



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

**RISCOS CLIMÁTICOS E VULNERABILIDADES DE  
PLANTIOS FLORESTAIS COMERCIAIS NO BRASIL  
SOB CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ATUAIS E  
FUTURAS**

---

**Rafael Gonçalves Xavier**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2026**

# **RISCOS CLIMÁTICOS E VULNERABILIDADES DE PLANTIOS FLORESTAIS COMERCIAIS NO BRASIL SOB CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ATUAIS E FUTURAS**

---

**por**

**Rafael Gonçalves Xavier**

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.<sup>a</sup> Dra. Fabrina Bolzan Martins

**Vinculação:**

Projeto DPI 646, APQ 01511-24

**Itajubá, MG,  
Brasil 2026**

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

**RAFAEL GONÇALVES XAVIER**

**RISCOS CLIMÁTICOS E VULNERABILIDADES DE  
PLANTIOS FLORESTAIS COMERCIAIS NO BRASIL SOB  
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ATUAIS E FUTURAS**

Dissertação aprovada pela banca examinadora em 23 de fevereiro de 2026 conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

**Banca examinadora:**

Documento assinado digitalmente



FABRINA BOLZAN MARTINS

Data: 03/03/2026 09:57:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr<sup>a</sup>. Fabrina Bolzan Martins (Orientadora)  
Universidade Federal de Itajubá

Documento assinado digitalmente



CASSIA GABRIELE DIAS

Data: 03/03/2026 10:00:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr<sup>a</sup>. Cássia Gabriele Dias  
Universidade Federal de Itajubá

Documento assinado digitalmente



CLEVERSON HENRIQUE DE FREITAS

Data: 03/03/2026 10:47:36-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Cleverson Henrique de Freitas  
University of Florida

**Itajubá, MG,  
Brasil 2026**

Ao meu pai, Carlos Roberto Xavier (*In memoriam*), que partiu antes de ver esta conquista, mas permanece vivo em cada linha que escrevo.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Quem diria que, depois de tantas páginas escritas com naturalidade, essas linhas seriam as mais desafiadoras. De antemão, agradeço a Deus e a Maria Santíssima por sonharem coisas tão lindas para mim, por guiarem meus passos e por me fortalecerem dia após dia. Há dois anos eu orava pela minha vaga no mestrado e, posteriormente, pedia auxílio para escrever cada parágrafo desta dissertação. Sem dúvidas, foi dessa fé que encontrei minha força.

Agradeço, com todo coração, à minha família. Obrigado mãe, por não me deixar esquecer de comer, dormir e descansar. Obrigado pelo apoio incondicional, mesmo quando eu não parava de falar sobre pragas e doenças em horários inoportunos. Obrigado pela preocupação, pelo cuidado constante, pelas marmitas para trazer para Itajubá, por acreditar em mim e por sempre se orgulhar de cada pequena conquista minha. Agradeço a minha irmã, Letícia, por me escutar ler e reler inúmeros parágrafos, por ajudar com as referências, pelas opiniões, por olhar minhas figuras e, mesmo sem entender do assunto, me dar opiniões e conselhos. Agradeço ao meu gatinho Theodoro, que chegou despretensiosamente na minha vida e trouxe conforto, companhia e alegria em todos os momentos. A minha madrinha, Silvia Helena, e ao meu primo, Pedro Matheus, agradeço pelos momentos em família e por cuidarem da minha mãe em meus períodos de ausência.

Em seguida, gostaria de agradecer à minha orientadora, Profa. Dra. Fabrina Bolzan Martins, pela orientação, reuniões, correções, paciência, amizade e por me acompanhar durante cinco anos desta jornada acadêmica. Não consigo imaginar minha trajetória acadêmica sem sua orientação. Seu apoio e ensinamentos foram fundamentais para que eu me tornasse o profissional que sou e para todo o conhecimento que construí ao longo desse período.

Aos meus amigos, em especial Thales, Hemily, Flávia, Cássia e Mábele: vocês foram meus alicerces nesses dois anos. Foram vocês que me ouviram chorar a cada correção, a cada artigo recusado e principalmente nos momentos que eu não estava dando conta de tudo (mesmo quando não queria admitir). Às minhas amigas do mestrado, Fernanda e Aylla, obrigado por me acompanharem em cada passo dessa jornada, desde as infinitas aulas de seminários, até a prova de proficiência em inglês. Vocês, sem dúvidas, fizeram esse caminho ser mais fácil. Um agradecimento especial também a todos os meus amigos que não foram mencionados. Durante esses anos, foram presença constante, apoio em todos os momentos e incentivo nas pequenas e grandes conquistas. Agradeço também à minha gestora e amiga, Malu, por sempre enxergar e destacar o melhor em mim; ao Dr. Cleverson, por aceitar participar e contribuir brilhantemente

com meu trabalho; e aos meus professores, pelo apoio, ensinamentos e incentivo ao longo desta jornada.

Por último, gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio financeiro (processos número ID11831 e APQ 01511-24), ao Instituto de Recursos Naturais (IRN) e ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos (POSMARH) pelos recursos disponibilizados.

“Dalva poderia tantas coisas se pudesse. Mas só pôde o que fez. Quem vê de fora faz arranjos melhores, mas é dentro, bem no lugar que a gente não vê, que o não dar conta ocupa tudo”.

Tudo é rio, Carla Madeira

## RESUMO

Xavier, Rafael Gonçalves. **Riscos climáticos e vulnerabilidades de plantios florestais comerciais no Brasil sob condições climáticas atuais e futuras**. 2026. 91 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2026.

O setor florestal brasileiro é sustentado principalmente por florestas plantadas, que ocupam ~10,52 milhões de hectares, movimentam mais de US\$ 15,7 bilhões em exportações e geram cerca de 2,8 milhões de empregos diretos e indiretos. Tradicionalmente, essa produção comercial tem sido dominada por espécies exóticas, como *Pinus* spp., embora cresça o interesse por espécies mais rentáveis e com maior valor agregado, como a teca (*Tectona grandis* L.f.), mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla* King) e mogno africano (*Khaya* spp.). Mesmo com avanços no manejo e silvicultura, o volume de produção e a qualidade da madeira dessas espécies poderão ser impactadas pelas mudanças climáticas projetadas. Para lidar com esses desafios, a utilização de indicadores de risco climático e bioclimáticos é uma estratégia eficaz para quantificar as vulnerabilidades das plantações brasileiras no clima atual e futuro. Embora sejam ferramentas essenciais para avaliar a magnitude, distribuição espacial, tipologia e níveis de severidade, a utilização desses indicadores ainda não foi aplicada para espécies florestais brasileiras de interesse comercial. Para preencher essa lacuna, esta dissertação aborda os riscos e vulnerabilidades de plantios comerciais de *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla* e *Khaya* spp. no Brasil, por meio do desenvolvimento e aplicação de 36 indicadores específicos sob condições climáticas atuais e futuras. Para atingir esse objetivo, foram utilizados dados diários de temperatura mínima (Tasmin, °C), média (Tas, °C) e máxima (Tasmax, °C) do ar próximo à superfície, precipitação (P; mm dia<sup>-1</sup>), umidade relativa (Hurs; %) e radiação solar global (Rsds; MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) provenientes de dezesseis Modelos Climáticos Globais (MCGs) do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projection* (NEX-GDDP-CMIP6). Neste estudo, todos os indicadores de risco desenvolvidos foram simulados para o período base (PB; 1995-2014) e projetados para o futuro próximo (FP; 2041-2060) e distante (FD; 2081-2100) sob dois cenários socioeconômicos (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Até o final do século XXI, os maiores riscos às plantações de *Pinus* spp. estão associados à quebra de produtividade (~ 84% da área com risco moderado a muito alto no futuro distante), seguido da vespa da madeira (entre 17 a 87%), seca de ponteiros causada por *Sphaeropsis sapinea* (entre 58 e 66%), estresse por temperaturas basais (entre 5 e 64%), queima de acículas por *Calonectria pteridis* (entre 12 e 53%) e estresse por deficiência hídrica (entre 32 e 45%). Para a *T. grandis*, serão o estresse por temperaturas basais (entre 88 e 98%), quebra de produtividade por deficiência hídrica (entre 84 a 88%) e a incidência de cancro (entre 53 a 59%). Por fim, *S. macrophylla* e espécies de *Khaya* spp. apresentarão maior vulnerabilidade a estresses térmicos, sobretudo associados às temperaturas basais (entre 48 a 89%) e máximas (entre 41 a 80%). Para mitigar as perdas de produtividade e minimizar os riscos fitossanitários nas plantações, a adoção de medidas de adaptação efetivas e economicamente viáveis será indispensável. Será essencial selecionar espécies e híbridos mais tolerantes a temperaturas elevadas e ao estresse hídrico intenso, adotar o manejo adequado do espaçamento e da densidade de plantio, realizar desbastes e desramas em intervalos adequados para cada espécie, e ampliar o controle da *Sphaeropsis sapinea*, *Calonectria pteridis*, *Sirex noctilio*, *Hyblaea puera* e *Hypsipyla robusta*.

**Palavras-chave:** Indicadores climáticos; Pinus; Teca; Mogno; Mudanças Climáticas

## ABSTRACT

Xavier, Rafael Gonçalves. **Climatic risks and vulnerabilities of commercial forest plantations in Brazil under current and future climate conditions**. 2026. 91 p. Dissertation (Master's in Environment and Water Resources) – Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2026.

The Brazilian forest sector is primarily supported by planted forests, which cover ~10.52 million hectares, account for more than USD 15.7 billion in exports, and generate ~2.8 million direct and indirect jobs. Traditionally, this commercial production has been dominated by exotic species such as *Pinus* spp., although there is growing interest in more profitable and high-value-added species, including teak (*Tectona grandis* L.f.), Brazilian mahogany (*Swietenia macrophylla* King), and African mahogany (*Khaya* spp.). Despite advances in forest management and silvicultural practices, the wood volume and quality of these species are likely to be impacted by climate conditions. To address these challenges, using climatic and bioclimatic risk indicators is an effective strategy for quantifying the vulnerabilities of Brazilian plantations under current and future climates. Although these indicators are essential tools for assessing magnitude, spatial distribution, typology, and severity levels, their application to Brazilian forest species of commercial interest remains limited. To fill this gap, this dissertation assesses the risks and vulnerabilities of commercial plantations of *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla*, and *Khaya* spp. in Brazil by developing and applying 36 specific indicators under current and future climate conditions. To achieve this aim, daily data of near-surface minimum (Tasmin, °C), mean (Tas, °C), and maximum (Tasmax, °C) air temperature, precipitation (P; mm day<sup>-1</sup>), relative humidity (Hurs; %), and global solar radiation (Rsds; MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) were obtained from sixteen Global Climate Models (GCMs) from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projection (NEX-GDDP-CMIP6). All risk indicators developed in this study were simulated for the baseline period (BP; 1995–2014) and projected for the near future (NF; 2041–2060) and far future (FF; 2081–2100) under two socioeconomic scenarios (SSP3-7.0 and SSP5-8.5). By the end of the 21st century, the greatest risks to *Pinus* plantations are associated with productivity losses (approximately 84% of the area under moderate to very high risk in the far future), followed by the wood wasp (*Sirex noctilio*) (17–87%), tip blight caused by *Sphaeropsis sapinea* (58–66%), stress related to basal temperatures (5–64%), needle blight caused by *Calonectria pteridis* (12–53%), and water deficit stress (32–45%). For *T. grandis*, the main risks are basal temperature stress (88–98%), productivity losses (84–88%), and canker incidence (53–59%). Lastly, *S. macrophylla* and *Khaya* spp. shown greater vulnerability to thermal stress, particularly at basal (48–89%) and maximum temperatures (41–80%). To mitigate productivity losses and minimize phytosanitary risks in these plantations, the adoption of effective and economically viable adaptation measures will be essential. These measures include selecting species and hybrids more tolerant to water and thermal stresses, implementing appropriate spacing and planting density management, performing thinning and pruning at appropriate intervals for each species, and strengthening control strategies for *Sphaeropsis sapinea*, *Calonectria pteridis*, *Sirex noctilio*, *Hyblaea puer*a, and *Hypsipyla robusta*.

**Keywords:** Climatic indicators; *Pinus*; Teak; Mahogany; Climate Change.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Localização da área de estudo e distribuição geográfica do *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla* e *Khaya* spp. no Brasil. Os registros de ocorrência das espécies foram obtidos na plataforma SpeciesLink (<https://specieslink.net/>) .....18
- Figura 2** – Representação esquemática da metodologia adotada para o cálculo dos indicadores de risco .....21
- Figura 3** - Distribuição espacial dos valores de viés médio (VM) entre a média do conjunto dos MCGs (*ensemble mean*) e os dados observados de Xavier et al., 2016. A = temperatura mínima do ar (°C), B = temperatura média do ar (°C), C = temperatura máxima do ar (°C), D = radiação solar global (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), E = precipitação mensal acumulada (mm mês<sup>-1</sup>) e F = umidade relativa do ar (%). As barras mostram a porcentagem de área com viés positivo (VM +) e viés negativo (VM -) para cada variável .....33
- Figura 4** – Distribuição espacial das mudanças projetadas (futuro menos período base) na temperatura mínima (Tasmin, °C) (painéis A-D), média (Tas, °C) (painéis E-H) e máxima (Tasmax, °C) (painéis I- L) do ar, radiação solar global (Rsds, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) (painéis M-P), precipitação anual acumulada (P<sub>anual</sub>, mm ano<sup>-1</sup>) (painéis Q-T), umidade relativa do ar (Hurs, %) (painéis U- X), evapotranspiração da cultura (ETc, mm ano<sup>-1</sup>) (painéis Y-BB) e deficiência hídrica anual (DEF<sub>anual</sub>, mm ano<sup>-1</sup>) (painéis CC-FF) para o futuro próximo (FP, 2041-2060) e distante (FD, 2081-2100), nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Todos os painéis foram representados pela média dos 16 Modelos de Circulação Geral do NEX-GDDP-CMIP6 .....35
- Figura 5** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *Pinus* spp. no Brasil baseados nos indicadores climáticos (na horizontal) para o período base (PB, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos dois cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. IH<sub>pinus</sub> = indicador de requerimento hídrico, IDH<sub>pinus</sub> = indicador de estresse por deficiência hídrica, ITB<sub>pinus</sub> = indicador de estresse por temperatura base, ITmax<sub>pinus</sub> = indicador de estresse por temperatura máxima e Iqp<sub>pinus</sub> = indicador de quebra de produtividade. Os valores de porcentagem (%) representam a área de risco em cada categoria .....39
- Figura 6** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *Pinus* spp. no Brasil baseados nos indicadores de suscetibilidade a pragas (na horizontal) para o período base (PB, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. Psir = indicador de suscetibilidade à praga *S. noctilio*, Pcin = indicador de suscetibilidade as pragas *C. atlantica* e *C. pinivora*, Ppis = indicador de suscetibilidade à praga *P. castaneus*, Pacr = indicador de suscetibilidade as pragas *Acromyrmex* e *Atta*, Ppin = indicador de suscetibilidade à praga *P. boernerii*. Os valores de porcentagem (%) representam a área de risco em cada faixa .....43
- Figura 7** - Distribuição espacial dos indicadores de riscos para o cultivo de *Pinus* spp. no Brasil baseados nos indicadores de suscetibilidade a doenças (na horizontal) para o período base (PB, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (eixo y)

nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. Drhi = indicador de suscetibilidade à doença tombamento de mudas, causada por *Rhizoctonia solani*, Darm = indicador de suscetibilidade à doença armilarirose, causada por *Armillaria spp.*, Dcal = indicador de suscetibilidade à doença queima de acículas, causada por *Calonectria pteridis*, Ddot = indicador de suscetibilidade à doença queima de acículas, causada por *Dothistroma septosporum*, Dsph = indicador de suscetibilidade à doença seca de ponteiros, casuada por *Sphaeropsis sapinea*. Os valores de porcentagem (%) representam a área de risco em cada faixa .....45

**Figura 8** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *T. grandis* no Brasil baseados nos indicadores climáticos (na horizontal) para o período base (PB,1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. IH<sub>teca</sub> = indicador de requerimento hídrico para a *T. grandis*, IDH<sub>teca</sub> = indicador de estresse por deficiência hídrica para a *T. grandis*, ITB<sub>teca</sub> = indicador de estresse por temperaturas basais para a *T. grandis*, ITmax<sub>teca</sub> = indicador de estresse por temperatura máxima para a *T. grandis*, Igeada = indicador de estresse por geadas, Iqp<sub>teca</sub> = indicador de quebra de produtividade por estresse hídrico para a *T. grandis*. Os valores de porcentagem (%) representam a área de risco em cada faixa .....47

**Figura 9** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *T. grandis* no Brasil baseados nos indicadores de suscetibilidade a pragas e doenças (na horizontal) para o período base (PB,1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. Phyb = indicador de suscetibilidade à praga *Hyblaea puera*, Pxyl = indicador de suscetibilidade à praga *Xyleborus affinis*, Pcop = indicador de suscetibilidade à praga *Coptotermes testaceus*, Pmac = indicador de suscetibilidade à praga *Maconellicoccus hirsutus* Green, Pnez = indicador de suscetibilidade à praga *Nezara viridula*, Dcer = indicador de suscetibilidade à doença murcha de *Ceratocystis*, Dlas = indicador de suscetibilidade à doença cranco, Doli = indicador de suscetibilidade à doença ferrugem. Os valores de porcentagem (%) representam a área de risco em cada faixa .....51

**Figura 10** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *S. macrophylla* e *Khaya* spp. no Brasil baseados nos indicadores climáticos, de suscetibilidade a pragas e doenças (na horizontal) para o período base (PB,1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. IH<sub>mogno</sub> = indicador de requerimento hídrico para *S. macrophylla* e *Khaya* spp., ITB<sub>mogno</sub> = indicador de estresse por temperaturas basais para *S. macrophylla* e *Khaya* spp., ITmax<sub>mogno</sub> = indicador de estresse por temperatura máxima para *S. macrophylla* e *Khaya* spp., Pgran = indicador de suscetibilidade à praga *Hypsipyla grandella*, Prob = indicador de suscetibilidade à praga *Hypsipyla robusta*, Dtha = indicador de suscetibilidade à doença mancha aureolada, Dpha = indicador de suscetibilidade à doença rubelose. Os valores de porcentagem (%) representam a área de risco em cada faixa .....53

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Lista de modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 utilizados nas simulações e projeções dos indicadores de risco para as três espécies florestais e seus respectivos centros desenvolvedores.....	22
<b>Tabela 2.</b> Faixas bioclimáticas utilizadas em cada indicador de risco do <i>Pinus</i> spp., <i>T. grandis</i> , <i>S. macrophylla</i> e <i>Khaya</i> spp .....	24
<b>Tabela 3.</b> Valores de comprimento radicular (Zr, cm), coeficiente de cultura (Kc, adimensional) e coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico (Ky, adimensional) das três principais espécies de <i>Pinus</i> spp. cultivadas no Brasil e da <i>T. grandis</i> .....	29
<b>Tabela 4.</b> Classificação dos valores normalizados dos indicadores de risco .....	30
<b>Tabela 5.</b> Estatísticas de desempenho (r, KGE e RQME) aplicadas nas variáveis temperatura mínima (Tasmin, °C), média (Tas, °C) e máxima (Tasmax, °C) do ar, radiação solar global (Rsds, MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> ), precipitação acumulada mensal (P <sub>mensal</sub> , mm mês <sup>-1</sup> ) e umidade relativa do ar (Hurs, %) para cada região brasileira, comparando as simulações da média dos 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 com os dados observados do banco de dados de Xavier et al. (2016) .....	31
<b>Tabela 6.</b> Principais medidas de adaptação identificadas na literatura para reduzir os impactos das mudanças climáticas nas plantações de <i>Pinus</i> spp., <i>Tectona grandis</i> , <i>Swietenia macrophylla</i> e <i>Khaya</i> spp. ....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CAD – Capacidade de água disponível no solo (mm)
- CMIP6 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
- CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono
- CRAS – Capacidade de retenção de água do solo (mm cm<sup>-1</sup>)
- DEF<sub>anual</sub> – Deficiência hídrica anual acumulada (mm ano<sup>-1</sup>)
- Darm – Indicador de suscetibilidade à doença armilariose (adimensional)
- Dcal – Indicador de suscetibilidade à doença queima de acículas por *Calonectria pteridis* (adimensional)
- Dcer – Indicador de suscetibilidade à doença murcha de *Ceratocystis* (adimensional)
- Ddot – Indicador de suscetibilidade à doença queima de acículas por *Dothistroma septosporum* (adimensional)
- Dlas – Indicador de suscetibilidade à doença cranco (adimensional)
- Doli – Indicador de suscetibilidade à doença ferrugem (adimensional)
- Dpha – Indicador de suscetibilidade à doença rubelose (adimensional)
- Drhi – Indicador de suscetibilidade à doença tombamento de mudas (adimensional)
- Dsph – Indicador de suscetibilidade à doença seca de ponteiros (adimensional)
- Dtha – Indicador de suscetibilidade à doença mancha aureolada (adimensional)
- ETc – Evapotranspiração anual da cultura (mm ano<sup>-1</sup>)
- ETc<sub>mensal</sub> – Evapotranspiração mensal da cultura (mm mês<sup>-1</sup>)
- ETo – Evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>)
- ETr<sub>mensal</sub> – Evapotranspiração real mensal (mm mês<sup>-1</sup>)
- FD – Futuro distante (2081-2100)
- FP – Futuro próximo (2041-2060)
- GLDAS-2 – NASA *Global Land Data Assimilation System* Versão 2
- Hurs – Umidade relativa (%)
- IDH<sub>pinus</sub> – Indicador de estresse por deficiência hídrica para o *Pinus* spp. (adimensional)
- IDH<sub>teca</sub> – Indicador de estresse por deficiência hídrica para a *T. grandis* (adimensional)
- Igeada – Indicador de estresse por geada (adimensional)
- IH<sub>mogno</sub> – Indicador de requerimento hídrico para a *S. macrophylla* e *Khaya* spp. (adimensional)
- IH<sub>pinus</sub> – Indicador de requerimento hídrico para o *Pinus* spp. (adimensional)
- IH<sub>teca</sub> – Indicador de requerimento hídrico para a *T. grandis* (adimensional)

- I<sub>qp</sub><sub>pinus</sub> – Indicador de quebra de produtividade por estresse hídrico para o *Pinus* spp. (adimensional)
- I<sub>qp</sub><sub>teca</sub> – Indicador de quebra de produtividade por estresse hídrico para a *T. grandis* (adimensional)
- ITB<sub>mogno</sub> – Indicador de temperatura base para *S. macrophylla* e *Khaya* spp. (adimensional)
- ITB<sub>pinus</sub> – Indicador de temperatura base para o *Pinus* spp. (adimensional)
- ITB<sub>teca</sub> – Indicador de temperatura base para a *T. grandis* (adimensional)
- ITmax<sub>mogno</sub> – Indicador de temperatura máxima para *S. macrophylla* e *Khaya* spp. (adimensional)
- ITmax<sub>pinus</sub> – Indicador de temperatura máxima para o *Pinus* spp. (adimensional)
- ITmax<sub>teca</sub> – Indicador de temperatura máxima para a *T. grandis* (adimensional)
- K<sub>c</sub> – Coeficiente da cultura (adimensional)
- KGE - Eficiência Kling-Gupta
- K<sub>y</sub> – Coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico (adimensional)
- LDAS – Land Data Assimilation System
- MCG – Modelo Climático Global
- NEX-GDDP-CMIP6 – NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections
- P – Precipitação diária acumulada (mm dia<sup>-1</sup>)
- Pacr – indicador de suscetibilidade a formigas cortadeiras (adimensional)
- PB – Período base (1995-2014)
- P<sub>cin</sub> – Indicador de suscetibilidade ao pulgão gigante do *Pinus* spp. (adimensional)
- P<sub>cop</sub> – Indicador de suscetibilidade à praga *Coptotermes testaceus* (adimensional)
- P<sub>gran</sub> – Indicador de suscetibilidade à praga *Hypsipyla grandella* (adimensional)
- P<sub>hyb</sub> – Indicador de suscetibilidade à praga *Hyblaea puera* (adimensional)
- P<sub>mac</sub> – Indicador de suscetibilidade à praga *Maconellicoccus hirsutus* Green (adimensional)
- P<sub>nez</sub> – Indicador de suscetibilidade à praga *Nezara viridula* (adimensional)
- P<sub>pin</sub> – Indicador de suscetibilidade ao pulgão lanígero do *Pinus* spp. (adimensional)
- P<sub>pis</sub> – Indicador de suscetibilidade à praga gorgulho do *Pinus* spp. (adimensional)
- P<sub>rob</sub> – Indicador de suscetibilidade à praga *Hypsipyla robusta* (adimensional)
- P<sub>sir</sub> – Indicador de suscetibilidade à praga vespa da madeira (adimensional)
- P<sub>xyl</sub> – Indicador de suscetibilidade à praga *Xyleborus affinis* (adimensional)
- P<sub>mensal</sub> – Precipitação mensal acumulada (mm mês<sup>-1</sup>)
- P<sub>anual</sub> – Precipitação anual acumulada (mm ano<sup>-1</sup>)
- r – Coeficiente de correlação de Pearson

RCP – *Representative Concentration Pathways*

Rds – Radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )

RQME - Raiz do quadrado médio do erro

SSP – *Shared Socioeconomic Pathways*

Tas – Temperatura média do ar próximo à superfície ( $^{\circ}\text{C}$ )

Tamax – Temperatura máxima do ar próximo à superfície ( $^{\circ}\text{C}$ )

Tasmin – Temperatura mínima do ar próximo à superfície ( $^{\circ}\text{C}$ )

VM – Viés médio

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

Zr – Profundidade do sistema radicular (m)

$\Pi$  – Produtório

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO COM REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
<b>2. DADOS E METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
2.1 DADOS CLIMÁTICOS.....	21
2.2 DEFINIÇÃO DOS INDICADORES DE RISCO .....	24
2.3 BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL DA CULTURA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	28
2.4 DADOS EDÁFICOS E CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO .....	29
2.5 OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE RISCO CLIMÁTICO .....	29
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>31</b>
3.1 VALIDAÇÃO DA PERFORMANCE DOS MODELOS CLIMÁTICOS PARA O PERÍODO BASE	31
3.2 MUDANÇAS PROJETADAS NAS VARIÁVEIS QUE ALIMENTARAM OS INDICADORES DE RISCO.....	34
3.3. AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE RISCO PARA O PINUS SPP.....	38
3.2 AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE RISCO PARA T. GRANDIS .....	46
3.3 AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE RISCO PARA S. MACROPHYLLA E KHAYA SPP.....	53
3.4 ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO PARA PLANTIOS DE PINUS SPP., T. GRANDIS, S. MACROPHYLLA E KHAYA SPP. ....	56
<b>4. CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>86</b>

## 1. INTRODUÇÃO COM REFERENCIAL TEÓRICO

As mudanças climáticas exercem impactos diretos e indiretos sobre o setor florestal, com implicações na produtividade, segurança florestal, épocas de plantio e na suscetibilidade a pragas e doenças (Shrestha, 2019; Vacek et al., 2023). Para lidar com esses desafios, uma estratégia eficaz é o uso de indicadores de risco (Dias et al., 2024; Ferreira et al., 2021; Rao et al., 2019). Indicadores são ferramentas que permitem quantificar riscos e fragilidades dos sistemas naturais (Rao et al., 2019), fornecendo informações sobre sua magnitude, distribuição espacial, tipologia, níveis de severidade e evolução espaço-temporal (Dias et al., 2024; Walsh et al., 2020). Esses indicadores são baseados nas exigências específicas de uma cultura em questão e podem abranger fatores bioclimáticos, edáficos, ambientais, além de susceptibilidades a pragas e doenças, e perdas de produtividade (Dias et al., 2024; Ferreira et al., 2021), o que lhes confere utilidade prática e direta para análises em distintos contextos climáticos. No clima futuro, a aplicação desses indicadores permite identificar desafios potenciais e auxiliar na identificação de medidas de adaptação (Dias et al., 2024). Ou seja, ao integrar dados de projeções climáticas em escalas temporais e espaciais mais amplas, os indicadores oferecem uma visão estratégica para o planejamento do manejo sustentável (Rao et al., 2019) e para a avaliação dos riscos ao cultivo.

Estudos sobre indicadores de riscos têm sido desenvolvidos e aplicados para quantificar uma série de impactos, incluindo previsão de deslizamentos (Segoni et al., 2025) e inundações (Jain et al., 2025), eventos de seca (Geng et al., 2024) e geada (Harding et al., 2015), ondas de calor (Walsh et al., 2020), incêndios florestais (Arnell et al., 2021) e quebra de produtividade de culturas agrícolas (Dias et al., 2024; Ferreira et al., 2021). No entanto, até o momento nenhum estudo desenvolveu e/ou aplicou tais indicadores específicos para espécies florestais, incluindo aquelas de interesse comercial, o que limita a compreensão dos riscos enfrentados em cenários de mudanças climáticas.

O setor florestal brasileiro é sustentado principalmente por florestas plantadas, que ocupam ~10,52 milhões de hectares, movimentam mais de US\$ 15,7 bilhões em exportações e geram cerca de 2,8 milhões de empregos diretos e indiretos (IBÁ, 2025). Entre as espécies cultivadas, o Pinus (*Pinus* spp.) se destaca por sua utilização na produção de resina (López-Álvarez et al., 2023), terebintina (Chalier et al., 2024), celulose (Kandhola et al., 2020), óleos essenciais (Moore et al., 2025), madeira para serraria (Wieruszewski et al., 2023), compensado (Santos et al., 2018) e usos ornamentais (Neto et al., 2024), ocupando aproximadamente 1,9 milhões de hectares, cerca de 19,4% das florestas plantadas (IBÁ, 2025) (Figura 1). Em contraste, espécies tropicais de madeira nobre, como a teca (*Tectona grandis* L.f.), o mogno

brasileiro (*Swietenia macrophylla* King) e o mogno africano (*Khaya* spp.), embora cultivadas em menor escala, se destacam por seu elevado retorno econômico, com preços de mercado variando de ~US\$ 450 a 11.000 por m<sup>3</sup> (Herrera-Feijoo et al., 2023; ITTO, 2025). Essas espécies são direcionadas principalmente à produção de móveis de alto padrão, construção naval, instrumentos musicais e aplicações na medicina (Mishra et al., 2025; Momolli et al., 2024; Reis et al., 2019; Wang et al., 2022), além de contribuírem com múltiplos serviços ecossistêmicos, como sequestro de carbono, quebra-ventos e diversificação da microfauna do solo (Venkatesh et al., 2024), o que justifica a expansão recente de seus plantios comerciais em diferentes regiões do país (Figura 1).



**Figura 1** – Localização da área de estudo e distribuição geográfica do *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla* e *Khaya* spp. no Brasil. Os registros de ocorrência das espécies foram obtidos na plataforma SpeciesLink (<https://specieslink.net/>).

