). Em comum, nenhum dos estudos acima mencionados focam na quantificação dos riscos financeiros do aumento da temperatura do ar na produção de mudas. Ou seja, o impacto dos aumentos projetados da temperatura do ar na viabilidade financeira do setor de viveiros florestais no clima futuro ainda é desconhecido para a maioria das espécies florestais, incluindo

as espécies nativas brasileiras *C. antisiphilitica* e *P. regnellii*. Além disso, esses estudos usaram diferentes MSTs e downscalings, todos derivados da penúltima versão do conjunto de dados do CMIP (CMIP5).

Nesse contexto, três questões práticas ainda permanecem sem respostas: i) como os aumentos projetados de temperatura do ar dos MSTs do NEX-GDDP (CMIP6) podem afetar o desenvolvimento e a DFM das duas espécies florestais nativas em relação ao clima presente? ii) Se o desenvolvimento e a DFM forem afetados, quais as práticas de manejo e as medidas de adaptação mais efetivas? e iii) qual o impacto na viabilidade financeira para a produção de mudas nos viveiros florestais? Para responder essas questões, este estudo identificou os possíveis impactos dos aumentos projetados da temperatura do ar na DFM e na viabilidade financeira da produção de mudas das espécies *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* para o município de Itajubá, localizado em Minas Gerais (Figura 1.1 B – Capítulo I, item 1.2.1), para o clima futuro.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Dados e descrição do modelo de desenvolvimento da muda

A variável usada para quantificar a fase de muda das duas espécies florestais é a DFM (FLORÊNCIO et al. 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021), obtida indiretamente a partir do modelo WE, previamente calibrado e avaliado no Capítulo 2 dessa dissertação. As calibrações e avaliações foram realizadas para cada espécie em diferentes datas de semeadura (DS) e anos (2017 e 2018) (Tabela 1.1 – Capítulo I, item 1.2.1), usando dados de NFa e NFF provenientes de experimentos instalados a céu aberto no viveiro florestal do Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá, em Itajubá, Minas Gerais (Figura 1.1 B - Capítulo I, item 1.2.1). Itajubá possui clima típico de monção, com duas estações bem definidas: outono/inverno secos (de abril a setembro) e primavera/verão úmidos (outubro a março) (ALVES et al., 2020; MARTINS et al., 2022a), e possui ocorrência natural das espécies *C. antisiphilitica* e *P. regnellii*. O protocolo experimental para a condução dos experimentos e coleta dos dados de NFa e NFF está completamente detalhado em Capítulo I dessa dissertação no item 1.2.1.

O modelo WE estima a DFM pelo somatório da TAF, dada em escala diária, desde a data de emergência (i) até a data de término da fase de muda (n) (Tabela 1.1 – Capítulo I, item 1.2.1). A data i representa o início das simulações, enquanto a data n representa o dia que a *C.*

antisyphilitica atinge 20 folhas e *P. regnellii* atinge 10 folhas acumuladas na haste principal. Ambos limiares (20 e 10 folhas) referem-se ao patamar ideal de comercialização das mudas das duas espécies florestais nativas, o que corresponde a ~ 40 cm de altura (OLIVEIRA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2016).

No modelo WE, a DFM e TAF são obtidos por (STRECK et al., 2011; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c):

$$DFM = \sum_i^n TAF, \text{ sendo } TAF = TAF_{\max} \cdot f(T) \quad (3.1)$$

Em que: DFM = duração da fase de muda (em dias); i = data de emergência, n = data de término da fase de muda; TAF = taxa diária de aparecimento de folha do modelo WE (folhas dia⁻¹), TAF_{max} = taxa máxima diária de aparecimento de folhas específica para *C. antisyphilitica* (0,0923 folhas dia⁻¹) e *P. regnellii* (0,0741 folhas dia⁻¹) (Capítulo 2); f(T) = função de resposta de temperatura beta (de 0 a 1) dada por (WANG e ENGEL, 1998; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c):

$$f(T) = \begin{cases} 0, & \text{quando } T < T_b \text{ ou } T > T_B \\ \frac{2(T-T_b)^\alpha(T_{\text{Tot}}-T_b)^\alpha - (T-T_b)^{2\alpha}}{(T_{\text{Tot}}-T_b)^{2\alpha}}, & \text{quando } T_b \leq T \leq T_B \end{cases}, \text{ sendo } \alpha = \frac{\ln 2}{\ln\left[\frac{(T_B-T_b)}{(T_{\text{Tot}}-T_b)}\right]} \quad (3.2)$$

Em que: T = temperatura média diária do ar; T_b, T_{tot} e T_B = temperaturas cardinais (basal inferior, ótima e basal superior, respectivamente) de desenvolvimento da muda. As temperaturas cardinais para *C. antisyphilitica* são: T_b = 13°C, T_{opt} = 20°C, T_B = 48,4°C, e para *P. regnellii* são: T_b = 13,7°C, T_{opt} = 21,5°C, T_B = 43,4°C (Capítulo I); e α = coeficiente da f(T).

3.2.2. Simulações, projeções e avaliação dos impactos na duração da fase de muda

A DFM de ambas espécies florestais foi simulada para o clima presente (CP, 1995 – 2014) e projetada para futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (FLORÊNCIO et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2023). CP, FP e FD referem-se aos mesmos períodos temporais do sexto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021). A simulação e as projeções foram realizadas para as 12 DSs (a partir daqui será tratada como data de simulação da semeadura) desde a data i até n (Tabela 1.1 – Capítulo I, item 1.2.1) para cada um dos MSTs.

Para isso, dados diários de temperatura média do ar (T) próximo a superfície de 13 ESMs do NEX-GDDP (CMIP6) foram inseridos na f(T) do modelo WE (equação 3.2). O conjunto de dados do NEX-GDDP é fornecido 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-cmip6>>. Os 13 MSTs usados foram: ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, EC-Earth3, GFDL-CM4, INM-CM4-8, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MICOR6, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM e NorESM2-MM, os quais foram escolhidos pelo bom desempenho em capturar os padrões de T para o Brasil (ALMAZROUI et al., 2021; ORTEGA et al., 2021). Todos os MSTs possuem resolução horizontal de 0,25° x 0,25° (latitude/longitude) e foram extraídos para o ponto de grade mais próximo a Itajubá (22°25,5'S e 45°27'W) (Figura 1.1 B – Capítulo I, item 1.2.1).

As projeções (para FP e FD) da nova geração dos MSTs do CMIP6 combinam os cenários SSPs com os RCPs, a fim de melhor compreender as respostas do sistema terrestre aos aumentos das forçantes antropogênicas (RIAHI et al., 2017; ALMAZROUI et al., 2021). Os SSPs descrevem narrativas distintas de desenvolvimento socioeconômico, considerando estimativas quantitativas de população, crescimento socioeconômico, urbanização, sistemas de energia, uso da terra, emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar, entre outros (RIAHI et al., 2017). Portanto, como os SSPs da nova geração de MSTs descrevem desenvolvimentos socioeconômicos alternativos plausíveis (O'NEILL et al., 2017; RIAHI et al., 2017; TEBALDI et al., 2021), é possível explorar diferentes projeções e incertezas futuras. Neste estudo, foram utilizados dois SSPs: SSP2-4.5 (desafios intermediários para mitigação e adaptação, e forçante radiativa de 4,5 Wm⁻² no FD) e o SSP5-8.5 (grandes desafios à mitigação combinados com baixos desafios à adaptação, e forçante radiativa de 8,5 Wm⁻² no FD) (RIAHI et al., 2017).

Previamente, os dados de T dos MSTs foram validados para o CP (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 próximo de Itajubá, com resolução de 0,25° x 0,25° (latitude/longitude). Os dados do Xavier et al. (2016) possuem alta qualidade espaço-temporal, pois derivam de interpolações de dados observados de estações meteorológicas (FAGUNDES et al., 2021; MONTEIRO et al., 2021). Este procedimento foi realizado para avaliar a confiabilidade dos 13 MSTs do NEX-GDDP em simular a T, e conseqüentemente a DFM das espécies. Na validação foram utilizadas as estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME) e correlação de Pearson (r) (SNEDECOR e COCHRAN, 1989; FAGUNDES et al., 2021):

$$RQME = \left[\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (3.3)$$

$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum (E_i - \bar{E})^2 - \sum (O_i - \bar{O})^2)}} \quad (3.4)$$

Em que: E_i = valores diários de T simulados para cada um dos 13 MSTs (1995-2014); O_i =

valores diários de T do banco de dados disponibilizados por Xavier et al. 2016 (1995-2014), n = número de dados.

Para avaliar o impacto das projeções de T na DFM, os dados de DFM de cada espécie florestal foram submetidos a análise de variância (ANOVA), em esquema trifatorial considerando 12 datas de simulação de semeadura (Tabela 1.1 – Capítulo I, item 1.2.1), 3 períodos (CP, FP e FD) e 2 cenários socioeconômicos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Por fim, os valores médios de DFM foram comparados pelo teste de Scott-Knott ($p = 0,05$), conforme recomendação de Florêncio et al. (2019), Fagundes et al. (2021), Reis et al. (2021) e Martins et al. (2023). A ANOVA e o teste de Scott-Knott foram realizados considerando o valor médio do DFM (*ensemble mean*) obtido dos 13 MSTs em cada SSP (2-4.5 e 5-8.5).

3.2.3. Análise da viabilidade financeira

A análise financeira para produção de mudas das espécies *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* foi realizada considerando somente os investimentos iniciais e o valor presente dos custos unitários de operação para a produção de uma muda, obtidos mediante pesquisa de preços (Tabela 3.1). Foram considerados como investimentos iniciais: substrato, recipiente (tubete + bandeja), adubação de base ou fertilizante de liberação controlada, e como custos de operação: o gasto com energia elétrica para irrigação por aspersão, adubação de cobertura, produtos fungicidas e inseticidas (Figura 3.1). Não foram considerados na análise, os custos relativos a materiais permanentes para a instalação e manutenção do viveiro florestal, administração, salários, entre outros custos possíveis, pois este estudo foca na análise dos impactos do aumento da temperatura do ar nos custos diretamente relacionados à produção de uma muda de ambas as espécies. Além disso, as análises foram baseadas na produção de uma muda, pelas razões i) ambas são espécies nativas e a produção de mudas é sazonal e dependente da época de dispersão das sementes, ou seja, a produção não é contínua; e ii) baixa qualidade fisiológica e genética das sementes, pois as coletas são realizadas em poucas árvores matrizes (às vezes apenas uma), com baixa qualidade fitossanitária (MACEDO, 1993).

Tabela 3. 1 - Discriminação, especificação e valor (em reais, R\$) dos itens que compõem os investimentos iniciais e custos de operação para produzir uma (01) muda das espécies florestais nativas *Cybistax antisyphilitica* e *Platycyamus regnellii* no viveiro florestal.

Discriminação e descrição dos itens	Especificação	Valor unitário ^a	Fator de conversão para a produção de 01 muda ^b	Referência	Especificação convertida para 01 muda ^c	Valor para 01 muda ^d
Investimentos iniciais						
Substrato comercial (turfa <i>Sphagnum</i>)	Saco de 0,04 m ³	120,0	Volume do tubete	Tonetto (2018)	1,2 x 10 ⁻⁴ m ³ (no tubete de 120 cm ³)	0,36
					2,9 x 10 ⁻⁴ m ³ (no tubete de 290 cm ³)	0,87
Tubete de 120 cm ³	Milheiro = 1000 unidades	210,0	-	Schorn and Formento (2003)	1 tubete	0,21
Tubete de 290 cm ^{3*}	Milheiro = 1000 unidades	420,0	-	Schorn and Formento (2003)	1 tubete	0,42
Bandeja de 120 cm ³	Unitária = 96 células	20,0	-	Schorn and Formento (2003)	1 célula	0,21
Bandeja de 290 cm ^{3*}	Unitária = 56 células	24,0	-	Schorn and Formento (2003)	1 célula	0,43
Sulfato de amônio (NH ₄) ₂ SO ₄	Saco de 50 kg	205,0	0,15 kg de (NH ₄) ₂ SO ₄ para 1 m ³ de substrato	Schorn and Formento (2003)	1,8 x 10 ⁻⁵ kg	0,00007
Superfosfato simples (P ₂ O ₅) (18%)	Saco de 50 kg	150,0	0,3 kg de P ₂ O ₅ para 1 m ³ de substrato	Schorn and Formento (2003)	3,6 x 10 ⁻⁵ kg	0,00011
Cloreto de potássio (KCl) (60%)	Saco de 50 kg	300,0	0,1 kg de KCl para 1 m ³ de substrato	Schorn and Formento (2003)	1,2 x 10 ⁻⁵ kg	0,00007
FTE BR 12 (Micronutrientes)	Saco de 50 kg	200,0	0,15 kg de FTE BR 12 para 1 m ³ de substrato	Schorn and Formento (2003)	1,8 x 10 ⁻⁵ kg	0,00007
Fertilizante de liberação controlada NPK (18-05-09)*	Saco de 22,68 kg	1100,0	8 kg de NPK (18-05-09) para 1 m ³ de substrato	Tonetto (2018)	0,96 x 10 ⁻³ kg	0,0466
					2,32 x 10 ⁻³ kg	0,1125