Apesar das adaptações e dos avanços no manejo, a qualidade da madeira e o volume de produção poderão ser impactados pelas mudanças climáticas projetadas (Fagundes et al., 2025;

Olmedo et al., 2023). Em comum, as espécies de estudo podem ser particularmente vulneráveis a tais mudanças por: i) ocorrerem em regiões tropicais e subtropicais que coincidem com *hotspots* climáticos globais (Casaroli et al., 2018; Fagundes et al., 2025); ii) dependerem de disponibilidade hídrica intermitente para manutenção das taxas de crescimento e qualidade da madeira (Galeano et al., 2019) e iii) não possuem estudos que investiguem os riscos dos plantios em cenários futuros, dificultando a definição de estratégias eficazes de manejo adaptativo.

Além disso, essas espécies apresentam suscetibilidade a pragas e doenças, o que pode resultar em redução da qualidade da madeira e aumento dos custos de controle fitossanitário. Por exemplo, em plantações brasileiras de *Pinus* spp., os danos causados pela vespa *Sirex noctilio* chegam a cerca de US\$ 53 milhões por ano, incluindo redução na qualidade da madeira e aumento nos custos de colheita (Penteado et al., 2024). Em *T. grandis*, ataques da lagarta *Hyblaea puera* podem causar desfolha, deformações no fuste e perdas de produtividade, com redução do volume comercializável de até 44% (Venkatesh et al., 2024). De modo similar, brocas do gênero *Hypsipyla* danificam o meristema apical e a formação do fuste de *S. macrophylla* e *Khaya* spp., podendo levar à perda de 70 a 100% das plantas nos primeiros anos, especialmente em condições de alta infestação e ausência de medidas de controle (Zanetti et al., 2017; Lemes et al., 2019). Dessa forma, esse cenário pode ser exacerbado no clima futuro, uma vez que um aumento maior ou igual a 2 °C na temperatura do ar pode acelerar o ciclo de desenvolvimento das pragas, possibilitando até cinco ciclos adicionais por estação (Shrestha, 2019).

Com isso, os aumentos projetados na temperatura do ar (entre 0,5 e ~5,5 °C), combinados com redução da umidade (~10%) e alterações espacialmente heterogêneas na precipitação (aumentos na região Sul e reduções mais intensas nas regiões Norte e Centro-Oeste) para o Brasil ao longo do século XXI (Dias et al., 2024; Florêncio et al., 2022), poderão intensificar vulnerabilidades e susceptibilidades ao cultivo de *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla* e *Khaya* spp. Diante dessas mudanças, é essencial desenvolver e aplicar indicadores de risco capazes de quantificar os impactos gerados por condições climáticas adversas e orientar os tomadores de decisão a adaptar possíveis impactos negativos. Esses indicadores são ferramentas estratégicas para subsidiar o planejamento florestal resiliente ao clima e orientar a tomada de decisões estratégicas. Além disso, permitem antecipar ameaças à produção florestal em diferentes escalas espaciais e temporais.

Para quantificar os impactos das projeções climáticas sobre os riscos associados ao cultivo dessas espécies, duas abordagens devem ser realizadas de forma integrada. A primeira

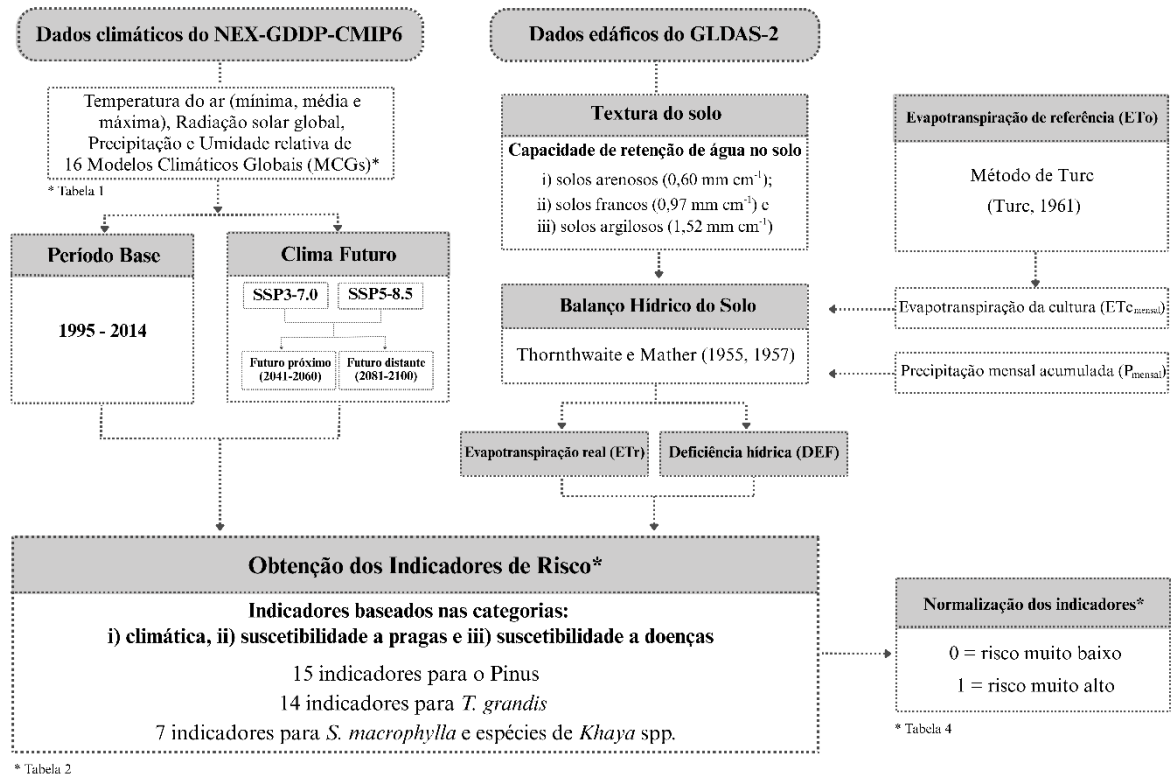
consiste no desenvolvimento de um conjunto de indicadores específicos, baseados nos requerimentos das plantações em relação a múltiplos fatores, incluindo suprimento hídrico, estresses hídrico e térmico, susceptibilidades a pragas e doenças, e quebra de produtividade (Dias et al., 2024). Na segunda etapa, esses indicadores são alimentados com as saídas de Modelos de Circulação Geral (MCGs), permitindo quantificar os riscos ao cultivo no clima futuro (Ferreira et al., 2021; Dias et al., 2024).

No entanto, as saídas brutas dos MCGs frequentemente operam com resolução grosseira (~100 a 250 km latitude/longitude), o que limita sua aplicabilidade em estudos que exigem maior resolução espacial. Para contornar esse problema, os MCGs do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) representam o que há de mais avançado em termos de modelos climáticos com alta resolução espacial (Thrasher et al., 2022; Ribeiro et al., 2024). A precisão dos dados do NEX-GDDP-CMIP6 é aprimorada por meio de um processo de duas etapas envolvendo redução de escala estatística e correção de viés (Chanda et al., 2025; Thrasher et al., 2022), integrando cenários socioeconômicos e de forçamento radiativo (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSPs). Com isso, essa abordagem garante maior confiabilidade na utilização dos dados do NEX-GDDP-CMIP6 em indicadores climáticos e bioclimáticos (Dias et al., 2024).

Dessa forma, ao acoplar os dados gerados pelos MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 nos indicadores de risco, é possível mapear os padrões espaço-temporais de vulnerabilidade e identificar áreas suscetíveis aos riscos em condições climáticas atuais e futuras (Dias et al., 2024; Ferreira et al., 2021). Apesar da importância, essa abordagem ainda não foi aplicada para nenhuma das espécies mencionadas em nenhuma localidade brasileira. Devido à escassez de estudos dessa natureza, três questões práticas permanecem sem resposta: (i) Os riscos climáticos associados ao cultivo de *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla* e *Khaya* spp. serão potencializados pelas mudanças climáticas? (ii) Pragas e doenças representarão ameaças adicionais ao longo do século XXI? e (iii) Em caso positivo, quais medidas de adaptação (biológicas, químicas e silviculturais) serão mais eficazes para mitigar esses impactos? Para responder essas questões, este estudo desenvolveu e aplicou 36 indicadores considerando condições climáticas atuais e futuras, e delineou um conjunto de medidas adaptativas para fortalecer a adaptação das espécies e minimizar perdas financeiras futuras.

## 2. DADOS E METODOLOGIA

A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas deste estudo, sintetizando o fluxo de dados e as principais etapas para obtenção dos indicadores de risco climático. O detalhamento de cada etapa é apresentado nas seções subsequentes.



**Figura 2** – Representação esquemática da metodologia adotada para o cálculo dos indicadores de risco.

### 2.1 Dados climáticos

Foram utilizados dados diários de temperatura mínima (T<sub>asmin</sub>, °C), média (T<sub>as</sub>, °C) e máxima (T<sub>asmax</sub>, °C) do ar próximo à superfície, precipitação (P; mm dia<sup>-1</sup>), umidade relativa média próxima à superfície (H<sub>urs</sub>; %) e radiação solar global (R<sub>sds</sub>; MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) provenientes de dezesseis MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 (versão 1.0) (Tabela 1) para cada ponto de grade do domínio de estudo (Figura 1). A temperatura média do ar próximo à superfície (T<sub>as</sub>, °C) foi obtida por meio da média entre T<sub>asmin</sub> e T<sub>asmax</sub>.

O conjunto de dados NEX-GDDP-CMIP6, desenvolvido pelo *Climate Analytics Group* em parceria com o *NASA Ames Research Center*, é derivado dos modelos climáticos do CMIP6 e está acessível por meio do portal do *NASA Center for Climate Simulation* (em: <https://nex-gddp-cmip6.s3.us-west-2.amazonaws.com/index.html#NEX-GDDP-CMIP6/>). Os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 apresentam resolução espacial padronizada e refinada de 0,25°

(latitude/longitude), sendo ideais para estudos como esse, que demandam alta resolução espacial (Thrasher et al., 2022). Esses modelos foram selecionados com base na cobertura completa de dados para todas as variáveis deste estudo e excelente desempenho na reprodução dos padrões climáticos no Brasil (Dias et al., 2024; Qiu et al., 2020).

**Tabela 1** - Lista de modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6 utilizados nas simulações e projeções dos indicadores de risco para as três espécies florestais e seus respectivos centros desenvolvedores.

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

Todos os indicadores de risco (detalhados na seção 2.2) foram simulados para o período base (PB, 1995-2014) e projetados para o futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) em dois SSPs: 3-7.0 e 5-8.5. O cenário SSP3-7.0 representa um futuro com altas emissões de gases de efeito estufa e esforços limitados de mitigação, com forçamento radiativo superior a  $7,0 \text{ W m}^{-2}$  e concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de aproximadamente 900 ppm até 2100 (Hegre et al., 2016; O'Neill et al., 2017). Já o SSP5-8.5 representa um futuro de alto crescimento populacional, fragmentação social e política, emissões elevadas de gases de efeito estufa e forte dependência de combustíveis fósseis, com políticas climáticas ineficazes. Nesse cenário, prevê-se que o forçamento radiativo exceda  $8,5 \text{ W m}^{-2}$  e a concentração de  $\text{CO}_2$  atinja cerca de 1100 ppm até 2100 (Hegre et al., 2016).

Os dados diários dos MCGs (Tasmin, Tas, Tasmx, P, Hurs e Rsds) foram validados para o PB (1995-2014) comparando-os com os dados observados fornecidos por Xavier et al. (2016). Esse banco de dados apresenta alta qualidade espaço-temporal, pois deriva da interpolação de dados observados em 735 estações meteorológicas e 3625 pluviômetros, com resolução de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  latitude/longitude (Xavier et al., 2016), a mesma resolução dos MCGs. Para essa etapa, foram utilizadas as estatísticas: viés médio (VM, Equação 1), coeficiente de correlação de Pearson (r, Equação 2), eficiência Kling-Gupta (KGE, Equação 3) e a raiz do quadrado médio do erro (RQME, Equação 4), calculadas para cada variável climática (Tasmin, Tas, Tasmx, P, Hurs e Rsds) considerando a média dos 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 (*ensemble mean*).

$$\text{VM} = \bar{S} - \bar{O} \quad (1)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}) \times (O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \times \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)}} \quad (2)$$

$$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o} - 1\right)^2} \quad (3)$$

$$\text{RQME} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (4)$$

Em que: VM = viés médio entre os dados simulados e observados,  $\bar{S}$  e  $\bar{O}$  = valores médios dos dados simulados e observados, respectivamente, r = coeficiente de correlação de Pearson (adimensional),  $S_i$  = valores diários dos dados simulados,  $O_i$  = valores diários dos dados observados, n = número de observações/simulações, KGE = eficiência de Kling-Gupta (adimensional),  $\mu_s$  = média diária dos dados simulados,  $\mu_o$  = média diária dos dados observados,  $\sigma_s$  = Desvio padrão dos dados simulados,  $\sigma_o$  = Desvio padrão dos dados observados, RQME = raiz do quadrado médio do erro. Foram considerados os dados simulados pelo *ensemble mean*

dos 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 e os dados observados de Xavier et al. (2016), ambos para o PB (1995-2014).

## 2.2 Definição dos indicadores de risco

Foram desenvolvidos quinze indicadores de risco para o *Pinus* spp., quatorze para a *T. grandis* e sete indicadores para *S. macrophylla* e espécies do gênero *Khaya*, baseados em três categorias: climática, suscetibilidade a pragas e suscetibilidade a doenças. Todas as faixas bioclimáticas de cada um dos 36 indicadores foram baseadas em ampla revisão bibliográfica (Tabela 2).

**Tabela 2** - Faixas bioclimáticas utilizadas em cada indicador de risco do *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla* e *Khaya* spp.

Indicador	Categoria	Nome científico	Sigla	Faixas bioclimáticas	Referências
<i>Pinus</i> spp.					
Requerimento hídrico	Climática		IH <sub>pinus</sub>	Número de anos com: P <sub>anual</sub> ≤ 900 mm ano <sup>-1</sup>	Booth et al. (2002)
Estresse por deficiência hídrica	Climática		IDH <sub>pinus</sub> <sup>1</sup>	Número de anos com: DEF <sub>anual</sub> ≥ 309 mm ano <sup>-1</sup>	
Estresse por temperaturas basais	Climática		ITB <sub>pinus</sub>	Número de dias com: Tas ≤ 15 °C ou Tas ≥ 31 °C	Gonzalez-Benecke et al. (2016)
Estresse por temperatura máxima	Climática		ITmax <sub>pinus</sub>	Número de dias com: Tasmax ≥ 38 °C	Gonzalez-Benecke et al. (2016)
Quebra de produtividade por estresse hídrico	Climática		Iqp <sub>pinus</sub>	Quebra de produtividade por estresse hídrico (entre 0 e 1), obtida pela Equação 5	Dias et al. (2024)
Vespa da madeira	Suscetibilidade a pragas	<i>Sirex noctilio</i> Fabricius	Psir	Número de dias com: 24°C ≤ Tas ≤ 30°C Hurs ≥ 65%	Carnegie et al. (2006); Ireland et al. (2018)
Pulgões gigantes do Pinus	Suscetibilidade a pragas	<i>Cinara atlantica</i> Wilson; <i>Cinara pinivora</i> Wilson	Pcin	Número de dias com: 15°C ≤ Tas ≤ 25°C Hurs ≥ 70%	Castro-Guedes et al. (2016); Kairo e Murphy (1999)
Gorgulho do Pinus	Suscetibilidade a pragas	<i>Pissodes castaneus</i> (De Geer)	Ppis	Número de dias com: 15°C ≤ Tas ≤ 23°C Hurs ≥ 75%	Zaleski (2009)

Formigas cortadeiras	Suscetibilidade a pragas	<i>Acromyrmex</i> (Mayr, 1865); <i>Atta</i> (Fabricius, 1804)	Pacr	Número de dias com: $18^{\circ}\text{C} \leq \text{Tas} \leq 26^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 40\%$	Nickele et al. (2016); Giesel, et al. (2013)
Pulgão lanígero do Pinus	Suscetibilidade a pragas	<i>Pineus boernerii</i> Annand	Ppin	Número de dias com: $16^{\circ}\text{C} \leq \text{Tas} \leq 22^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Rachmatsyah et al. (2012)
Tombamento de mudas	Suscetibilidade a doenças	<i>Rhizoctonia solani</i>	Drhi	Número de dias com: $21^{\circ}\text{C} \leq \text{Tas} \leq 30^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Resende et al. (2023); Akber e Fang (2024)
Armillaríose	Suscetibilidade a doenças	<i>Armillaria</i> spp.	Darm	Número de dias com: $15^{\circ}\text{C} \leq \text{Tas} \leq 25^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Resende et al. (2023); Lech et al. (2023)
Queima de acículas	Suscetibilidade a doenças	<i>Calonectria pteridis</i> Crous	Dcal	Número de dias com: $30^{\circ}\text{C} \leq \text{Tas} \leq 33^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Crous e Wingfield (1994); Graça et al. (2009); Resende et al. (2023)
		<i>Dothistroma septosporum</i>	Ddot	Número de dias com: $18^{\circ}\text{C} \leq \text{Tas} \leq 25^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Graça et al. (2009); Resende et al. (2023)
Seca de ponteiros	Suscetibilidade a doenças	<i>Sphaeropsis sapinea</i>	Dsph	Número de dias com: $22^{\circ}\text{C} \leq \text{Tas} \leq 34^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Georgieva e Hlebarka (2016); Desprez-Loustau et al. (2006)
<i>T. grandis</i>					
Requerimento hídrico	Climática		IH <sub>teca</sub>	Número de anos com: $P_{\text{anual}} \leq 1200 \text{ mm ano}^{-1}$	Jerez-Rico et al., (2017); Reis et al. (2023)
Estresse por deficiência hídrica	Climática		IDH <sub>teca</sub> <sup>1</sup>	Número de anos com: $\text{DEF}_{\text{anual}} \geq 402 \text{ mm ano}^{-1}$	
Estresse por temperaturas basais	Climática		ITB <sub>teca</sub>	Número de dias com: $\text{Tas} \leq 22^{\circ}\text{C}$ ou $\text{Tas} \geq 27^{\circ}\text{C}$	Jerez-Rico et al., (2017); Reis et al. (2023)
Estresse por temperatura máxima	Climática		ITmax <sub>teca</sub>	Número de dias com: $\text{Tasmax} \geq 43^{\circ}\text{C}$	Jerez-Rico et al., (2017)
Estresse por geada	Climática		Igeada	Número de dias com: $\text{Tasmin} \leq 4^{\circ}\text{C}$	Dias et al. (2024)
Quebra de produtividade por estresse hídrico	Climática		Iqp <sub>teca</sub>	Quebra de produtividade por estresse hídrico (entre 0 e 1), obtida pela Equação 5	Dias et al. (2024)
Lagarta da Teca	Suscetibilidade a pragas	<i>Hyblaea puera</i> (Cramer, 1777)	Phyb	Número de dias com: $24^{\circ}\text{C} \leq \text{Tas} \leq 28^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Dhobe et al. (2014); Murugan et al. (1999)

Broca da madeira	Suscetibilidade a pragas	<i>Xyleborus affinis</i> (Eichhoff, 1867)	Pxyl	Número de dias com: $21^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 30^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Zelaya (1985); Rojano et al. (2021)
Cupim de cerne	Suscetibilidade a pragas	<i>Coptotermes testaceus</i> (Linnaeus, 1758)	Pcop	Número de dias com: $15^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 25^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Pozo-Santiago et al. (2020); Reis et al. (2023)
Cochonilha rosada	Suscetibilidade a pragas	<i>Maconellicoccus hirsutus</i> (Green, 1908)	Pmac	Número de dias com: $27^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 32^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Chong, Roda e Mannion (2008); Reddy et al. (2023)
Percevejo verde	Suscetibilidade a pragas	<i>Nezara viridula</i> (Linnaeus, 1758)	Pnez	Número de dias com: $20^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 26^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Cividanes e Parra (1994); Hirose, Panizzi e Cattelan (2006)
Murcha de <i>Ceratocystis</i>	Suscetibilidade a doenças	<i>Ceratocystis fimbriata</i> Ellis & Halsted, 1890	Dcer	Número de dias com: $24^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 27^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Ferreira, Alfenas e Mafia (2013); Oliveira et al. (2015); Stahr e Quesada-Ocampo (2020)
Crânco da Teca	Suscetibilidade a doenças	<i>Lasiodiplodia theobromae</i> (Pat.) Griffon & Maubl., 1909	Dlas	Número de dias com: $27^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 35^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Borges (2014); Félix et al. (2016); Venkatech et al. (2023)
Ferrugem da Teca	Suscetibilidade a doenças	<i>Olivea tectonae</i> (Racib.) Cummins	Doli	Número de dias com: $24^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 30^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Hackbarth et al. (2014); Sales et al. (2017)
<i>S. macrophylla</i> e <i>Khaya</i> spp.					
Requerimento hídrico	Climática		IH <sub>mogno</sub>	Número de anos com: $P_{\text{anual}} \leq 850 \text{ mm ano}^{-1}$	Casaroli et al. (2018)
Estresse por temperaturas basais	Climática		ITB <sub>mogno</sub>	Número de dias com: $T_{as} \leq 23^{\circ}\text{C}$ ou $T_{as} \geq 29^{\circ}\text{C}$	Casaroli et al. (2018)
Estresse por temperatura máxima	Climática		ITmax <sub>mogno</sub>	Número de dias com: $T_{\text{max}} \geq 35^{\circ}\text{C}$	Casaroli et al. (2018)
Broca do mogno brasileiro	Suscetibilidade a pragas	<i>Hypsipyla grandella</i> (Zeller, 1848)	Pgran	Número de dias com: $24^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 30^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Berti Filho (1973); Taveras et al. (2004)
Broca do mogno africano	Suscetibilidade a pragas	<i>Hypsipyla robusta</i> (Moore, 1886)	Prob	Número de dias com: $22^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 29^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Mo (1996); Effraim (1996)
Mancha aureolada	Suscetibilidade a doenças	<i>Thanatephorus cucumeris</i> (A.B. Frank) Donk, 1958	Dtha	Número de dias com: $20^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 22^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Anderson et al. (1972)
Rubelose	Suscetibilidade a doenças	<i>Phanerochaete salmonicolor</i>	Dpha	Número de dias com: $24^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 27^{\circ}\text{C}$ Hurs $\geq 75\%$	Kimati et al. (1997)

(Berk. &  
Broome) Julich

$IH_{pinus}$  = indicador de requerimento hídrico para o *Pinus* spp.,  $P_{anual}$  = precipitação acumulada anual ( $mm\ ano^{-1}$ ),  $IDH_{pinus}$  = indicador de estresse por deficiência hídrica para o *Pinus* spp.,  $DEF_{anual}$  = deficiência hídrica anual acumulada ( $mm\ ano^{-1}$ ),  $ITB_{pinus}$  = estresse por temperaturas basais para o *Pinus* spp.,  $Tas$  = temperatura média do ar ( $^{\circ}C$ ),  $ITmax_{pinus}$  = estresse por temperatura máxima para o *Pinus* spp.,  $Tamax$  = temperatura máxima do ar ( $^{\circ}C$ ),  $Iqp_{pinus}$  = indicador de quebra de produtividade por estresse hídrico para o *Pinus* spp.,  $Psir$  = indicador de suscetibilidade à praga vespa da madeira,  $Pcin$  = indicador de suscetibilidade ao pulgão gigante do Pinus,  $Ppis$  = indicador de suscetibilidade à praga gorgulho do Pinus,  $Pacr$  = indicador de suscetibilidade à formigas cortadeiras,  $Ppin$  = indicador de suscetibilidade ao pulgão lanígero do Pinus,  $Drhi$  = indicador de suscetibilidade à doença tombamento de mudas,  $Darm$  = indicador de suscetibilidade à doença armilariose,  $Dcal$  = indicador de suscetibilidade à doença queima de acículas por *Calonectria pteridis*,  $Ddot$  = indicador de suscetibilidade à doença queima de acículas por *Dothistroma septosporum*,  $Dsph$  = indicador de suscetibilidade à doença seca de ponteiros.  $IH_{teca}$  = indicador de requerimento hídrico para a *T. grandis*,  $IDH_{teca}$  = indicador de estresse por deficiência hídrica para a *T. grandis*,  $ITB_{teca}$  = indicador de estresse por temperaturas basais para a *T. grandis*,  $ITmax_{teca}$  = indicador de estresse por temperatura máxima para a *T. grandis*,  $Igeada$  = indicador de estresse por geadas para a *T. grandis*,  $Iqp_{teca}$  = indicador de quebra de produtividade por estresse hídrico para a *T. grandis*,  $Phyb$  = indicador de suscetibilidade à praga *Hyblaea puera*,  $Pxyl$  = indicador de suscetibilidade à praga *Xyleborus affinis*,  $Pcop$  = indicador de suscetibilidade à praga *Coptotermes testaceus*,  $Pmac$  = indicador de suscetibilidade à praga *Maconelliococcus hirsutus* Green,  $Pnez$  = indicador de suscetibilidade à praga *Nezara viridula*,  $Dcer$  = indicador de suscetibilidade à doença murcha de *Ceratocystis*,  $Dlas$  = indicador de suscetibilidade à doença cranco,  $Doli$  = indicador de suscetibilidade à doença ferrugem.  $IH_{mogno}$  = indicador de requerimento hídrico para *S. macrophylla* e *Khaya* spp.,  $ITB_{mogno}$  = indicador de estresse por temperaturas basais para *S. macrophylla* e *Khaya* spp.,  $ITmax_{mogno}$  = indicador de estresse por temperatura máxima para *S. macrophylla* e *Khaya* spp.,  $Pgran$  = indicador de suscetibilidade à praga *Hypsipyla grandella*,  $Prob$  = indicador de suscetibilidade à praga *Hypsipyla robusta*,  $Dtha$  = indicador de suscetibilidade à doença mancha aureolada,  $Dpha$  = indicador de suscetibilidade à doença rubelose. <sup>1</sup>O indicador de estresse por deficiência hídrica foi obtido por meio da média do produto entre a capacidade de retenção de água no solo ( $CRAS$ ,  $mm\ cm^{-1}$ ) e o comprimento radicular médio do *Pinus* spp. e da *T. grandis* ( $Zr$ ) (detalhado na seção 2.4). Todos os indicadores são adimensionais, devido ao processo de normalização (detalhado na seção 2.5).

Todos os indicadores foram calculados em escala diária para cada período (PB, FP e FD nos dois SSPs), exceto o  $IH_{pinus}$ ,  $IH_{teca}$ ,  $IH_{mogno}$  e o  $IDH_{pinus}$  e  $IDH_{teca}$ , obtidos em escala anual. Os indicadores  $Iqp_{pinus}$  e  $Iqp_{teca}$  representam a quebra da produtividade da cultura devido à deficiência de água no solo (Dias et al., 2024; Ferreira et al., 2021) expressa por (Rao et al., 1988):

$$Iqp = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - Ky * (1 - \frac{ETr_{mensal}}{ETC_{mensal}})] \quad (5)$$

Em que:  $Iqp$  = indicador de quebra de produtividade (adimensional) obtido para cada ano nos três períodos (PB, FP e FD nos dois SSPs),  $\prod$  = produto,  $i$  = meses de simulação e projeção do indicador, desde o 1º mês = janeiro até 12º mês = dezembro,  $n$  = duração do ciclo total (240 meses),  $Ky$  = coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico específico para o *Pinus* spp. e *T. grandis* (Tabela 3) (adimensional),  $ETr_{mensal}$  = Evapotranspiração real mensal ( $mm\ mês^{-1}$ ) e  $ETC_{mensal}$  = evapotranspiração mensal da cultura ( $mm\ mês^{-1}$ ). Os valores de  $ETr_{mensal}$  e  $ETC_{mensal}$  foram obtidos pelo balanço hídrico sequencial da cultura (detalhado na seção 2.3).

Para *S. macrophylla* e *Khaya* spp. o indicador  $I_{qp}$  não foi calculado devido a ausência de informações na literatura sobre comprimento radicular, coeficiente da cultura e coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico.

### 2.3 Balanço hídrico sequencial da cultura e evapotranspiração de referência

Neste estudo, o balanço hídrico sequencial da cultura foi calculado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955, 1957) com as inicializações propostas por Dourado-Neto et al. (2010). Esse método fornece os extratos de água no solo necessários para o cálculo da  $I_{qp}$  ( $ET_{r\text{mensal}}$ ) e IDH para qualquer ponto de grade e para locais de clima árido, semi-árido e úmido, que possuem mais de uma estação seca por ano (Dias et al., 2024; Martins et al., 2022; Dourado-Neto et al., 2010).

Esse método exige dados acumulados mensais de  $P_{\text{mensal}}$  ( $\text{mm mês}^{-1}$ ) e  $ET_{c\text{mensal}}$  ( $\text{mm mês}^{-1}$ ), ambos calculados para cada ano dos intervalos de tempo (PB, FP e FD, sob os cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5) e a capacidade de armazenamento da água disponível no solo (CAD, mm) (detalhado na seção 2.4). Para estabilização do balanço hídrico sequencial, foi realizada uma simulação adicional de um ano anterior ao PB.

A  $ET_c$  diária foi obtida pelo produto entre a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ) e o  $K_c$  (Tabela 3) (Allen et al., 1998). Neste estudo, a  $ET_o$  foi estimada pelo método de Turc (Turc, 1961) (Equação 6) devido à sua excelente performance espaço-temporal e adequação às condições climáticas brasileiras (Monteiro et al., 2021).

$$ET_o = (0.3107 * R_{sds} + 0.65) * \frac{T_{as} * at}{T_{as} + 15} \quad (6)$$

Em que:  $ET_o$  = evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $R_{sds}$  = radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ),  $T_{as}$  = temperatura média do ar próximo à superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $at$  = fator de umidade relativa (adimensional) dada por:  $at = \begin{cases} 1, & \text{se Hurs} \geq 50\% \\ 1 + \frac{50 - \text{Hurs}}{70}, & \text{se Hurs} < 50\% \end{cases}$ ,  $\text{Hurs}$  = umidade relativa média do ar próxima a superfície (%).

**Tabela 3** - Valores de comprimento radicular (Zr, cm), coeficiente de cultura (Kc, adimensional) e coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico (Ky, adimensional) das três principais espécies de *Pinus* spp. cultivadas no Brasil e da *T. grandis*.

Espécies	Zr	Kc (adimensional) <sup>1</sup>	Sensibilidade à deficiência hídrica	Ky (adimensional) <sup>1</sup>	Referências
<i>Pinus taeda</i>	240		Alta		Allen et al. (1998); Castro et al. (2008);
<i>Pinus elliottii</i>	300	1,0	Alta	1,2	Gurski et al. (2017); Shimizu (2008);
<i>Pinus caribaea</i>	370		Moderada		Stone e Kalisz (1991).
<i>Tectona grandis</i>	390	1,2	Alta	1,1	Attarod et al. (2006)

<sup>1</sup> Valores referem-se à fase adulta das espécies, de 120 a 240 meses para o *Pinus* spp. e de 120 a 300 para a *T. grandis*, que representam as condições que ocorrem em ~90% do ciclo total da cultura (Neto et al., 2024; Reis et al., 2023).