Custos de operação						
Sulfato de amônio (NH ₄) ₂ SO ₄	Saco de 50 kg	205,0	0,3 kg de (NH ₄) ₂ SO ₄ para 1 m ³ de substrato	Schorn and Formento (2003)	2,4 x 10 ⁻⁵ kg	0,00010
Cloreto de potássio (KCl) (60%)	Saco de 50 kg	300,0	0,15 kg de KCl para 1 m ³ de substrato	Schorn and Formento (2003)	1,8 x 10 ⁻⁵ kg	0,00011
Inseticida Imidacloprido	Saco de 1 kg	159,0	0,003 kg (em 20L H ₂ O) para 10000 mudas	Tonetto (2018)	6 x 10 ⁻⁶ kg	0,000954
Fungicida Captana	Saco de 1 kg	57,0	0,0025 kg (em 20L H ₂ O) para 10000 mudas		5 x 10 ⁻⁶ kg	0,000285
Inseticida Imidacloprido*	Saco de 1 kg	350,0	0,003 kg (em 20L H ₂ O) para 10000 mudas		6 x 10 ⁻⁶ kg	0,0021
Fungicida Tiofanato-metilico*	Saco de 1 kg	119,0	0,0025 kg (em 20L H ₂ O) para 10000 mudas		5 x 10 ⁻⁶ kg	0,000595
Energia elétrica para irrigação por aspersão	1kW hora ⁻¹	0,69	0,38 horas para irrigar 8 mm dia ⁻¹ em uma área de 8,75 m ²		Tonetto (2018)	0,000035 horas (0,00006 horas) para irrigar 6 mm dia ⁻¹ (9 mm dia ⁻¹) em uma área de 0,001075 m ² (Tubete de 120 cm ³)
					0,0001 horas para irrigar 9 mm dia ⁻¹ em uma área de 0,002043 m ² (Tubete de 290 cm ³)	0,000069

^a Pesquisa de preço realizada em maio/junho de 2022 para as especificações de cada item. ^b fator de conversão para transformar o item em unidade unitária para 01 muda. ^c Adubos: obtido por regra de três entre fator de conversão para (NH₄)₂SO₄, P₂O₅, KCl, FTE BR 12 e NPK (18-05-09) e volume do tubete (120 cm³ ou 290 cm³); fungicidas e inseticidas: obtido 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 ou 9 mm dia⁻¹) por área do tubete (0,001075 m² ou 0,001075 m²). ^d investimentos iniciais: a) substrato: obtido por regra de três entre valor unitário e fator de conversão (volume do tubete 120 cm³

ou 290 cm³); b) tubete: obtido pela razão entre especificação (1000) e valor unitário; c) bandeja: obtido pela especificação (96 ou 56) e valor unitário; d) (NH₄)₂SO₄: obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda (1,8 x 10⁻⁵ kg); e) P₂O₅: obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda (3,6 x 10⁻⁵ kg); f) KCl: obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda (1,2 x 10⁻⁵ kg); g) FTE BR 12: obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda (1,8 x 10⁻⁵ kg); h) NPK (18-05-09): obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda (8 kg); custos de operação: a) (NH₄)₂SO₄: obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda (2,4 x 10⁻⁵ kg); b) KCl: obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda (1,8 x 10⁻⁵ kg); c) inseticidas: obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda (6 x 10⁻⁶ kg); d) fungicidas: obtido por regra de três entre o valor unitário e a especificação convertida para 01 muda (5 x 10⁻⁶ kg); e) energia elétrica: obtido pela multiplicação entre o valor unitário (0,69) e o tempo de irrigação (0,000035 horas (0,00006 horas) e 0,0001 horas). * Itens considerados somente no clima futuro.

Para avaliar as possíveis alterações nos custos para a produção de uma muda de ambas espécies florestais nativas, foi considerado o critério do valor presente líquido (VPL). Optou-se pelo VPL, por ser um critério de avaliação financeira que indica o resultado em valores monetários para a comparação entre os cenários analisados. No presente estudo, o VPL será estimado a partir do cálculo do valor presente dos custos de operação durante a fase de muda adicionado dos investimentos iniciais (BONFATTI JÚNIOR et al., 2019). O VPL foi calculado para cada DS simulada no CP, e projetada no FP e FD nos dois cenários SSPs (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), considerando os fluxos de caixa, representados por todas as saídas monetárias referentes aos investimentos iniciais e os valores mensais dos custos de operação para a produção de uma muda, desde $t = i$ (data de emergência) até $n =$ data do término da fase de muda, sendo obtido por (BREALEY et al., 2018):

$$VPL = -C_0 + \frac{C_1}{(1+r)^1} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (3.5)$$

Em que: VPL = valor presente líquido (nesse estudo é um valor negativo, pois considera apenas os custos para a produção da muda); C_0 = investimento inicial (composto por: substrato, recipiente (tubete + bandeja), adubação de base ou fertilizante de liberação controlada); c = fluxo de caixa (saídas monetárias referentes aos investimentos iniciais e custos de operação) no período t ; r = taxa de desconto, considerada como 1.01% a.m. (equivalente à 12.75% a.a. em maio de 2022, Fonte: Banco Central do Brasil (BCB)); t = tempo (em meses) da duração da fase de muda desde $t = i$ (data da emergência) a n (data de término da fase de muda). A

representação esquemática das etapas de cálculo do VPL pode ser visualizada na Figura 3.1.

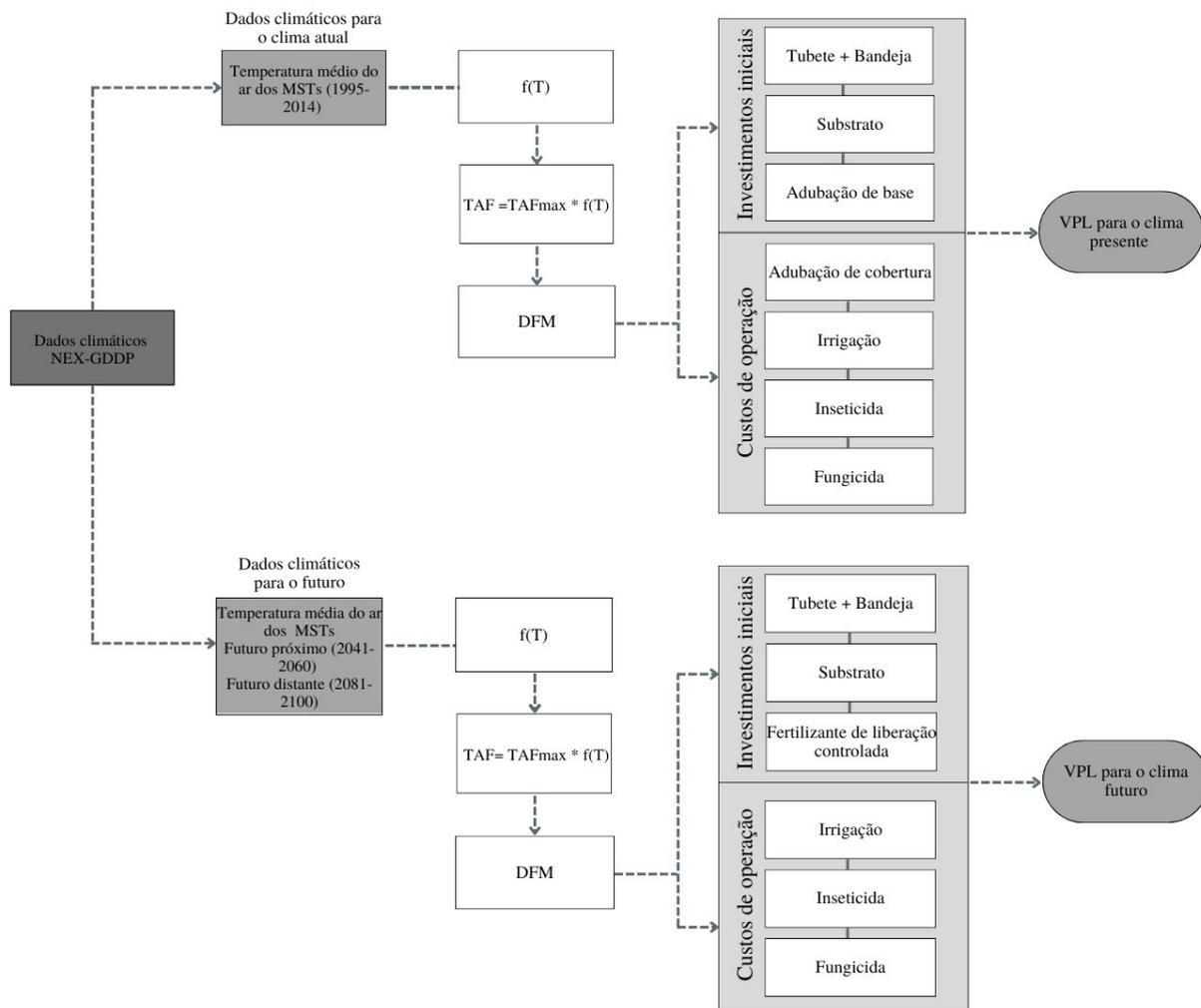


Figura 3.1 - Representação esquemática das etapas de cálculo da viabilidade financeira para produzir uma muda das espécies nativas *Cyristax antisiphilitica* e *Platycyamus regnellii* no clima presente (CP, 1995-2014) e futuro (FP, 2041-2060 e FD, 2081-2100) considerando a duração da fase de muda para cada uma das 12 datas de simulação de semeadura (ver detalhes no item 1.2.1 do Capítulo I).

Os impactos na viabilidade financeira para produzir uma muda de ambas espécies florestais foram analisados considerando as mudanças e porcentagem de mudança nos valores de VPL para cada DS e espécie. O termo mudança refere-se a diferença entre o VPL no FP e FD (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), menos os respectivos VPL para CP, e a porcentagem de mudança refere-se a razão entre a mudança em cada período futuro e o VPL do CP.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Validação das saídas dos modelos climáticos para o clima presente e projeções de mudanças na temperatura do ar

Antes de simular e projetar a DFM, as simulações de T dos 13 ESM foram validadas para o CP (1995-2014) (Figura 3.2). Para isso, foi analisada a performance de cada um dos MSTs, baseado no valor de RQME e r , assim como o ciclo mensal e anual da T. Os 13 MSTs conseguiram representar o padrão mensal e anual da T. Os valores de T de cada MST apresentaram erros baixos (RQME $< 0,78$ °C) e correlação alta ($r > 0,98$), com destaque para os modelos GFDL-CM4, NorESM2-LM e NorESM2-MM (RQME $\sim 0,56$ °C e $r \sim 0,99$). Além disso, os valores médios (*ensemble mean*) dos 13 MSTs se aproximam dos valores de T observado. Por essas razões, foi possível inserir os dados de T de cada MST na $f(T)$ do modelo de WE para estimar a DFM para *C. antisyphilitica* e *P. regnellii* no CP, FP e FD.

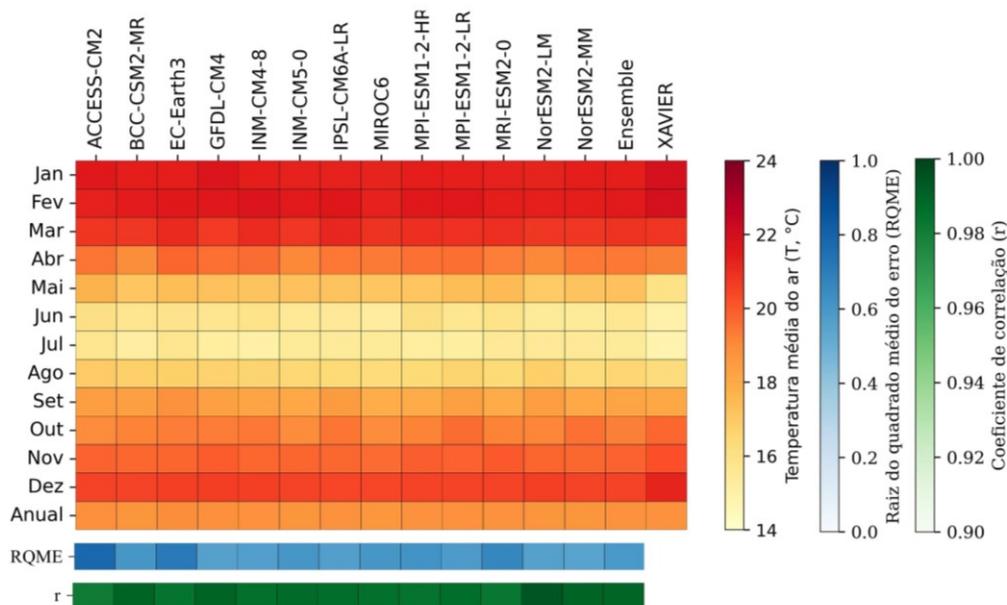


Figura 3.2 - Validação, ciclo mensal e anual da temperatura média do ar (T, °C) simulada pelos 13 modelos climáticos do sistema terrestre do conjunto de dados do NEX-GDDP (do CMIP6), *ensemble mean* e dados observados disponibilizados por Xavier et al. (2016) para o clima atual (CP, 1995 – 2014). Os dados foram extraídos para o ponto de grade próximo à Itajubá (22°25,5'S e 45°27'W).

As projeções climáticas dos 13 MSTs do NEX-GDDP (CMIP6) indicam aumento gradual e contínuo da T para Itajubá no decorrer do século XXI (Figura 3.3), sendo mais intenso no FD e SSP5-8.5 (Figura 3.3 C). Esse comportamento está associado a variabilidade interna

de cada MST e é amplificado, à medida que a integração numérica avança ao longo tempo (IPCC, 2021). As projeções de temperatura são mais amenas no SSP2-4.5 e FP ($\sim +1,1$ °C) e mais intensas no SSP5-8.5 e FD ($\sim +4$ °C). O padrão observado é esperado e semelhante as projeções encontradas para Itajubá utilizando diferentes MSTs e downscalings, todos derivados da penúltima versão do conjunto de dados do CMIP (CMIP5). Por exemplo, Reis et al. (2021), usando projeções de modelos climáticos globais, Fagundes et al. (2021), usando projeções de 8 MSTs do NEX-GDDP, e Alves et al. (2020), usando projeções de um modelo climático regional (RegCM4), encontraram aumentos entre $\sim 1,2$ °C (FP e RCP4.5) e ~ 5 °C (FD e RCP8.5). Além disso, os aumentos de T estão de acordo com as projeções para a região Sul de Minas Gerais (SANTOS et al., 2017; TAVARES et al., 2018; FLORÊNCIO et al., 2019), com aumentos entre $+1,5$ °C (FP) a $+5$ °C (FD) no RCP8.5.