#### 2.4 Dados edáficos e capacidade de armazenamento de água no solo

A CAD foi obtida pelo produto entre o comprimento radicular (Zr, cm. Tabela 3) e a capacidade de retenção de água no solo (CRAS, mm cm<sup>-1</sup>). Os valores de CRAS foram obtidos para cada ponto de grade da Figura 1 a partir de dados de textura do solo fornecidos pelo NASA *Global Land Data Assimilation System* Versão 2 (GLDAS-2), disponíveis no portal *Land Data Assimilation System* (LDAS) (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/soils>). Os dados de textura do solo têm uma resolução espacial de 0,25° x 0,25° (latitude/longitude), o que permite uma cobertura detalhada das propriedades do solo em grande escala. Por brevidade, as dezesseis classes texturais do banco de dados GLDAS-2 foram agrupadas em três classes para englobar as texturas predominantes dos solos do Brasil (Battisti e Sentelhas, 2019; Elli et al., 2020): i) solo predominantemente arenoso com baixa CRAS (0,60 mm cm<sup>-1</sup>), ii) solo predominantemente franco com média CRAS (0,97 mm cm<sup>-1</sup>) e iii) solo predominantemente argiloso com alta CRAS (1,52 mm cm<sup>-1</sup>).

#### 2.5 Obtenção e avaliação dos indicadores de risco climático

Todos os 36 indicadores de risco, exceto o  $I_{qp_{pinus}}$  e  $I_{qp_{teca}}$ , foram normalizados (Equação 7) para valores entre 0 a 1, permitindo intercomparações e avaliações (Dias et al., 2024; Ferreira et al., 2021). Valores normalizados próximos de 0 indicam baixo risco para as espécies, enquanto valores próximos de 1 indicam alto risco, associado a condições

desfavoráveis que podem impactar negativamente o desenvolvimento e a qualidade da madeira. Os indicadores  $I_{pp_{pinus}}$  e  $I_{pp_{teca}}$  não foram normalizados, uma vez que seus valores já variam entre 0 (sem quebra de produtividade) e 1 (máxima quebra de produtividade). A normalização foi realizada pelo método descrito por Coutinho, Silva e Delgado (2016) e Dias et al. (2024):

$$IN_{ij} = \frac{Ind_{ij} - Ind_{min}}{Ind_{max} - Ind_{min}} \quad (7)$$

Em que:  $IN_{ij}$  = Indicador normalizado 'i' no ponto de grade 'j' (adimensional e entre 0 e 1),  $Ind_{ij}$  = valor do indicador 'i' no ponto de grade 'j' para cada período (PB, FP e FD e cenário SSP),  $Ind_{min}$  = valor mínimo que o indicador 'i' pode receber (melhor situação = baixo risco) em cada período e SSP,  $Ind_{max}$  = valor máximo que o indicador 'i' pode receber (pior situação = alto risco) em cada período e SSP.

Os valores normalizados para cada indicador foram agrupados em cinco faixas de risco de acordo com Dias et al. (2024) (Tabela 4):

**Tabela 4** - Classificação dos valores normalizados dos indicadores de risco.

Faixa de risco	Intervalo de valores normalizados
Muito baixo	$IN_{ij} \leq 0.2$
Baixo	$0.2 < IN_{ij} \leq 0.4$
Moderado	$0.4 < IN_{ij} \leq 0.6$
Alto	$0.6 < IN_{ij} \leq 0.8$
Muito alto	$IN_{ij} > 0.8$

As mudanças projetadas nos indicadores de risco climático para as espécies foram analisadas em duas etapas: (i) considerando mudanças nas variáveis  $T_{smin}$ ,  $T_{as}$ ,  $T_{smax}$ ,  $R_{sds}$ ,  $H_{urs}$ ,  $P_{anual}$ ,  $ET_c$  e  $DEF_{anual}$  que alimentam os indicadores; e (ii) considerando os padrões espaciais e temporais de cada indicador normalizado no PB e nos períodos futuros (FP e FD) nos dois SSPs (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Na etapa i, o termo “mudança” se refere às diferenças entre os valores médios projetados nos períodos futuros (FP e FD, nos dois SSPs) e os respectivos valores médios no PB. Nas duas etapas foi utilizado a média (*ensemble mean*) dos 16 MCGs, para minimizar possíveis incertezas associadas a abordagem individual de cada MCG do NEX-GDDP-CMIP6 (Dias et al., 2024; Florêncio et al., 2022; Ribeiro et al., 2024).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Validação da performance dos modelos climáticos para o período base

O desempenho da média (*ensemble mean*) dos 16 MCGs utilizados foi avaliado com base nas estatísticas  $r$ , KGE e RQME (Tabela 5) e por meio do padrão espacial do VM (Figura 3).

**Tabela 5.** Estatísticas de desempenho aplicadas nas variáveis temperatura mínima (Tasmin, °C), média (Tas, °C) e máxima (Tasmax, °C) do ar, radiação solar global (Rsds, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), precipitação acumulada mensal (P<sub>mensal</sub>, mm mês<sup>-1</sup>) e umidade relativa do ar (Hurs, %) para cada região brasileira, comparando as simulações da média dos 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 com os dados observados do banco de dados de Xavier et al. (2016).

Coeficiente de correlação de Pearson (r) – adimensional						
	Tasmin	Tas	Tasmax	Rsds	P <sub>mensal</sub>	Hurs
Sul	0,909	0,921	0,903	0,928	0,614	0,316
Sudeste	0,918	0,867	0,700	0,758	0,783	0,664
Centro-Oeste	0,866	0,696	0,700	0,520	0,849	0,848
Norte	0,734	0,613	0,737	0,487	0,823	0,706
Nordeste	0,763	0,788	0,800	0,721	0,695	0,753
Eficiência Kling-Gupta (KGE) <sup>1</sup> - adimensional						
Sul	0,957	0,959	0,943	0,769	0,717	0,317
Sudeste	0,840	0,780	0,704	0,883	0,963	0,033
Centro-Oeste	0,764	0,716	0,905	0,302	0,959	0,056
Norte	0,801	0,909	0,881	0,587	0,965	0,511
Nordeste	0,726	0,756	0,898	0,860	0,853	0,451
Raiz do Quadrado Médio do Erro <sup>2</sup> (RQME)						
Sul	0,595	0,572	0,579	2,337	11,235	11,043
Sudeste	0,668	0,636	0,616	1,863	7,388	11,400
Centro-Oeste	1,065	1,106	1,115	0,924	8,691	10,136
Norte	0,152	0,197	0,266	0,945	7,129	7,623
Nordeste	0,396	0,325	0,302	0,629	8,691	9,169

<sup>1</sup> A classificação de desempenho pelo Kling-Gupta Efficiency (KGE) segue os seguintes critérios: desempenho muito bom,  $0,70 < KGE \leq 1,00$ ; desempenho bom,  $0,60 < KGE \leq 0,70$ ; desempenho satisfatório,  $0,50 < KGE \leq 0,60$ ; desempenho aceitável,  $0,40 < KGE \leq 0,50$ ; e desempenho insatisfatório,  $KGE \leq 0,40$  (Norouzi et al., 2020).

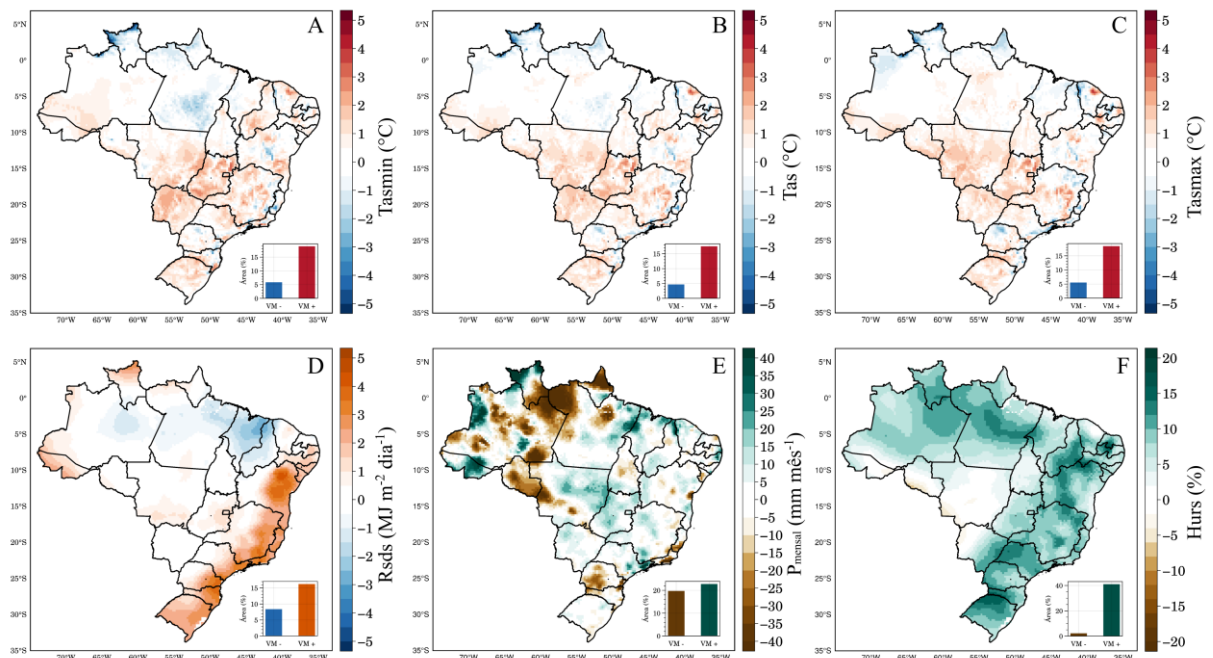
<sup>2</sup> O valor do RQME está expresso na mesma unidade da variável analisada: para temperatura do ar (Tasmin, Tas, Tasmax) em °C, para radiação solar global (Rsds) em MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, para precipitação acumulada mensal (P<sub>mensal</sub>) em mm mês<sup>-1</sup> e para umidade relativa do ar (Hurs) em %.

Em geral, a média do conjunto foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento de todas as variáveis de entrada dos indicadores de risco. As variáveis de temperatura (Tasmin, Tas, Tasmx) foram bem simuladas em todas as regiões ( $r > 0,6$ ), com destaque para a região Sul, que apresentou a maior precisão e menor erro ( $r > 0,9$ ,  $KGE > 0,943$  e  $RQME < 0,6$ ). Por outro lado, o Centro-Oeste apresentou os maiores erros ( $RQME \sim 1,1$  °C) e a menor performance ( $KGE \sim 0,7$ ) para Tas, o que pode estar associado a alta variabilidade climática da região, caracterizada por contrastes sazonais intensos, além da heterogeneidade espacial das variáveis analisadas, que dificultam a captura dos extremos de temperatura pelos MCGs (Dias et al., 2024; Penna et al., 2021). Outros autores encontraram valores semelhantes de RQME para a região Centro-Oeste utilizando MCGs do CMIP6, como Firpo et al. (2022) (até  $\sim 0,8$  °C) e Correa et al. (2022) (até  $1,2$  °C).

Já a Rds e Hurs apresentaram desempenho mais limitado comparadas a temperatura. Rds teve excelente valor de correlação no Sul ( $r=0,928$ ), mas baixos valores de KGE no Centro-Oeste ( $KGE=0,302$ ). A Hurs foi a variável com menor desempenho geral, especialmente no Sul ( $r=0,316$ ,  $KGE=0,317$  e  $RQME \sim 11\%$ ), indicando dificuldades dos modelos em representar a variabilidade local de Hurs, principalmente em função dos sistemas atmosféricos transitórios que operam nessas latitudes (Dias et al., 2024; Penna et al., 2021).

A  $P_{\text{mensal}}$  também foi bem representada em todas as regiões ( $r > 0,6$  e  $KGE > 0,7$ ), destacando o bom desempenho dos modelos na captura dos padrões sazonais de chuva, especialmente no Centro-Oeste e Norte. Contudo, os erros foram moderados em algumas regiões, como no Sul ( $RQME=11,235$  mm mês<sup>-1</sup>) e Nordeste ( $RQME=8,691$  mm mês<sup>-1</sup>).

Com relação ao VM (Figura 3), a média dos MCGs representou adequadamente o padrão espacial das variáveis de temperatura, embora ainda apresente vieses positivos ( $\sim 17\%$  da área) localizados no centro-sul do Brasil e negativos ( $\sim 5\%$ ) na porção norte e em pontos localizados na região sul e sudeste. Além disso, houve superestimativas (e subestimativas) nos valores de Tasmin (VM até  $4$  °C), Tas (VM até  $4$  °C) e Tasmx (VM até  $4,5$  °C) (Figura 3A-C), principalmente na região Centro-Oeste e partes do Sudeste e Nordeste do Brasil.



**Figura 3** - Distribuição espacial dos valores de viés médio (VM) entre a média do conjunto dos MCGs (*ensemble mean*) e os dados observados de Xavier et al., 2016. A = temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), B = temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), C = temperatura máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), D = radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ), E = precipitação mensal acumulada ( $\text{mm m\text{e}s}^{-1}$ ) e F = umidade relativa do ar (%). As barras mostram a porcentagem de área com viés positivo (VM +) e viés negativo (VM -) para cada variável.

Com relação a  $R_{\text{sds}}$ , superestimativas de até  $4,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  foram observadas na faixa costeira que se estende desde o Rio Grande do Sul até a Paraíba (Figura 3D). Por outro lado, subestimativas de aproximadamente  $-3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  foram observadas na porção noroeste da região Nordeste. Apesar dessas diferenças, os valores de VM são semelhantes aos observados para a  $R_{\text{sds}}$  por Florêncio et al. (2022) para diferentes regiões do Brasil com MCGs do CMIP5 e por Dias et al. (2024) utilizando MCGs do CMIP6. A dificuldade dos MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 em representar  $R_{\text{sds}}$  está associada à complexidade da estimativa das propriedades microfísicas e ópticas das nuvens, influenciada por processos atmosféricos não lineares, como absorção e emissão de radiação, parametrização e dinâmica de nuvens, interação oceano-atmosfera, aerossóis atmosféricos e mecanismos de *feedback* (Wang et al., 2021; Yamamoto et al., 2024).

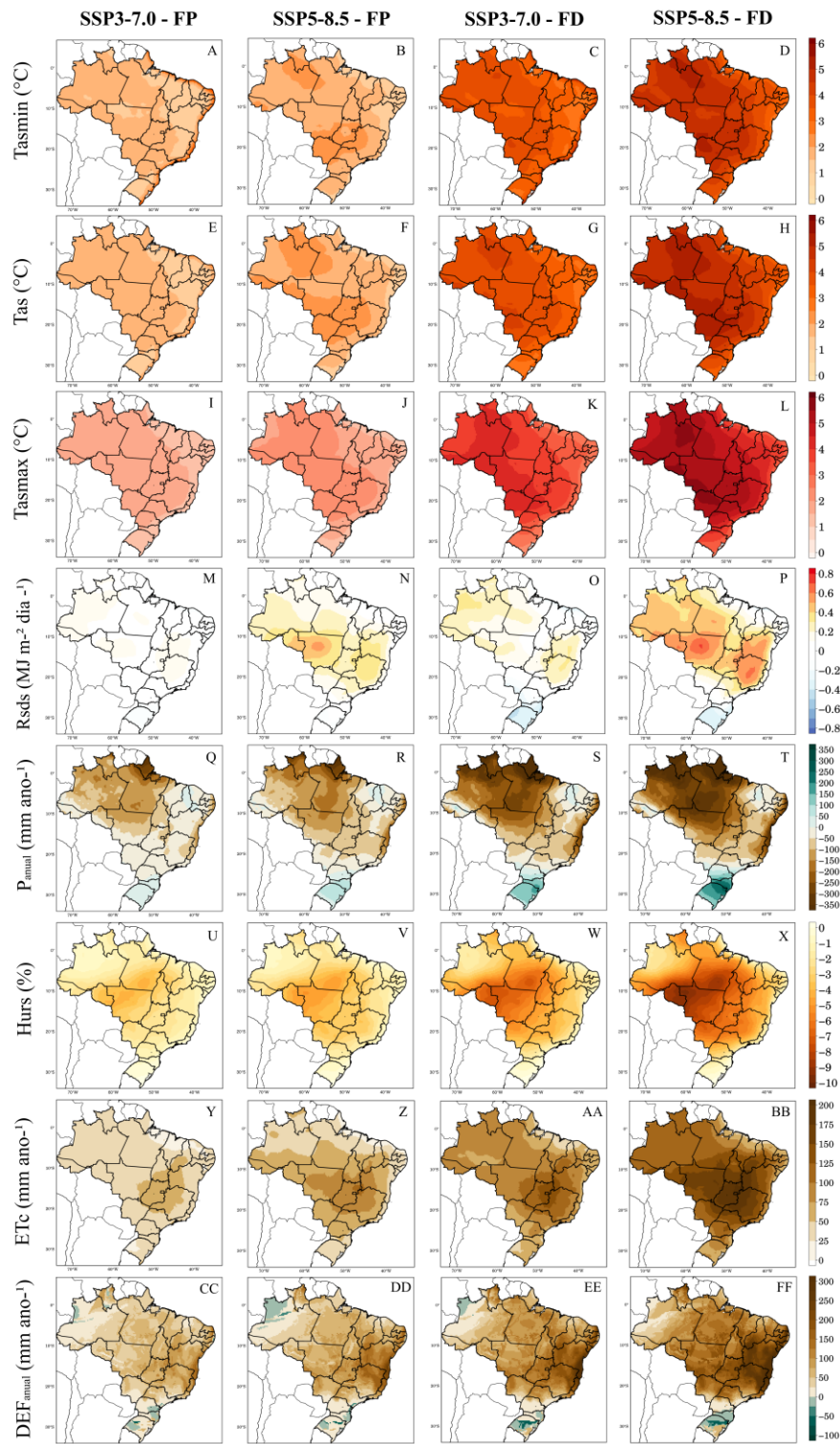
Mesmo com a média dos MCGs houve tendência de superestimativa (e subestimativa) da  $P_{\text{mensal}}$  (Figura 3E) e superestimativa da  $H_{\text{urs}}$  (Figura 3F). No entanto, o VM não ultrapassou  $-40$  a  $35 \text{ mm m\text{e}s}^{-1}$  para precipitação e  $20\%$  para umidade relativa do ar. Além disso, há leve

superestimativa da  $P_{\text{mensal}}$  ( $\sim +25 \text{ mm mês}^{-1}$ ) entre o Mato Grosso, Goiás e o centro-sul de Minas Gerais, local de influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Penna et al., 2021; Dias et al., 2024). Apesar disso, a média dos MCGs representou bem o padrão da ZCAS, o que é essencial para estudos climáticos (Florêncio et al., 2022; Penna et al., 2021). Já a Hurs é subestimada em uma pequena parte do sudoeste de Rondônia e do Mato Grosso (VM  $\sim -7\%$ ) e superestimada na maioria dos estados ( $\sim 40\%$  da área), principalmente na Paraíba (VM  $\sim +20\%$ ), Piauí (VM  $\sim +15\%$ ), Bahia (VM  $\sim +15\%$ ), Rio Grande do Sul (VM  $\sim +15\%$ ), São Paulo (VM  $\sim +14\%$ ) e Minas Gerais (VM  $\sim +13\%$ ).

Valores elevados de VM para Tasmin, Tasmx e Hurs, em algumas partes da área de estudo, podem estar relacionadas às diferentes parametrizações e a dinâmica interna dos MCGs, o que pode dificultar a representação das flutuações de temperaturas e umidade relativa (Almazroui et al., 2021; Dias et al., 2024; Ortega et al., 2021). Dessa forma, como os valores médios anuais de VM para Tasmin e Tasmx excederam o limite aceitável de  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  (Dias et al., 2024) e para Hurs foram superiores a 10% em grande parte do Brasil, foi necessário aplicar a correção de viés nessas variáveis. Para isso, foi seguida a metodologia de Lenderink et al. (2007), na qual primeiro foi calculado o viés mensal entre a média dos MCGs e os dados observados da base de dados de Xavier et al. (2016) para cada variável (Tasmin, Tasmx e Hurs) no PB. Em seguida, o viés mensal foi subtraído dos dados diários em cada período (PB, FP e FD) e SSPs (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Posteriormente, o valor de Tas foi recalculado com base no valor corrigido de Tasmin e Tasmx. As variáveis P e Rsds não precisaram ser corrigidas devido ao bom desempenho em comparação aos dados observados.

### 3.2 Mudanças projetadas nas variáveis que alimentaram os indicadores de risco

A Figura 4 mostra a distribuição espacial das mudanças (clima futuro menos período base) para as variáveis Tasmin, Tas, Tasmx, Rsds,  $P_{\text{anual}}$ , Hurs, ETC e  $DEF_{\text{anual}}$  para o FP e FD nos dois SSPs (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Padrões semelhantes de mudanças são observados em todas as variáveis em ambos os SSPs, sendo as magnitudes menos (mais) intensas no FP e SSP3-7.0 (FD e SSP5-8.5).



**Figura 4** – Distribuição espacial das mudanças projetadas (futuro menos período base) na temperatura mínima (Tasmin, °C) (painéis A-D), média (Tas, °C) (painéis E-H) e máxima (Tasmax, °C) (painéis I- L) do ar, radiação solar global (Rsds, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) (painéis M-P), precipitação anual acumulada (P<sub>anual</sub>, mm ano<sup>-1</sup>) (painéis Q-T), umidade relativa do ar (Hurs, %) (painéis U- X), evapotranspiração da cultura (ETc, mm ano<sup>-1</sup>) (painéis Y-BB) e deficiência hídrica anual (DEF<sub>anual</sub>, mm ano<sup>-1</sup>) (painéis CC-FF) para o futuro próximo (FP, 2041-2060) e

distante (FD, 2081-2100), nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Todos os painéis foram representados pela média dos 16 Modelos de Circulação Geral do NEX-GDDP-CMIP6.

De forma geral, são projetados aumentos crescentes na temperatura do ar e ETc, redução na Hurs e padrões heterogêneos na Rds,  $P_{\text{anual}}$  e  $DEF_{\text{anual}}$  ao longo do século XXI. Para T<sub>asmin</sub> e T<sub>as</sub>, os aumentos variam entre 0,5 °C (SSP3-7.0) e 3,5 °C (SSP5-8.5) no FP (Figuras 4A- F) e entre 3 °C (SSP3-7.0) a 5,5 °C (SSP5-8.5) no FD (Figuras 4C-H). Para T<sub>amax</sub> o aumento é entre 1,0 e 2,5 °C no FP (Figura 4I e 4J) e entre 2,5 °C a 6 °C (Figuras 4K e 4L). De maneira geral, os menores aumentos são projetados nas regiões Sul e Nordeste e em áreas litorâneas que se estendem desde o Rio Grande do Sul até o Rio Grande do Norte, variando de +0,5 °C no FP (SSP3-7.0) a +4,0 °C no FD (SSP5-8.5). Já os maiores aumentos estão concentrados nas regiões Centro-Oeste, Norte e Sudeste (em ordem de magnitude), atingindo +1,5 °C no FP (SSP3-7.0) e +6,0 °C no (SSP5-8.5).

Com relação a Rds (Figura 4M-P), exceto para a região Sul ( $\sim -0,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), são projetados aumentos, principalmente no Mato Grosso ( $\sim +0,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), Minas Gerais ( $\sim +0,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), Bahia ( $\sim +0,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), Goiás ( $\sim +0,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e grande parte da região Norte ( $\sim +0,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ). Esses aumentos projetados de Rds na porção central do Brasil e diminuições no Sul são consistentes com o padrão observado por De Jong et al. (2019) utilizando MCGs do CMIP5 e Lima et al. (2024) utilizando MCGs do CMIP6.

Com relação a  $P_{\text{anual}}$  (Figuras 4Q-T), são projetadas reduções nas regiões Norte (-50 a -350 mm ano<sup>-1</sup>), Centro-Oeste (-50 a -250 mm ano<sup>-1</sup>), centro-norte do Sudeste (até -200 mm ano<sup>-1</sup>) e na faixa litorânea entre o Espírito Santo e o Rio Grande do Norte (-50 a -200 mm ano<sup>-1</sup>), em ambos os períodos, sendo mais (menos) intensas no FD do SSP5-8.5 (FP do SSP3-7.0). Ao contrário, são projetados aumentos entre +50 a 250 mm ano<sup>-1</sup> na região Sul do Brasil, principalmente no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e leve aumento (até 100 mm ano<sup>-1</sup>) no sul de São Paulo. Padrões semelhantes de alteração da  $P_{\text{anual}}$  foram observados por Florêncio et al. (2022) com MCGs do CMIP5 e por Ortega (2021), Dias et al. (2024) e Marques et al. (2024) com MCGs do CMIP6.

Para Hurs (Figura 4U-X), são projetadas reduções em toda a área de estudo, nos dois períodos e SSPs, com padrões espaciais semelhantes aos de T<sub>asmin</sub>, T<sub>as</sub> e T<sub>amax</sub>, mas com sinais opostos (de redução). Ou seja, as maiores reduções de Hurs ocorrem precisamente nas áreas com os aumentos mais intensos de temperatura, com exceção do noroeste do Amazonas

(até -4 %), variando de -0,5 % na região Sul e em todo o litoral brasileiro até -9 % em Rondônia e no Mato Grosso.

Com relação a ETc (Figuras 4Y-BB), são projetados aumentos em todo o Brasil, sendo mais intensos na porção central, principalmente no Centro-Oeste e Sudeste (até +175 mm ano<sup>-1</sup>) e em partes do Norte e Nordeste (até +150 mm ano<sup>-1</sup>) no FD e SSP5-8.5. Já os aumentos menos intensos estão localizados no extremo sul da região Sul (até +100 mm ano<sup>-1</sup>). Também são projetados aumentos na DEF<sub>anual</sub> (Figuras 4CC-FF) entre ~+50 mm ano<sup>-1</sup> (FP do SSP3-7.0) a ~+300 mm ano<sup>-1</sup> (FD do SSP5-8.5) em praticamente todo o território brasileiro, exceto no Sul e noroeste da região Norte. Na região Sul são projetadas reduções na DEF<sub>anual</sub> no FP e FD (e nos dois SSPs) de ~-60 a -80 mm ano<sup>-1</sup>, e no noroeste do Amazonas entre ~-25 a -50 mm ano<sup>-1</sup> no FP (em ambos SSPs) e no FD (SSP3-7.0).

Ao analisar conjuntamente todas as variáveis da Figura 3, é possível notar quatro padrões acoplados, sendo mais notáveis e intensos no FD. O primeiro padrão ocorre nos locais com maiores magnitudes de aumento da DEF<sub>anual</sub> (Centro-Oeste, porção nordeste do Sudeste, porção sudoeste do Norte e porção sul do Nordeste), resultantes da combinação de aumentos de Tasmin, Tas e Tasmáx (entre 2,5 e 6 °C), Rsds (entre 0,2 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) e ETc (entre 75 a 175 mm ano<sup>-1</sup>), e reduções na Hurs (entre -3 e -9 %) e P<sub>anual</sub> (entre -50 e -300 mm ano<sup>-1</sup>). O segundo padrão abrange locais com ligeira redução da DEF<sub>anual</sub> (50 a 100 mm ano<sup>-1</sup>) (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e sudeste de São Paulo), onde são projetados os menores aumentos de Tasmin, Tas, Tasmáx (entre 0,5 e 3 °C), ETc (< +100 mm ano<sup>-1</sup>), pequena redução da Hurs (< -1 %) e Rsds (~ -0,3 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), que são compensados pelos aumentos da P<sub>anual</sub> (até +300 mm ano<sup>-1</sup>). O terceiro padrão ocorre no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, em que mesmo com aumento da P<sub>anual</sub> (até +150 mm ano<sup>-1</sup>) e menores aumentos da Tas (até +3 °C), observa-se aumento da DEF<sub>anual</sub> (até +75 mm ano<sup>-1</sup>). Por fim, o quarto padrão é observado no noroeste do estado do Amazonas, onde é projetada pequena redução da DEF<sub>anual</sub> (até - 50 mm ano<sup>-1</sup>) apesar da intensa redução da P<sub>anual</sub> (~ -300 mm ano<sup>-1</sup>), e aumentos moderados de Tasmin, Tas e Tasmáx (entre 1 e 4 °C), Rsds (de 0,2 a 0,5 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) e sem alterações na ETc (de 25 a 100 mm ano<sup>-1</sup>).

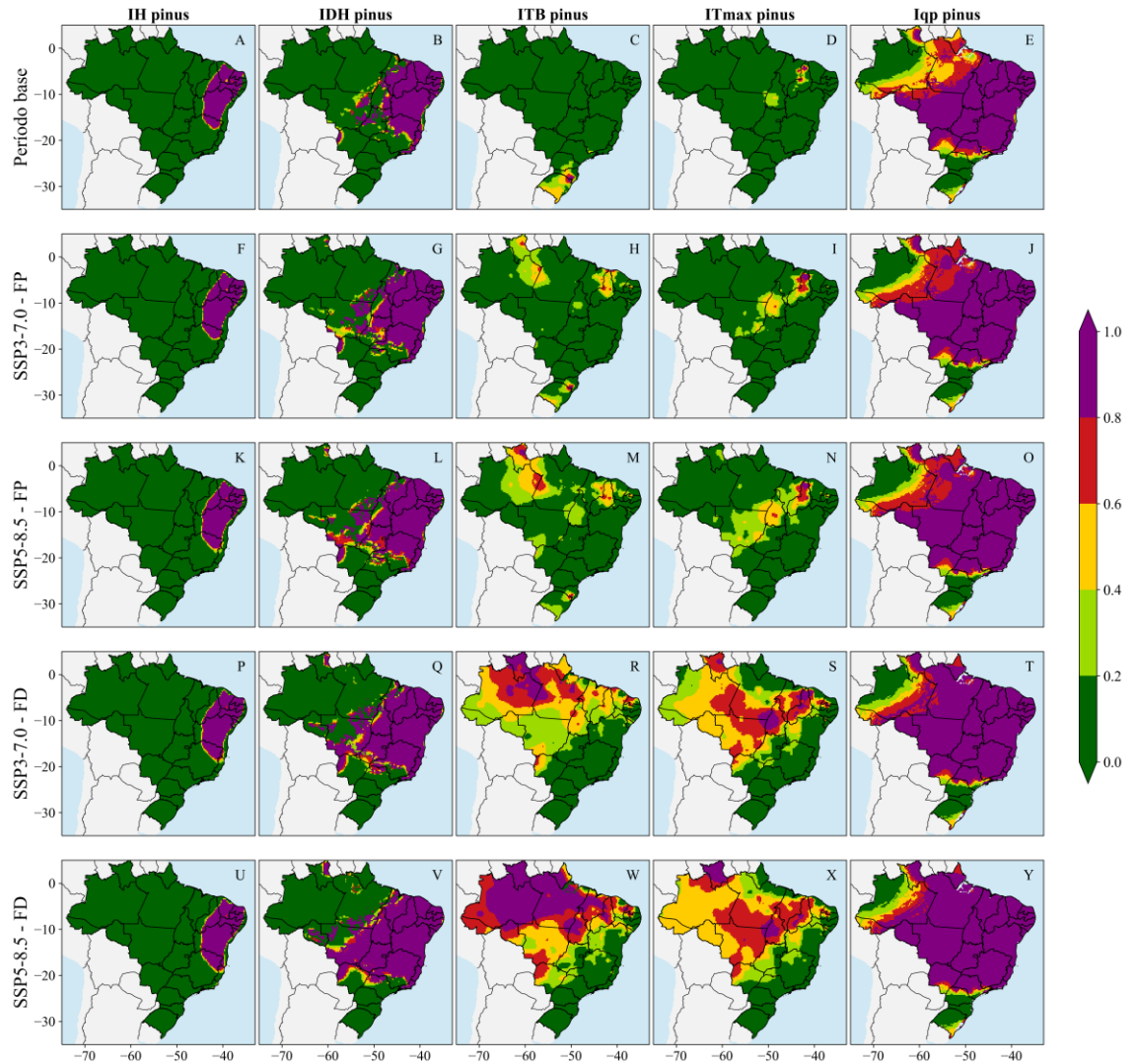
Com base nesses padrões acoplados, o Centro-Oeste, Sudeste, sul do Nordeste e a porção leste do Norte emergem como as regiões brasileiras mais críticas e altamente vulneráveis às mudanças climáticas, devido as mudanças persistentes e intensas nas variáveis climáticas analisadas. Essas regiões coincidem com áreas previamente identificadas como vulneráveis para o cultivo de eucalipto (Florêncio et al., 2022), mandioca (Souza et al., 2023), milho (Martins et al., 2019), café arábica (Dias et al., 2024; Freitas et al., 2024) e frutíferas de clima

temperado como a oliveira e maçã (Ribeiro et al., 2024), sobretudo pelo aumento da  $T_{as}$  e redução da  $P_{anual}$ .

### 3.3. Avaliação dos indicadores de risco para o *Pinus* spp.

A figura 5 mostra o padrão espacial dos cinco indicadores de risco para o *Pinus* spp. baseados na categoria climática ( $IH_{pinus}$ ,  $IDH_{pinus}$ ,  $ITB_{pinus}$ ,  $ITmax_{pinus}$ ,  $Iqp_{pinus}$ ) para o PB, FP e FD nos dois SSPs (3-7.0 e 5-8.5). As porcentagens de área em cada classe de risco estão descritas no Apêndice 1. No PB os indicadores que mais afetam o *Pinus* spp. (em ordem de severidade de risco) são:  $Iqp_{pinus}$  (Figura 4E) com risco muito alto ( $IN_{ij} > 0,8$ ) em ~52 % da área de estudo e  $IDH_{pinus}$  (Figura 4B) em ~23 %.

Por outro lado, os indicadores  $IH_{pinus}$ ,  $ITB_{pinus}$  e  $ITmax_{pinus}$  apresentam risco baixo ou muito baixo ( $IN_{ij} \leq 0,4$ ) (Figuras 5A-D) no PB para a maior parte da área de estudo (entre ~90 a 98 %). Somente parte do Nordeste e o extremo norte de Minas Gerais apresentam risco muito alto para  $IH_{pinus}$  ( $IN_{ij} > 0,8$ ), enquanto o norte do estado do Piauí e parte do Tocantins apresentam uma pequena área com risco variando de moderado a muito alto para  $ITmax_{pinus}$  (Figura 4D). Embora a extensão da área com  $IN_{ij} > 0,4$  para o indicador  $ITB_{pinus}$  seja pequena no PB (~2,2 %), ela é crítica por afetar principalmente a região Sul do Brasil onde se concentra ~ 89 % das plantações nacionais de *Pinus* spp. (IBA, 2025).



**Figura 5** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *Pinus* spp. no Brasil baseados nos indicadores climáticos (na horizontal) para o período base (PB, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos dois cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6.  $IH_{pinus}$  = indicador de requerimento hídrico,  $IDH_{pinus}$  = indicador de estresse por deficiência hídrica,  $ITB_{pinus}$  = indicador de estresse por temperatura base,  $ITmax_{pinus}$  = indicador de estresse por temperatura máxima e  $Iqp_{pinus}$  = indicador de quebra de produtividade.

Ao longo do século XXI os riscos climáticos para o cultivo de *Pinus* spp. serão intensificados em área e magnitude (Figura 5). O indicador de quebra de produtividade ( $Iqp_{pinus}$ ) (Figura 5Y) continua sendo a maior ameaça, com ~80% do território brasileiro apresentando risco alto e muito alto ( $IN_{ij} \geq 0,6$ ) (Figuras 5T e 5Y). O  $Iqp_{pinus}$  será intensificado principalmente no Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e parte da região Norte devido ao padrão acoplado de aumento da temperatura do ar ( $\sim +5,5$  °C),  $DEF_{anual}$  (até + 250 mm ano<sup>-1</sup>),  $ETc$  (até +175 mm

ano<sup>-1</sup>) e redução da  $P_{\text{anual}}$  (até  $\sim -250$  mm ano<sup>-1</sup>). Essa condição de alto risco também abrange parte do Sudeste, onde atualmente se concentra  $\sim 10\%$  da produção nacional de *Pinus* spp.. Apenas os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e noroeste do Amazonas, não apresentam risco alto de quebra de produtividade por deficiência hídrica no FP e FD.

Com relação aos riscos por estresse por temperatura ( $ITB_{\text{pinus}}$  e  $IT_{\text{maxpinus}}$ ), é possível notar que ambos serão intensificados em magnitude, principalmente no FD (SSP5-8.5) cobrindo até 50,3% da área de estudo, englobando o Norte, Nordeste e Centro-Oeste (Figuras 4H-W). No entanto, na região Sul o risco por  $ITB_{\text{pinus}}$  será reduzido progressivamente até o final do século XXI. Somente na região Sul, Sudeste, na porção leste do Nordeste e em partes isoladas do Norte ( $\sim 41\%$  da área), o risco associado a  $IT_{\text{maxpinus}}$  é classificado como baixo ou muito baixo. No Sul as projeções de  $T_{\text{as}}$  e  $T_{\text{asmax}}$  são mais moderadas (até  $\sim +3,5$  °C), não excedendo os limites adequados para o cultivo de *Pinus* spp. ( $15$  °C <  $T_{\text{as}}$  <  $31$  °C) (Gonzalez-Benecke et al., 2016).

O risco moderado a muito alto para  $ITB_{\text{pinus}}$  ( $\sim 63,9\%$ ) e  $IT_{\text{maxpinus}}$  ( $\sim 59,1\%$ ) do centro em direção ao Norte do Brasil é impulsionado pelas projeções de aumento da  $T_{\text{asmin}}$  (até 4,5 °C),  $T_{\text{as}}$  (até  $\sim +5,5$  °C),  $T_{\text{asmax}}$  (entre  $\sim +3$  e 5,5 °C), sendo mais intenso no FD e SSP5-8.5. O risco alto e muito alto por  $IDH_{\text{pinus}}$  apresenta aumento em área no futuro, indo de 23,9% (no PB) para 43,4% no FD (e SSP5-8.5). Nesse período, 54,9% do território brasileiro apresenta risco baixo e muito baixo ao  $IDH_{\text{pinus}}$ . Esse aumento é impulsionado pelas projeções de aumento de  $T_{\text{as}}$  (até +5,5 °C), redução da  $P_{\text{anual}}$  (até -200 mm ano<sup>-1</sup>) e aumento da  $ET_c$  ( $\sim +150$  mm ano<sup>-1</sup>). Já o  $IH_{\text{pinus}}$  praticamente não será alterado ao longo do século XXI, com risco muito alto somente em 11,2% da área (Região Nordeste, porção norte de Minas Gerais e partes do Espírito Santo), devido a redução da  $P_{\text{anual}}$  ( $\sim -250$  mm ano<sup>-1</sup>) na região costeira entre os estados da Bahia e Rio Grande do Norte (Figura 3Q-T).

Temperaturas elevadas ( $T_{\text{max}} \geq \sim 38$  °C) e deficiência hídrica intensa ( $DEF_{\text{anual}} > 309$  mm ano<sup>-1</sup>) podem afetar o *Pinus* spp. em qualquer estágio de desenvolvimento. O aumento da temperatura pode provocar alterações metabólicas e hormonais associadas a danos celulares e estresse oxidativo (Escandón et al., 2016), comprometendo o metabolismo energético (Li et al., 2024) e reduzindo o crescimento radial/apical (Peng M. et al., 2022). Embora o *Pinus* spp. possa se recuperar rapidamente de episódios de estresse térmico moderado, a combinação de calor e  $DEF_{\text{anual}}$  afeta as relações hídricas e de carbono, alterando a fotossíntese e a condutância estomática. Quando a água no solo não é limitante, a manutenção parcial da abertura estomática pode sustentar a transpiração e o resfriamento evaporativo das acículas (Rehshuh and Ruehr, 2022; Urban et al., 2017). Contudo, calor intenso, combinado à redução da  $H_{\text{urs}}$ , aumenta a

demanda atmosférica, levando ao fechamento estomático para evitar perda excessiva de água e a falha na condutividade hidráulica (Carnicer et al., 2013; Petek-Petrik et al., 2023). Essa resposta reduz a condutância hidráulica foliar, a transpiração e, conseqüentemente, a entrada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) pelas acículas, além de aumentar a razão fotorrespiração/fotossíntese em função da maior atividade oxigenase da ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase-oxigenase (RuBisCo) em condições de temperaturas supra-ótimas (Fagundes et al., 2025; Florêncio et al., 2022).

Além disso, a recuperação hidráulica após eventos de “*hot-drought*” é lenta e muitas vezes incompleta, o que limita a capacidade de resfriamento evaporativo e a assimilação de carbono durante ondas de calor subsequentes (Rehshuh and Ruehr, 2022). A redução das trocas gasosas e do balanço de carbono leva ao declínio da capacidade fotossintética, o que pode comprometer o crescimento do *Pinus* spp. e enfraquecer suas defesas naturais contra pragas e patógenos, como *P. castaneus* e *S. noctilio* (Frensch et al., 2023; Ireland et al., 2018).

Adicionalmente, temperaturas acima de 32 °C podem reduzir a concentração de compostos voláteis nos óleos essenciais extraídos do *Pinus* spp., como  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -pineno, limoneno, terpineol e cariofileno (Sharma et al., 2016). Paralelamente, o estresse térmico compromete a formação do xilema ao encurtar a fase de alargamento radial, resultando em um menor número de traqueídes maduros (Vacek et al., 2023), e conseqüentemente reduzindo a capacidade de transporte de água. Essa limitação no transporte de água afeta a síntese e produção de resina (Guada et al., 2016), além da quantidade (e qualidade) dos óleos essenciais.

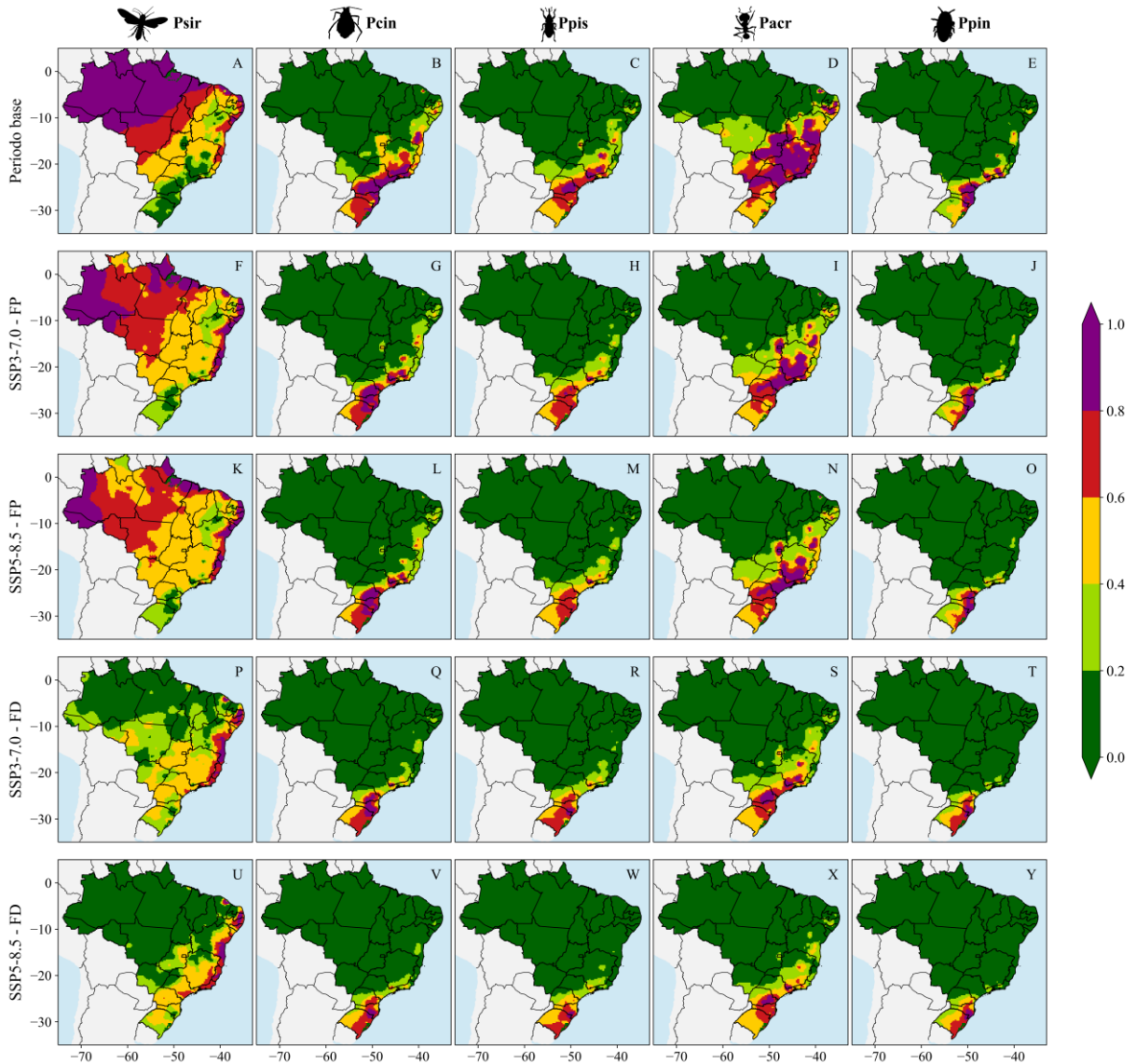
Com relação as pragas, os indicadores que mais afetam o *Pinus* spp. no PB são: Psir (Figura 6A) com risco alto a muito alto em ~63 % da área de estudo, e Pacr (Figura 6D) em ~23 %. A *S. noctilio* (Psir) apresenta maior favorabilidade ( $IN_{ij} > 0,60$ ) nas regiões Norte, Centro-Oeste e na área costeira do Nordeste, devido às projeções mais intensas de  $T_{as}$  e pouca alteração da  $H_{urs}$  (Figura 4). Embora a *S. noctilio* seja a principal praga do *Pinus* spp. no Brasil, ela apresenta risco baixo ou muito baixo (~17%) em praticamente toda a região Sul e porção sudoeste do Sudeste.

*S. noctilio* é favorecida em condições de  $24\text{ °C} \leq T_{as} \leq 30\text{ °C}$  e  $H_{urs} \geq 65\%$  (Carnegie et al., 2006; Ireland et al., 2018). Quando essas condições são satisfeitas, a fêmea ovoposita associando seus ovos a uma secreção mucilaginosa fitotóxica e a esporos do fungo *Amylostereum areolatum*, acelerando a deterioração da madeira, e elevando a mortalidade de *Pinus* spp. em até 60 % (Masagué et al., 2025). Ou seja, as projeções de aumento na frequência de eventos extremos, como ondas de calor e secas (Medeiros et al., 2022), podem aumentar as infestações, e conseqüentemente reduzir o ciclo da praga, aumentando o número de gerações

(Lantschner et al., 2014). Com isso, a incidência e a severidade dos ataques da *S. noctilio* podem aumentar, provocando murchamento da copa, amarelamento das acículas, perfurações no tronco e exsudação de resina (Resende et al., 2023). No Brasil, as perdas econômicas causadas pela *S. noctilio* atingem US\$ 53 milhões (Penteado et al., 2024), com impactos similares em outros países, como Austrália (US\$ 22,4 milhões) (Cameron et al., 2018), África do Sul (US\$ 109 milhões) (Garnas et al., 2012) e Estados Unidos (até US\$ 131 milhões) (Chase, 2013).

Em relação às formigas cortadeiras (*Acromyrmex* e *Atta*), as áreas de maior risco no PB incluem as regiões Sudeste e Sul, além de partes dos estados da Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul e Pernambuco, exatamente onde ocorre a maior frequência de Tas entre 18 e 26 °C e Hurs  $\geq 40\%$  que favorecem seu forrageamento e ataque. O risco de PaCr pode ser pior em viveiros e durante os primeiros meses (e ano) de cultivo, que são os períodos mais críticos de ataque (Resende et al., 2023). Nesses períodos, as formigas cortadeiras podem causar desfolha total das mudas e danos diretos ao meristema apical (Scherf et al., 2022). Durante fases subsequentes, e quando a desfolha é superior a 75 %, pode gerar perdas de até 43 % no volume de *Pinus* spp. (Masiulionis and Samuels, 2025). Por exemplo, uma única colônia de *Acromyrmex* pode atacar até 453 mudas de *Pinus* spp. (Nickele et al., 2021), gerando perdas de produtividade que podem variar de 40 %, quando o ataque é controlado, a 100 % em casos de infestação severa e ausência de controle (Reis Filho et al., 2024).

Por outro lado, Pcin, Ppis e Ppin apresentam risco baixo ou muito baixo ( $IN_{ij} \leq 0,4$ ) para a maior parte da área de estudo (entre ~83 a 94 %) no PB. Somente no leste dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, na porção sul de Minas Gerais e em áreas isoladas do Rio de Janeiro e Bahia, o risco é muito alto ( $IN_{ij} \geq 0,8$ ). Os riscos associados aos pulgões do gênero *Cinara* (Pcin) e besouros *Pissodes* (Ppis) já representam ameaças aos plantios comerciais de *Pinus* spp. na região Sul do Brasil (Frensch et al., 2023; Penteado et al., 2016). Esses insetos fitófagos alimentam-se da seiva dos ramos e brotos de *Pinus* spp., formando colônias extensas que induzem o surgimento de fumagina, reduzindo a capacidade fotossintética das árvores (Zaleski et al., 2005). Por outro lado, o Ppis compromete a integridade estrutural das árvores através da ovoposição subcortical, cujas larvas formam túneis no floema, o que interrompe o fluxo de seiva (Wolski and Skrzeez, 2022). Já as infestações por *P. boernerii* resultam em danos severos, incluindo desfolhação, amarelamento das acículas e senescência precoce (Rodas et al., 2015).



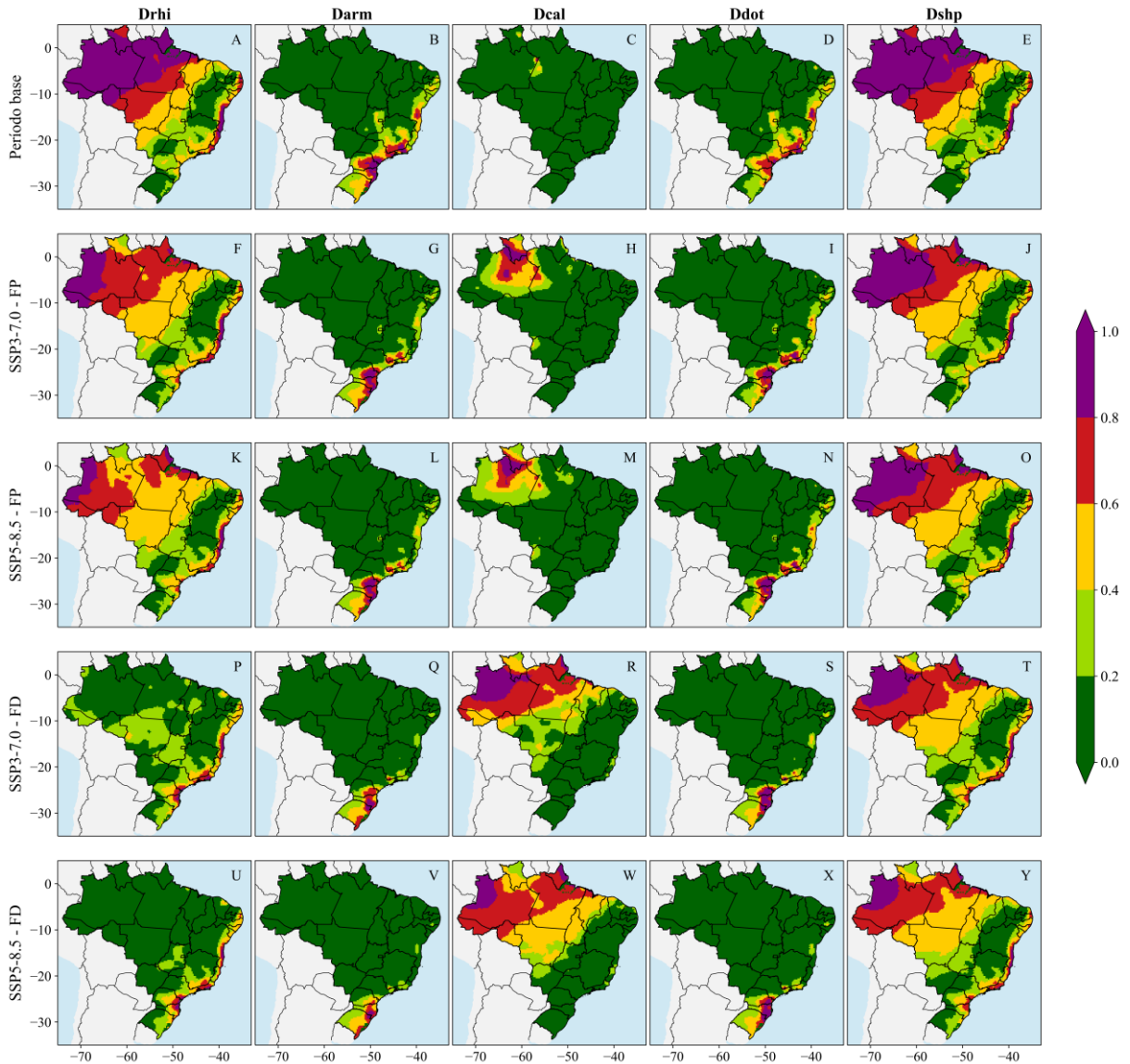
**Figura 6** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *Pinus* spp. no Brasil baseados nos indicadores de suscetibilidade a pragas (na horizontal) para o período base (PB, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. Psir = indicador de suscetibilidade à praga *S. noctilio*, Pcin = indicador de suscetibilidade as pragas *C. atlantica* e *C. pinivora*, Ppis = indicador de suscetibilidade à praga *P. castaneus*, Pacr = indicador de suscetibilidade as pragas *Acromyrmex* e *Atta*, Ppin = indicador de suscetibilidade à praga *P. boernerii*.

Os riscos associados a todas as pragas (Psir, Pcin, Ppis, Pacr e Ppin) serão progressivamente reduzidos (em área e magnitude) ao longo do século XXI (nos dois SSPs), com a maior suscetibilidade concentrada principalmente na região Sul e no litoral (para o Psir). O padrão espacial do risco do Psir será alterado no FP e FD, com aumento do risco na faixa costeira entre São Paulo e Ceará e redução na região Norte e Centro-Oeste. Os demais

indicadores manterão áreas de risco moderado a muito alto ( $IN_{ij} > 0,4$ ) menos extensas e predominantemente localizadas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e na porção sul de Minas Gerais, devido as projeções de temperatura mais amenas (entre 15 °C a 26 °C).

Com relação as doenças, é possível observar padrão espacial heterogêneo de risco no PB e no futuro (FD e FF nos dois SSPs) (Figura 7). No PB, o tombamento de mudas (Drhi) (Figura 7A) e a seca de ponteiros (Dsph) (Figura 7E) emergem como as doenças mais severas em termos de área, com risco moderado a muito alto em ~68 % da área de estudo. O tombamento manifesta-se em condições de Tas entre 21 °C e 30 °C e Hurs  $\geq 75\%$  (Akber and Fang, 2024), promovendo a podridão do sistema radicular e lesões necróticas no hipocótilo que podem resultar na mortalidade das plantas (Song et al., 2022). Paralelamente, a ocorrência e severidade da seca de ponteiros (Dsph) é maior em temperatura entre 22 °C e 34 °C (com ótimo em 26 °C) e Hurs elevada ( $\geq 75\%$ ) (Georgieva and Hlebarka, 2016), causando queima na ponteira das acículas, cancro do caule, exsudação de resina nas lesões e perdas de até 63% do volume comercializável de madeira (Bußkamp et al., 2020).

Por outro lado, os riscos associados a armilariose (Darm) (Figura 7B) e a queima de acículas por *Dothistroma septosporum* (Ddot) (Figura 7D) apresentam risco baixo ou muito baixo ( $IN_{ij} \leq 0,4$ ) em ~90 % da área, exceto para a faixa costeira que se estende do Rio Grande do Sul até Paraíba e partes de Minas Gerais, onde o risco é alto ou muito alto ( $IN_{ij} > 0,6$ ). Já o risco associado a queima de acículas por *Calonectria pteridis* (Dcal) é muito baixo em ~99 % da região de estudo.



**Figura 7** - Distribuição espacial dos indicadores de riscos para o cultivo de *Pinus* spp. no Brasil baseados nos indicadores de suscetibilidade a doenças (na horizontal) para o período base (PB, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (eixo y) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. Drhi = indicador de suscetibilidade à doença tombamento de mudas, causada por *Rhizoctonia solani*, Darm = indicador de suscetibilidade à doença armilarirose, causada por *Armillaria* spp., Dcal = indicador de suscetibilidade à doença queima de acículas, causada por *Calonectria pteridis*, Ddot = indicador de suscetibilidade à doença queima de acículas, causada por *Dothistroma septosporum*, Dshp = indicador de suscetibilidade à doença seca de ponteiros, causada por *Sphaeropsis sapinea*.

No FP e FD (em ambos SSPs), o padrão espacial dos riscos associados a doenças é alterado, com redução em área e severidade de risco, exceto para Dcal e Dsph. A maior redução é projetada para o Drhi (Figuras 7F-U), com redução de ~12 % (FP no SSP3-7.0) a ~48 % (FD no SSP5-8.5) nas áreas de risco alto e muito alto. Padrão similar de redução, porém menos acentuado, é projetado para Darm (~1,1 a ~2,9 %), Ddot (~0,2 a ~1,3 %) e Dsph (~10 a ~20 %) entre o FP do SSP3-7.0 e o FD do SSP5-8.5. Por outro lado, as projeções indicam aumento da área e da magnitude do risco para o Dcal, com risco moderado a muito alto entre ~12 % (FP no SSP3-7.0) e ~53 % (FD no SSP5-8.5) e redução do risco muito alto para Dsph (~29 % no FD e SSP585). De qualquer forma, as ameaças potenciais das doenças no clima futuro, serão mais localizadas nas regiões Sul para Drhi, Darm e Ddot, e do centro-oeste ao norte para Dcal e Dsph.

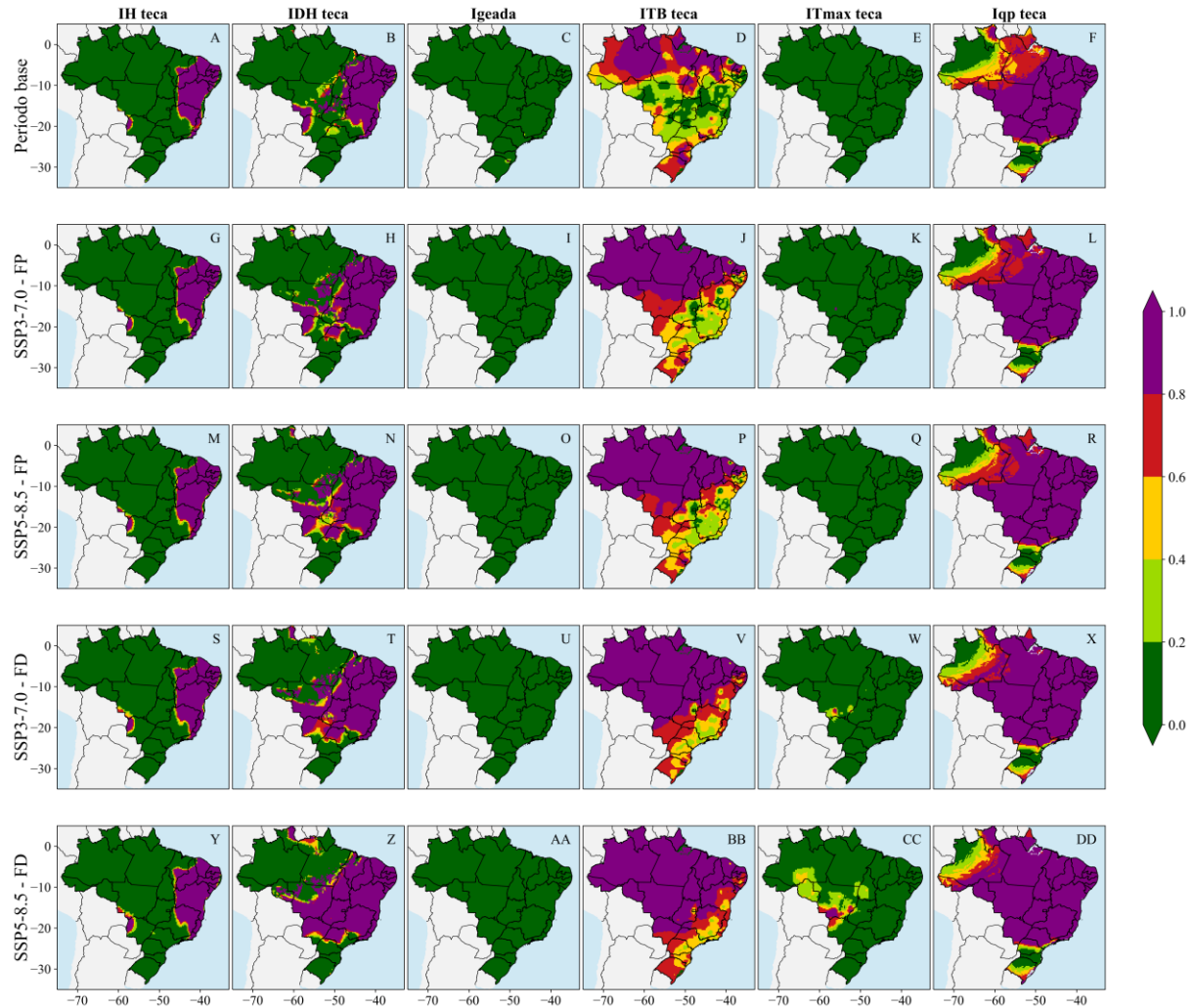
Embora o risco associado a armilariose seja baixo, os fungos do gênero *Armillaria* são ameaças aos plantios de *Pinus* spp. (Resende et al., 2023), ocasionando perdas de até 20 % da produção em plantios juvenis ( $\leq 20$  anos) (Cleary et al., 2021) e prejuízos de até US\$ 1000 ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Lech et al., 2023). As lesões causadas pela armilariose afetam principalmente às raízes, causando podridão radicular (Oliveira et al., 2019) e facilitando a dispersão do patógeno por meio de rizomorfos subterrâneos, que podem expandir a infecção por vários hectares (Labbé et al., 2015). Já a queima de acículas causada por *Calonectria pteridis* e *Dothistroma septosporum*, provoca lesões necróticas e ferrugem nas agulhas (Monteiro et al., 2026), sendo favorecida pelo desequilíbrio de cálcio e potássio no solo (Soares et al., 2018) e pelo aumento da Tas.