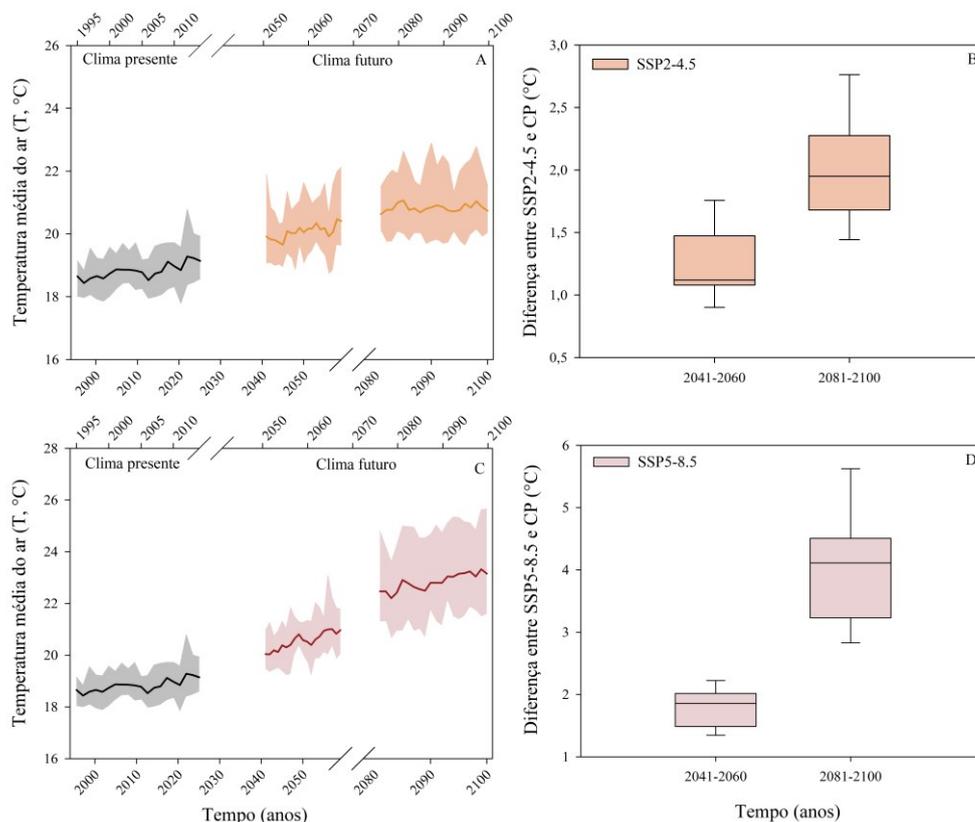


Figura 3.3 - Painéis A e C) Variação temporal simulada para o clima presente (CP = 1980-2004) e projetada para o clima futuro (FP = 2041-2060; FD = 2081-2100) para a temperatura média do ar para Itajubá obtida pelos 13 modelos climáticos do sistema terrestre (MSTs) do NEX-GDDP em dois cenários socioeconômicos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). As linhas em negrito (preto, laranja e vermelho) representam o *ensemble mean* dos MSTs. As linhas gradiente (cinza, laranja e vermelho) representam os dados de cada MST. Painéis B e D) Boxplot das diferenças entre clima futuro (FP e FD) e clima presente (CP) para a temperatura média do ar em dois

cenários socioeconômicos (SSP2-4.5 = laranja no painel B e SSP5-8.5 = vermelho no painel D).

3.3.2. Simulação e projeções da duração da fase de muda

Os aumentos projetados da T (Figura 3.3) resultaram em mudanças na DFM para as duas espécies florestais (Figura 3.4). De maneira geral, a variabilidade na simulação e projeções da T entre os MSTs foi refletida na DFM. Isto mostra que a $f(T)$ do modelo WE capturou a variação no desenvolvimento com a inserção das T projetadas dos MSTs do NEX-GDDP, o que é ideal para esse tipo de estudo (FLORÊNCIO et al., 2019; REIS et al., 2021). Além disso, há uma tendência majoritária de redução da DFM ao longo do século XXI para as duas espécies florestais nativas.

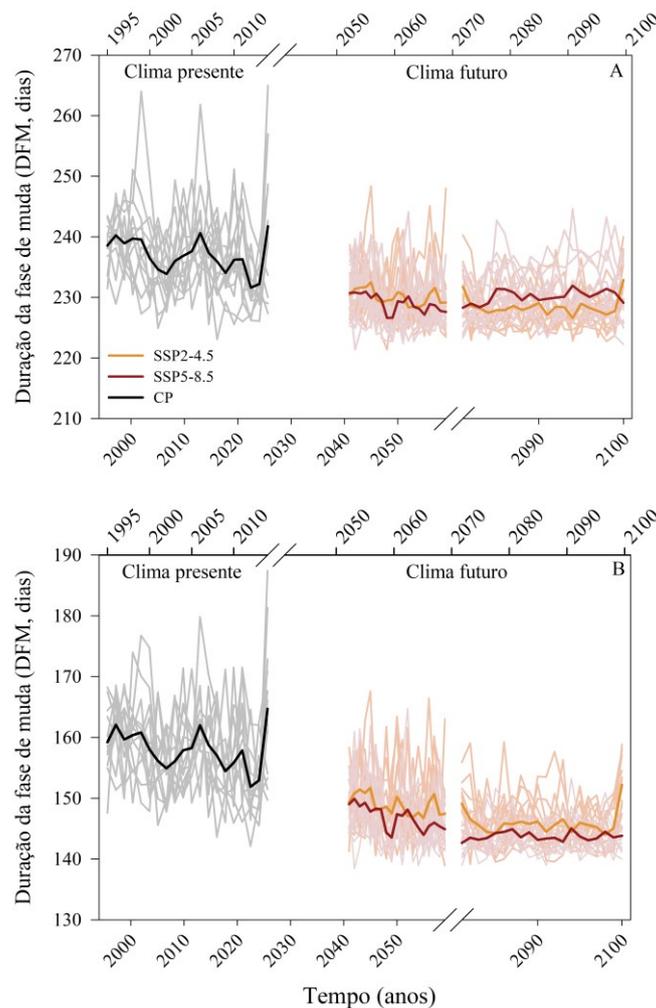


Figura 3.4 - Variação temporal da duração da fase de muda (DFM, em dias) simulada para o clima presente (CP = 1995-2044) e projetada para os climas futuros (FP = 2041-2060 e FD = 2081-2100) em dois cenários socioeconômicos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) pelos 13 modelos

climáticos do sistema terrestre (MSTs) para *Cybistax antisiphilitica* (A) e *Platygyamus regnellii* (B). As linhas claras (em cinza, laranja e vermelho) representam a duração da fase de muda para cada MST do NEX-GDDP, e as linhas em negrito (preto, laranja e vermelho) representam a média da DFM.

Quando se analisa as projeções da DFM para cada data de simulação de semeadura (Figura 3.5) é possível verificar a ocorrência de três padrões: i) aumentos de T aceleram a TAF e causam redução da DFM; ii) reduzem a TAF e causam o aumento da DFM; ou iii) não alteram a TAF e a DFM. Além disso, as magnitudes de alterações na DFM são distintas entre as espécies, DS e MSTs. A maior variação na DFM projetada pelos MSTs ocorreu no FP (em ambos SSPs) e nas DS1, DS2, DS3 e DS4. Incertezas nas projeções da DFM podem ocorrer devido limitações na previsibilidade dos MSTs (FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2023). Porém, usando multi-MSTs do NEX-GDDP é possível cobrir uma gama de resultados possíveis, reduzindo as incertezas nas projeções climáticas futuras na DFM (FLORÊNCIO et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021, e MARTINS et al., 2023).

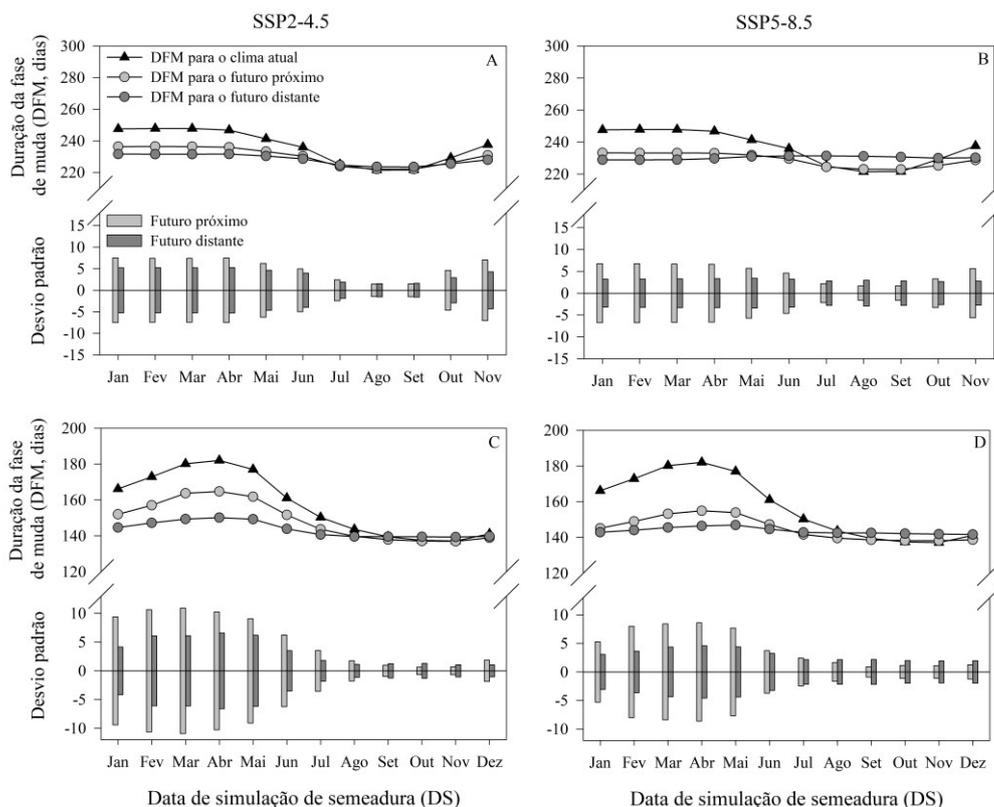


Figura 3.5 - Duração da fase de muda (DFM, em dias) para *Cybistax antisiphilitica* (A e B) e *Platygyamus regnellii* (C e D) simulada para o clima presente (CP, 1995–2014), projetada para o futuro próximo (FP, 2041–2060) e futuro distante (FP, 2081–2100) nos dois cenários

socioeconômicos (SSP2-4.5: A e C e SSP5-8.5: B e D) para as doze datas de simulação da semeadura (DS1 a DS12). As colunas verticais referem-se ao desvio padrão da DFM dos 13 MSTs do NEX-GDDP para FP (em cinza claro) e FD (em cinza escuro).

Em ambas espécies são projetadas redução da DFM na maioria das DSs, principalmente nas DSs simuladas entre fevereiro (DS2) e abril (DS4), com magnitudes distintas entre FP e FD (e SSPs). Para *C. antisyphilitica* é projetada redução da DFM nas DS1 a DS6 e DS11, que compreendem os meses de janeiro a junho, e novembro, além de aumento nas DS7, DS8, DS9 e DS10, que compreendem os meses de julho a outubro no FD (em ambos SSPs). Para *P. regnellii* é projetada redução da DFM nas DS1 a DS7 (janeiro a julho), aumento nas DS9, DS10 e DS11 (setembro a novembro), além disso não houve alteração da DFM nas DS8 (agosto) e DS12 (dezembro) no FD (em ambos SSPs).

Vale ressaltar que a DFM foi simulada (no CP) e projetada (no FP e FD) com a T de cada um dos 13 MSTs, porém a ANOVA e a comparação de médias (Tabela 3.2) foram realizadas considerando a média dos valores de DFM dos 13 MSTs. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de reduzir as incertezas geradas pelos MSTs nas projeções do DFM, semelhante ao realizado por Fagundes et al. (2021), Reis et al. (2021) e Florêncio et al. (2022).

A ANOVA indicou efeito significativo para a interação entre as datas de simulação de semeadura x períodos (CP, FP e FD) x cenários socioeconômicos (SSP 2-4.5 e 5-8.5) ($p \leq 0,05$) na DFM das duas espécies florestais (Tabela 3.2). Ou seja, houve diferenças na magnitude e influência de cada efeito principal na DFM de ambas espécies. Entre os efeitos principais, a data de simulação da semeadura apresentou maior valor do teste F, e, portanto, exerce maior influência na DFM da *C. antisyphilitica* (263,58) e da *P. regnellii* (861,93), sendo seguida pelos períodos (teste F = 17,51 para *C. antisyphilitica* e 486,51 para *P. regnellii*) e cenários socioeconômicos (teste F = 4,01 para *C. antisyphilitica* e 224,82 para *P. regnellii*). Ou seja, a DFM será mais suscetível as variações interanuais de T observadas entre as DSs, corroborando com os resultados de Fagundes et al. (2021) para *L. ferrea*, e Reis et al. (2021) para *B. orellana*.

Tabela 3. 2 - Comparação de médias para a duração da fase de muda (DFM, em dias) para *Cybistax antisiphilitica* e *Platygyamus regnellii*, considerando as simulações realizadas para o clima presente (CP = 1995–2014) e as projeções para dois climas futuros (FP = 2041–2060, FD = 2081–2100) para as doze datas de simulação de semeadura em dois cenários socioeconômicos (SSP 2-4.5 e 5-8.5) para Itajubá.