### 3.2 Avaliação dos indicadores de risco para *T. grandis*

A distribuição espacial dos seis indicadores de risco para a *T. grandis* baseados na categoria climática ( $IH_{teca}$ ,  $IDH_{teca}$ ,  $Igeada$ ,  $ITB_{teca}$ ,  $ITmax_{teca}$ ,  $Iqp_{teca}$ ) para o PB, FP e FD no SSP3-7.0 e no SSP5-8.5 é apresentada na Figura 8. No PB, os indicadores que mais afetam a *T. grandis* (em ordem de severidade de risco) são:  $Iqp_{teca}$  (Figura 8F) com risco muito alto ( $IN_{ij} > 0,8$ ) em ~57 % da área de estudo,  $IDH_{teca}$  (~26%) (Figura 8B) e  $ITB_{teca}$  (Figura 8D) em ~26 %.

Por outro lado, os indicadores  $Igeada$  (Figura 8C) e  $ITmax_{teca}$  (Figura 8E) apresentam risco muito baixo ( $IN_{ij} < 0,2$ ) para praticamente todo o Brasil no PB. Esse baixo risco para  $Igeada$  pode estar associado à limitação dos MCGs em representar adequadamente eventos extremos, como geadas. O indicador  $IH_{teca}$  (Figura 8A) apresenta risco muito alto ( $IN_{ij} > 0,8$ ) na região Nordeste, centro-norte do Sudeste, e na porção sudoeste da região Centro-Oeste (~15%

da área). Dessa forma, para o PB, os riscos climáticos para a *T. grandis* são dominados por limitações hídricas, enquanto os estresses térmicos e os eventos de geada apresentam relevância secundária.



**Figura 8** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *T. grandis* no Brasil baseados nos indicadores climáticos (na horizontal) para o período base (PB, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6.  $IH_{teca}$  = indicador de requerimento hídrico para a *T. grandis*,  $IDH_{teca}$  = indicador de estresse por deficiência hídrica para a *T. grandis*,  $ITB_{teca}$  = indicador de estresse por temperaturas basais para a *T. grandis*,  $ITmax_{teca}$  = indicador de estresse por temperatura máxima para a *T. grandis*,  $Igeada$  = indicador de estresse por geadas,  $Iqp_{teca}$  = indicador de quebra de produtividade por estresse hídrico para a *T. grandis*.

Até 2100, os riscos climáticos para a *T. grandis* serão potencializados em área e magnitude, exceto para o indicador  $Igeada$  (Figura 8). O indicador  $ITB_{teca}$  (Figura 8E4) é o que

apresenta maior aumento na severidade de risco, sendo considerado a maior ameaça para os plantios brasileiros de *T. grandis*, com ~91% do território brasileiro apresentando risco alto e muito alto ( $IN_{ij} \geq 0,6$ ). A intensificação do  $ITB_{teca}$  ao longo do século XXI ocorre principalmente nas regiões Norte, Centro-Oeste e partes do Nordeste e estão associados às projeções de aumento da  $T_{asmin}$ ,  $T_{as}$  e  $T_{asmax}$  (até  $\sim +5,5$  °C), sendo mais intenso no FD e SSP5-8.5, assim como pelo aumento da frequência de temperaturas fora da faixa ótima para o cultivo da espécie ( $T_{as} \leq 22$  °C ou  $T_{as} \geq 27$  °C). A segunda maior ameaça é atribuída ao  $Iqp_{teca}$  (~84%) (Figura 8DD), intensificado principalmente no Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e parte da região Norte. Esse aumento decorre do efeito combinado de aumento da temperatura do ar ( $\sim +5,5$  °C),  $DEF_{anual}$  (até  $+250$  mm ano<sup>-1</sup>),  $ET_c$  (até  $+175$  mm ano<sup>-1</sup>) e redução da  $P_{anual}$  (até  $\sim -250$  mm ano<sup>-1</sup>). Apenas o Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e noroeste do Amazonas, não apresentam risco alto de  $Iqp_{teca}$  no FP e FD. Os estresses hídricos ( $IH_{teca}$  e  $IDH_{teca}$ ) (Figuras 8Y e 8Z), também serão intensificados, embora com menor magnitude e abrangência espacial quando comparados ao  $ITB_{teca}$  e  $Iqp_{teca}$ . Em relação ao PB, a área sob risco moderado a muito alto aumenta de ~17% para ~20% no  $IH_{teca}$  (Figura 8Y) e de ~29% para ~50% no  $IDH_{teca}$  (Figura 8Z) (FD e SSP5-8.5).

Temperaturas elevadas ( $T_{as} \geq 27$ °C e/ou  $T_{asmax} \geq \sim 43$  °C) associadas a  $DEF_{anual} > 402$  mm ano<sup>-1</sup> podem afetar a *T. grandis*, uma vez que a combinação desses estresses promove um desequilíbrio nas trocas gasosas, caracterizado pela redução da entrada de CO<sub>2</sub> e da saída de água pela transpiração. Ou seja, o fechamento estomático em situações de estresse térmico e hídrico reduz a condutância estomática (até 84%), a taxa fotossintética (até 71%) e o teor relativo de água foliar (até 63%) (Galeano et al., 2019), comprometendo o funcionamento fisiológico da *T. grandis*. Esse processo é intensificado sob temperaturas supra-ótimas ( $T_{as} \geq 27$  °C, Reis et al., 2023), nas quais alterações no balanço entre a fotossíntese e a fotorrespiração favorecem a maior atividade da oxigenase da RuBisCO (Fagundes et al., 2025; Florêncio et al., 2022), semelhante ao observado para o *Pinus* spp. Esse processo reduz a assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, resultando em menor disponibilidade de fotoassimilados para os processos de crescimento, manutenção e defesa. Como consequência, observa-se o enfraquecimento da resistência fisiológica e bioquímica da *T. grandis*, o que aumenta sua suscetibilidade a pragas e patógenos, como *H. puera*, *X. affinis* e *L. theobromae* (Reis et al., 2023; Shafae et al., 2025).

Essas condições também reduzem a eficiência do enraizamento de mudas, pois intensificam a produção de ácido abscísico e etileno, o que favorece a formação de calos e inibe a emissão radicular e a sobrevivência de propágulos vegetativos na *T. grandis* (Reis et al., 2023). Em árvores adultas, o estresse hídrico acelera a queda foliar e encurta o período

fisiologicamente ativo, isto é, reduz o intervalo em que a planta mantém área foliar funcional e elevadas taxas de fotossíntese e absorção de carbono. No entanto, sistemas radiculares mais profundos podem atenuar esse efeito ao garantir o acesso à água armazenada em camadas subsuperficiais do solo, reduzindo a duração da deciduidade e mantendo maior densidade de copa, além de proporcionar maior resiliência a eventos de seca inter e intrassazonais (Clément et al., 2019).

Considerando a suscetibilidade a pragas, os indicadores de maior risco para a *T. grandis* no PB são: P<sub>xyl</sub> (~50% da área com risco alto a muito alto) (Figura 9B), Ph<sub>yb</sub> (~40%) (Figura 9A) e P<sub>mac</sub> (~28%) (Figura 9D). As pragas *H. puera* (Ph<sub>yb</sub>) e *X. affinis* (P<sub>xyl</sub>) apresentam maior severidade ( $IN_{ij} \geq 0,6$ ) nas regiões Norte, Centro-Oeste e na faixa litorânea que se estende desde o Espírito Santo até o Rio Grande do Norte, associada às projeções mais intensas de  $T_{as}$  e menor alteração da  $H_{urs}$  (Figura 4). Para *M. hirsutus* (P<sub>mac</sub>), o maior risco no PB restringe-se à região Norte, com destaque para os estados do Amazonas e Pará. Nas demais regiões o risco é predominantemente baixo ou muito baixo ( $IN_{ij} \leq 0,4$ ), com ocorrências pontuais de risco moderado associadas ao indicador P<sub>xyl</sub>.

*H. puera* é favorecida em condições de  $24\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{as} \leq 28\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $H_{urs} \geq 75\%$  (Dhobe et al., 2014; Murugan et al., 1999), sob as quais a praga pode completar múltiplas gerações e se dispersar por fios de seda para as porções inferiores da copa, intensificando a infestação (Reis et al., 2023). O ataque inicia-se em folhas jovens, entre as nervuras secundárias, e tende a se expandir em epicentros que podem abranger todo o talhão em plantações não manejadas (Reis et al., 2023; Shafae et al., 2025). As lagartas atacam mudas em viveiro e árvores em campo, sendo que a desfolha completa causa perdas de até 50% no volume de madeira de *T. grandis* (Kottaipalayam-Somasundaram et al., 2022).

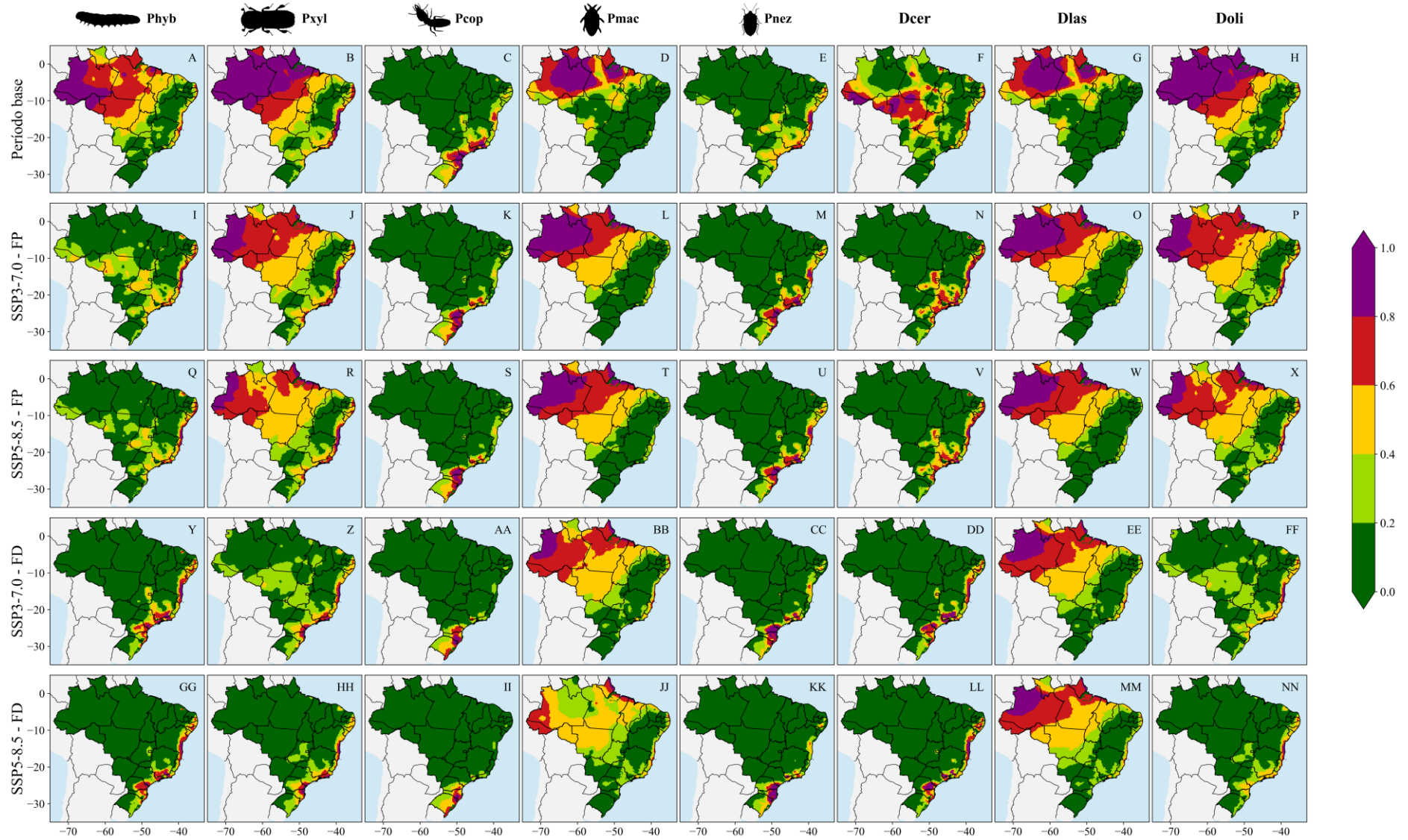
Em relação ao besouro *X. affinis*, sua ocorrência é favorecida por  $T_{as}$  entre 21 e 30 °C e  $H_{urs} \geq 75\%$  (Rojano et al., 2021; Zelaya, 1985). O risco de P<sub>xyl</sub> é maior em árvores estressadas, recém-abatidas ou estocadas, nas quais a fêmea coloniza o floema morto e o xilema, escavando galerias e inoculando fungos ambrosiais simbiotes, como *Raffaelea* spp. (Smith et al., 2020). Esse processo compromete a qualidade da madeira, reduz o volume comercializável e provoca desvalorização econômica das toras, especialmente para usos nobres de *T. grandis* (Reis et al., 2023; Tarno et al., 2022).

Por outro lado, P<sub>cop</sub> e P<sub>nez</sub> apresentam risco baixo ou muito baixo ( $IN_{ij} \leq 0,2$ ) nas regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, abrangendo ~90% da área de estudo. Em contraste, o risco é classificado como moderado a muito alto ( $IN_{ij} \geq 0,6$ ) apenas na porção leste da região

Sul, no centro-sul de Minas Gerais, Rio de Janeiro e ao longo da faixa litorânea da região Nordeste. Apesar do baixo risco associado a *C. testaceus* nas principais regiões produtoras de *T. grandis* (Figura 1), sua ocorrência pode comprometer a integridade estrutural do cerne, devido a formação de galerias no fuste, especialmente na região basal, resultando na desvalorização da madeira (Costa et al., 2020; Reis et al., 2023). Já a ocorrência de *N. viridula* pode afetar o desenvolvimento inicial da espécie ao se alimentar da seiva de folhas jovens, provocando a morte dos ponteiros, atraso no crescimento e a mortalidade de mudas e árvores jovens de *T. grandis* (Reis et al., 2023).

Ao longo do século XXI, os riscos associados a todas as pragas (Phyb, Pxyl, Pcop, Pmac e Pnez) poderão ser progressivamente reduzidos, tanto em área quanto em magnitude, com maior suscetibilidade concentrada nas regiões Sul e Norte (para o Pmac), principalmente no SSP5-8.5.

O padrão espacial do risco de Phyb e Pxyl será modificado no FP e FD, com deslocamento das áreas de maior risco das regiões Norte e Centro-Oeste, para a região Sul e faixa litorânea desde o Rio Grande do Sul até o Rio Grande do Norte (Figuras 9GG e 9HH). As pragas *C. testaceus* e *N. viridula* manterão áreas de risco moderado a muito alto ( $IN_{ij} \geq 0,4$ ) localizadas na região Sul, sul do Sudeste e na faixa costeira do Nordeste. Esse padrão está associado aos menores aumentos de  $T_{as}$  (entre +3 e +3,5 °C) e menores reduções da  $H_{urs}$  (Figura 4).



**Figura 9** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *T. grandis* no Brasil baseados nos indicadores de suscetibilidade a pragas e doenças (na horizontal) para o período base (PB, 1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. Phyb = indicador de suscetibilidade à praga *Hyblaea puera*, Pxyl = indicador de suscetibilidade à praga *Xyleborus affinis*, Pcop = indicador de suscetibilidade à praga *Coptotermes testaceus*, Pmac = indicador de suscetibilidade à praga *Maconellicoccus hirsutus* Green, Pnez = indicador de suscetibilidade à praga *Nezara viridula*, Dcer = indicador de suscetibilidade à doença murcha de *Ceratocystis*, Dlas = indicador de suscetibilidade à doença cranco, Doli = indicador de suscetibilidade à doença ferrugem.

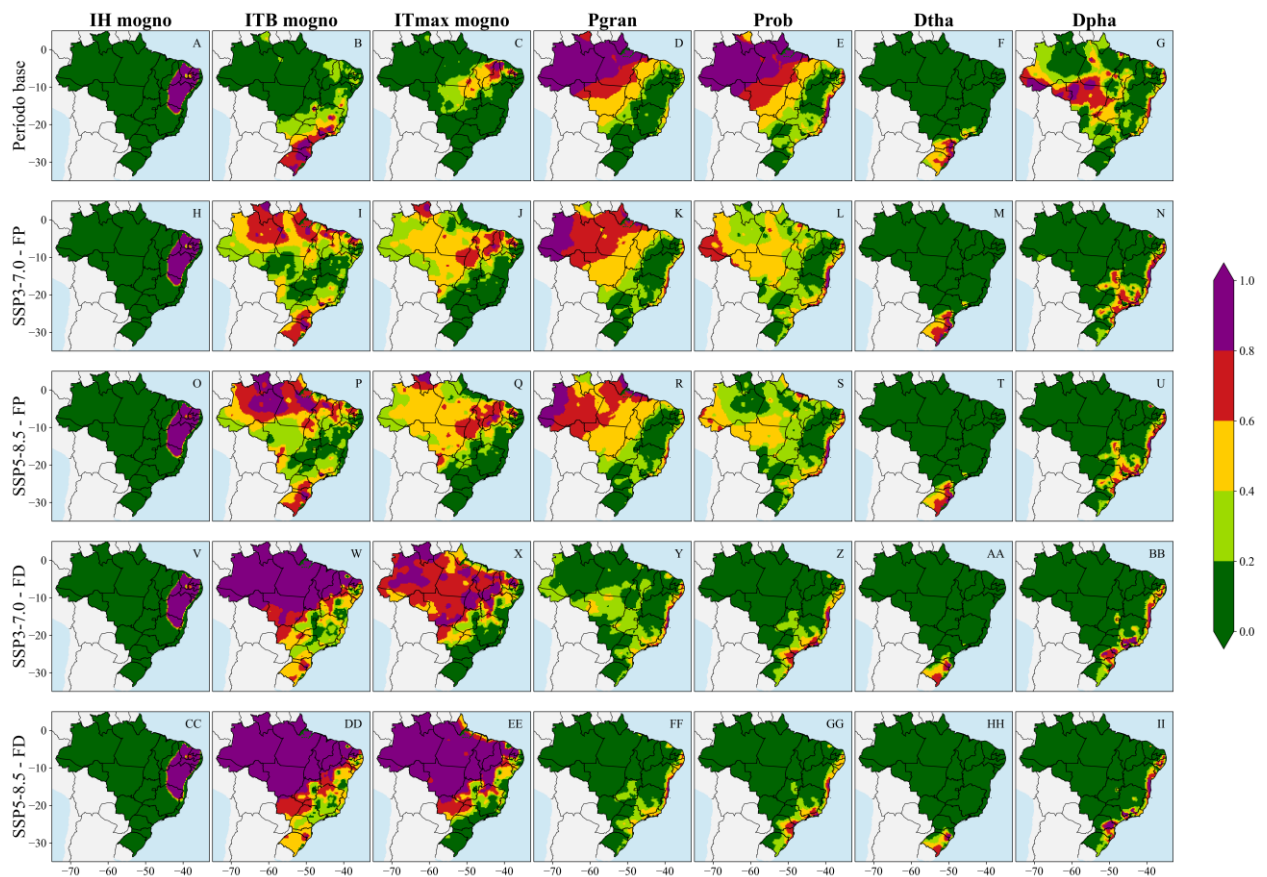
Com relação as doenças, no PB as maiores ameaças são a ferrugem (Doli) (Figura 9H) e o cranco (Dlas) (Figura 9G), com maior severidade na região Norte e risco moderado a alto em ~63% e ~39% da área, respectivamente. A ferrugem da teca ataca plantas em condições de viveiro e no campo em condições de Tas entre 24 °C e 30 °C e alta umidade (Hurs  $\geq$  75%) (Hackbarth et al., 2014; Sales et al., 2017). Os primeiros sintomas manifestam-se em folhas maduras na forma de pequenas lesões cloróticas com pústulas amareladas, evoluindo para lesões na face adaxial das folhas. Em casos severos, a doença promove desfolha e reduz o incremento volumétrico (Reis et al., 2023). Já a ocorrência de cranco é favorecida em condições de Tas entre 27 °C a 35 °C e Hurs  $\geq$  75% (Félix et al., 2016; Venkatesh et al., 2023), causando fissuras no tronco, desprendimento da casca, necrose da periderme, além de gomose (Reis et al., 2023).

Em contrapartida, o risco associado à murcha causada pelo fungo *Ceratocystis fimbriata* (Dcer) (Figura 9F) é menor em área e magnitude (~31% da área com risco moderado a muito alto), concentrada principalmente na região Centro-Oeste e em partes isoladas do Norte, Nordeste e Sudeste.

Assim como observado para as pragas, projeta-se uma redução progressiva da extensão espacial associada às doenças Dcer, Dlas e Doli ao longo do período futuro (nos dois SSPs). A maior redução de área ocorre para Doli (Figuras 9P-NN), com diminuição das áreas classificadas com risco moderado a muito alto de ~1,7% (FP no SSP3-7.0) a ~59% (FD no SSP5-8.5). Para Dcer (Figura 9B6- 9E6) a redução não excede ~26% (FD no SSP5-8.5). Ao longo do século XXI, a Dcer e Doli terão risco alto apenas na região Sul e na faixa litorânea do Nordeste, enquanto a Dcer afetará somente as plantações localizadas nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil.

### 3.3 Avaliação dos indicadores de risco para *S. macrophylla* e *Khaya* spp.

A figura 10 apresenta o padrão espacial dos indicadores de risco baseados nas categorias climática, suscetibilidade a pragas e doenças (IH<sub>mogno</sub>, ITB<sub>mogno</sub>, ITmax<sub>mogno</sub>, Pgran, Prob, Dtha, Dpha) para *S. macrophylla* e *Khaya* spp. ao longo dos três períodos (PB, FP e FD) e cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).



**Figura 10** - Distribuição espacial dos riscos para o cultivo de *S. macrophylla* e *Khaya* spp. no Brasil baseados nos indicadores climáticos, de suscetibilidade a pragas e doenças (na horizontal) para o período base (PB,1995-2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e futuro distante (FD, 2081-2100) (na vertical) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5, calculados utilizando a média de 16 modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6. IH<sub>mogno</sub> = indicador de requerimento hídrico para *S. macrophylla* e *Khaya* spp., ITB<sub>mogno</sub> = indicador de estresse por temperaturas basais para *S. macrophylla* e *Khaya* spp., ITmax<sub>mogno</sub> = indicador de estresse por temperatura máxima para *S. macrophylla* e *Khaya* spp., Pgran = indicador de suscetibilidade à praga *Hypsipyla grandella*, Prob = indicador de suscetibilidade à praga *Hypsipyla robusta*, Dtha = indicador de suscetibilidade à doença mancha aureolada, Dpha =

indicador de suscetibilidade à doença rubelose. Os valores de porcentagem (%) representam a área de risco em cada faixa.

No PB, os indicadores climáticos que afetam as espécies com maior severidade são  $ITB_{mogno}$  (Figura 10B) com risco moderado a muito alto ( $IN_{ij} > 0,4$ ) em ~14% da área de estudo e  $ITmax_{mogno}$  (Figura 10C) em ~10%. O risco associado ao  $ITB_{mogno}$  possui maior severidade na região Sul e centro-sul da região Sudeste. Já  $ITmax_{mogno}$  é maior em áreas pontuais do Nordeste, Norte e Centro-Oeste. Assim como a *T. grandis*, o indicador  $IH_{mogno}$  (Figura 10A) apresenta risco baixo ou muito baixo ( $IN_{ij} \leq 0,4$ ) para a maior parte da área de estudo no PB (~91%). Somente parte dos estados da Bahia, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, assim como o extremo norte de Minas Gerais, apresentam risco muito alto ( $IN_{ij} > 0,8$ ).

Temperaturas elevadas, especialmente quando associadas a situações de déficit hídrico prolongado ou intermitente, impõem restrições fisiológicas que, quando amplificadas no tempo, alteram a morfologia e fenologia da *Khaya* spp. e *S. macrophylla*, especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento (Kc et al., 2025; Neto et al., 2023). Como exemplo de alterações morfológicas na *S. macrophylla* destacam-se a redução do número de folhas (~30%), folíolos (~42%) e do diâmetro do caule (~20%) (Cordeiro et al., 2009). Essas alterações estão associadas, principalmente, à menor condutância estomática sob estresses térmicos e hídricos, que limita a difusão de  $CO_2$  no mesófilo foliar e reduz a fotossíntese (Neto et al., 2023), indicando que a manutenção do status hídrico ocorre à custa da penalização da assimilação de carbono e da alocação de biomassa, com implicações diretas para a viabilidade silvicultural dessas espécies.

Com relação as pragas *H. grandella* (Pgran) e *H. robusta* (Prob), ambas apresentam elevado risco no PB, principalmente nas regiões Norte e Centro-Oeste. Para Pgran (Figura 10D), os riscos moderados a altos abrangem ~62%, e para Prob (Figura 10E) ~67%. Com relação as doenças, a rubelose (Dpha) (Figura 10G) emerge como a doença mais severa para plantios de *S. macrophylla* e *Khaya* spp. no PB, com risco moderado a muito alto em ~31% da área, sobretudo nas regiões Centro-Oeste e Norte. Por outro lado, o risco associado a mancha aureolada (Dtha) (Figura 10F) é baixo ou muito baixo ( $IN_{ij} \leq 0,4$ ) em ~94% da área, exceto na região Sul, onde o risco é predominantemente moderado a muito alto.

Analisando conjuntamente os padrões de risco ao longo do século XXI, é possível observar dois resultados principais para *S. macrophylla* e *Khaya* spp.: i) os riscos climáticos serão intensificados em área e severidade de risco, ii) enquanto a magnitude dos riscos será

reduzida para as pragas e doenças. A maior redução é projetada para Prob (Figuras 10L-GG), com redução de ~27% (FP no SSP3-7.0) a ~60% (FD no SSP5-8.5) nas áreas de risco moderado a muito alto. Padrão similar de redução é projetado para Pgran (~1,2% a ~57%), Dpha (~20% a ~26%) e Dtha (~1% a ~4%), entre o FP do SSP3-7.0 e o FD do SSP5-8.5.

As duas maiores vulnerabilidades para os cultivos de *S. macrophylla* e *Khaya* spp. serão decorrentes do estresse por temperaturas basais ( $ITB_{\text{mogno}}$ ) (Figuras 10I-DD) e por temperaturas máximas ( $IT_{\text{max}_{\text{mogno}}}$ ) (Figuras 10J-EE), com ~89% e ~80% da área com risco moderado a muito alto no FD e SSP5-8.5, respectivamente. Os maiores riscos de  $ITB_{\text{mogno}}$  no FP e FD estão concentrados nas regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, devido a maior frequência de temperaturas fora da faixa ideal para espécies de mogno ( $23\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{as}} < 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Em contraste, a região Sul, que no PB apresenta risco alto e muito alto (Figura 10A2), apresenta redução consistente do risco nos dois períodos e SSPs. Como o risco é maior quando as temperaturas são  $< 23\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou  $> 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o aumento das temperaturas na região Sul reduz a exposição de temperaturas abaixo de  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , resultando em menor risco projetado. Por fim,  $IH_{\text{mogno}}$  (Figuras 10H-CC) apresenta um pequeno aumento de até ~+1.7% no FD (SSP5-8.5), associado ao aumento da frequência de anos com precipitação  $\leq 850\text{ mm ano}^{-1}$  até 2100.

Mesmo com a redução da severidade dos riscos associados a pragas e doenças (Pgran, Prob, Dtha e Dpha), ainda são identificadas áreas persistentes e localizadas de susceptibilidade na região Sul, sul do Sudeste e na faixa litorânea do Nordeste, fruto da redistribuição espacial do risco que no PB era localizado nas regiões Norte e Centro-Oeste.

No FP e FD, os maiores riscos fitossanitários estão relacionados principalmente ao ataque das lagartas *H. grandella* e *H. robusta*, e à ocorrência da rubelose (Dpha). Esses padrões refletem a ocorrência de condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento dessas pragas e do patógeno ao longo do século XXI ( $22\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{as}} \leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $H_{\text{urs}} \geq 75\%$ ) (Figura 10). No Brasil, lagartas do gênero *Hypsipyla* são as pragas mais severas em plantações comerciais de *S. macrophylla* e *Khaya* spp. (Reyes-Reyes et al., 2025; Queiroga et al., 2023). O ataque de brotos jovens, especialmente no meristema apical, resulta em deformação do fuste, exsudação de seiva e excesso de ramificações laterais (Lemes et al., 2019; Opuni-Frimpong et al., 2022), os quais reduzem a qualidade da madeira. Outro ponto que merece atenção são os brotos danificados que tendem a ser reinfestados, culminando em árvores com fustes inadequados para a produção de madeira de qualidade (Darko et al., 2022; Queiroga et al., 2023).

Além dos impactos em *S. macrophylla* e *Khaya* spp. no Brasil, os broqueadores *H. grandella* e *H. robusta* atacam uma ampla gama de espécies florestais em diferentes regiões tropicais. Infestações e danos recorrentes têm sido registrados, por exemplo, em *Cedrela*

*odorata* no México (Pérez-Salicrup e Esquivel, 2008), *Cedrela fissilis* no Brasil (Borges et al., 2022), *Toona ciliata* na China (Song et al., 2022) e em *Chukrasia tabularis* no Vietnã (Chi et al., 2023). Dessa forma, a não especificidade de hospedeiro resulta em danos semelhantes aos brotos terminais de meliáceas cultivadas em distintos países, reforçando a necessidade de estratégias de adaptação e manejo fitossanitário nos sistemas florestais.

### 3.4 Estratégias de adaptação para plantios de *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla* e *Khaya* spp.

Devido aos aumentos projetados nos riscos associados ao  $I_{qp_{pinus}}$ ,  $IDH_{pinus}$ ,  $ITB_{pinus}$ ,  $ITmax_{pinus}$ ,  $D_{cal}$  e  $D_{sph}$ ,  $ITB_{teca}$ ,  $I_{qp_{teca}}$ ,  $IDH_{teca}$ ,  $ITB_{mogno}$ ,  $ITmax_{mogno}$ ,  $P_{mac}$ ,  $D_{las}$  e  $D_{pha}$ , aliado à maior vulnerabilidade das regiões Sul e Sudeste às pragas  $P_{acr}$ ,  $P_{cin}$ ,  $P_{pis}$ ,  $P_{pin}$ ,  $P_{hyb}$ ,  $P_{xyl}$ ,  $P_{cop}$ ,  $P_{gran}$  e  $P_{prob}$  será essencial adotar medidas eficientes e seguras de adaptação, com foco na redução dos impactos na produtividade e na sustentabilidade das plantações a longo prazo. Um resumo das principais medidas de adaptação para *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla* e *Khaya* spp. é apresentada na Tabela 6.