Datas de simulação da semeadura (DS)*	<i>Cybistax antisiphilitica</i>				
	SSP2.4-5			SSP5.8-5	
	CP	FP	FD	FP	FD
DS1	247,6 Gc	236,4 Fb2	231,6 Da2	233,2 Db1	228,9 Aa1
DS2	247,8 Gc	236,4 Fb2	231,5 Da2	233,2 Db1	228,9 Aa1
DS3	247,8 Gc	236,4 Fb2	231,6 Da2	233,2 Db1	228,9 Aa1
DS4	246,2 Gc	235,7 Fb2	231,5 Da2	233,1 Db1	229,7 Aa1
DS5	241,3 Fc	233,3 Eb2	230,4 Da1	231,8 Da1	231,0 Ba1
DS6	235,9 Dc	230,2 Db1	228,6 Ca1	229,5 Ca1	231,3 Bb2
DS7	225,1 Ba	223,8 Ba1	224,6 Ba1	224,5 Ba1	231,3 Bb2
DS8	221,5 Aa	222,1 Aa1	223,6 Ab1	223,0 Ab1	231,1 Bc2
DS9	221,5 Aa	222,1 Aa1	223,5 Ab1	222,9 Aa1	230,7 Bb2
DS10	229,2 Cc	226,1 Cb1	225,5 Ba1	225,3 Ba1	230,0 Ac2
DS11	237,6 Ec	230,8 Db2	228,0 Ca1	228,7 Ca1	230,2 Ba2
DS12 ⁺	-	-	-	-	-
	<i>Platygyamus regnellii</i>				
DS1	166,1 Gc	152,0 Db2	146,9 Ca2	148,2 Db1	142,9 Aa1
DS2	172,9 Hc	157,0 Eb2	150,7 Da2	152,6 Eb1	144,0 Aa1
DS3	180,2 Jc	163,7 Gb2	155,4 Ea2	157,7 Fb1	145,5 Ba1
DS4	182,1 Jc	164,7 Gb2	154,3 Fa2	159,7 Gb1	146,4 Ca1
DS5	177,0 Ic	161,8 Fb2	155,6 Ea2	157,7 Fb1	146,9 Ca1
DS6	161,0 Fc	151,7 Db2	147,9 Ca2	149,3 Db1	144,6 Ba1
DS7	150,0 Ec	143,6 Cb1	141,9 Ba1	142,8 Ca1	142,7 Aa1
DS8	143,6 Db	139,7 Ba1	139,4 Aa1	139,5 Ba1	142,5 Ab2
DS9	139,5 Ba	137,9 Aa1	138,3 Aa1	138,1 Aa1	142,5 Ab2
DS10	137,5 Aa	137,1 Aa1	137,8 Aa1	137,5 Aa1	142,1 Ab2
DS11	137,1 Aa	136,9 Aa1	137,6 Aa1	137,4 Aa1	141,9 Ab2
DS12	141,1 Cb	138,9 Ba1	138,7 Aa1	138,8 Ba1	141,7 Ab2

*Para as datas de simulação da semeadura consulte a tabela 1.1 (Capítulo I, item 1.2.1). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna (datas de simulação de semeadura), minúscula na linha (CP, FP e FD) e número na linha (cenários socioeconômicos) não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. Os valores de DFM foram obtidos para cada modelo climático do sistema terrestre e os dados da tabela referem-se aos valores médios de DFM. Os dados apresentados na tabela referem-se aos dados originais. Porém, os dados do DFM foram transformados pelo Ln (DFM) devido a violação do pressuposto de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) (Florêncio et al., 2019; Fagundes et al., 2021; Reis et al., 2021). As letras (A a J; a, b ou c) e os números (1 ou 2) foram configuradas em ordem crescente de duração da fase de muda. ⁺ Não foram realizadas simulações e projeções para esta data de semeadura.

As magnitudes de reduções (ou aumentos) da DFM em relação ao CP, ou seja, DFM projetada (no FP e FD) menos a DFM simulada (no CP) foram distintas entre as duas espécies.

Para *P. regnellii* são projetadas as maiores reduções e menores aumentos da DFM entre as DSs, variando entre ~ -35 dias (DS3 e DS4) à $\sim +5$ dias (DS10 e DS11) no FD (e SSP5-8.5). Para *C. antisiphilitica* são projetadas reduções na DFM entre -5 (DS6) e -19 dias (nas DS1 à DS3) e aumentos entre $+6$ dias (DS7) à $+10$ dias (DS8 e DS9) no FD (e SSP5-8.5).

Analisando separadamente cada data de simulação de semeadura, nota-se que, apesar das diferenças na magnitude, a redução da DFM de ambas espécies foi maior nas DSs simuladas tardiamente no verão (DS1 e DS2) e no outono (DS3, DS4 e DS6), e menor nas DSs simuladas precocemente no inverno (DS6). Para *C. antisiphilitica* as reduções são entre -5 (FP e SSP2-4.5) e -19 dias (FD e SSP5-8.5) e para *P. regnellii* entre -6 (FP e SSP2-4.5) e -36 dias (FD e SSP5-8.5). Ou seja, a maior redução da DFM ocorreu nas DSs simuladas entre os meses de março a maio (e junho) onde são projetados os menores aumentos de T ($\sim 1,7$ °C no FP e $\sim 3,7$ °C no FD no SSP5-8.5) para Itajubá.

Por outro lado, aumentos da DFM da *C. antisiphilitica* (entre $+6$ a $+10$ dias) foram projetados somente nas DS7 a DS10, e da *P. regnellii* (entre $+3$ a $+5$ dias) somente nas DS9, DS10 e DS11, todos no FD (e SSP5-8.5), justamente entre julho e outubro (novembro) onde são projetados maiores aumentos de T (de até $\sim 4,4$ °C) para Itajubá. Em ambas espécies, o aumento médio entre $\sim 1,1$ °C a ~ 4 °C na T projetado pelos MSTs do NEX-GDDP (Figura 3.3) poderá reduzir a TAF, fazendo com que as plantas se desenvolvam mais lentamente, retardando a finalização da fase de muda e aumentando a DFM (de $+6$ a $+10$ dias).

Como a DFM depende do acúmulo térmico diário, o qual é ajustado metabolicamente pelas plantas para ocorrer dentro dos limiares das temperaturas cardinais – T_b , T_{ot} e T_B (BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; HARTFIELD e PRUEGER, 2015; FERREIRA et al., 2019a e 2019b; BAATH et al., 2020; MARTINS et al., 2022c), qualquer modificação na T, altera a $f(T)$ e consequentemente altera a TAF e DFM (MARTINS e STRECK, 2007; COSTA e STRECK, 2018; FERREIRA et al., 2019b; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c). Portanto, a redução da DFM durante as datas de simulação de semeadura com projeções de temperaturas mais amenas (janeiro a julho) mesmo em cenários mais intensos (FD e SSP5-8.5) (Figura 3.5 e Tabela 3.2), ocorreram devido ao aumento na frequência de valores de T próximas a T_{ot} das duas espécies florestais ($C. antisiphilitica = 20$ °C e $P. regnellii = 21,5$ °C). Por exemplo, para *C. antisiphilitica* houveram 150 dias (59%) na DS1, 151 dias (60%) na DS2 e 149 dias (73%) na DS3, e para *P. regnellii* houveram 168 dias (91%) na DS4 em que a T foi próxima à T_{ot} . Em temperaturas ótimas, a $f(T)$ (equação 3.2) é próxima de 1.0 (MARTINS et al., 2014, 2022b; COSTA e STRECK, 2018; REIS et al., 2021), e assim a TAF é próxima à TAF_{max} . Por isso, há um aumento da taxa de desenvolvimento, resultando em aumento da DFM.

Tais condições podem ser vantajosas às duas espécies nativas, uma vez que um desenvolvimento mais rápido pode melhorar a capacidade competitiva e sobrevivência das mudas no campo (REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2022a), além de favorecer a aquisição de tolerância aos aumentos de T. O efeito de temperaturas ótimas na aceleração do desenvolvimento em projeções de aumento de T também foi verificado no desenvolvimento de mudas de *A. peregrina* (FAGUNDES et al., 2021) e *B. orellana* (REIS et al., 2021), ambas espécies florestais nativas do Brasil e da América do Sul, respectivamente, e em mudas de *Quercus ilex* L. nativa do centro-oeste da bacia do Mediterrâneo (MORIN et al., 2010). Apesar disso, é mais comum (e esperado) que aumentos de T aumentem a DFM.

Do contrário, o aumento da DFM somente nas simulações realizadas nas datas de simulação de semeadura mais quentes (setembro a novembro) e nos cenários mais quentes (FD e SSP5-8.5), ocorreram devido ao aumento na frequência de valores de T projetados (Figura 3.3) acima da Tot e próximo da TB da *C. antisiphilitica* (20 °C) e *P. regnellii* (21,5 °C) (Capítulo I). Para a *C. antisiphilitica* houveram 187 dias (70%) na DS7, 148 dias (91%), na DS8, 182 dias (80%) na DS9, e 144 (93%) na DS10 em que a T foi superior à Tot (em ~ 7 °C). De maneira análoga, para *P. regnellii* em 70 dias (47%) (na DS9), 31 dias (40%) (na DS10), 59 dias (60%) (na DS11) e 62 dias (73%) (na DS12) a T foi superior à Tot (em ~5 °C). Em temperaturas supra ótimas (entre Tot e TB), a $f(T)$ é menor que 1,0, e assim a TAF é menor que o TAF_{max} , resultando em aumento da DFM (STRECK et al., 2008; MARTINS e STRECK, 2007; STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2014; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c). O efeito de temperaturas supra ótimas no retardamento do desenvolvimento em projeções de aumento de T também foi verificado em mudas das espécies florestais nativas *C. myrianthum* (REIS et al., 2021), *L. ferrea* (FAGUNDES et al., 2021), das espécies exóticas *P. guajava* (REIS et al., 2021), *E. grandis* e *E. saligna* (COSTA e STRECK, 2018), *E. urophylla* e *C. citriodora* (MARTINS et al., 2023), assim como culturas agrícolas e ornamentais como: cultivares de oliveira (FLORÊNCIO et al., 2019), gladiolo (BECKER et al., 2021), batata (STRECK et al., 2006), trigo (LIU e TAO, 2013), milho (STRECK et al., 2012) e arroz (STRECK et al., 2013).

Apesar das espécies tropicais operarem dentro de um limiar estreito de temperaturas cardinais, elas apresentam capacidade de aclimação térmica, que pode reduzir o efeito negativo das temperaturas supra ótimas (KOSITSUP et al., 2009; CHEESMAN e WINTER, 2013; YAMORI et al., 2014; SLOT e WINTER, 2017). Embora seja pouco conhecido, a aclimação térmica pode incluir uma série de processos que define a capacidade de um organismo em ajustar suas características fisiológicas, bioquímicas, e morfológicas de forma a

otimizar o desempenho sob um determinado regime de temperatura (CHEESMAN e WINTER, 2013; NIEVOLA et al., 2017). Por exemplo, as espécies florestais tropicais *Ficus insipida* Willd., *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb (CHEESMAN e WINTER, 2013) e *Calophyllum longifolium* L. (SLOT e WINTER, 2017) ajustam a curva de máxima eficiência fotossintética, com um deslocamento da curva de resposta à temperatura, de modo que a Tot para fotossíntese das plantas aclimatadas se aproxime da nova temperatura do ar. Assim em cenários de aquecimento moderado (entre 1,5 °C e 2 °C) (MORIN et al., 2010; MARTINS et al., 2022b), a curva de resposta à temperatura consegue ser ajustada entre +0,5 °C a +2 °C acima da Tot das espécies (CHEESMAN e WINTER, 2013; SLOT e WINTER, 2017).

Entretanto, em cenários de aquecimento mais intenso (> 3 °C) e persistente várias alterações metabólicas, fisiológicas e morfológicas podem ser observadas (CHEESMAN e WINTER, 2013; SLOT e WINTER, 2017; FLORÊNCIO et al., 2022) afetando negativamente o ganho de carbono, a qualidade e o vigor das mudas (KOSITSUP et al., 2009; MORIN et al., 2010). Essas mudanças são desencadeadas devido (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; MATHUR et al., 2014; BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; NIEVOLA et al., 2017; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2023): i) comprometimento da ativação da RuBisCo, pela Rubisco activase; ii) favorecimento da atividade oxigenase da RuBisCo com aumento da fotorrespiração; iii) inibição da atividade de transporte de elétrons, da síntese de adenosina trifosfato (ATP) e regeneração da ribulose-1,5 bifosfato (RuBP), iv) aumento do consumo de energia ou esqueletos carbonados, elevando os custos de manutenção celular. Além disso, caso as projeções sejam ainda mais intensas as observadas neste estudo, a T pode aumentar ainda mais acima do ótimo térmico (KOSITSUP et al., 2009; PERDOMO et al., 2017), e assim, comprometer a integridade física dos componentes de transporte de elétrons do aparato fotossintético (PERDOMO et al., 2017).

Embora este estudo tenha usado uma abordagem em escala local, os resultados podem ser comparados com outras escalas (e espécies), além de fornecer subsídios para a escolha de medidas de adaptação mais eficientes para serem aplicadas em viveiros florestais no clima futuro (COSTA e STRECK, 2018; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021; MARTINS et al., 2023), reduzindo as perdas financeiras futuras.

3.3.3. Medidas de adaptação para minimizar os impactos nas mudas e nos viveiros florestais

Medidas de adaptação adequadas, oportunas e econômicas serão necessárias para garantir a qualidade das mudas e a sustentabilidade técnica e financeira dos viveiros florestais, mesmo que as projeções de redução da DFM sejam mais intensas comparadas as projeções de aumento da DFM. Tais medidas devem variar de acordo com a DS. Nas datas de simulação de semeadura onde aumentos da DFM são projetados (DS7 à DS9 para *C. antisiphilitica* e DS9 à DS11 para *P. regnellii*, ambas no SSP5-8.5), alterar as épocas de realização da semeadura ou plantio e controlar artificialmente o ambiente de produção de mudas serão as medidas de adaptação mais urgentes (COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al., 2019; FAGUNDES et al., 2021; REIS et al., 2021). Além disso, para garantir que as mudas atinjam o vigor necessário à comercialização, medidas como aumentar o tamanho (ou volume) dos recipientes, usar fertilizantes de liberação controlada, aumentar a frequência de aplicações de inseticidas e fungicidas e a quantidade de água irrigada, serão necessárias nessas DSs.

Por outro lado, nas nas datas de simulação de semeadura onde redução da DFM são projetados (DS1 à DS6, DS11 e DS12), medidas como usar fertilizantes de liberação controlada, aumentar a frequência de aplicações de inseticidas e fungicidas e a quantidade de água irrigada, serão necessários nessas DSs. Entretanto, medidas como alterações das épocas de semeadura ou plantio e a necessidade de aumentar o tamanho (ou volume) não se fazem necessários nessas DS, pois entre janeiro a junho, dezembro as espécies se desenvolvem mais rápido.

Para controlar artificialmente o ambiente de produção das mudas duas estratégias são as mais adequadas: utilizar sombrite e intensificar a irrigação (COSTA e STRECK, 2018; FAGUNDES et al. 2021; REIS et al. 2021), sendo que ambas poderão onerar os custos de produção de mudas. Além disso, intensificar a irrigação pode propiciar o surgimento e a inoculação de patógenos responsáveis por doenças foliares e de podridão radicular, sendo necessário aplicação de fungicidas como Tiofanato-metilico, Mancozebe, Tiabendazol (MOREIRA e ARCO-VERDE, 1998; GRIGOLETTI JÚNIOR et al., 2001; FAGUNDES et al., 2021; LEMES, 2021; MARTINS et al., 2022c). Tal medida também eleva os custos de produção e comercialização das mudas (FERREIRA et al., 2019b; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022c), além de não ser uma estratégia ecologicamente correta. Como os aumentos de T projetados (Figura 3.4) em todas as DSs elevam a demanda evaporativa, haverá necessidade de irrigar $\sim 9 \text{ mm dia}^{-1}$ (no FP e FD) em Itajubá (ALVES et al., 2020), em todas DSs. Essa medida (e quantidade) também é válida para as localidades com condições climáticas

semelhantes à Itajubá.

Em todas as DSs, inclusive onde são projetadas reduções da DFM, deverão ser intensificadas estratégias de controle de pragas e doenças. Com o aumento de T a abundância relativa de potenciais pragas de plantas quase triplica (DELGADO-BAQUERIZO et al., 2020; FLORÊNCIO et al., 2022; MARTINS et al., 2022c), com muitas gerações por ano, ou várias gerações sobrepostas (SANTANA e BURCKHARDT, 2007; DELGADO-BAQUERIZO et al., 2020; SKENDŽIĆ et al., 2021). Sob estresse térmico, as mudas de *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* são susceptíveis aos ataques de pragas como *Saissetia oleae* e *Coccus viridis* (cochonilhas); *Oligonychus sp.* (ácaros); *Agrotis ipsilon*, *Nomophila spp.* e *Spodoptera spp.* (lagartas); *Thaumastocoris peregrinus* (percevejos); *Toxoptera aurantii* (pulgão); *Liothrips sp.* (tripes); *Gryllus assimilis* (grilos) e *Neocurtilla hexadactyla*, *Neotridactylus politus* e *Scapteriscus didactylus* (paquinhas) (MOREIRA e ARCO-VERDE, 1998; LEMES, 2021; QUEIROZ et al., 2021; MARTINS e BOSCARDIN, 2022), mais recorrentes nos viveiros florestais brasileiros. Por isso, deverão ser adotadas estratégias de controle biológico, como introduzir potenciais inimigos naturais de pragas e doenças (predadores ou parasitoides) (FLORÊNCIO et al., 2022), ou aumentar a frequência de aplicação de inseticidas como Imidacloprido, Diflubenzurom, Vamidação, Cipermetrina, Carbaril, Tiametoxam e Carbofurano (MOREIRA e ARCO-VERDE, 1998; MARTINS e BOSCARDIN, 2022), que possuem amplo espectro. Assim, todas as medidas de adaptação mencionadas anteriormente podem ser consideradas na gestão de risco climático, pois se referem a métodos utilizados em viveiros florestais para facilitar a tomada de decisão resiliente ao clima (FAGUNDES et al., 2021; FLORÊNCIO et al., 2022; MARTINS et al., 2022b). Porém, elas podem onerar ainda mais os custos para produzir uma muda, podendo impactar negativamente a viabilidade financeira nos viveiros florestais (FAGUNDES et al., 2021).

3.3.4. Impactos dos aumentos da temperatura do ar na viabilidade financeira para produção de mudas das duas espécies florestais nativas em viveiros florestais

Apesar das projeções de redução na DFM serem mais intensas (em magnitude e frequência) comparadas aos aumentos na DFM (Tabela 3.2 e Figura 3.5), haverá impactos na viabilidade financeira para produzir uma muda das espécies *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* no viveiro florestal (Figura 3.6 e Anexo 1 e 2). Isso significa que os aumentos projetados de T podem causar maiores prejuízos para a viabilidade financeira comparado as projeções de

alterações na taxa de desenvolvimento (TAF e DFM) de ambas espécies nativas brasileiras.

Os itens considerados no cálculo do VPL foram distintos entre os períodos (CP, FP e FD) em função dos itens comumente utilizados para a produção de mudas no CP e das medidas de adaptação necessárias nos climas futuros (item 3.4.3). No CP foram considerados todos os itens atualmente utilizados nos viveiros florestais brasileiros (ARCO-VERDE e MOREIRA, 2002; SCHORN e FORMENTO, 2003; OLIVEIRA et al., 2016) (Tabela 3.1): i) recipiente (tubete e bandeja) com volume de 120 cm³, ii) substrato e duas adubações: sendo a primeira de base, realizada 10 dias antes de cada DS, com a aplicação de (NH₄)₂SO₄, P₂O₅, KCl e FTE BR 12, e a segunda de cobertura ((NH₄)₂SO₄ e KCl), realizada em intervalos de 30 dias, iii) aplicação de inseticida (Imidacloprido) e fungicida (Captana) em intervalos de 45 dias, e iv) irrigação por aspersão com aplicação de 6 mm dia⁻¹ (ALVES et al., 2020), o que representa um custo de energia (por tubete) de R\$ 2,4 x 10⁻⁵ (para 1 dia) durante 0,0021 minutos (por tubete dia) (SCHORN e FORMENTO, 2003; TONETTO, 2018).

Já no FP e FD foram considerados os itens (ARCO-VERDE e MOREIRA, 2002; SCHORN e FORMENTO, 2003; OLIVEIRA et al., 2016): i) recipiente (tubete e bandeja) com volume de 120 cm³ para as DSs com projeção de redução da DFM, e de 290 cm³ nas DSs com projeção de aumento da DFM (Tabela 3.2 e Figura 3.5), ii) substrato e adubação única com fertilizante de liberação controlada (NPK (18-05-09)), realizada 10 dias antes de cada DS, iii) aplicação de inseticida (Imidacloprido) e fungicida (Tiofanato-metilico) de maior espectro em intervalos de 30 dias, e iv) irrigação por aspersão de 9 mm dia⁻¹ (ALVES et al., 2020), que representa um custo de energia (por tubete de 290 cm³) de R\$ 6,9 x 10⁻⁵ (para 1 dia) durante 0,0006 minutos (por tubete dia), e R\$ 4 x 10⁻⁵ durante 0,0036 minutos por tubete de 120 cm³ dia, aplicada em todas as DSs (Tabela 3.2). A escolha por fertilizante de liberação controlada (no FP e FD) é justificada pela maior eficiência comparada a adubação convencional (base e cobertura) e menor lixiviação com a intensificação da irrigação (TONETTO, 2018; SILVA, 2022). Nos três períodos (CP, FP e FD) os custos com a irrigação foram calculados considerando aos aumentos no consumo de energia, obtido pela multiplicação entre potência da bomba de irrigação (3677,45 Watts), número de dias, tempo de irrigação (horas por dia) e valor do kWh de energia da região (R\$ 0,69, mantido constante no CP, FP e FD).

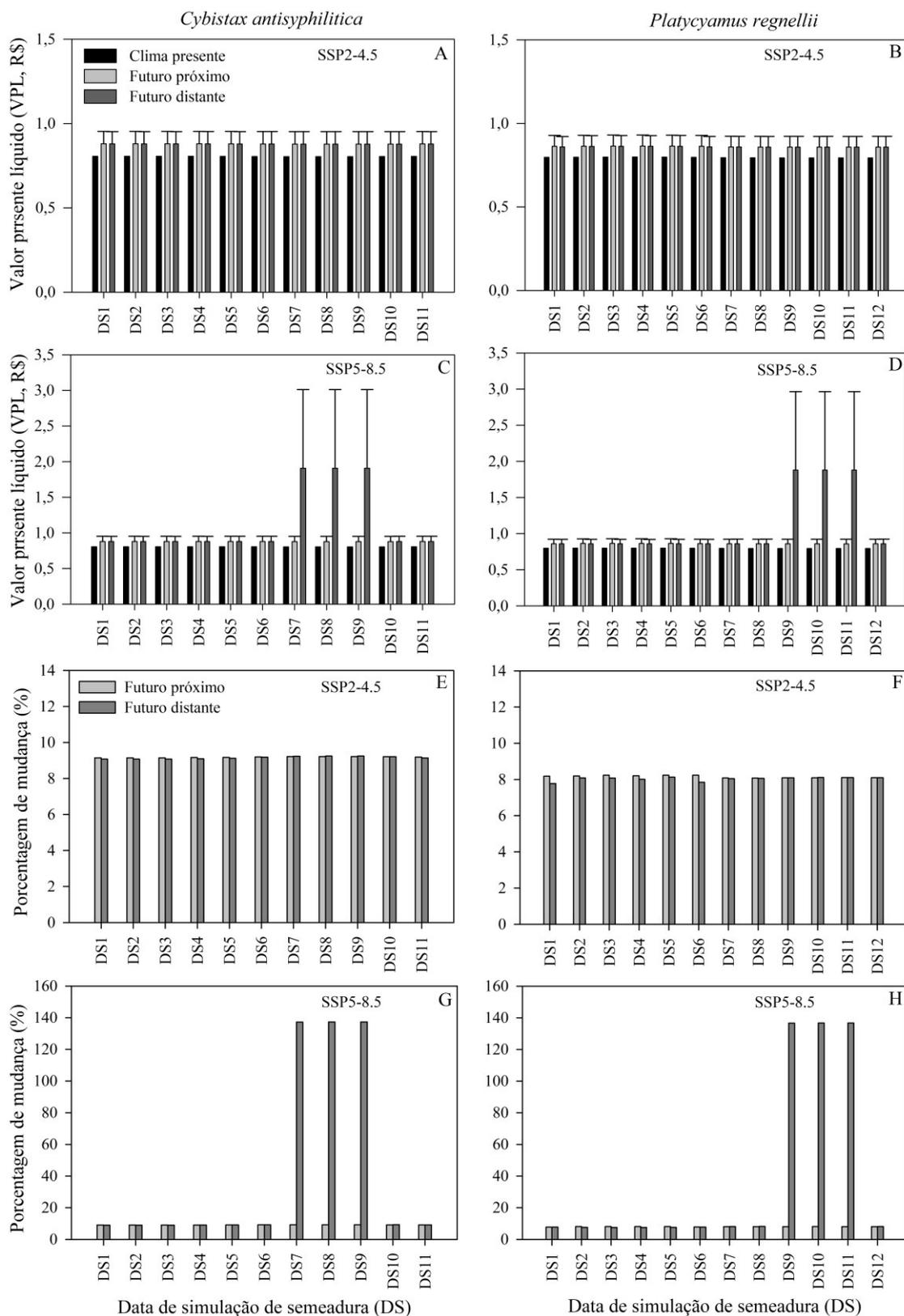


Figura 3.6 – Valor presente líquido (VPL, em reais) (Painéis A a D) e porcentagem de mudança (Painéis E a H) nos custos para produção de uma muda de *Cybistax antisiphilitica* (Painéis A, C, E e G) e *Platycyamus regnellii* (Painéis B, D, F e H) calculados para o clima presente (CP, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em dois

cenários socioeconômicos (SSP2-4.5: A, B, E e F e SSP5-8.5: C, D, G e H) para as 12 datas de simulação de semeadura. As barras verticais nos painéis A - D representam a mudança, ou seja, a diferença entre o VPL no FP e FD (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CP para cada data de simulação de semeadura.

As diferenças nos padrões (e magnitudes) de mudanças na DFM entre as espécies refletiram nos valores de VPL (Figura 3.6 e Anexo 1 e 2), sendo variável entre as DSs, períodos e SSPs. Nos cenários (FP e FD em ambos SSPs) e DSs onde se projetam redução da DFM são projetados menores aumentos nos custos para a produção de uma muda de ambas espécies florestais. Por exemplo, as reduções na DFM da *C. antisyphilitica* (~-19 dias) e *P. regnellii* (~-36 dias) geraram aumentos de ~R\$ 0,07 por muda, que representa ~9% de aumento no VPL (FP em ambos SSPs e FD no SSP2-5.4) (Figura 3.6 E a G). Por outro lado, no cenário de aquecimento mais intenso (FD e SSP5-8.5) e nas DSs onde se projetam aumento da DFM são projetados maiores aumentos no VPL. Ou seja, aumentos da DFM entre 3 dias (*P. regnellii*) e 10 dias (*C. antisyphilitica*) no FD (e SSP5-8.5) (Tabela 3.2) geraram aumentos de ~R\$ 1,10, que representa um aumento de ~137% para produzir uma muda (Figura 3.6 G e H).

De maneira geral, os maiores acréscimos nos custos para a produção de uma muda em todas as DSs no clima futuro (FP e FD) são devido ao uso de fertilizantes de liberação controlada (investimento inicial), aumento da irrigação e na frequência da aplicação de inseticidas e fungicidas (custo de operação). Além disso, nas DS7, DS8 e DS9 (*C. antisyphilitica*) e DS9, DS10 e DS11 (*P. regnellii*) o aumento dos custos também é decorrente do aumento do volume dos tubetes (290 cm³) e maior quantidade de substrato em função da maior DFM. Tubetes de maior tamanho são utilizados quando há maior permanência (maior DFM) das mudas no viveiro a fim de favorecer o desenvolvimento radicular e a distribuição das raízes no substrato (SCHORN e FORMENTO, 2003; FERRAZ e ENGEL, 2011).