Nesse sentido, as quatro medidas de adaptação que devem ser consideradas em um primeiro momento, por exigirem maior tempo de execução e investimento em pesquisa, são: i) seleção de genótipos (espécies puras ou híbridos) mais tolerantes ao aumento de temperatura do ar e que, ao mesmo tempo, possuam maior eficiência do uso de água em condições de estresse hídrico (Martins et al., 2022; Wang et al., 2024), ii) introdução de inimigos potenciais para pragas; iii) práticas de manejo ambientalmente corretas para o controle doenças, e iv) desenvolvimento e aplicação de novas técnicas de hibridização, ou propagação vegetativa (molecular e convencional) para incorporar as características desejadas (Heuchel et al., 2024). Paralelamente, será necessário otimizar as práticas de implantação, condução e manejo dos povoamentos, assim como no ambiente de produção de mudas nos viveiros florestais (i.e., intensificação da irrigação e/ou utilização de sombrites) (Liu et al., 2025).

Tabela 6 – Principais medidas de adaptação identificadas na literatura para reduzir os impactos das mudanças climáticas nas plantações de *Pinus* spp., *Tectona grandis*, *Swietenia macrophylla* e *Khaya* spp.

<b>Categoria</b>	<b>Gênero/Espécie</b>	<b>Medida de adaptação</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Exemplos</b>	<b>Referências</b>
<b>Adaptação genética</b>	<i>Pinus</i> spp.	Seleção de genótipos e híbridos tolerantes ao estresse térmico e hídrico	Reduzir perdas produtivas sob aumento de temperatura e déficit hídrico	<i>P. caribaea</i> (caribaea, hondurensis); <i>P. tecunumanii</i> ; <i>P. maximinoi</i> ; <i>P. greggii</i> , <i>P. elliottii</i> × <i>P. caribaea</i> ; <i>P. caribaea</i> × <i>P. tecunumanii</i> ; <i>P. elliottii</i> × <i>P. caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	Mutete et al. (2015); Munhoz et al. (2021); Zulian et al. (2024); Resende et al. (2023) Manucelli (2024); Dias et al. (2022); Zanella et al. (2018)
	<i>S. macrophylla</i>	Uso de híbridos interespecíficos	Aumentar tolerância à seca e resistência a pragas	<i>S. macrophylla</i> × <i>S. mahagoni</i>	Quiala et al. (2022)
<b>Propagação e melhoramento</b>	<i>Pinus</i> spp.	Enxertia de topo (Propagação vegetativa)	Antecipar reprodução e selecionar genótipos mais resistentes	Enxertia para formação precoce de estróbilos	Pérez-Luna et al. (2021); Heuchel et al. (2024); Resende et al. (2023)
	<i>Pinus</i> spp. <i>T. grandis</i>	Microenraizamento com reguladores de crescimento	Aumentar enraizamento e sobrevivência das mudas	Ácido naftalenoacético; Paclobutrazol; Ácido indol-3-butírico	Abdalla et al. (2021); Wang e Yao (2021); Tambarussi et al. (2017)

	<i>T. grandis</i> , <i>S. macrophylla</i> , <i>Khaya</i> spp.	Micropropagação e embriogênese somática	Acelerar ciclos de seleção e clonagem de genótipos superiores	Organogênese; Embriogênese somática; 6-benzilaminopurina	Calderin et al. (2025)
	<i>S. macrophylla</i>	Biotecnologia associada à transferência gênica	Aumentar resistência à <i>H. grandella</i>	<i>Rhizobium radiobacter</i>	Madrigal-Villalobos (2025)
<b>Manejo das plantações</b>	<i>Pinus</i> spp.	Redução da densidade e espaçamentos mais amplos	Reduzir competição hídrica e estresse fisiológico	2,5 × 2,5 m; 3,0 × 2,5 m; 3,0 × 3,0 m; (≈1111–1600 árvores ha <sup>-1</sup> )	Andognini et al. (2025); Bai e Ding (2024); Cardoso et al. (2013); Guo et al. (2025); David et al. (2017)
	<i>T. grandis</i>	Redução da densidade e espaçamentos mais amplos	Reduzir competição hídrica e estresse fisiológico	6 × 4 m; 5 × 5 m; 10 × 3 m; 12 × 3 m (≈277–416 árvores ha <sup>-1</sup> )	Medeiros et al. (2017); Dhanush et al. (2025); Reis et al. (2023); Pachas et al. (2019 <sup>a</sup> )
	<i>S. macrophylla</i> , <i>Khaya</i> spp.	Espaçamentos iniciais moderados + desbaste	Equilibrar forma do fuste e produtividade	2,5 × 3,5 m; 3,0 × 2,0 m; 3,5 × 1,7 m (≈1100–1800 árvores ha <sup>-1</sup> )	Reis et al. (2019); Queiroga et al. (2023)
	<b>Práticas silviculturais</b>	<i>T. grandis</i>	Desbrota precoce e desrama progressiva	Garantir fuste único, melhorar a qualidade do tronco	Seleção do broto principal (~50 cm de altura e até 2–3 cm de diâmetro) e desrama progressiva até 50-60% da altura total

	<i>Khaya</i> spp.	Desrama e controle de brotações	Melhorar a arquitetura da árvore e a formação do fuste	Desrama a partir do 3º ano e remoção de ramos e brotos da metade inferior da árvore	Queiroga et al. (2023)
	<i>S. macrophylla</i>	Desbrota precoce e desrama progressiva	Reduzir a suscetibilidade ao ataque de <i>H. grandella</i> em fases iniciais	Intervenções nos primeiros três anos de cultivo	Telrandhe et al. (2022)
<b>Desbaste</b>	<i>Pinus</i> spp.	Desbaste leve a moderado	Aumentar eficiência hídrica e produtividade	Remoção de 15–30% da área basal	Ojeda et al. (2018); Simon e Ameztegui (2023); Heberle et al. (2025)
	<i>T. grandis</i>	Desbaste precoce e intenso	Reduzir competição intraespecífica	Redução de ~50% da área basal entre 3 e 8 anos	Seta et al. (2021); Souza et al. (2022)
	<i>S. macrophylla</i> , <i>Khaya</i> spp.	Desbastes progressivos	Maximizar crescimento do tronco	Redução de ~33% da área basal entre 4 e 8 anos, seguida de intervenções subsequentes	Peng, P., et al. (2022); Queiroga et al. (2023)

---

<b>Controle de pragas</b>	<i>Pinus</i> spp.	Controle biológico com agentes predadores; Controle químico e silvicultural	Reduzir riscos de Psir <sup>1</sup> , Pacr <sup>2</sup> , Pcin <sup>3</sup> , Ppin <sup>4</sup>	<sup>1</sup> <i>Deladenus siricidicola</i> + <sup>1</sup> Armadilhas atrativas miméticas à casca do <i>Pinus</i> spp.	Dodds e Groot (2011); Masagué et al. (2025); Falconaro et al. (2025); Della Lucia; Amaral (2020); Dornelas et al. (2017); Rodas et al., 2015; Prokocka et al., 2016;

<i>T. grandis</i>	Controle biológico com agentes predadores; Controle químico	Reduzir riscos de Pmac <sup>1</sup> , Pxl <sup>2</sup> , Phyb <sup>3</sup> , Pcop <sup>4</sup>	<sup>1</sup> <i>Cryptolaemus montrouzieri</i> ; <sup>1</sup> <i>Chilocorus nigritus</i> ; <sup>1</sup> <i>Coccinella septempunctata</i> ; <sup>1</sup> <i>Harmonia axyridis</i> ; <sup>1</sup> <i>Anagyrus kamali</i> Moursi; <sup>1</sup> <i>Achrysopophagus</i> sp.; <sup>1</sup> Neonicotinoides sistêmicos + inseticidas foliares  <sup>2</sup> <i>Metarhizium robertsii</i> ; <sup>2</sup> <i>Trichoderma asperellum</i>  <sup>3</sup> <i>Bacillus thuringiensis</i> ; <sup>3</sup> <i>Eucelatoria aurescens</i> ; <sup>3</sup> <i>Chetogena</i> spp.  <sup>4</sup> Inibidores da síntese de quitina (0,10–1,00%) e celulose atrativa (67,6–99,75%) + Fipronil	Reis et al. (2023); López et al. (2025); Pant e Dawadi (2025); Chong et al. (2015); Reynoso-López et al. (2021); Rodríguez-Becerra et al. (2024); Costa et al. (2020); Chiu e Li (2025).
<i>S. macrophylla</i> , <i>Khaya</i> spp.	Controle biológico integrado	Reduzir riscos de Pgran <sup>1</sup> e Prob <sup>2</sup>	<sup>1,2</sup> <i>Bacillus bombysepticus</i> ; <sup>1,2</sup> <i>Bacillus thuringiensis</i> ; <sup>1,2</sup> <i>Bacillus velezensis</i> ; <sup>1,2</sup> Inseticidas (triclorfon, paration, carbaril, azinfos etil e piretroides) + Colacid	Queiroga et al. (2023); Tra et al. (2022); Castro et al. (2019)

<b>Controle de doenças</b>	Todas	Fungicidas cúpricos; Controle biológico e Práticas Silviculturais	Reduzir riscos de Ddot <sup>1</sup> , Dcal <sup>2</sup> , Dshp <sup>3</sup> , Dlas <sup>4</sup> e Dpha <sup>5</sup>	<sup>1,2,3</sup> Óxido cuprodo (Cu <sub>2</sub> O) + Calda bordalesa (CuSO <sub>4</sub> + Ca(OH) <sub>2</sub> ); <sup>1,2,3</sup> <i>Bacillus pumilus</i> ; <sup>1,2,3</sup> <i>A. migulanus</i> ; <sup>1,2,3</sup> <i>P. fructuariae-cellae</i> ; <sup>4</sup> <i>Trichoderma</i> spp.; <sup>4</sup> <i>Bacillus</i> sp.; <sup>4</sup> Extratos vegetais	Resende et al. (2023); Alenezi et al. (2016); Dai et al. (2021); Borges et al. (2018); Rusin et al. (2021); Reis et al. (2019)
				<sup>5</sup> Poda dos ramos afetados (15 a 30 cm do ponto de infecção) + Selagem das feridas	
<b>Sistemas integrados</b>	<i>T. grandis</i> , <i>S. macrophylla</i> , <i>Khaya</i> spp.	Sistemas silvipastoris	Reduzir estresse térmico e hídrico	Integração com bovinos a partir do 1º ou 2º ano (100–150 árvores ha <sup>-1</sup> )	Reis et al. (2023); Budiadi et al. (2025)
	<i>T. grandis</i> , <i>S. macrophylla</i> , <i>Khaya</i> spp.	Sistemas agroflorestais	Regulação do microclima e redução da ETc	Consórcio com milho, arroz, mandioca e café	Santos et al. (2022); Pachas et al. (2019b)

Em locais com risco moderado a elevado por IH (pinus, teca e mogno), IDH (pinus e teca) e Iqp (pinus e teca), como o Nordeste e partes do Centro-Oeste e do Sudeste, a manutenção da serrapilheira e remoção parcial do sub-bosque são práticas conservacionistas que devem ser adotadas em cenários futuros (Zawadzka and Ślupska, 2022), por reduzir as flutuações térmicas e ETc e manter a umidade do solo (Prévosto et al., 2020).

Medidas específicas de adaptação voltadas ao controle das pragas Psir e Pacr, Pcin, Ppin, Ppis, Phyb, Pxyl, Pcop, Pgran e Prob devem ser priorizadas no Sul e região costeira brasileira, assim como para Pmac na região Norte, devido aos padrões de maior risco no FP e FD (nos dois SSPs). Com relação às doenças, Ddot, Dcal, Dsph, Dlas e Dpha, o monitoramento é essencial devido ao maior risco projetado na área de estudo (Figura 7).

A integração das práticas acima descritas com sistemas de alerta precoce é fundamental para antecipar surtos e minimizar prejuízos. Ferramentas baseadas em inteligência artificial, associadas a previsões probabilísticas de risco, monitoramento por drones e projeções climáticas de alta resolução, permitem identificar com maior precisão espacial e temporal condições e áreas propícias ao aumento populacional de pragas ou infestação de doenças (Orellana et al., 2025), viabilizando implementar ações preventivas mais eficazes e seguras (Eugenio et al., 2021; Raffa et al., 2023).

Por fim, o suporte governamental por meio de programas de controle fitossanitário, como o Fundo Nacional de Controle de Pragas Florestais (FUNCEMA), Programa Nacional de Controle à Vespa-da-Madeira (PNCVM) e o Programa Nacional de Prevenção e Vigilância de Pragas Quarentenárias Ausentes (PNPV) (Penteado et al., 2012) continuará sendo fundamental para reduzir os riscos projetados para o clima futuro. Assim, apenas a adoção integrada dessas estratégias de adaptação, tecnologias de ponta, planejamento climático e políticas públicas, permitirá reduzir os riscos, suscetibilidades e vulnerabilidades dos plantios brasileiros de *Pinus* spp., *T. grandis*, *S. macrophylla* e *Khaya* spp.

#### 4. CONCLUSÃO

Ao longo do século XXI são projetadas mudanças na temperatura (mínima, média e máxima) do ar, radiação solar global, precipitação, umidade relativa, evapotranspiração e na deficiência hídrica em grande parte do território brasileiro. Essas alterações serão mais intensas no Centro-Oeste, Norte, Nordeste e na porção norte do Sudeste, enquanto no Sul são projetadas mudanças menos intensas. Tais mudanças podem tornar as plantações de *Pinus* spp., *T. grandis*,

*S. macrophylla* e *Khaya* spp. ainda mais vulneráveis nas regiões onde as mudanças são mais persistentes, e impactar a produtividade, gerando perdas econômicas para o setor.

Os maiores riscos às plantações de *Pinus* spp. no clima futuro são devido à quebra de produtividade, sendo intensificado em área e magnitude (chegando a ~ 84% da área com risco moderado a muito alto no futuro distante), seguido da vespa da madeira (entre 17 a 87%), seca de ponteiros causada por *Sphaeropsis sapinea* (entre 58 e 66%), estresse por temperaturas basais (entre 5 e 64%), queima de acículas por *Calonectria pteridis* (entre 12 e 53%), estresse por deficiência hídrica (entre 32 e 45%). Para a *T. grandis*, serão o estresse por temperaturas basais (entre 88 e 98%), quebra de produtividade por deficiência hídrica (entre 84 a 88%) e a incidência de cancro (entre 53 a 59%). Já *S. macrophylla* e espécies de *Khaya* spp. apresentarão maior vulnerabilidade a estresses térmicos, sobretudo associados às temperaturas basais (entre 48 a 89%) e máximas (entre 41 a 80%).

Para minimizar os riscos e vulnerabilidades futuras, será essencial selecionar espécies e híbridos mais tolerantes a temperatura e estresse hídrico, espaçamentos de plantio de 2,5m x 2,5m ou 3,0m x 3,0m com stockings ótimos entre 1111 e 1600 árvores ha<sup>-1</sup> para o *Pinus* spp., 6,0 m × 4,0 m (com 416 árvores ha<sup>-1</sup>) ou 5,0 m × 5,0 m (com 400 árvores ha<sup>-1</sup>) para *T. grandis* e 2,5 × 3,5 m (com 1100 árvores ha<sup>-1</sup>) ou 3,5 × 1,7 m (com 1800 árvores ha<sup>-1</sup>) para *S. macrophylla* e espécies do gênero *Khaya*. Desbastes e desramas devem ser realizadas de forma mais frequente e ajustadas à dinâmica de crescimento dos povoamentos. Por fim, deverá ser ampliado o controle da *Sphaeropsis sapinea*, *Calonectria pteridis*, *Sirex noctilio*, *Hyblaea puera* e *Hypsipyla robusta*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, N.; TAHA, N.; BAYOUMI, Y.; EL-RAMADY, H.R.; SHALABY, T. Paclobutrazol applications in agriculture, plant tissue cultures and its potential as stress ameliorant: A mini review. **Environmental Biodiversity and Soil Security**, v. 5, p. 245-257, 2021. <https://doi.org/10.21608/jenvbs.2021.95536.1143>.
- AKBER, M.A.; FANG, X. Research Progress on Diseases Caused by the Soil-Borne Fungal Pathogen *Rhizoctonia solani* in Alfalfa. **Agronomy**, v. 14, n. 7, p. 1483, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071483>.
- ALENEZI, F.N.; FRASER, S.; BELKA, M.; DOĞMUŞ, T. H.; HECKOVA, Z.; OSKAY, F.; BELBAHRI, S.; WOODWARD, S. Biological control of *Dothistroma* needle blight on pine with *Aneurinibacillus migulanus*. **Forest Pathology**, v. 46, p. 555–558, 2016. <https://doi.org/10.1111/efp.12237>.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M.N.; RASHID, I.U.; KAMIL, S.; ABID, M.A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M.S.; SÖRENSSON, A.A.; ARIAS, P.A.; ALVES, L.M.; TIPPETT, M.K.; SAEED, S.; HAARSMA, R.; DOBLAS-REYES, F.J.; SAEED, F.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J.A.; EHSAN, M.A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, Á.G.; ALI, M.A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M.B. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155-183, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.
- ANDERSON, N.A.; STRETTON, H.M.; GROTH, J.V.; FLENTJE, N.T. Genetics of heterokaryosis in *Thanatephorus cucumeris*. **Phytopathology**, v. 62, n. 9, p. 1057, 1972.
- ANDOGNINI, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; OLIVEIRA, B.F.D. Mechanized harvesting of a *Pinus taeda* L. forest does not impair the physical properties of a Nitossolo Bruno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 49, e0240113, 2025. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240113>.
- ARNELL, N.W.; FREEMAN, A.; KAY, A.L.; RUDD, A.C.; LOWE, J.A. Indicators of climate risk in the UK at different levels of warming. **Environmental Research Communications**, v. 3, n. 9, 095005, 2021. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac24c0>.
- ATTAROD, P.; AOKI, M.; KOMORI, D.; ISHIDA, T.; FUKUMURA, K.; BOONYAWAT, S.; TONGDEENOK, P.; YOKOYA, M.; PUKNGUM, S.; PAKOKTOM, T. Estimation of crop coefficients and evapotranspiration by meteorological parameters in a rain-fed paddy rice [*Oryza sativa*] field, cassava [*Manihot esculenta*] and teak [*Tectona grandis*] plantations in Thailand. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 62, n. 3, 2006.
- BAI, Y.; DING, G. Estimation of changes in carbon sequestration and its economic value with various stand density and rotation age of *Pinus massoniana* plantations in China. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 16852, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67307-z>.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v. 240, p. 95-105, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.007>.

BERTI FILHO, E. **Observações sobre a biologia de *Hypsipyla grandella* (Zeller, 1848) (Lepidoptera, Phycitidae)**. 1973. 122 p. Dissertação. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1973.

BINDU, T.N.; BALAKRISHNAN, P.; SAJEEV, T.V.; SUDHEENDRAKUMAR, V.V. Seeding baculovirus HpNPV in the epicentre populations of teak defoliator, *Hyblaea puera* to prevent large-scale outbreaks. **Current Science**, v. 122, n. 7, p. 812, 2022.

BOOTH, T.H.; JOVANOVIĆ, T.; NEW, M. A new world climatic mapping program to assist species selection. **Forest Ecology and Management**, v. 163, n. 1-3, p. 111-117, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00531-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00531-X).

BORGES, R.C.F. **Etiologia do cancro da teca e caracterização patogênica e molecular de *Lasiodiplodia theobromae***. 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia). Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

BORGES, R.C.F.; MARQUES, E.; MACEDO, M.A.; MARTINS, I.; SILVA FILHO, J.G.D.; MELLO, S.C.M.D. Biocontrol of teak canker caused by *Lasiodiplodia theobromae*. **Revista Árvore**, v. 42, n. 3, p. e420304, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882018000300004>.

BORGES, R.; BOFF, M.I.C.; MANTOVANI, A.; BORGES, M.; LAUMANN R.A.; BLASSIOLI-MORAES, M.C. Why shading cedar (*Cedrela fissilis*) reduces damage caused by mahogany shoot borer, *Hypsipyla grandella* (Zeller)? **Forest Ecology and Management**, v. 504, p. 119853, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119853>.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J.R.M.; SENTELHAS, P.C. Silvopastoral system with *Eucalyptus* as a strategy for mitigating the effects of climate change on Brazilian pasturelands. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, p. e20180425, 2020. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020180425>.

BUBKAMP, J.; LANGER, G.J.; LANGER, E.J. *Sphaeropsis sapinea* and fungal endophyte diversity in twigs of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in Germany. **Mycological Progress**, v. 19, p. 985–999, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11557-020-01617-0>.

BUDIADI; SAWITRI; PRIMANANDA, E.; JIHAD, A.N.; CAMPERA, M.; RAHMAWATI, R.B. Integrating indigenous crops in agroforestry systems: Lesser yam and teak mixed systems are more profitable than monocultures in Indonesia. **Plants, People, Planet**, p. 1–13, 2025. <https://doi.org/10.1002/ppp3.70145>.

CALDERIN, O.C.L.; LÓPEZ, R.C.; CABRERAS, A.S.; MOREJÓN, R.C. Desarrollo en campo de *Swietenia macrophylla* King propagada *in vitro*: evaluación comparativa con propagación convencional. **Revista Forestal Baracoa**, v. 44, p. cu-id, 2025. <https://cu-id.com/0522/v44e02>.

CAMARGO, T.S.; NICKELE, M.A.; FILHO, W.R.; PENTEADO, S.R.C.; QUEIROZ, E.C.; AUER, C.G. Fungal community associated with the leaf-cutting ant *Acromyrmex crassispinus* (Hymenoptera: Formicidae) colonies: a search for potential biocontrol agents. **Microbial Ecology**, v. 86, n. 2, p. 1281–1291, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02217-7>.

CAMERON, N.L.; CARNEGIE, A.J.; WARDLAW, T.; LAWSON, S.; VENN, T. Economic appraisal of *Sirex* wood wasp (*Sirex noctilio*) control in Australian pine plantations. **Australian Forestry**, v. 81, p. 37–45, 2018. <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1430436>.

CARDOSO, D.J.; LACERDA, A.E.B.; ROSOT, M.A.D.; GARRASTAZÚ, M.C.; LIMA, R.T. Influence of spacing regimes on the development of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 761–769, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.021>.

CARNEGIE, A.J.; MATSUKI, M.; HAUGEN, D.A.; HURLEY, B.P.; AHUMADA, R.; KLASMER, P.; SUN, J.; IEDE, E.T. Predicting the potential distribution of *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae), a significant exotic pest of *Pinus* plantations. **Annals of Forest Science**, v. 63, n. 2, p. 119-128, 2006. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2005104>.

CARNICER, J.; BARBETA, A.; SPERLICH, D.; COLL, M.; PEÑUELAS, J. Contrasting trait syndromes in angiosperms and conifers are associated with different responses of tree growth to temperature on a large scale. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 409, 2013. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00409>.

CASAROLI, D.; ROSA, F.D.O.; ALVES, J.; EVANGELISTA, A.W.P.; BRITO, B.V.D.; PENA, D.S. Aptidão edafoclimática para o mogno-africano no Brasil. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 357–368, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509831606>.

CASTRO, F.S. **Zoneamento agroclimático para a cultura do Pinus no estado do Espírito Santo**. 2008, 123 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre - ES. 2008.

CASTRO, M.T.; MONTALVÃO, S.C.L.; MONNERAT, R.G. Control of mahogany shoot borer, *Hypsipyla grandella* (Lepidoptera: Pyralidae), with *Bacillus thuringiensis* in a systemic way. **Nativa**, v. 7, n. 4, p. 426-430, 2019. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i4.6567>.

CASTRO-GUEDES, C.F.; DE ALMEIDA, L.M.; PENTEADO, S.R.C.; MOURA, M.O. Effect of different diets on biology, reproductive variables and life and fertility tables of *Harmonia axyridis* (Pallas)(Coleoptera, Coccinellidae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 60, p. 260-266, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rbe.2016.03.003>.

CHALIER, P.; MARTINEZ-LOPEZ, B.; LACOUR, M.A.; RIGOU, P. Extraction of turpentine essential oil from *Pinus pinaster* ait: Comparison of yield and composition between conventional-or microwave assisted-hydro-distillation and vacuum distillation. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 41, p. 101702, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101702>.

CHASE, K.D. **Forest stand preference of *Sirex nigricornis*, and *Sirex noctilio* hazard in the Southeastern United States**. 2013, 99 f. Tese (Doutorado em Agricultural Life Sciences). Mississippi State University, Starkville, MS, 2013.

CHI, N.M.; PHAM, D.L.; NHUNG, N.P.; HOA, N.T.H.; DO, T.T.; TRAN, T.L.T.; VU, V.V.L.; PHAM, P.T.T.T.; NGUYEN, N.D.H.; DUONG, D.X.T.; PHAM, P.Q.T.; DELL, B. Integrated pest management of *Hypsipyla robusta* shoot-tip borer (Lepidoptera: Pyralidae) in *Chukrasia tabularis* (Sapindales: Meliaceae). **Journal of economic entomology**, v. 116, n. 2, p. 486-495, 2023. <https://doi.org/10.1093/jee/toad033>.

CHIU, C.I.; LI, H.F. Challenges in baiting to manage fungus-growing termite colonies. **Journal of Economic Entomology**, v. 118, n. 3, p. 1014–1022, 2025. <https://doi.org/10.1093/jee/toae276>.

CHONG, J.H.; RODA, A.L.; MANNION, C.M. Life history of the mealybug, *Maconellicoccus hirsutus* (Hemiptera: Pseudococcidae), at constant temperatures. **Environmental Entomology**, v. 37, n. 2, p. 323–332, 2008. <https://doi.org/10.1093/ee/37.2.323>.

CIVIDANES, F.J.; PARRA, J.R. Biologia em diferentes temperaturas e exigências térmicas de percevejos pragas da soja. I. *Nezara viridula* (L.) (Heteroptera: Pentatomidae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 23, n. 2, p. 243–250, 1994.

CLEARY, M.; MORRISON, D.J.; KAMP, B.D. Symptom development and mortality rates caused by *Armillaria ostoyae* in juvenile mixed conifer stands in British Columbia's southern interior region. **Forest Pathology**, v. 51, e12675, 2021. <https://doi.org/10.1111/efp.12675>.

CLÉMENT, C.; PIERRET, A.; MAEGHT, J.L.; HARTMANN, C.; XAYYATHIP, K.; SOULILEUTH, B.; SOUNYAFONG, P.; LATSACHACK, K.; THAMMAHACKSA, C.; SENGTAHEUANGHOUNG, O. Linking tree-rooting profiles to leaf phenology: a first attempt on *Tectona grandis* Linn F. **Trees**, v. 33, n. 5, p. 1491–1504, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01876-9>.

CORDEIRO, Y.E.; PINHEIRO, H.A.; FILHO, B.G.S.; CORRÊA, S.S.; SILVA, J.R.; DIAS-FILHO, M.B. Physiological and morphological responses of young mahogany (*Swietenia macrophylla* King) plants to drought. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 7, p. 1449–1455, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.054>.

CORREA, W.D.S.C.; SOARES, W.R.; AYLAS, G.Y.R.; REIS JUNIOR, N.C.; MARENGO, J.A.; CHOU, S.C.; NOBRE, C. Avaliação das simulações de temperatura e precipitação de um subconjunto de modelos do CMIP6 para o Brasil. **Derbyana**, v. 43, e774, 2022. <http://dx.doi.org/10.14295/derb.v43.774>.

COSTA, J.G.; SANTOS, I.C.D.L.; PERES FILHO, O.; ZANETTI, R.; SANTOS, A.D. Characterization of injury caused by *Coptotermes testaceus* in *Tectona grandis* plantations in Brazil. **Cerne**, v. 26, n. 3, p. 310–314, 2020. <https://doi.org/10.1590/01047760202026032739>.

CROUS, P.W.; WINGFIELD, M.J. A monograph of *Cylindrocladium*, including anamorphs of *Calonectria*. **Mycotaxon**, v. 51, p. 341–435, 1994.

COUTINHO, E.R.C.; SILVA, R.M.; DELGADO, A.R.S. Utilização de Técnicas de Inteligência Computacional na Predição de Dados Meteorológicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 24–36, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778620140115>.

DAI, Y.; WU, X.Q.; WANG, Y.H.; ZHU, M.L. Biocontrol potential of *Bacillus pumilus* HR10 against *Sphaeropsis* shoot blight disease of pine. **Biological Control**, v. 152, 104458, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104458>.

DARKO, C.B.; OPUNI-FRIMPONG, E.; OWUSU, S.A.; KYERE, B.; STORER, A.J. Sustainability of mahogany production in plantations: does resource availability influence susceptibility of young mahogany plantation stands to *Hypsipyla robusta* infestation?

**International Journal of Forestry Research**, v. 2022, n. 1, p. 5588184, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5588184>.

DAVID, H.C.; ARCE, J.E.; OLIVEIRA, E.B.D.; NETTO, S.P.; MIRANDA, R.O.V.D.; EBLING, Â.A. Economic analysis and revenue optimization in management regimes of *Pinus taeda*. **Revista Ceres**, v. 64, p. 222–231, 2017. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764030002>.

DE JONG, P.; BARRETO, T.B.; TANAJURA, C.A.; KOULOUKOU, D.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K.P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E.A. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, v. 141, p. 390–401, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.086>.

DELLA LUCIA, T.M.C.; AMARAL, K.D. Past and current strategies for the control of leaf-cutting ants in Brazil. In: **Forest Pest and Disease Management in Latin America: Modern Perspectives in Natural Forests and Exotic Plantations**. [S.l.]: Springer, 2020. p. 31–43. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35143-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35143-4_3).

DESPREZ-LOUSTAU, M.L.; MARÇAIS, B.; NAGELEISEN, L.; PIOUS, D.; VANNINI, A. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. **Annals of forest science**, v. 63, n. 6, p. 597–612, 2006. <https://doi.org/10.1051/forest:2006040>.

DHANUSH, G. M.; HANUMANTHAPPA, D. C.; RAVI, A. R.; CHANDRIKA, K.; KOTYAL, K. Growth performance of teak at different planting densities. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 15, n. 7, p. 374–380, 2025. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2025/v15i74939>.

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

DIAS, M.C.; FERREIRA DE OLIVEIRA, J.M.P.; MARUM, L.; PEREIRA, V.; ALMEIDA, T.; NUNES, S.; ARAÚJO, M.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; CORREIA, C.M.; SANTOS, C. *Pinus elliottii* and *P. elliottii* × *P. caribaea* hybrid differently cope with combined drought and heat episodes. **Industrial Crops and Products**, v. 176, p. 114428, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114428>.

DHOBE, N. S.; NAIK, K. V.; GOLVANKAR, G. M.; HEGADE, P. B. Relationship between activity of major defoliators of teak and weather parameters under konkan conditions of Maharashtra State, India. **Plant Archives**, v. 14, n. 2, p. 847–850, 2014.

DODDS, K.J.; GROOT, P. *Sirex*, surveys and management: challenges of having *Sirex noctilio* in North America. In: **The *Sirex* woodwasp and its fungal symbiont: research and management of a worldwide invasive pest**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. p. 265–286. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1960-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1960-6_19).

DORNELAS, A.S.P.; SARMENTO, R.D.A.; PEDRO-NETO, M.; SILVA, D.G.D.; SANTOS, G.R.D.; NASCIMENTO, M.O.D.; OLIVEIRA, C.A.; SOUZA, D.J.D. Susceptibility of *Atta sexdens* worker ants treated with the immunosuppressant Sandimmun Neoral to *Metarhizium*

*anisopliae*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 2, p. 133–136, 2017. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000200008>.

DOURADO-NETO, D.; LIER, Q.J.V.; METSELAAR, K.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agricola**, v. 67, p. 7–95, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000100013>.

EFFRAIM, N. O. **Biology, economic impact and potential for semiochemical-based control of mahogany shootborer, *Hypsipyla robusta* (Moore) (Lepidoptera: Pyralidae), African rhinoceros beetle, *Oryctes monoceros* (Olivier) (Coleoptera: Scarabaeidae) and maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae)**. 1996, 98 f. Tese (Doutorado em Pest Management). Simon Fraser University, Canadá, 1996.

ESCANDÓN, M.; CAÑAL, M.J.; PASCUAL, J.; PINTO, G.; CORREIA, B.; AMARAL, J.; MEIJÓN, M. Integrated physiological and hormonal profile of heat-induced thermotolerance in *Pinus radiata*. **Tree Physiology**, v. 36, p. 63–77, 2016. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv127>.

EUGENIO, F.C.; SILVA, S.D.P.; FANTINEL, R.A.; DE SOUZA, P.D.; FELIPPE, B.M.; ROMUA, C.L.; ELSENBACH, E.M. Remotely piloted aircraft systems to identify pests and diseases in forest species: the global state of the art and future challenges. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 10, n. 1, p. 320–333, 2021. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2021.3087445>.

FAGUNDES, F.F.A.; MARTINS, F.B.; TORRES, R.R.; MARRAFON, V.H.A. Global Warming Levels (1.5–4° C) and Water Availability for Eucalyptus Plantations Based on High-resolution CMIP6 Models. **Earth Systems and Environment**, p. 1-18, 2025. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00916-4>.

FALCONARO, A.C.; FISCHBEIN, D.; CORLEY, J.C. Sex bias in parasitism by *Deladenus siricidicola* and its implications for the success of biological control of invasive *Sirex noctilio* populations. **Biocontrol Science and Technology**, p. 1–6, 2025. <https://doi.org/10.1080/09583157.2024.2448660>.

FÉLIX, C.; DUARTE, A. S.; VITORINO, R.; GUERREIRO, A. C.; DOMINGUES, P.; CORREIA, A. C.; ALVES, A.; ESTEVES, A. C. Temperature modulates the secretome of the phytopathogenic fungus *Lasiodiplodia theobromae*. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1096, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01096>.

FERREIRA, M.A.; ALFENAS, A.C.; MAFIA, R.G. *Ceratocystis fimbriata* em espécies florestais e agrônômicas no Brasil. In: **Patologia florestal: desafios e perspectivas**. São Carlos, p. 75–101, 2013.

FERREIRA, N.C.R.; MARTINS, M.; TAVARES, P.S.; CHAN CHOU, S.; MONTEIRO, A.; GOMES, L.; SANTANA, A. Assessment of crop risk due to climate change in Sao Tome and Principe. **Regional Environmental Change**, v. 21, p. 1–12, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01746-6>.

FIRPO, M.Â.F.; GUIMARÃES, B.D.S.; DANTAS, L.G.; SILVA, M.G.B.D.; ALVES, L.M.; CHADWICK, R.; LLOPART, M.P.; OLIVEIRA, G.S.D. Assessment of CMIP6 models

performance in simulating present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, v. 4, p. 948499, 2022. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.948499>.

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

FREITAS, C.H.; COELHO, R.D.; COSTA, J.O.; SENTELHAS, P.C. A bitter cup of coffee? Assessing the impact of climate change on Arabica coffee production in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 957, p. 177546, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177546>.

FRENSCH, G.; ZALESKI, S.R.; SCHORR, R.R.; DANTAS, L.G.; KRASNIAK, M.; LAZZARI, S.M.; MAIA, B.H.L.N.; MARQUES, F.A. Attraction of *Pissodes castaneus* (Coleoptera, Curculionidae) to *Pinus taeda*: laboratory and field evaluation. **Chemoecology**, v. 33, n. 1, p. 45-54, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00049-023-00383-1>.

GALEANO, E.; VASCONCELOS, T. S.; NOVAIS DE OLIVEIRA, P.; CARRER, H. Physiological and molecular responses to drought stress in teak (*Tectona grandis* Lf). **PLoS One**, v. 14, n. 9, p. e0221571, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221571>.

GARNAS, J.R.; HURLEY, B.P.; SLIPPERS, B.; WINGFIELD, M.J. Biological control of forest plantation pests in an interconnected world requires greater international focus. **International Journal of Pest Management**, v. 58, p. 211–223, 2012. <https://doi.org/10.1080/09670874.2012.698764>.

GENG, G.; ZHANG, B.; GU, Q.; HE, Z.; ZHENG, R. Drought propagation characteristics across China: time, probability, and threshold. **Journal of Hydrology**, v. 631, p. 130805, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130805>.

GEORGIEVA, M.I.; HLEBARSKA, S. A review of *Sphaeropsis sapinea* occurrence on Pinus species in Bulgaria. **Journal of BioScience and Biotechnology**, v. 5, n. 3, p. 247-250, 2016.

GIESEL, A.; BOFF, M.I.C.; BOFF, P. Seasonal activity and foraging preferences of the leaf-cutting ant *Atta sexdens piriventris* (Santschi)(Hymenoptera: Formicidae). **Neotropical entomology**, v. 42, p. 552-557, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13744-013-0160-2>.

GOMES, G.S.L.; CALDEIRA, M.V.W.; GOMES, R.; DUARTE, V.B.R.; MOMOLLI, D.R.; GODINHO, T.O.; MOREIRA, S.O.; TRAZZI, P.A.; SOBRINHO, L.S.; CÁSSIA, A.; CARNEIRO, O.; SCHUMACHER, M.V. Assessing the of carbon and nitrogen storage potential in *Khaya* spp. stands in Southeastern Brazil. **New Forests**, v. 55, n. 6, p. 1913-1937, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11056-024-10065-7>.

GONZALEZ-BENECKE, C.A.; TESKEY, R.O.; MARTIN, T.A.; JOKELA, E.J.; FOX, T.R.; KANE, M.B.; NOORMETS, A. Regional validation and improved parameterization of the 3-PG model for *Pinus taeda* stands. **Forest Ecology and Management**, v. 361, p. 237-256, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.025>.

GRAÇA, R.N.; ALFENAS, A.C.; MAFFIA, L.A.; LAU, D.; ROCABADO, J.M.A. Factors influencing infection of eucalypts by *Cylindrocladium pteridis*. **Plant Pathology**, v. 58, n. 5, p. 971-981, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02094.x>.

GUADA, G.; CAMARERO, J.J.; SÁNCHEZ-SALGUERO, R.; CERRILLO, R.M.N. Limited growth recovery after drought-induced forest dieback in very defoliated trees of two pine species. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 418, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00418>.

GUO, X.; YANG, G.; MA, Y.; QIAO, S.; CHEN, H.; LIU, F.; MA, S. Effect of plant spacing on the soil properties and fertility of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in sandy land of the agro-pastoral ecotone in northern China. **Frontiers in Environmental Science**, v. 13, p. 1477459, 2025. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1477459>.

GURSKI, B.C.; SOUZA, J.L.M.; JERSZURKI, D. Crop coefficient in different densities of *Pinus taeda*. **Advances in Forestry Science**, v. 5, p. 249–252, 2018.

HACKBARTH, A. C.; BONALDO, S. M.; TRENTO, R. A.; RIBEIRO, A. S. Influência da concentração, do fotoperíodo e da temperatura de armazenamento na germinação de urediniósporos de *Olivea tectonae*. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 2, p. 340-348, 2014.

HARDING, A.E.; RIVINGTON, M.; MINETER, M.J.; TETT, S.F.B. Agro-meteorological indices and climate model uncertainty over the UK. **Climatic Change**, v. 128, p. 113-126, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130805>.

HEBERLE, T.; STEPKA, T.F.; JÚNIOR, M.D.; NOCOLETTI, M.F. Growth of *Pinus taeda* L. in the first years after high thinning. **Ciência Rural**, v. 55, p. e20240186, 2025. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20240186>.

HEGRE, H.; BUHAUG, H.; CALVIN, K.V.; NORDKVELLE, J.; WALDHOF, S.T.; GILMORE, E. Forecasting civil conflict along the shared socioeconomic pathways. **Environmental Research Letters**, v. 11, p. 054002, 2016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054002>.

HERRERA-FEIJOO, R. J.; TORRES, B.; LÓPEZ-TOBAR, R.; TIPÁN-TORRES, C.; TOULKERIDIS, T.; HEREDIA-R, M.; MATEO, R. G. Modelling climatically suitable areas for Mahogany (*Swietenia macrophylla* King) and their shifts across Neotropics: The role of Protected Areas. **Floresta**, v. 14, n. 2, p. 385, 2023. <https://doi.org/10.3390/f14020385>.

HEUCHEL, A.; HALL, D.; ALMQVIST, C.; WENNSTRÖM, U.; PERSSON, T. Topgrafting as a tool in operational Scots pine breeding. **Journal of Forestry Research**, v. 35, n. 1, p. 111, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01766-y>.

HIROSE, E.; PANIZZI, A. R.; CATTELAN, A. J. Effect of relative humidity on emergence and on dispersal and regrouping of first instar *Nezara viridula* (L.) (Hemiptera: Pentatomidae). **Entomologia Neotropical**, v. 35, p. 757-761, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2006000600006>.

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

IRELAND, K.B.; BULMAN, L.; HOSKINS, A.J.; PINKARD, E.A.; MOHAMMED, C.; KRITICOS, D.J. Estimating the potential geographical range of *Sirex noctilio*: comparison with an existing model and relationship with field severity. **Biological Invasions**, v. 20, p. 2599-2622, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10530-018-1721-4>.

International Tropical Timber Organization (ITTO), 2025. **Tropical Timber Market Report**. v. 28, n. 4, p. 1-28. International Tropical Timber Organization, Yokohama, Japan. Disponível em: <https://www.itto.int/>.

JAIN, J.; MUÑOZ-ARRIOLA, F.; KHARE, D. Evidencing sources of flood disaster policy improvement leveraging flood risk attributes in India. **Natural Hazards**, p. 1-28, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07108-3>.

JEREZ-RICO, M.; COUTINHO, S. Establishment and management of planted Teak forests. In: **The Global Teak Study: Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources**. IUFRO World Series, v. 36, p. 49-65, 2017.

KAIRO, M.T.K.; MURPHY, S.T. Temperature and plant nutrient effects on the development, survival and reproduction of *Cinara* sp. nov., an invasive pest of cypress trees in Africa. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 92, n. 2, p. 147-156, 1999. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.1999.00534.x>.

KANDHOLA, G.; DJIOLEU, A.; RAJAN, K.; LABBÉ, N.; SAKON, J.; CARRIER, D.J.; KIM, J.W. Maximizing production of cellulose nanocrystals and nanofibers from pre-extracted loblolly pine kraft pulp: a response surface approach. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 7, p. 1-16, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40643-020-00302-0>.

KC, K., ME, P., SA, V., Kamalolbhanan, B.N., MN, A., Rocha, D., Bindyalaxmi, K., 2025. Proteomic and Hormonal Insights into Drought Stress Mitigation in *Swietenia macrophylla*: Role of Jasmonic Acid and Salicylic Acid in Enhancing Resilience. **Research Square**. 1, 1-18. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5763391/v1>.

KHAN, M.N.I.; SHIL, M.C.; AZAD, M.S.; SADATH, M.N.; FERROZ, S.M.; MOLLICK, A.S. Allometric relationships of stem volume and stand level carbon stocks at varying stand density in *Swietenia macrophylla* King plantations, Bangladesh. **Forest Ecology and Management**, v. 430, p. 639-648, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.002>.

KIMATI, H.; AMORIM, L.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A.; REZENDE, J. A. M. **Manual de Fitopatologia: Doenças das Plantas Cultivadas**. São Paulo, p. 706, 1997.

KOTTAIPALAYAM-SOMASUNDARAM, S. R.; JACOB, J. P.; AIYAR, B.; MERZENDORFER, H.; NAMBIAR-VEETIL, M. Chitin metabolism as a potential target for RNAi-based control of the forestry pest *Hyblaea puera* Cramer (Lepidoptera: Hyblaeidae). **Pest Management Science**, v. 78, n. 1, p. 296-303, 2022. <https://doi.org/10.1002/ps.6634>.

LABBÉ, F.; MARCAIS, B.; DUPOUEY, J.L.; BÉLOUARD, T.; CAPDEVIELLE, X.; PIOUS, D.; ROBIN, C.; DUTECH, C. Pre-existing forests as sources of pathogens? The emergence of *Armillaria ostoyae* in a recently planted pine forest. **Forest Ecology and Management**, v. 357, p. 248–258, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.028>.

LANTSCHNER, M.V.; VILLACIDE, J.M.; GARNAS, J.R.; CROFT, P.; CARNEGIE, A.J.; LIEBHOLD, A.M.; CORLEY, J.C. Temperature explains variable spread rates of the invasive woodwasp *Sirex noctilio* in the Southern Hemisphere. **Biological Invasions**, v. 16, p. 329–339, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0521-0>.

- LECH, P.; MYCHAYLIV, O.; HILDEBRAND, R.; ORMAN, O. Weather conditions drive the damage area caused by *Armillaria* root disease in coniferous forests across Poland. **Plant Pathology Journal**, v. 39, p. 548, 2023. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.07.2023.0098>.
- LEMES, P. G.; ZANUNCIO, A. J. V.; OLIVEIRA, L. S.; MATOS, M. F.; LEITE, G. L. D.; SOARES, M. A.; ZANUNCIO, J. C.; ASSIS JÚNIOR, S. L. *Hypsipyla grandella* (Lepidoptera: Pyralidae) boring *Khaya ivorensis* (Meliaceae) fruits and seeds in Brazil: first report. **Florida Entomologist**, v. 102, n. 1, p. 266-269, 2019. <https://doi.org/10.1653/024.102.0151>.
- LENDERINK, G.; BUISHAND, A.; VAN DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1145–1159, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>.
- LI, L.; LI, Y.; DING, G. Response mechanism of carbon metabolism of *Pinus massoniana* to gradient high temperature and drought stress. **BMC genomics**, v. 25, n. 1, p. 166, 2024. <https://doi.org/10.1186/s12864-024-10054-2>.
- LIMA, F.J.L.; GONÇALVES, A.R.; COSTA, R.S.; PES, M.P.; SANTOS, A.P.P.; ORSINI, J.A.M.; PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R. Reducing uncertainties of climate projections on solar energy resources in Brazil. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 23586, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73769-y>.
- LIU, C.; WU, J.; GU, J.; DUAN, H. Responses of non-structural carbohydrate and carbon, nitrogen, and phosphorus chemometrics in needles of early shaded *Pinus yunnanensis* seedlings to drought. **BMC Plant Biology**, v. 25, p. 270, 2025. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06265-8>.
- LÓPEZ-ÁLVAREZ, Ó.; ZAS, R.; MAREY-PEREZ, M. Resin tapping: A review of the main factors modulating pine resin yield. **Industrial Crops and Products**, v. 202, p. 117105, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117105>.
- LÓPEZ, M. A. D.; KONDO, T.; MOLINA-MOREIRA, N. A new threat to Ecuadorian flora: first report of the pink hibiscus mealybug, *Maconellicoccus hirsutus* (Green, 1908) (Hemiptera: Pseudococcidae) and its potential biological control agent. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 69, p. e20250007, 2025. <https://doi.org/10.1590/1806-9665-RBENT-2025-0007>.
- LUCENA, F. R.; ANDRADE, J. R.; SANTOS, C. F.; PINHEIRO, M. V. M.; BARROSO, D. G.; BRAUN, H.; MUNIZ, L. C.; NOBRE, C. P.; FIGUEIREDO, F. A. M. A. Agroforestry systems with *Khaya ivorensis* provide improved tree growth and economic benefits to rural producers. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 5, p. 1211-1224, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00864-w>.
- MADRIGAL-VILLALOBOS, J.; VALDEZ-MELARA, M.; GARCÍA-DÍAZ, E.; ZÚÑIGA-UMAÑA, J. M.; GATICA-ARIAS, A. Review of biotechnological advances in mahogany (*Swietenia macrophylla* King): in vitro culture and genetic transformation. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 160, n. 3, p. 78, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11240-025-03003-8>.

MARTINS, M.A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C.G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural water management**, v. 216, p. 339-350, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.011>.

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

MARQUES, M.T.A.; KOVALSKI, M.L.; PEREZ, G.M.; MARTIN, T.C.; BARBOSA, E.L.; RIBEIRO, P.A.S.; VALDES, R.H. Data-driven discovery of mechanisms underlying present and near-future precipitation changes and variability in Brazil. **EGUosphere**, v. 2024, p. 1-14, 2024.

MASAGUÉ, S.; BRUCHHAUSEN, A.; ROZAS, G.; DE LA VEGA, G.J.; VILLACIDE, J.; CORLEY, J.C.; MARTÍNEZ, A.S. The relevance of integrating multiple sensory modalities into capturing devices: the case of the global pest *Sirex noctilio*. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 27, p. 100–110, 2025. <https://doi.org/10.1111/afe.12637>.

MASIULIONIS, V.E.; SAMUELS, R.I. Investigating the biology of leaf-cutting ants to support the development of alternative methods for the control and management of these agricultural pests. **Agriculture**, v. 15, p. 642, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriculture15060642>.

MEDEIROS, R. A.; PAIVA, H. N.; LEITE, H. G.; SALLES, T. T.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; DÁVILA, F. S. Idade técnica do primeiro desbaste de povoamentos de teca em diferentes espaçamentos. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 705-716, 2017. <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n116.11>.

MEDEIROS, F.J.; OLIVEIRA, C.P.; AVILA-DIAZ, A. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: from CMIP3 to CMIP6. **Weather and Climate Extremes**, v. 38, p. 100511, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100511>.

MISHRA, K.; SHASHIKALA, S.; SOLANKI, A. A.; SETHY, A. K. A comprehensive evaluation of anatomical and physico-mechanical properties of 40-year-old *Swietenia macrophylla* King wood from India. **International Wood Products Journal**, p. 20426445251361775, 2025. <https://doi.org/10.1177/20426445251361775>.

MO, J. **Some aspects of the ecology and behaviour of the Australian red cedar tip moth, *Hypsipyla robusta* Moore.** 1996, 283 f. Tese (Doutorado em Philosophy). Australian National University, Australia, 1996. <https://doi.org/10.25911/5d74e8b3c3e92>.

MOORE, A.; ANKNEY, E.; SWOR, K.; POUDEL, A.; SATYAL, P.; SETZER, W.N. Leaf Essential Oil Compositions and Enantiomeric Distributions of Monoterpenoids in Pinus Species: *Pinus albicaulis*, *Pinus flexilis*, *Pinus lambertiana*, *Pinus monticola*, and *Pinus sabiniana*. **Molecules**, v. 30, n. 2, p. 244, 2025. <https://doi.org/10.3390/molecules30020244>.

MOMOLLI, D. R.; CALDEIRA, M. V. W.; GOMES, G. S. L.; GOMES, R.; DUARTE, V. B. R.; GODINHO, T. O.; SILVA, J. G. M.; SANTOS, V. B.; VIDAURRE, G. B.; FARIA, J. C. T.; SCHUMACHER, M. V.; PEREIRA, M. G. Stem longitudinal gradient for basic density, carbon, nitrogen, and CN ratio in *Khaya* spp.: improved correlation using diameter instead of commercial height. **Forests**, v. 15, p. 1923, 2024. <https://doi.org/10.3390/f15111923>.

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

MONTEIRO, P.; SANTOS, B.; ALVES, A.; PINTO, G. Interaction Between Pinus Species and Foliar Fungal Pathogens: Similar Symptoms, Contrasting Physiology. **Plant Pathology**. v. 75, n. 1, p. e70107, 2026. <https://doi.org/10.1111/ppa.70107>.

MUNHOZ, L.V.; BIERNASKI, F.A.; PERES, F.S.; DIAS, A.N.; TAMBARUSSI, E.V. Predicted genetic gains for growth traits and genotype  $\times$  environment interaction in *Pinus greggii*: new perspectives for genetic improvement in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. e20201486, 2021. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120201486>.

MURUGAN, K.; SENTHIL KUMAR, N.; JEYABALAN, D.; SENTHIL NATHAN, S.; SIVARAMAKRISHNAN, S. Neem as an effective bio-pesticide to control teak defoliator *Hyblaea puera* (Cramer) (Lepidoptera: Hyblaeidae). **Journal of Non-Timber Forest Products**, v. 6, n. 1/2, p. 78-82, 1999.

MUTETE, P.; MUREPA, R.; GAPARE, W.J. Genetic parameters in subtropical pine F1 hybrids: heritabilities, between-trait correlations and genotype-by-environment interactions. **Tree Genetics & Genomes**, v. 11, p. 1–16, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11295-015-0926-2>.

NETO, A. P. S.; AMARAL, G. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; JÚNIOR, R. D. S. N.; XAVIER, T. M. T.; FONSECA, M. D. S.; MACHUCA, M. A. H. Responses of African mahogany seedlings to temperature, vapor pressure deficit and water. **Scientia Forestalis**, v. 51, p. e3961, 2023. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.20>.

NETO, T.C.C.; SANTOS, V.B.; KULMANN, M.S.S.; CIRILO, N.R.M.; SCHUMACHER, M.V.; STAPE, J.L.; VIDAURRE, G.B. The impact of age and forestry practices on the wood quality of *Pinus taeda* L. grown in different sites in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 562, p. 121898, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121898>.

NICKELE, M.A.; FILHO, W.R.; PIE, M.R.; PENTEADO, S.R.C. Daily foraging activity of *Acromyrmex* (Hymenoptera: Formicidae) leaf-cutting ants. **Sociobiology**, v. 63, n. 1, p. 645-650, 2016. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v63i1.902>.

NICKELE, M.A.; FILHO, W.R.; PENTEADO, S.D.R.; QUEIROZ, E.C.; SCHAITZA, E.G.; PIE, M.R. Potential damage by *Acromyrmex* ant species in pine plantations in southern Brazil. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 23, p. 32–40, 2021. <https://doi.org/10.1111/afe.12400>.

NOROUZI, R.; ARVANAGHI, H.; SALMASI, F.; FARSADIZADEH, D.; GHORBANI, M.A. A new approach for oblique weir discharge coefficient prediction based on hybrid inclusive multiple model. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 76, p. 101810, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101810>.

OJEDA, H.; RUBILAR, R.A.; MONTES, C.; CANCINO, J.; ESPINOSA, M. Leaf area and growth of Chilean radiata pine plantations after thinning across a water stress gradient. **New**

**Zealand Journal of Forestry Science**, v. 48, p. 10, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40490-018-0116-8>.

OLIVEIRA, L. S. S.; GUIMARÃES, L. M. S.; FERREIRA, M. A.; NUNES, A. S.; PIMENTA, L. V. A.; ALFENAS, A. C. Aggressiveness, cultural characteristics and genetic variation of *Ceratocystis fimbriata* on *Eucalyptus* spp. **Forest Pathology**, v. 45, n. 6, p. 505-514, 2015. <https://doi.org/10.1111/efp.12200>.

OLIVEIRA, C.F.; MOURA, P.F.; RECH, K.S.; OLIVEIRA, C.S.P.; HIROTA, B.C.K.; OLIVEIRA, M.; SILVA, C.B.; SOUZA, A.M.; DIAS, J.F.G.; MIGUEL, O.G.; AUER, C.G.; MIGUEL, M.D. Antagonistic activity of *Diplodia pinea* against phytopathogenic fungi. **Folia Microbiologica**, v. 64, p. 415–419, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12223-018-00667-y>.

OLMEDO, G.M.; HORNINK, B.; ARENHARDT, B.B.; NUNES, A.J.; DE OLIVEIRA, C.; DO AMARAL, I.S.; SANTOS, M.R.; FONTANA, C.; OLIVEIRA, J.M. Growth dynamic and climate signals on abandoned plantation of *Pinus elliottii* in Southern Brazil: A dendrochronological contribution. **Dendrochronologia**, v. 82, p. 126136, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126136>.

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

OPUNI-FRIMPONG, E.; OWUSU, S. A.; OPOKU, E. M.; MENSAH, J. K.; STORER, A. J. Sustainable production of mahogany in plantations: biology of mahogany shoot borer (*Hypsipyla robusta* Moore) on artificial media and associated natural enemies. **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 42, n. 3, p. 2635-2644, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42690-022-00791-w>.

ORELLANA, O.; SANDOVAL, M.; ZAGAL, E.; HIDALGO, M.; SUAZO-HERNÁNDEZ, J.; PAULINO, L.; DUARTE, E. Comparison of artificial intelligence algorithms and remote sensing for modeling pine bark beetle susceptibility in Honduras. **Remote Sensing**, v. 17, n. 5, p. 912, 2025. <https://doi.org/10.3390/rs17050912>.

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, n. 15, p. 6713-6735, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7221>.

PACHAS, A.N.A.; SAKANPHET, S.; SOUKKHY, O.; LAO, M.; SAVATHVONG, S.; NEWBY, J.C.; SOULIYASACK, B.; KEOBOUALAPHA, B.; DIETERS, M.J. Initial spacing of teak (*Tectona grandis*) in northern Lao PDR: impacts on the growth of teak and companion crops. **Forest Ecology and Management**, v. 435, p. 77-88, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.031>.

PACHAS, A.N.A.; SAKANPHET, S.; MIDGLEY, S.; DIETERS, M. Teak (*Tectona grandis*) silviculture and research: applications for smallholders in Lao PDR. **Australian Forestry**, v. 82, p. 94-105, 2019b. <https://doi.org/10.1080/00049158.2019.1610215>.

PAKULL, B.; MADER, M.; KERSTEN, B.; EKUÉ, M. R.; DIPELET, U. G. B.; PAULINI, M.; BOUDA, Z. H.; DEGEN, B. Development of nuclear, chloroplast and mitochondrial SNP markers for *Khaya* sp. **Conservation Genetics Resources**, v. 8, n. 3, p. 283-297, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12686-016-0557-4>.

PANT, J.; DAWADI, P. Effective control of invasive grape mealybugs (*Maconellicoccus hirsutus*) involves cautious release of ladybird beetles in variable temperature parameters. **Journal of Applied Entomology**, v. 5, n. 1, p. 01-06, 2025.

PENG, M.; LI, X.; PENG, J.; CUI, J.; LI, J.; WEI, Y.; WEI, X.; LI, J. Early summer temperature variation recorded by earlywood width in the northern boundary of *Pinus taiwanensis* Hayata in central China and its linkages to the Indian and Pacific oceans. **Biology**, v. 11, n. 7, p. 1077, 2022. <https://doi.org/10.3390/biology11071077>.

PENG, P. H.; PAN, H. L.; TANG, S. L.; CHIU, C. M.; CHIANG, H. L.; ZHAN, Y. X.; HSIEH, Y.; CHEN, J. C. Effects of thinning on the growth and relative change in the diameter of a mahogany plantation. **Forests**, v. 13, n. 2, p. 213, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13020213>.

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

PENTEADO, S.; IEDE, E.T.; REIS FILHO, W. Programa Nacional de Controle à Vespa-da-Madeira. In: **Anais do Seminário Internacional sobre Pragas Quarentenárias Florestais**. Embrapa, 2012. p. 53–58. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/951722/1/Doc244SeminarioSuseteversaofinal.pdf>>.

PENTEADO, S.D.R.C.; LAZZARI, S.M.N.; DE OLIVEIRA, E.B.; CARVALHO, R.C.Z. Parâmetros morfológicos e biológicos de populações monoclonais e multiclônicas do pulgão-gigante-do-pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, p. 465–474, 2016. <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.1110>.

PENTEADO, S.; IEDE, E.; REIS FILHO, W.; WILSON, R.F. **Manual para o controle da vespa-da-madeira em plantios de pinus**. Embrapa, 2024. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1164868>>.

PÉREZ-LUNA, A.; HERNÁNDEZ-DÍAZ, J.C.; WEHENKEL, C.; SIMENTAL-RODRÍGUEZ, S.L.; HERNÁNDEZ-VELASCO, J.; PRIETO-RUIZ, J.Á. Graft survival of *Pinus engelmannii* Carr. in relation to two grafting techniques with dormant and sprouting buds. **PeerJ**, v. 9, p. e12182, 2021. <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.12182>.

PÉREZ-SALICRUP, D.R.; ESQUIVEL, R. Tree infection by *Hypsipyla grandella* in *Swietenia macrophylla* and *Cedrela odorata* (Meliaceae) in Mexico's southern Yucatan Peninsula. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 2, p. 324-327, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.054>.

PETEK-PETRIK, A.; PETRÍK, P.; LAMARQUE, L.J.; COCHARD, H.; BURLETT, R.; DELZON, S. Drought survival in conifer species is related to the time required to cross the stomatal safety margin. **Journal of Experimental Botany**, v. 74, n. 21, p. 6847-6859, 2023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad352>.

PINHEIRO, H.S.; CALAZANS, C.C.; MASIULIONIS, V.E.; ANDRADE, V.S.; CARVALHO, T.D.S.; GOIS, I.B.; RIBEIRO, G.T.; BLANCK, A.F.; ARAÚJO, A.P.A.; BACCI, L. Potential of alternative control of leaf-cutting ants using essential oils: a systematic review. **Agricultural and Forest Entomology**, p. 1–15, 2025. <https://doi.org/10.1111/afe.12688>.

POZO-SANTIAGO, C. O.; CRUZ, M. P. L.; CRUZ, M. T. L.; CRUZ-PÉREZ, A. L.; CAPELLO-GARCÍA, S.; HERNÁNDEZ-GALLEGOS, M. A.; VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ, J. R. Survival of *Coptotermes testaceus* (Isoptera: Rhinotermitidae) to environmental conditions (relative humidity and temperature) and preference to different substrates. **Sociobiology**, v. 67, n. 3, p. 425-432, 2020. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v67i3.5141>.

PRÉVOSTO, B.; HELLUY, M.; GAVINET, J.; FERNANDEZ, C.; BALANDIER, P. Microclimate in Mediterranean pine forests: what is the influence of the shrub layer? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 282, p. 107856, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107856>.

PROKOCCA, A.; SKRZECZ, I.; SOWINSKA, A.; WOLSKI, R.; JANISZEWSKI, W. Insecticidal activity of alpha-cypermethrin against small banded pine weevil *Pissodes castaneus* (Coleoptera: Curculionidae) in forest plantations and thickets. **Folia Forestalia Polonica, Series A, Forestry**, v. 58, p. 142-146, 2016. <https://doi.org/10.1515/ffp-2016-0016>.

QUEIROGA, V. P.; GOMES, J. P.; MENDES, N. V. B.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; LIMA, D. C.; ALBUQUERQUE, E. M. B. **Mogno Africano (*Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss.): tecnologias de plantio e utilização**. Campina Grande, Brazil: AREPB, v. 1, p. 206, 2023.

QUIALA, E.; BARBÓN, R.; MESTANZA, S.; O, M.L.; MERLAN, G.; NUÑEZ-RAMOS, J.; PÉREZ, N.; LEIZA, M.; JIMÉZES, E.; DANIELS, D.; NOCEDA, C. Somatic embryogenesis and plant regeneration from leaf of the interspecific hybrid of mahogany (*Swietenia macrophylla* King × *S. mahagoni* (L.) Jacq.). **Trees**, v. 36, n. 1, p. 167-178, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02192-x>.