Os fertilizantes de liberação controlada são medidas de adaptação necessárias no FP e FD para garantir que as mudas atinjam a qualidade e o vigor necessários para a comercialização (MARTINS et al., 2022a; SILVA, 2022), e aumentar as chances de sobrevivência das mudas após o plantio. Esse tipo de fertilizante é eficaz, pois libera gradativamente os nutrientes garantindo que as necessidades nutricionais da planta sejam supridas ao longo do tempo de permanência no viveiro (DFM entre 8 a 9 meses) (TONETTO, 2018; SILVA, 2022). Já a intensificação da irrigação (9 mm dia⁻¹) onera os custos de operação devido ao aumento com gastos com energia elétrica. Porém, é uma estratégia fundamental em todas as DSs para repor a quantidade de água perdida pela evapotranspiração (ALVES et al., 2020; ABREU et al.,

2022). Em Itajubá também são projetados aumentos crescentes da evapotranspiração, chegando a 40 mm mês⁻¹ (ALVES et al., 2020) no FD. Por sua vez, gastos com fungicidas e inseticidas (MACEDO, 1993; MOREIRA e ARCO-VERDE, 1998) também impactarão nos custos de operação para a produção de mudas de *C. antisyphilitica* e *P. regnellii* no clima futuro devido ao aumento de pragas e doenças em condições de temperaturas elevadas.

Os acréscimos entre ~R\$ 0,07 e ~R\$ 1,10 por muda podem ser melhor visualizados quando extrapolados para viveiros de médio à grande porte, com produção anual superior a 100 mil mudas (MACEDO, 1993). Por exemplo, considerando um viveiro localizado próximo à região de estudo (Figura 1.1 – Capítulo 1, item 1.2.1) que produz ~ 120 mil mudas por ano de diferentes espécies nativas brasileiras (GRUPO DISPERSORES, 2018), tais acréscimos poderão refletir em aumento anual entre R\$ 8400 e R\$ 132.000 ao longo do século XXI. Esses valores podem ser ainda maiores em viveiros mais tecnificados e que produzem espécies com projeções de aumento da DFM, como exemplo *L. ferrea* (FAGUNDES et al., 2021) e *B. orellana* (REIS et al., 2021).

Vale ressaltar que o VPL foi calculado desconsiderando custos com materiais permanentes, referentes à instalação e manutenção do viveiro florestal, administração, salários, entre outros custos possíveis e mantendo constante o valor do kWh de energia elétrica (no FP e FD). Por isso, os custos podem ser ainda maiores que os encontrados neste estudo, assim como os impactos negativos para a viabilidade financeira e para o retorno dos investimentos realizados no viveiro. Apesar dos resultados deste estudo serem exclusivos para *C. antisyphilitica* e *P. regnellii* e realizados em abordagem de escala local, eles são inéditos, e geram informações que podem ser consideradas na gestão de riscos climáticos futuros em empreendimentos florestais.

3.4. CONCLUSÃO

Aumentos projetados na temperatura do ar ao longo do século XXI (de ~ 1,1 °C no futuro próximo e ~ 4 °C no futuro distante) poderão modificar o desenvolvimento e a duração da fase de muda das duas espécies florestais nativas - *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. e *Platycyamus regnellii* Benth. - cultivadas em Itajubá, e em regiões de climas similares.

As magnitudes de alterações na duração da fase de muda foram distintas entre as espécies, datas de simulação de semeadura e períodos. Entre os efeitos principais, a data de simulação da semeadura exerce maior influência na duração da fase de muda de ambas espécies florestais. Somente as semeaduras simuladas entre julho/agosto a outubro/novembro poderão

aumentar a duração da fase de muda de ambas as espécies. Nas demais datas (entre janeiro a junho, dezembro) são projetadas reduções na duração da fase de muda.

Impactos negativos são projetados na viabilidade financeira para produzir uma muda das espécies *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* no viveiro florestal decorrentes da necessidade de adoção de medidas adaptativas para garantir qualidade e vigor necessário à comercialização das mudas, como uso de fertilizante de liberação controlada, aumento da irrigação e na frequência de uso de inseticidas e fungicidas.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. C.; SOARES, A. A. V.; FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B. Transpiration and growth responses by Eucalyptus species to progressive soil drying. **Journal of Forestry Research**, v.33, n.1, p.1-15, 2022.

ALMAZROUI, M.; ISLAM, M. N.; SAEED, F.; SAEED, S.; ISMAIL, M.; EHSAN, M. A.; DIALLO, I.; O'BRIEN, E.; ASHFAQ, M.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; CAVAZOS, T.; CERESO-MOTA, R.; TIPPETT, M. K.; GUTOWSKI 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.; 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.

ALMEIDA, D.; MARCHINI, L. C.; SODRÉ, G. S.; ÁVILA, M. d'; ARRUDA, C. M. F. **Plantas visitadas por abelhas e polinização**. ESALQ - Divisão de Biblioteca e Documentação, 2003.

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.

ARCO-VERDE, M. F.; MOREIRA, M. A. B. **VIVEIROS FLORESTAIS: construção, custos, cuidados e atividades desenvolvidas para a produção de mudas**. Embrapa Roraima, 2002.

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.

BAHUGUNA, R. N.; JAGADISH, K. S. V. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v.111, p.83-90, 2015.

BECKER, C. C.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. T.; SILVEIRA, W. B.; BALEST, D. S.; SILVA, L. F. Assessing climate change effects on gladiola in Southern Brazil, **Scientia Agricola**, v.78, n.1, p.1-11, 2021.

BITTENCOURT, N. S.; PEREIRA, E. J.; SÃO-THIAGO, P. S.; SEMIR, J. The reproductive biology of *Cybistax antisyphilitica* (Bignoniaceae), a characteristic tree of the South American savannah-like Cerrado vegetation. **Flora**, v.206, p.872-886, 2011.

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.

BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; ALLEN, F. **Princípios de Finanças Corporativas**. 12ª edição. AMGH, 2018.

CHEESMAN, A. W.; WINTER, K. Growth response and acclimation of CO₂ exchange characteristics to elevated temperatures in tropical tree seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v.64, p.3817-3828, 2013.

CHOU, S.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.;

- BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v.3, p.512-527, 2014.
- COSTA, D. B.; STRECK, N. A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciência Florestal**, v.28, n.2, p.1263–1279, 2018.
- COSTA, S.; LOHMANN, L. G.; BURIL, M. T. Flora of Pernambuco, Brazil: *Tabebuia* alliance and tribe Jacarandae (Bignoniaceae). **Biota Neotropica**, v.19, n.4, p.e20190737, 2019.
- CURY, G.; TOMAZELLO-FILHO, M. Caracterização e descrição da estrutura anatômica do lenho de seis espécies arbóreas com potencial medicinal. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.13, n.3, p.311-318, 2011.
- DEAL, R.; HENIKOFF, S. A chromatin thermostat. **Nature**, v.463, p.887–888, 2010.
- 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.
- DEVI, M. J.; REDDY, V. R. Transpiration response of cotton to vapor pressure deficit and its relationship with stomatal traits. **Frontiers in Plant Science**, v.9, p.1572, 2018.
- 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.
- FERRAZ, A. V.; ENGEL, V. L. Efeito do tamanho de tubetes na qualidade de mudas de Jatobá (*Hymenaea courbaril* L. var. *stilbocarpa* (Hayne) Lee et Lang.), Ipê-amarelo (*Tabebuia chrysotricha* (Mart. ex DC.) Sandl.) e Guaruaia (*Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan). **Revista Árvore**, v.35, p.413-423, 2011.
- FERREIRA, M. C.; COSTA, S. M. L.; PASIN, L. A. A. Uso de Resíduos da Agroindústria de Bananas na Composição de Substratos para Produção de Mudas de Pau Pereira. **Nativa**, v.3, p.120-124, 2015.
- FERREIRA, M. C.; MARTINS, F. B.; FLORENCIO, G. W. L. Cardinal temperatures and modeling the vegetative development of seedlings of guava. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.11, p.819-825, 2019b.
- FERREIRA, M. C.; MARTINS, F. B.; FLORENCIO, 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, n.1, p.1-9, 2019a.
- FLORENCIO, 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.
- FLORENCIO, 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, n.9, p.641-647, 2019.

FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n.5, p.283-292, 2017.

FREITAS, F. M.; NASCIMENTO, A. R. T.; SANCHES, M. C. Can morpho-physiological responses to natural light conditions in *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. explain its widespread occurrence in Brazilian Savannas? **Flora**, v.286, p.151990, 2022.

GRUPO DISPERSORES, 2018. Disponível em: <<https://dispersores.org/wp/viveiro-florestal/>>. Acesso em: 21, fevereiro de 2023.

GENTRY, A. H. Bignoniaceae. Part II (Tribe Tecomeae). **Flora Neotropica**, v.25, p.1-370, 1992.

GRIGOLETTI JUNIOR, A.; AUER, C.G.; SANTOS, A.F. **Estratégias de manejo de doenças em viveiros florestais**. Circular Técnica, pp. 01–08, 2001.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v.10, p.4–10, 2015.

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.

JAGADISH, S. V. K.; WAY, D. A.; SHARKEY, T. D. Plant heat stress: Concepts directing future research. *Plant, Cell & Environment*, v.2021, p.1–14, 2019.

KOSITSUP, B.; MONTPIED, P.; KASEMSAP, P.; THALER, P.; AMÉGLIO, T.; DREYER, E. Photosynthetic capacity and temperature responses of photosynthesis of rubber trees (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) acclimate to changes in ambient temperatures. **Trees**, v.23, p.357–365, 2009.

LEMES, P. G. **Novo Manual de Pragas Florestais Brasileiras**. Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

LIU, Y.; TAO, F. Probabilistic change of wheat productivity and water use in China for Global mean temperature change of 1, 2 and 3 °C. **J. Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.52, p.114-129, 2013.

LLOPART M.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. **Climate Dynamics**, v.54, p.99-116, 2020.

LOHMANN, L.G. *Cybistax* in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB114028/>> Acesso em: 13 Mar. 2022.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change

projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, v.132, p.663–682, 2018.

MACEDO, A.C. **Produção de mudas em viveiros florestais espécies nativas**. Fundação Florestal, 1993.

MARTINS, F. B.; BENASSI, R. B.; TORRES, R. R.; BRITO NETO, F.A. Impacts of 1.5° C and 2° C global warming on Eucalyptus plantations in South America. *Science of The Total Environment*, v.825, p.153820, 2022b.

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.33, p.1-12, 2022a.

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, n.4, p.e20200192, 2022c.

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**, 2023 (no prelo).

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 modelo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.4, p.505-514, 2014.

MARTINS, F. B.; PEREIRA, R. A. A.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. F. Climate projections of chill hours and implications for olive cultivation in Minas Gerais, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.55, p.e01852, 2020.

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 n.3, p.373-381, 2007.

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.

MARTINS, S. M. C.; BOSCARDIN, J. Levantamento do manejo de pragas aplicado em viveiros florestais no Brasil. **Entomology Beginners**, v.3, p.e047, 2022.

MATHUR, S.; AGRAWAL, D.; JAJOO, A. Photosynthesis: response to high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.137, p.116-126, 2014.

MONTEIRO, A. F. M.; MARTINS, F. B.; RODRIGUES, R. T.; MARRAFON, V. H. A.; ABREU, M. C.; MATTOS, E. V. Intercomparison and uncertainty assessment of methods for estimating evapotranspiration using a high-resolution gridded weather dataset over Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.46, p.583–597, 2021.

MOON, H.; SOLOMON, T. Forest Production, Restoration and Management under Climate Change. **Greener Journal of Agricultural Sciences**, v.9, n.3, p.337-343, 2019.

- MOREIRA, M. A. B.; ARCO-VERDE, M. F. **Controle de pragas e doenças em viveiros florestais**. Embrapa Roraima, 1998.
- MORIN, X.; FAHSE, L.; JACTEL, H.; SCHERER-LORENZEN, M.; GARCÍA-VALDÉS, R.; BUGMANN, H. Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. **Scientific Reports**, v.8, p.5627, 2018.
- MORIN, X.; ROY, J.; SONIÉ, L.; CHUINE, I. Changes in leaf phenology of three European oak species in response to experimental climate change. **New Phytologist**, v.186, p.900-910, 2010.
- MOURA, T. M. 2020. *Platycyamus* in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB29815>>. Acesso em: 13 Mar. 2022.
- MOURA, T. M.; LEWIS, G. P.; TOZZI, A. M. G. A. A revision of the South American genus *Platycyamus* Benth. (Leguminosae). **Kew Bulletin**, v.9, p.1-7, 2016.
- NIEVOLA, C. C., CARVALHO, C. P., CARVALHO, V., RODRIGUES, E. Rapid responses of plants to temperature changes. **Temperature**, v.4, p.371-405, 2017.
- OLIVEIRA, M. C. de; OGATA, R. S.; ANDRADE, G. A. de; SANTOS, D. S.; SOUZA, R. M.; GUIMARÃES, T. G.; SILVA JUNIOR, 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. p.124, 2016.
- OLIVEIRA, M. C. de; PEREIRA, D. J. de S.; RIBEIRO, J. F. **Viveiro e produção de mudas de algumas espécies arbóreas nativas do cerrado**. Embrapa Cerrado: Planaltina. p. 85, 2011.
- O'NEILL, B. C.; TEBALDIL, C.; VAN VUUREN, D. P.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J. F.; LOWE, J.; MEEH, G. A.; MOSS, R.; RIAHI, K.; SANDERSON, B. M. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v.9, p.3461-3482, 2016.
- ORTEGA, G.; ARIAS, P. A.; VILLEGAS, J. C.; MARQUET, P. A.; NOBRE, P. Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v.41, p.6713-6735, 2021.
- ORTOLANI, F. A.; MATAQUEIRO, M. F.; MORO, J. R.; MORO, F. V.; DAMIÃO FILHO, C.F. Morfo-anatomia de plântulas e número cromossômico de *Cybistax antisyphilitica* (Mart.) Mart. (Bignoniaceae). **Acta Botanica Brasilica**, v.22, n.2, p.345-353, 2008.
- 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.490, 2017.
- POORTER, H.; NIKLAS, K. J.; REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v.193, p.30-50, 2012.
- QUEIROZ, D. L.; SOLIMAN, E. P.; BURCKHARDT, D. **Principais pragas em viveiros de**

mudas de eucalipto. Embrapa Florestas, 2021.