QIU, L.; IM, E.; KWON, H. Categorization of precipitation changes in China under 1.5 C and 3 C global warming using the bivariate joint distribution from a multi-model perspective. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 12, p. 124043, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc8bb>.

RACHMATSYAH, O.; SIREGAR, U.J.; HANEDA, N.F.; NANDIKA, D.; HIDAYAT, P. Distribution of pine woolly adelgids infestation on pinus merkusii plantation in Java. **Jurnal Manajemen Hutan Tropika**, v. 18, n. 3, p. 191-197, 2012. <https://doi.org/10.7226/jtfm.18.3.191>.

RAO, N.H.; SARMA, P.B.S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 13, p. 25–32, 1988. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(88\)90130-8](https://doi.org/10.1016/0378-3774(88)90130-8).

RAO, C.S.; KAREEMULLA, K.; KRISHNAN, P.; MURTHY, G.R.K.; RAMESH, P.; ANANTHAN, P.S.; JOSHI, P. K. Agro-ecosystem based sustainability indicators for climate resilient agriculture in India: A conceptual framework. **Ecological Indicators**, v. 105, p. 621-633, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.038>.

REDDY, K. N.; RAMASAMY, G. G.; AGRAWAL, A.; SRIVASTAVA, S.; PATHAK, J.; VENKATESAN, T.; RANA, D. K. Reference genes selection for expression studies in *Maconellicoccus hirsutus* (Green) (Pseudococcidae: Hemiptera) under specific experimental conditions. **Molecular Biology Reports**, v. 50, n. 2, p. 1221-1230, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11033-022-08120-7>.

REHSCHUH, R.; RUEHR, N.K. Diverging responses of water and carbon relations during and after heat and hot drought stress in *Pinus sylvestris*. **Tree Physiology**, v. 42, n. 8, p. 1532-1548, 2022. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab141>.

REIS, C. A. F.; OLIVEIRA, E. B. DE; SANTOS, A. M. *Mogno-africano (Khaya spp.): atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil*. Brasília, DF, Brazil: Embrapa, 2019. p. 378.

REIS, C. A. F.; OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, A. M. *Teca (Tectona grandis L. f.) no Brasil*. Brasília, DF, Brazil: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1154566/1/EmbrapaFlorestas2023-Teca-Tectona-grandis-L.-f.-no-Brasil.pdf>.

REIS FILHO, W.; NICKELE, M.A.; PENTEADO, S.S.; QUEIROZ, E.C. Manejo de formigas cortadeiras. **Boletim Didático**, n. 177. Embrapa, 2024. p. 32. Disponível em: <https://sistemas.epagri.sc.gov.br/semob/consulta.action?subFuncao=consultaPublicacoesDetalle&cdDoc=62842>.

REN, N.; WANG, L.; YOU, C. Diversity, community structure, and antagonism of endophytic fungi from asymptomatic and symptomatic Mongolian pine trees. **Journal of Fungi**, v. 10, n. 3, p. 212, 2024. <https://doi.org/10.3390/jof10030212>.

RESENDE, R.T.; BORÉM, A.; LEITE, H.G. (Eds.). **Pinus: do plantio à colheita**. São Paulo: Oficina de Textos, 2023.

REYES-REYES, J.; MARROQUÍN-MORALES, P.; OVALLES-NOMURA, D. A.; AGUIRRE-MEDINA, J. F.; DAMIÁN-CARRIÓN, D. A.; BARRIOS-CALDERÓN, R. D. J. Control of *Hypsipyla grandella* Zeller in a commercial plantation of *Cedrela odorata* L., in Chiapas, Mexico. **Agro Productividad**, v. 18, n. 9, p. 149-155, 2025. <https://doi.org/10.32854/8c2vrw66>.

REYNOSO-LÓPEZ, E.A.; MÉNDEZ-HERNÁNDEZ, J. E.; EK-RAMOS, J.; MONTESINOS-MATÍAS, R.; LOERA, O. *Metarhizium robertsii* in combination with *Trichoderma asperellum* reduce the malathion doses used to control ambrosia beetles: the case of *Xyleborus affinis*. **Biocontrol Science and Technology**, v. 31, n. 10, p. 1080-1097, 2021. <https://doi.org/10.1080/09583157.2021.1923656>.

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

RODAS, C.A.; SERNA, R.; BOLAÑOS, M.D.; GRANADOS, G.M.; WINGFIELD, M.J.; HURLEY, B.P. Biology, incidence and host susceptibility of *Pineus boernerii* (Hemiptera: Adelgidae) in Colombian pine plantations. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 77, p. 165–171, 2015. <https://doi.org/10.2989/20702620.2014.1001662>.

- RODRÍGUEZ-BECERRA, S. H.; VÁZQUEZ-RIVERA, R.; VENTURA-HERNÁNDEZ, K. I.; PAWAR, T. J.; OLIVARES-ROMERO, J. L. The biology, impact, and management of *Xyleborus* beetles: a comprehensive review. **Insects**, v. 15, n. 9, p. 706, 2024. <https://doi.org/10.3390/insects15090706>.
- ROJANO, F.; IBARRA-JUAREZ, L. A.; POWELL, J.; SALAZAR, R.; LIRA-NORIEGA, A. Modeling the impact of temperature on the population abundance of the ambrosia beetle *Xyleborus affinis* (Curculionidae: Scolytinae) under laboratory-reared conditions. **Journal of Thermal Biology**, v. 101, p. 103001, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103001>.
- RUSIN, C.; CAVALCANTI, F. R.; LIMA, P. C. G. D.; FARIA, C. M. D. R.; ALMANÇA, M. A. K.; BOTELHO, R. V. Control of the fungi *Lasiodiplodia theobromae*, the causal agent of dieback, in cv. Syrah grapevines. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, p. e44785, 2021. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.44785>.
- SALES, N. I. S.; LEÃO, E. U.; CORREIA, L. C. M. D. A.; SIQUEIRA, C. D. A.; SANTOS, G. R. D. Temporal progress of teak rust in a tropical area of Tocantins State, Brazil. **Acta Amazônica**, v. 47, n. 3, p. 277-280, 2017. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201603212>.
- SANTOS, J.; DELGADO, N.; FUENTES, J.; FUENTEALBA, C.; VEGA-LARA, J.; GARCÍA, D.E. Exterior grade plywood adhesives based on pine bark polyphenols and hexamine. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 340-348, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.082>.
- SANTOS, F.M.; TERRA, G.; MONTE, M.A.; CHAER, G.M. Growth, yield and stem form of young African mahoganies (*Khaya* spp.) in mixed-species plantations and successional agroforestry systems. **New Forests**, v. 53, n. 1, p. 181-202, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09850-5>.
- SAYEDI, S.S.; ABBOTT, B.W.; VANNIÈRE, B.; et al. Assessing changes in global fire regimes. **Fire Ecology**, v. 20, p. 1–22, 2024. <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00237-9>.
- SCHERF, A.N.; CORLEY, J.C.; GIOIA, C.D.; ESKIVISKI, E.R.; CARAZZO, C.; PATZER, H.R.; DIMARCO, R.D. Impact of a leaf-cutting ant (*Atta sexdens* L.) on a *Pinus taeda* plantation: A 6 year-long study. **Journal of Applied Entomology**, v. 146, n. 9, p. 1178-1184, 2022. <https://doi.org/10.1111/jen.13047>.
- SEGONI, S.; NOCENTINI, N.; BARBADORI, C.; MEDICI, C.; GATTO, A.; ROSI, A.; CASAGLI, N. A novel prototype national-scale landslide nowcasting system for Italy combining rainfall thresholds and risk indicators. **Landslides**, p. 1-26, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02452-0>.
- SEGTOWICH, A.C.; LANGVALL, O.; HUUSKONEN, S.; FAHLVIK, N.; HOLMSTRÖM, E. Swift adjustment of biomass allocation strategies in Scots pine after thinning. **European Journal of Forest Research**, v. 114, p. 699–714, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01788-z>.
- SETA, G. W.; WIDIYATNO; HIDAYATI, F.; NA'ÏEM, M. Impact of thinning and pruning on tree growth, stress wave velocity, and pilodyn penetration response of clonal teak (*Tectona grandis*) plantation. **Forest Science and Technology**, v. 17, n. 2, p. 57-66, 2021. <https://doi.org/10.1080/21580103.2021.1911865>.

SHAFAE, G.; NAVEED, R.; QADAR, F.; AHMAD, N. The attack of the teak defoliator (*Hyblaea puera*) on Shisham (*Dalbergia sissoo*) and its environmental impacts. **Global Forests**, v. 4, n. 1, p. 1-12, 2025. <https://doi.org/10.54219/globalforests.04.01.2025.232>.

SHARMA, S.; ADAMS, J.P.; SAKUL, R.; MARTIN, E.M.; RICKE, S.C.; GIBSON, K.E.; CARRIER, D.J. Loblolly pine (*Pinus taeda* L.) essential oil yields affected by environmental and physiological changes. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 35, p. 417–430, 2016. <https://doi.org/10.1080/10549811.2016.1192046>.

SHIMIZU, J.Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/315381>>.

SHRESTHA, S. Effects of climate change in agricultural insect pest. **Acta Scientific Agriculture**, v. 3, n. 12, p. 74-80, 2019. <https://doi.org/10.31080/ASAG.2019.03.0727>.

SIMON, D.C.; AMEZTEGUI, A. Modelling the influence of thinning intensity and frequency on the future provision of ecosystem services in Mediterranean mountain pine forests. **European Journal of Forest Research**, v. 142, p. 521–535, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01539-y>.

SMITH, S. M.; BEAVER, R. A.; COGNATO, A. I. A monograph of the *Xyleborini* (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) of the Indochinese peninsula (except Malaysia) and China. **ZooKeys**, v. 983, p. 1, 2020. <https://doi.org/10.3897/zookeys.983.52630>.

SOARES, T.P.; POZZA, E.A.; POZZA, A.A.; MAFIA, R.G.; FERREIRA, M.A. Calcium and potassium imbalance favours leaf blight and defoliation caused by *Calonectria pteridis* in *Eucalyptus* plants. **Forests**, v. 9, n. 12, p. 782, 2018. <https://doi.org/10.3390/f9120782>.

SONG, H.; LI, Y.; WANG, Z.; DUAN, Z.; WANG, Y.; YANG, E.; QUE, Q.; CHEN, X.; LI, P. Transcriptome profiling of *Toona ciliata* young stems in response to *Hypsipyla robusta* Moore. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 950945, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.950945>.

SONG, Q.; DENG, X.; SONG, R.; SONG, X. Plant growth-promoting rhizobacteria promote growth of seedlings, regulate soil microbial community, and alleviate damping-off disease caused by *Rhizoctonia solani* on *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. **Plant Disease**, v. 106, p. 2730–2740, 2022. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-21-2562-RE>.

SOUZA, H.J.; MIGUEL, E.P.; NASCIMENTO, R.G.M.; CABACINHA, C.D.; REZENDE, A.V.; SANTOS, M.L. Thinning-response modifier term in growth models: an application on clonal *Tectona grandis* Linn F. stands at the Amazonian region. **Forest Ecology and Management**, v. 511, p. 120109, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120109>.

SOUZA, G.H.O.; APARECIDO, L.E.O.; MORAES, J.R.D.S.C.; BOTEAGA, G.T. Climate change and its influence on planting of cassava in the Midwest region of Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, n. 2, p. 1184-1204, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02088-3>.

STAHR, M.; QUESADA-OCAMPO, L. M. Assessing the role of temperature, inoculum density, and wounding on disease progression of the fungal pathogen *Ceratocystis fimbriata*

causing black rot in sweetpotato. **Plant Disease**, v. 104, n. 3, p. 930-937, 2020. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-18-2224-RE>.

STONE, E.L.; KALISZ, P.J. On the maximum extent of tree roots. **Forest Ecology and Management**, v. 46, p. 59–102, 1991. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90245-Q](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90245-Q).

TAMBARUSSI, E. V.; ROGALSKI, M.; GALEANO, E.; BRONDANI, G. E.; MARTIN, V. D. F. D.; SILVA, L. A. D.; CARRER, H. Efficient and new method for *Tectona grandis* in vitro regeneration. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, n. 2, p. 124-132, 2017. <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n2a19>.

TARNO, H.; SETIAWAN, Y.; WANG, J.; ITO, S.; MARIO, M. B.; KURAHMAN, T.; SURANINGWULAN, M.; AMALIAH, A. A.; SARI, M. B.; ACHMAD, M. A. Partitioning of ambrosia beetle diversity on teak plantations in Java, Sumbawa, and Sulawesi Islands. **Forests**, v. 13, n. 12, p. 2111, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13122111>.

TAVERAS, R.; HILJE, L.; CARBALLO, M. Development of *Hypsipyla grandella* (Zeller) (Lepidoptera: Pyralidae) in response to constant temperatures. **Neotropical Entomology**, v. 33, p. 1-6, 2004. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2004000100002>.

TELRANDHE, U.B.; KOSALGE, S.B.; PARIHAR, S.; SHARMA, D.; HEMALATHA, S. Collection and cultivation of *Swietenia macrophylla* King. *Scholars Academic Journal of Pharmacy*, v. 1, p. 13-9, 2022.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, R.J. The water Balance. New Gersey: Laboratory of Climatology, v. 8, 1955, p. 104 (Publication in Climatology).

THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Johns Hopkins University, **Laboratory in Climatology Publications in Climatology**, v. 10, n. 3, 1957.

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

TRA, T. T. L.; CHI, N. M.; ANH, D. T. K.; THU, P. Q.; NHUNG, N. P.; DELL, B. Bacterial endophytes from *Chukrasia tabularis* can antagonize *Hypsipyla robusta* larvae. **Phytoparasitica**, v. 50, n. 3, p. 655-668, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12600-022-01001-6>.

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

URBAN, J.; INGWERS, M.W.; MCGUIRE, M.A.; TESKEY, R.O. Increase in leaf temperature opens stomata and decouples net photosynthesis from stomatal conductance in *Pinus taeda* and *Populus deltoides* x *nigra*. **Journal of experimental botany**, v. 68, n. 7, p. 1757-1767, 2017a. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx052>.

VACEK, Z.; CUKOR, J.; VACEK, S.; GALLO, J.; BAŽANT, V.; ZEIDLER, A. Role of black pine (*Pinus nigra* JF Arnold) in European forests modified by climate change. **European Journal of Forest Research**, v. 142, n. 6, p. 1239-1258, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01605-5>.

VENKATESH, Y. N.; ASHAJYOTHI, M.; UMA, G. S.; RAJARAJAN, K.; HANDA, A. K.; ARUNACHALAM, A. Diseases and insect pests challenge to meet wood production demand of *Tectona grandis* (L.), a high-value tropical tree species. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 130, p. 929-945, 2023. <https://doi.org/10.1007/s41348-023-00758-0>.

VENKATESH, Y. N.; ASHAJYOTHI, M.; RAJARAJAN, K.; SAHU, S.; CHATURVEDI, V.; PRATHIMA, P. T.; MUTHAMILARSAN, M.; HANDA, A. K.; ARUNACHALAM, A. Transcriptional and physio-chemical responses of *Tectona grandis* L. triggered by teak defoliator. **Plant Stress**, v. 12, p. 100468, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100468>.

WALSH, M.; BACKLUND, P.; BUJA, L.; DEGAETANO, A.; MELNICK, R.; PROKOPY, L.; ZISKA, L. Climate indicators for agriculture. **USDA Technical Bulletin**, n. 1953, p. 1–75, 2020. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.320800>.

WANG, C.; SODEN, B.J.; YANG, W.; VECCHI, G.A. Compensation between cloud feedback and aerosol-cloud interaction in CMIP6 models. **Geophysical Research Letters**, v. 48, p. e2020GL091024, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020GL091024>.

WANG, Y.; YAO, R. Optimization of rhizogenesis for in vitro shoot culture of *Pinus massoniana* Lamb. **Journal of Forest Research**, v. 32, p. 203–209, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01076-8>.

WANG, G. K.; SUN, Y. P.; JIN, W. F.; YU, Y.; ZHU, J. Y.; LIU, J. S. Limonoids from *Swietenia macrophylla* and their antitumor activities in A375 human malignant melanoma cells. **Bioorganic Chemistry**, v. 123, p. 105780, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2022.105780>.

WANG, T.; XU, Q.; ZHANG, B.; GAO, D.; ZHANG, Y.; JIANG, J.; ZUO, H. Effects of thinning and understory removal on water use efficiency of *Pinus massoniana*: evidence from photosynthetic capacity and stable carbon isotope analyses. **Journal of Forest Research**, v. 35, p. 41, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11676-023-01666-7>.

WOLSKI, R.; SKRZECZ, I. Insect assemblages associated with *Pissodes castaneus* (De Geer) on *Pinus sylvestris* L. trees. **Sylwan**, v.166, n.2, p. e2022008, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2022008>.

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

YAMAMOTO, A.L.C.; CORRÊA, M.D.P.; TORRES, R.R.; MARTINS, F.B.; GODIN-BEEKMANN, S. Total ozone content, total cloud cover, and aerosol optical depth in CMIP6: simulations performance and projected changes. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 3, p. 2453-2471, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04821-6>.

ZALESKI, S.R.; LAZZARI, S.; PENTEADO, S.D.R. Danos qualitativos e quantitativos de *Cinara atlantica* (Wilson) (Homoptera, Aphididae) em mudas de *Pinus taeda* Linnaeus (Pinaceae). **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 22, p. 591–595, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0101-81752005000300011>.

ZALESKI, S.R.M. *Pissodes castaneus* (De Geer) (Coleoptera, Curculionidae): bioecologia, feromônio sexual, variabilidade genética e aspectos do monitoramento e controle. 2009, 121 f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

ZANELLA, L.B.; FRANCISCON, L.; GRUNENVALDT, R.L.; TOMASI, J.D.C.; DEGENHARDT-GOLDBACH, J. Micropropagation of *Pinus tecunumanii*. *Ciência Florestal*, v. 28, n. 2, p. 651–660, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509832058>.

ZANETTI, R.; ABREU, C. S.; SILVEIRA, S. H. P.; ANDRADE, E. D. First report of *Hypsipyla grandella* (Lepidoptera: Pyralidae) on African mahogany *Khaya ivorensis*. *Scientia Agricola*, v. 74, p. 492-494, 2017. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0362>.

ZAWADZKA, A.; SŁUPSKA, A. Under-canopy regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as adaptive potential in building a diverse stand structure. *Sustainability*, v. 14, p. 1044, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14021044>.

ZELAYA, M. R. M. **Observações sobre o comportamento de *Xyleborus* spp. (Coleoptera: Scolytidae) em florestas de *Pinus* spp. na região de Agudos, Estado de São Paulo.** 1985, 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade de São Paulo, 1985.

ZULIAN, D.F.; SOUZA, B.M.D.; GONZALEZ, D.; CAMBUIM, J.; SILVA, A.M.D.; ALVES, P.F.; LOPES, M.T.G.; MORAES, M.L.T.; AGUIAR, A.V.D. Selection methods to optimize the gain and genetic diversity in *Pinus caribaea* var. *caribaea*. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 24, n. 3, p. e47742436, 2024. <https://doi.org/10.1590/1984-70332024v24n3a31>.

## APÊNDICES

Apêndice 1 – Porcentagem de área para cada indicador de risco no período base (PB, 1995 – 2014), futuro próximo (FP, 2041-2060) e distante (FD,2081-2100) nos cenários socioeconômicos SSP3-7.0 e SSP5-8.5.

Indicador	Classificação	PB	SSP3-7.0		SSP5-8.5	
			FP	FD	FP	FD
IH <sub>pinus</sub>	Muito baixo	89,5	89,0	87,8	88,2	87,2
	Baixo	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6
	Médio	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	Alto	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5
	Muito alto	9,4	10,0	10,7	10,3	11,2
IDH <sub>pinus</sub>	Muito baixo	73,0	65,2	57,9	62,0	52,8
	Baixo	1,9	2,4	2,1	2,0	2,1
	Médio	1,2	1,8	1,8	1,9	1,7
	Alto	1,1	1,4	2,3	3,4	2,0
	Muito alto	22,8	28,9	36,0	30,7	41,4
ITB <sub>pinus</sub>	Muito baixo	95,7	86,6	33,4	75,2	25,0
	Baixo	2,0	8,9	25,0	15,2	11,1
	Médio	1,8	3,9	20,8	7,3	13,6
	Alto	0,2	0,6	14,3	2,0	19,5
	Muito alto	0,2	0,1	6,5	0,2	30,8
ITmax <sub>pinus</sub>	Muito baixo	97,6	91,8	37,6	81,6	28,3
	Baixo	1,7	4,8	14,9	12,4	12,5
	Médio	0,4	2,3	25,9	4,6	32,1
	Alto	0,2	0,8	18,3	1,1	22,8
	Muito alto	0,1	0,2	3,4	0,3	4,2
Iqp <sub>pinus</sub>	Muito baixo	18,1	15,3	12,4	14,8	10,8
	Baixo	5,8	4,7	4,7	4,7	4,8
	Médio	11,5	4,8	4,2	4,5	4,3
	Alto	12,9	15,4	7,9	13,6	5,5
	Muito alto	51,7	59,8	70,7	62,5	74,6
Psir	Muito baixo	9,5	3,4	45,4	3,1	72,6
	Baixo	7,8	9,7	29,5	10,5	9,9
	Médio	19,8	32,5	20,1	43,2	12,8
	Alto	17,8	32,6	3,5	29,9	3,4
	Muito alto	45,0	21,8	1,5	13,4	1,3

Pcin	Muito baixo	75,9	83,7	89,5	84,7	90,8
	Baixo	7,0	6,3	3,7	5,9	2,6
	Médio	6,7	3,5	2,8	3,6	2,6
	Alto	6,2	4,0	2,8	3,4	2,6
	Muito alto	4,2	2,5	1,2	2,3	0,5
Ppis	Muito baixo	88,8	91,0	92,9	91,8	93,4
	Baixo	4,8	3,5	2,4	3,5	2,3
	Médio	3,4	2,9	2,3	2,4	2,3
	Alto	1,4	1,7	2,0	1,4	1,7
	Muito alto	1,7	1,0	0,4	0,9	0,4
Pacr	Muito baixo	52,8	66,9	77,6	68,3	83,1
	Baixo	14,0	12,6	10,4	12,6	7,2
	Médio	10,3	9,5	6,8	8,7	6,1
	Alto	9,4	5,7	3,8	6,0	3,0
	Muito alto	13,6	5,2	1,5	4,3	0,7
Ppin	Muito baixo	88,3	91,0	92,9	91,8	93,4
	Baixo	4,8	3,5	2,4	3,5	2,3
	Médio	3,4	2,9	2,3	2,4	2,3
	Alto	1,4	1,7	2,0	1,4	1,7
	Muito alto	1,7	1,0	0,4	0,9	0,4
Drhi	Muito baixo	16,4	18,5	65,2	19,2	85,5
	Baixo	14,7	16,0	27,5	17,8	8,2
	Médio	18,7	27,5	5,0	36,6	4,2
	Alto	14,6	27,3	1,8	20,2	1,6
	Muito alto	35,6	10,7	0,5	6,2	0,5
Darm	Muito baixo	81,7	87,8	92,1	88,4	92,9
	Baixo	8,3	6,0	3,6	6,0	3,5
	Médio	5,7	3,0	2,2	2,8	2,2
	Alto	2,8	2,2	1,7	1,8	1,1
	Muito alto	1,5	1,0	0,5	1,0	0,3
Dcal	Muito baixo	98,8	80,8	43,8	77,4	37,8
	Baixo	0,9	7,3	16,6	11,9	9,3
	Médio	0,2	5,9	11,9	6,1	24,5
	Alto	0,0	4,3	19,1	2,8	23,5
	Muito alto	0,0	1,7	8,6	1,8	4,7
Ddot	Muito baixo	82,8	87,9	91,1	88,6	92,0
	Baixo	8,1	5,9	4,2	5,6	4,0

	Médio	5,9	3,2	2,4	3,0	2,1
	Alto	2,8	2,0	0,9	1,7	1,0
	Muito alto	0,4	1,0	1,3	1,3	0,9
Dshp	Muito baixo	18,0	19,6	20,6	20,3	23,2
	Baixo	15,3	14,9	17,8	14,7	18,9
	Médio	16,9	25,0	27,2	26,0	28,7
	Alto	14,3	17,9	24,3	21,2	23,2
	Muito alto	35,4	22,7	10,1	17,8	6,1
IH <sub>teca</sub>	Muito baixo	82,2	80,9	79,4	80,1	78,3
	Baixo	0,8	1,0	1,1	1,0	1,3
	Médio	0,6	0,7	1,0	0,8	0,9
	Alto	0,9	0,7	0,9	1,0	0,9
	Muito alto	15,4	16,7	17,7	17,0	18,6
IDH <sub>teca</sub>	Muito baixo	68,1	59,9	52,0	55,7	47,3
	Baixo	2,8	2,6	2,4	2,6	2,2
	Médio	1,6	1,6	2,0	2,6	2,1
	Alto	1,6	2,4	3,3	3,3	2,1
	Muito alto	25,9	33,5	40,3	35,9	46,5
ITB <sub>teca</sub>	Muito baixo	15,4	3,4	0,9	2,7	0,8
	Baixo	22,4	9,0	3,4	8,6	0,9
	Médio	15,8	13,9	8,6	12,9	7,0
	Alto	20,4	16,2	17,0	15,7	14,7
	Muito alto	25,9	57,5	70,2	60,0	76,7
ITmax <sub>teca</sub>	Muito baixo	100,0	99,9	98,6	100,0	86,2
	Baixo	0,0	0,0	1,0	0,0	9,3
	Médio	0,0	0,0	0,3	0,0	2,2
	Alto	0,0	0,0	0,1	0,0	1,4
	Muito alto	0,0	0,1	0,0	0,0	0,9
Igeada	Muito baixo	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0
	Baixo	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
	Médio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Alto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Muito alto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Iqp <sub>teca</sub>	Muito baixo	13,3	10,5	7,8	9,8	6,6
	Baixo	5,4	5,0	5,2	5,2	4,8
	Médio	8,7	4,8	4,6	4,7	4,9
	Alto	16,0	13,5	7,6	11,9	5,9

	Muito alto	56,6	66,2	74,8	68,3	77,8
Phyb	Muito baixo	25,5	65,8	86,0	75,4	88,8
	Baixo	13,0	21,5	5,0	17,1	4,7
	Médio	21,3	11,1	5,0	6,1	2,9
	Alto	25,3	1,2	3,2	1,1	3,1
	Muito alto	14,9	0,3	0,8	0,3	0,5
Pxyl	Muito baixo	16,4	18,5	65,2	19,2	85,5
	Baixo	14,7	16,0	27,5	17,8	8,2
	Médio	18,7	27,5	5,0	36,6	4,2
	Alto	14,6	27,3	1,8	20,2	1,6
	Muito alto	35,6	10,7	0,5	6,2	0,5
Pcop	Muito baixo	81,7	87,8	92,1	88,4	92,9
	Baixo	8,3	6,0	3,6	6,0	3,5
	Médio	5,7	3,0	2,2	2,8	2,2
	Alto	2,8	2,2	1,7	1,8	1,1
	Muito alto	1,5	1,0	0,5	1,0	0,3
Pmac	Muito baixo	49,5	33,6	29,3	33,4	30,9
	Baixo	11,4	7,7	13,5	8,3	30,6
	Médio	11,4	20,9	28,9	21,4	31,1
	Alto	13,0	17,3	23,1	20,8	6,9
	Muito alto	14,7	20,5	5,2	16,1	0,4
Pnez	Muito baixo	78,1	85,3	90,0	86,1	91,4
	Baixo	12,5	5,5	5,0	5,6	4,2
	Médio	7,9	4,9	2,3	4,4	2,3
	Alto	1,1	3,2	1,5	2,8	0,9
	Muito alto	0,3	1,1	1,3	1,1	1,2
Dcer	Muito baixo	45,8	83,2	88,1	85,2	90,8
	Baixo	22,8	5,8	4,7	5,6	3,6
	Médio	15,2	5,8	3,3	5,6	2,3
	Alto	11,7	4,4	2,6	3,1	2,0
	Muito alto	4,5	0,8	1,3	0,5	1,3
Dlas	Muito baixo	49,5	33,6	29,9	33,4	29,4
	Baixo	11,4	7,7	13,8	8,3	17,5
	Médio	11,4	20,9	23,8	21,4	24,5
	Alto	13,0	17,3	22,6	20,3	21,3
	Muito alto	14,7	20,6	9,9	16,6	7,3
Doli	Muito baixo	25,4	22,5	67,0	22,5	87,3

	Baixo	11,1	15,8	27,7	16,7	8,0
	Médio	15,9	23,8	4,5	29,4	4,0
	Alto	12,8	26,9	0,6	23,4	0,5
	Muito alto	34,8	11,1	0,2	8,0	0,2
	Muito baixo	90,3	89,8	88,9	89,2	88,3
IH <sub>mogno</sub>	Baixo	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6
	Médio	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
	Alto	0,4	0,4	0,5	0,7	0,6
	Muito alto	8,5	9,1	9,6	9,4	10,2
	Muito baixo	69,5	23,4	5,8	16,8	3,2
ITB <sub>mogno</sub>	Baixo	16,7	28,3	10,4	27,9	7,3
	Médio	4,8	24,1	14,2	20,9	12,6
	Alto	5,5	21,3	10,9	21,2	10,5
	Muito alto	3,5	2,9	58,6	13,1	66,3
	Muito baixo	80,6	33,7	20,1	29,1	14,0
ITmax <sub>mogno</sub>	Baixo	9,6	24,8	7,6	19,8	5,8
	Médio	6,7	31,2	13,8	37,4	6,8
	Alto	2,2	9,6	38,0	12,1	9,1
	Muito alto	0,9	0,7	20,6	1,7	64,3
	Muito baixo	29,8	25,6	64,3	25,3	87,3
Pgran	Baixo	8,5	14,0	28,9	15,3	8,5
	Médio	15,8	23,1	5,8	28,5	3,4
	Alto	11,4	26,6	0,8	23,1	0,6
	Muito alto	34,5	10,8	0,3	7,8	0,2
	Muito baixo	18,0	23,1	83,5	36,3	87,4
Prob	Baixo	15,3	37,0	9,1	37,1	6,5
	Médio	17,8	33,2	4,7	24,0	3,9
	Alto	14,6	6,3	2,3	2,0	2,0
	Muito alto	34,3	0,5	0,4	0,6	0,3
	Muito baixo	91,9	93,9	95,6	94,0	96,3
Dtha	Baixo	1,7	0,7	1,1	1,2	1,3
	Médio	4,1	2,5	1,9	2,4	1,4
	Alto	1,7	2,3	1,2	2,0	0,9
	Muito alto	0,5	0,6	0,2	0,4	0,2
	Muito baixo	45,8	83,2	88,1	85,2	90,8
Dpha	Baixo	22,8	5,8	4,7	5,6	3,6
	Médio	15,2	5,8	3,3	5,6	2,3

Alto	11,7	4,4	2,6	3,1	2,0
Muito alto	4,5	0,8	1,3	0,5	1,3

---