REBOITA, M. S.; MARRAFON, V. H.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R. P. Cenários de Mudanças Climáticas Projetados para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 2018, p. 110-128, 2018.

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.

RIAHI, K.; VUUREN, D. P. V.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CAURESMA, J. C.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENODER, F.; DA SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUETI, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; 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.

RUELLAND, E.; ZACHOWSKI, A. How plants sense temperature. **Environmental and Experimental Botany**, v.69, p.225-232, 2010.

SAGE, R. Variation in the keat of Rubisco in C3 and C4 plants and some implications for photosynthetic performance at high and low temperature. **Journal of Experimental Botany**, v.53, p.609–620, 2002.

SAMPAIO, M. T. F. **Ecofisiologia de *Platycyamus regnellii* Benth e *Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze submetidas a diferentes condições de sombreamento.** 2014. 29 f. Dissertação (Mestrado Ecologia e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Minas Gerais.

SANTANA, D. L. Q.; BURCKHARDT, D. Introduced eucalyptus psyllids in Brazil. **Journal of Forestry Research**, v.12, p.337-344, 2007.

SANTOS, D. F. dos.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R. Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 77-88, 2017.

SAUERESSIG, D. Árvores nativas. **Editora Plantas do Brasil**. p.432, 2017.

SCALON, S. P. Q.; ALVARENGA, A. A.; DAVIDE, A. C. Influência do substrato, temperatura, umidade e armazenamento sobre a germinação de sementes de pau pereira (*Platycyamus regnellii* Benth). **Revista Brasileira de Sementes**, v.15, n.1, p.143-146, 1993.

SCHORN, L. A.; FORMENTO, S. **Silvicultura II: Produção de Mudast Florestais.** Universidade Regional de Blumenau, Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento de Engenharia Florestal, 2003.

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**, v7, p.e7333, 2019.

SILVA, L. V.; REIS, F. Y. S.; MARTINS, F. B.; CASSEMIRO, J. M. Desenvolvimento vegetativo de *Cesalpineia ferrea* e *Anadenanthera macrocarpa*: I - estimativa das temperaturas cardinais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.1, p.23-33, 2020.

SILVA, V.S.N. **Fertilizante de liberação controlada para produção de mudas de *Libidibia ferrea* (Mart. Ex Tul.) L.P. Queiroz: uma espécie de rápido crescimento e tolerante ao plantio em áreas abertas**. 2022. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.

SKENDŽIĆ, S.; ZOVKO, M.; ŽIVKOVIĆ, I. P.; LEŠIĆ, V.; LEMIĆ, D. The impact of climate change on agricultural insect pests. **Insects**, v.12, p.440, 2021.

SLOT, M.; WINTER, K. Photosynthetic acclimation to warming in tropical forest tree seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v.68, p.2275–2284, 2017.

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

SOUZA, G. F. D.; LEITE, G. L. D.; SILVA, F. W. S.; SILVA, J. L.; SAMPAIO, R. A.; TEIXEIRA, G. L.; SOARES, M. A.; ZANUNCIO, J. C. Bottom-up effects on arthropod communities in *Platycyamus regnellii* (Fabaceae) fertilized with dehydrated sewage sludge. **Revista Colombiana de Entomologia**, v.47, n.1, p.e8943, 2021.

STRECK, N. A.; BOSCO, L. C.; LAGO, I. Simulating leaf appearance in rice. **Agronomy Journal**, v.100, n.3, p.490-501, 2008.

STRECK, N. A.; LAGO, I.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B.; TIBOLA, T. A. Um modelo não-linear para estimar o aparecimento de nós em meloeiro (*Cucumis melo* L.) cultivado em estufa plástica, baseado na temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, p.210-216, 2006.

STRECK, N. A.; LAGO, I.; OLIVEIRA, F. B.; HELDWEIN, A. B.; DE 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.

STRECK, N. A.; SILVA, S. D.; LANGNER, J. A. Assessing the response of maize phenology under elevated temperature scenarios. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, p.1-12, 2012.

STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; GABRIEL, L. F. Leaf development of cultivated rice and weedy red rice under elevated temperature scenarios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.190-199, 2013.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.; STEPHEN, B. P. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.115, p.139-150, 2003.

TAVARES, P.S., GIAROLLA, A., CHOU, S.C., SILVA, A.J.P., LYRA, A.A., 2018. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, v.18, n.3, p.873–883, 2018.

TEBALDI, C.; DEBEIRE, K.; EYRING, V.; FISCHER, E.; FYFE, J.; FRIEDLINGSTEIN, P.; KNUTTI, R.; LOWE, J.; O'NEILL, B.; SANDERSON, B.; VAN VUUREN, D.; R. K.; MEINSHAUSEN, M.; NICHOLLS, Z.; TOKARSKA, K.B.; HURTT, G.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J.F.; MEEHL, G.; MOSS, R.; BAUER, S.E.; BOUCHER, O.; BROVKIN, V.; BYUN, Y.H.; DIX, M.; GUALDI, S.; GUO, H.; JOHN, J.G.; KHARIN, S.; HO KIM, Y.H.; KOSHIRO, T.; MA, L.; OLIVIÉ, D.; PANICKAL, S.; QIAO, F.; RONG, X.; ROSENBLOOM, N.; SCHUPFNER, M.; SÉFÉRIAN, R.; SELLAR, A.; SEMMLER, T.; SHI, X.; SONG, Z.; STEGER, C.; STOUFFER, R.; SWART, N.; TACHIIRI, K.; TANG, Q.; TATEBE, H.; VOLDOIRE, A.; VOLODIN, E.; WYSER, K.; XIN, X.; YANG, S.; YU, Y.; ZIEHN, T. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. **Earth System Dynamics**, v.12, p.253–293, 2021.

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

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, Rio Grande do Sul.

TORRES, R. R.; BENASSI, R. B.; MARTINS, F. B.; LAPOLA, D. M. Projected impacts of 1.5 and 2°C global warming on temperature and precipitation patterns in South America. **International Journal of Climatology**, v.42, p.1597-1611, 2021.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Climate change hotspots over South America: from CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. **Theoretical and Applied Climatology**, v.117, p.579-587, 2014.

UHLMANN, L. O.; STRECK, N. A.; BECKER, C. C.; SCHWAB, N. T.; BENEDETTI, R. P.; CHARÃO, A. S.; RIBEIRO, B. S. M. R.; SILVEIRA, W. B.; BACKES, F. A. A. L.; ALBERTO, C. M.; MUTTONI, M.; PAULA, G. M.; TOMIOZZO, R.; BOSCO, L. C.; BECKER, D. PhenoGlad: A model for simulating development in *Gladiolus*. **European Journal of Agronomy**, v.82, p.33-49, 2017.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v.58, n.1, p.1-24, 1998.

WILLIAMS, M.I.; DUMROESE, R.K. Role of climate change in reforestation and nursery practices. **Western Forester**, v.59, n.1, p.11-13, 2014.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

YAMORI, W.; HIKOSAKA, K.; WAY, D.A. Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. **Photosynthesis Research**, v.119, p.101–117, 2014.

CONCLUSÃO GERAL

As temperaturas cardinais de desenvolvimento inicial estimadas para a *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. foram 13 °C (Tb), 20 °C (Tot) e 48,4 °C (TB) e para a *Platycyamus regnellii* Benth. foram 13,7 °C (Tb), 21,5 °C (Tot) e 43,4 °C (TB). Apesar da *Cybistax antisiphilitica* apresentar, em média, maior duração da fase de muda (~215 dias), necessita acumular menos energia (88,2 °C dia por folha) para o desenvolvimento comparada a *Platycyamus regnellii* (109,7 °C dia por folha com ~145 dias). Ambas espécies florestais se desenvolveram diferentemente ao longo das datas de semeadura, demonstrando que possuem taxas de desenvolvimento diferentes sob mesmas condições de campo, e que as temperaturas cardinais podem ser estimadas através do uso de múltiplas datas de semeadura.

Os modelos de desenvolvimento - Filocrono e Wang e Engel - utilizados neste estudo foram capazes de estimar a dinâmica do desenvolvimento inicial, número de folhas acumulado e duração da fase de muda para *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. e *Platycyamus regnellii* Benth. No entanto, os erros cumulativos na estimativa do número de folhas acumulado resultaram em estimativas menos precisas da duração da fase de muda, especialmente para *Cybistax antisiphilitica*. Ambos modelos de desenvolvimento foram notavelmente similares na estimativa da NFa e DFM para a *Cybistax antisiphilitica*, com erro de ~3,3 folhas e 25 dias, respectivamente. Por outro lado, o modelo Wang e Engel foi ligeiramente superior para *Platycyamus regnellii*, com RQME inferior a 2,06 folhas (NFa) e 13,1 dias (DFM).

Aumentos projetados na temperatura do ar ao longo do século XXI (de ~ 1,1 °C no futuro próximo e ~ 4 °C no futuro distante) poderão modificar o desenvolvimento e a duração da fase de muda das duas espécies florestais nativas - *Cybistax antisiphilitica* (Mart.) Mart. e *Platycyamus regnellii* Benth. - cultivadas em Itajubá, e em regiões de climas similares.

As magnitudes de alterações na duração da fase de muda foram distintas entre as espécies, datas de simulação de semeadura e períodos. Entre os efeitos principais, a data de simulação da semeadura exerce maior influência na duração da fase de muda de ambas espécies florestais. Somente as semeaduras simuladas entre julho/agosto a outubro/novembro poderão aumentar a duração da fase de muda de ambas as espécies. Nas demais datas (entre janeiro a junho, dezembro) são projetadas reduções na duração da fase de muda.

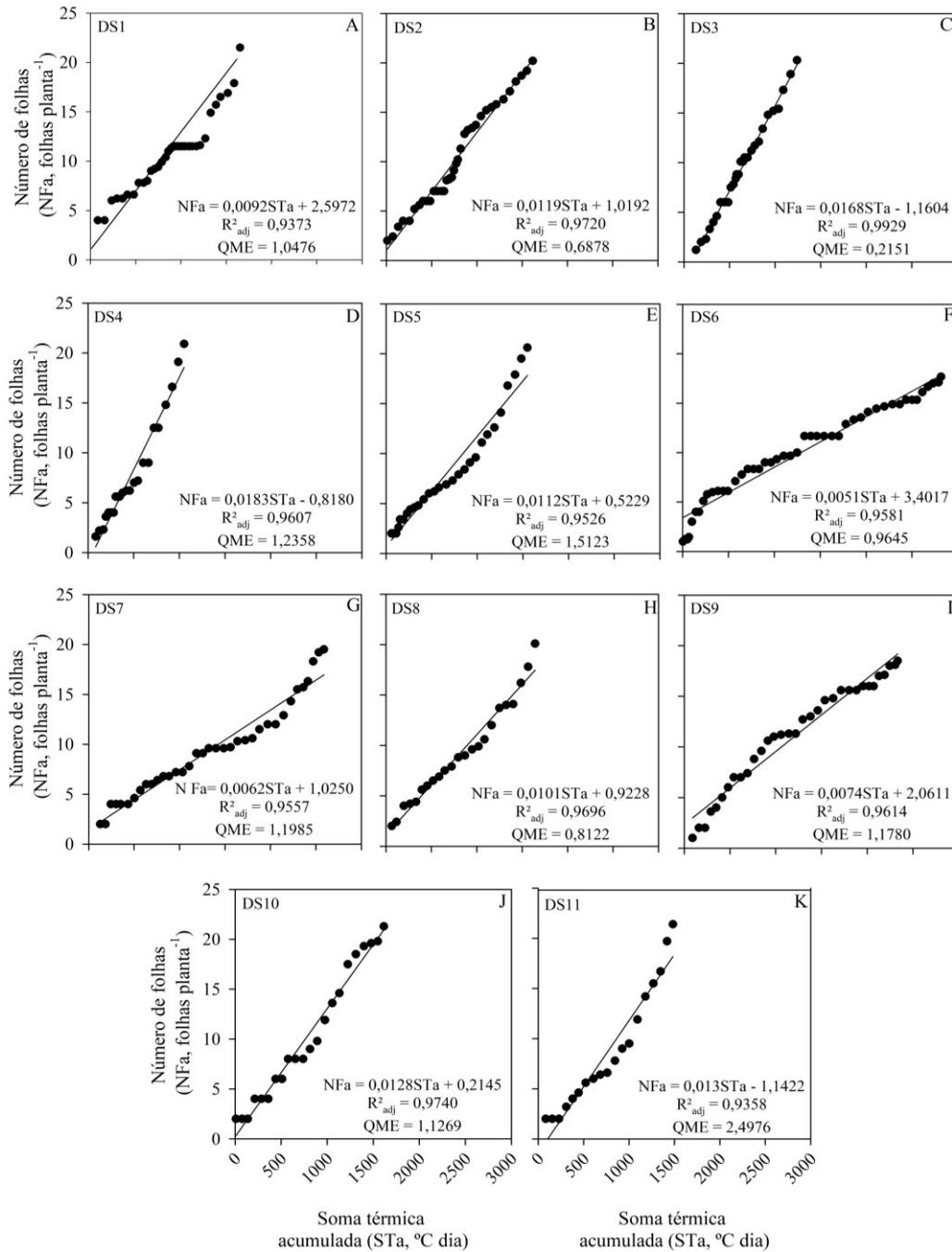
Impactos negativos são projetados na viabilidade financeira para produzir uma muda das espécies *C. antisiphilitica* e *P. regnellii* no viveiro florestal decorrentes da necessidade de adoção de medidas adaptativas para garantir qualidade e vigor necessário à comercialização das

mudas, como uso de fertilizante de liberação controlada, aumento da irrigação e na frequência de uso de inseticidas e fungicidas.

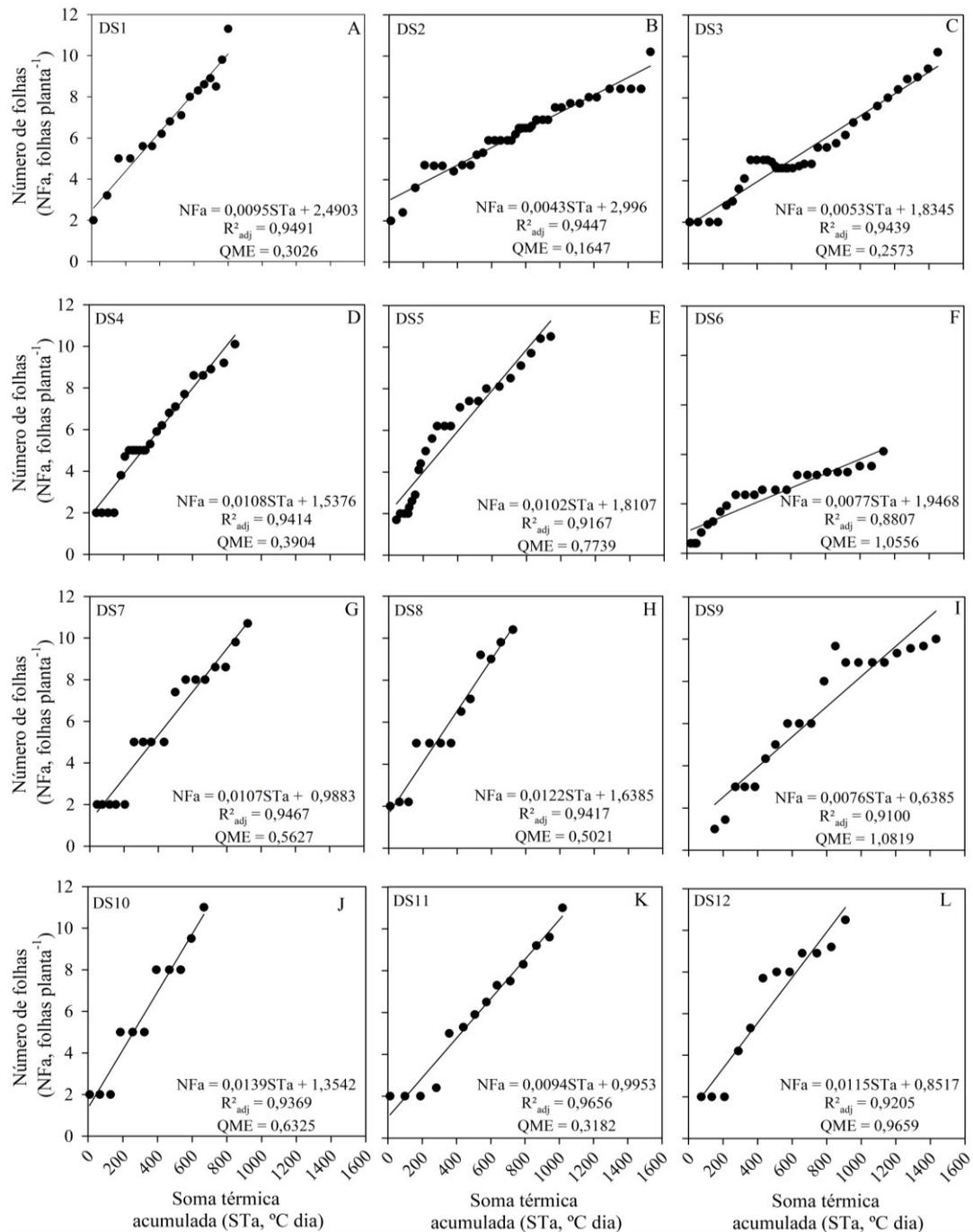
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL

- COSTA, D. B.; STRECK, N. A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciência Florestal**, v.28, n.2, p.1263–1279, 2018.
- 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.
- FERREIRA, M. C.; MARTINS, F. B.; FLORENCIO, G. W. L. Cardinal temperatures and modeling the vegetative development of seedlings of guava. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.11, p.819-825, 2019b.
- 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, n.9, p.641-647, 2019.
- FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n.5, p.283-292, 2017.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- 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.33, p.1-12, 2022a.
- MARTINS, F. B.; FERREIRA, M. C.; FLORÊNCIO, G. W. L. Agrometeorological models for predicting seedlings development of two native forest species. **Scientia Agrícola**, v.79, n.4, p.e20200192, 2022b.
- 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**, 2023 (prelo).
- 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.
- SILVA, L. V.; REIS, F. Y. S.; MARTINS, F. B.; CASSEMIRO, J. M. Desenvolvimento vegetativo de *Cesalpineia ferrea* e *Anadenanthera macrocarpa*: I - estimativa das temperaturas cardinais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.1, p.23-33, 2020.

ANEXOS CAPÍTULO I



Anexo 1. Número de folhas acumuladas na haste principal (NFa, folha planta⁻¹) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante a fase de desenvolvimento inicial da *Cybistax antisiphilitica*. Os dados de cada painel correspondem a um pote. R^2_{adj} é o coeficiente de estimação ajustado dado por $R^2_{adj} = MSS/TSS$, em que MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; TSS é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2_{adj} \leq 1$), QME é o erro quadrático médio dado por $QME = SSE/n$ onde SSE é a soma dos quadrados do erro; n é o número de observações.



Anexo 2. Número de folhas acumuladas na haste principal (NFa, folha planta⁻¹) versus soma térmica acumulada (STa, °C dia) durante a fase de desenvolvimento inicial da *Platycyamus regnellii*. Os dados de cada painel correspondem a um pote. R^2_{adj} é o coeficiente de estimação ajustado dado por $R^2_{adj} = MSS/TSS$, em que MSS é explicado pelos quadrados da variação devido à regressão; TSS é a variação total, ou seja, a soma total dos quadrados ($0 \leq R^2_{adj} \leq 1$), QME é o erro quadrático médio dado por $QME = SSE/n$ onde SSE é a soma dos quadrados do erro; n é o número de observações.

ANEXOS CAPÍTULO III

Anexo 1. Saldo de caixa, valor presente líquido (VPL), mudança e porcentagem de mudança nos custos para produção de uma muda de *Cybistax antisiphilitica* calculado para o clima presente (CP, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em dois cenários socioeconômicos (SSP 2-4.5 e 5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura. Para as datas de semeadura, consulte a tabela 1.1 (Capítulo I, item 1.2.1).

Período (meses) ¹	<i>Cybistax antisiphilitica</i>											
	Clima atual (1995 – 2014)											
	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	
0	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779
1	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003
2	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004
3	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003
4	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004
5	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003
6	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004
7	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003
8	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,004
9	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	0,000							
VPL (-R\$)²	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,81

Período (meses) ¹	<i>Cybistax antisiphilitica</i>											
	Futuro próximo (2041 – 2060) no SSP2-4.5											
	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8 ⁺	DS9 ⁺	DS10	DS11	
0	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825
1	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007

2	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
3	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
4	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
5	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
6	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
7	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
8	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,006	-0,006	-0,005	-0,005	-0,005	-0,005	-0,006
VPL (-R\$)²	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
Mudança (R\$)³	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
% de mudança⁴	9,1	9,1	9,1	9,2							
<i>Cybistax antisiphilitica</i>											
Período (meses)¹	Futuro distante (2081-2100) no SSP2-4.5										
	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11
0	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825
1	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
2	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
3	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
4	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
5	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
6	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
7	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
8	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,005	-0,005	-0,005	-0,005	-0,005
VPL (-R\$)²	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
Mudança (R\$)³	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
% de	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,2	9,2	9,3	9,3	9,2	9,1

mudança⁴											
<i>Cybistax antisyphilitica</i>											
Período (meses)¹	Futuro próximo (2041-2060) no SSP5-8.5										
	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11
0	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825
1	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
2	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
3	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
4	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
5	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
6	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
7	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
8	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,005	-0,005	-0,005	-0,005	-0,006
VPL (-R\$)²	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
Mudança (R\$)³	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
% de mudança⁴	9,1	9,1	9,1	9,1	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2
<i>Cybistax antisyphilitica</i>											
Período (meses)¹	Futuro distante (2081-2100) no SSP5-8.5										
	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11
0	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-1,831	-1,831	-1,831	-0,825	-0,825
1	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	-0,007
2	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	-0,007
3	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	-0,007
4	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	-0,007
5	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	-0,007
6	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	-0,007

7	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	-0,007
8	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,008	-0,008	-0,008	-0,006	-0,006
VPL (-RS)²	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	1,91	1,91	1,91	0,88	0,88
Mudança (RS)³	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	1,10	1,10	1,10	0,07	0,07
% de mudança⁴	9,0	9,0	9,0	9,1	9,1	9,2	137,3	137,3	137,3	9,3	9,2

*Datas de simulação de semeadura em negrito = projeção redução da duração da duração da fase de muda; datas de simulação de semeadura em cinza = projeção de aumento da duração da fase de muda; + datas de simulação da semeadura de simulação sem alteração na duração da fase de muda. ¹ Descrição do fluxo de caixa: 0 = investimento inicial (substrato, recipiente - tubete + bandeja -, adubo - base e cobertura - e fertilizante de liberação controlada), 1 a 9 = custos de operação (irrigação, inseticida e fungicida), todos contabilizados em intervalos de 30 dias desde a data de emergência até a data de término da fase de muda (ambas variáveis entre as datas de simulação de semeadura, espécies, períodos e cenários socioeconômicos). ² VPL é um valor negativo pois considera apenas custos para produzir uma muda. ³ O termo mudança refere-se a diferença entre o VPL no FP e FD (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CP para cada data de simulação de semeadura. ⁴ A porcentagem de mudança refere-se a razão entre a mudança em FP e FD (em ambos SSPs) e o VPL do CP.

Anexo 2. Saldo de caixa, valor presente líquido (VPL), mudança e porcentagem de mudança nos custos para produção de uma muda de *Platycyamus regnellii* calculado para o clima presente (CP, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em dois cenários socioeconômicos (SSP 2-4.5 e 5-8.5) para todas as datas de simulação de semeadura. Para as datas de semeadura, consulte a tabela 3 (Capítulo I, item 1.2.1).

Período (meses) ¹	<i>Platycyamus regnellii</i>											
	Clima atual (1995 – 2014)											
	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12
0	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779	-0,779
1	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003
2	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004
3	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003
4	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004
5	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002
6	-0,003	-0,003	-0,004	-0,004	-0,004	-0,002						
7				0,000								
VPL (-R\$)²	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79

Período (meses)	<i>Platycyamus regnellii</i>											
	Futuro próximo (2041-2060) no SSP2-4.5											
	DS5	DS6	DS7	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10 ⁺	DS11	DS12
0	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825
1	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
2	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
3	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
4	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
5	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,006	-0,006	-0,005	-0,005	-0,005	-0,006
6	-0,003	-0,004	-0,005	-0,005	-0,005	-0,003						

VPL (-R\$)²	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
Mudança (R\$)³	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
% de mudança⁴	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,1						

Platycomus regnellii

Período (meses)¹	Futuro distante (2081-2100) no SSP2-4.5												
	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10⁺	DS11⁺	DS12	
0	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825
1	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
2	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
3	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
4	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
5	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,006	-0,006	-0,005	-0,005	-0,005	-0,005	-0,006
6		-0,003	-0,003	-0,003	-0,004								
VPL (-R\$)²	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
Mudança (R\$)³	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
% de mudança⁴	7,8	8,1	8,1	8,0	8,1	7,9	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1

Platycomus regnellii

Período (meses)¹	Futuro próximo (2041-2060) no SSP5-8.5												
	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10⁺	DS11⁺	DS12	
0	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825
1	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
2	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
3	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
4	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007

5	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,006	-0,006	-0,005	-0,005	-0,005	-0,006
6		-0,003	-0,004	-0,004	-0,004								
VPL (-R\$)²	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
Mudança (R\$)³	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
% de mudança⁴	7,8	8,1	8,1	8,1	8,2	7,9	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
<i>Platycyamus regnellii</i>													
Período (meses)¹	Futuro distante (2081-2100) no SSP5-8.5												
	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9	DS10	DS11	DS12	
0	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-0,825	-1,831	-1,831	-1,831	-0,825	
1	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	
2	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	
3	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	
4	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,010	-0,010	-0,010	-0,007	
5	-0,007	-0,006	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007	-0,009	-0,008	-0,008	-0,006	
VPL (-R\$)²	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	1,88	1,88	1,88	0,86	
Mudança (R\$)³	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	1,09	1,09	1,09	0,06	
% de mudança⁴	7,8	7,6	7,6	7,6	7,7	7,8	8,1	8,2	136,7	136,7	136,7	8,15	

*Dadas de simulação de semeadura em negrito = projeção redução da duração da duração da fase de muda; datas de simulação de semeadura em cinza = projeção de aumento da duração da fase de muda; + datas de simulação da semeadura de simulação sem alteração na duração da fase de muda. ¹ Descrição do fluxo de caixa: 0 = investimento inicial (substrato, recipiente - tubete + bandeja -, adubo - base e cobertura - e 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 da fase de muda (ambas variáveis entre as datas de simulação de semeadura, espécies, períodos e cenários socioeconômicos). ² VPL é um valor negativo pois considera apenas custos para produzir uma muda. ³ O termo mudança refere-se a diferença entre o VPL no FP e FD (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) menos o respectivo VPL para CP para cada data de simulação de semeadura. ⁴ A porcentagem de mudança refere-se a razão entre a mudança em FP e FD (em ambos SSPs) e o VPL do CP.