

ANDRÉ PEREIRA FERNANDES

**MODELAGEM ESPACIAL DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A DANOS ECONÔMICOS
DE *Glycaspis brimblecombei* EM PLANTIOS DE *Eucalyptus* spp. NO
TERRITÓRIO BRASILEIRO: CENÁRIO PRESENTE E FUTURO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Alexandre Simões Lorenzon

Coorientadores: Ernani Lopes Possato
Gustavo Vieira Veloso

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F363m
2024
Fernandes, André Pereira, 1997-
Modelagem espacial de áreas susceptíveis a danos
econômicos de *Glycaspis brimblecombei* em plantios de
Eucalyptus spp. no território brasileiro: cenários presente e
futuro / André Pereira Fernandes. – Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (142 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Alexandre Simões Lorenzon.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.195>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Glycaspis brimblecombei* - Controle. 2. Eucalipto -
Doenças e pragas. 3. Aprendizado do computador. 4. Mudanças
climáticas. I. Lorenzon, Alexandre Simões, 1980-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal.
III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.9456

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

ANDRÉ PEREIRA FERNANDES

**MODELAGEM ESPACIAL DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A DANOS ECONÔMICOS
DE *Glycaspis brimblecombei* EM PLANTIOS DE *Eucalyptus* spp. NO
TERRITÓRIO BRASILEIRO: CENÁRIO PRESENTE E FUTURO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Data de aprovação: 26 de fevereiro de 2024

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **ANDRÉ PEREIRA FERNANDES**
Data: 28/03/2024 08:54:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

André Pereira Fernandes
Autor

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE SIMÕES LORENZON**
Data: 28/03/2024 11:53:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alexandre Simões Lorenzon
Orientador

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os homens e mulheres pretos que antes de mim lutaram para que hoje eu pudesse ocupar todos os espaços.

Aos meus pais, Gilcimar Pereira e Milton Fernandes (*In Memoriam*) por nunca colocarem limites nos meus sonhos, me apoiarem e depositarem confiança em todas as minhas escolhas.

Aos amigos que encontrei e reencontrei em Viçosa, por transformarem essa cidade em um lar e tornarem o caminho mais tranquilo. Em especial Jéssica Suzana, Mayron Rodrigues, Matheus Guidini, Emanuely Canabrava, Maurício Celeri, Gabriel Nicolau, Gabriel Andrade e Mateus Costa.

As amizades que construí ao longo das jornadas que trilhei até chegar em Viçosa, que por inúmeras vezes foram aconchego, suporte e amor. Em especial Alexia Sorensen, Alice Ferreira, Ana Caroline Castro, Brenda Campos, Carolina Marques, Diulia Bragança, Giordana Oliveira, José Amâncio, Luanna Alves, Rayanne Oliveira, Rayne Cardoso, Stela Sousa, Watles Moura e Wender Melquíades. Acredito que a vida nos reserva muitos reencontros!

A Unidade EMBRAPPII Fibras Florestais e a Sociedade de Investigações Florestais (SIF) por contribuírem para a construção do meu perfil profissional. Em especial, Juliana Pinheiro, Rodrigo Eiras, Bruna Valente, Jucielly Almeida, José Neto, Helen Reis, Cintia Alves e Silas Tadin.

Ao meu orientador Alexandre Lorenzon e aos coorientadores Ernani Possato e Gustavo Veloso pelo apoio e importantes contribuições para a elaboração desta dissertação.

Ao professor Sebastião Lourenço por instigar minha paixão pela entomologia.

A Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) por me preparar tão bem para os desafios do setor florestal.

A Universidade Federal de Viçosa (UFV) por se mostrar, de diversas formas, a mais bonita do Brasil.

As empresas do setor florestal que cederam os dados para essa pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa que viabilizou este trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Nem todo mundo guerreia gritando”
(Eliana Alves Cruz)

RESUMO

FERNANDES, André Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 1997. **Modelagem espacial de áreas susceptíveis a danos econômicos de *Glycaspis brimblecombei* em plantios de *Eucalyptus* spp. no território brasileiro: Cenário presente e futuro.** Orientador: Alexandre Simões Lorenzon. Coorientadores: Ernani Lopes Possato e Gustavo Vieira Veloso

O *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) destaca-se como uma das principais pragas exóticas do eucalipto no Brasil, anualmente infestando milhares de hectares e impactando a produtividade dos plantios. Sua rápida dispersão e adaptação têm sido evidentes, porém, ainda não está claro quais variáveis ambientais contribuem para a distribuição potencial de áreas suscetíveis à ocorrência de danos econômicos. As atuais medidas de controle se mostram insuficientes, indicando a necessidade de desenvolvimento de novas estratégias de gestão climática inteligente. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo modelar a distribuição geográfica das áreas suscetíveis a danos econômicos causados por *G. brimblecombei* no território brasileiro, em cenários climáticos do presente e do futuro. No processamento inicial dos dados, foram empregados 56 preditores ambientais, (36 variáveis climáticas, 19 variáveis bioclimáticas e 1 variável topográfica). Para cada preditor, foram extraídos os valores de máximo, mínimo, mediana, desvio padrão (SD) e quartis 0,05, 0,25, 0,75 e 0,95. A seleção das variáveis preditoras foi conduzida em um processo subdividido em três etapas complementares: remoção por variância próxima a zero (1), remoção baseada na correlação e avaliação (2) da importância das variáveis (3). Sete algoritmos de machine learning amplamente utilizados foram aplicados para mapear a distribuição da espécie: Random Forest (RF), C5.0, Support Vector Machine Radial Sigma (SVM), k-Nearest Neighbors (KNN) e Model Averaged Neural Network (AVNNET), Gradient Boosting Machine (GBM) e Partial Least Squares (PLS). A avaliação do desempenho incluiu métricas de acurácia, acurácia balanceada, F1-score, sensibilidade, especificidade e Kappa. O modelo mais eficiente foi então empregado na modelagem dos cenários atuais e futuros. Os cenários climáticos IPSL-CM6A-LR, MIROC6, HadGEM3-GC31-LL e UKESM1-0-LL foram utilizados para simulações nos cenários SSP-2.45 e SSP-5.85 nos períodos de 2041-2060, 2061-2080 e 2081–2100. As variáveis que mais influenciaram nas previsões das distribuições potenciais incluíram o quartil 0,05 da precipitação do trimestre mais seco (q05.BIO17), máxima temperatura máxima de maio (max.tmax_05), máxima

temperatura máxima de setembro (max.tmax_09), máxima, temperatura máxima do mês de novembro (max.tmax_11), o mínimo da precipitação anual (min.BIO12), máxima temperatura mínima de novembro (max.tmin_11) e mínima precipitação de novembro (min.prec_11). Embora todos os setes modelos tenham apresentado previsões de alta precisão, o RF demonstrou o melhor desempenho na maioria das métricas avaliativas. No cenário presente, as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste concentram as maiores áreas suscetíveis a danos econômicos, enquanto o Norte e o Nordeste exibem as menores extensões. Para os cenários futuros, o modelo prevê uma redução nas áreas potenciais para ocorrência de danos econômicos, as áreas que prevalecem suscetíveis se concentram no Sudeste e Sul do território.

Palavras-chave: Aprendizado de máquina; Danos econômicos; Pragas florestais; Modelo de distribuição de espécie; Mudanças climáticas.

ABSTRACT

FERNANDES, André Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March de 1997. **Spatial modeling of areas susceptible to economic damage by *Glycaspis brimblecombei* in *Eucalyptus* spp. plantations in the Brazilian territory: present and future scenarios.** Adviser: Alexandre Simões Lorenzon. Co-advisers: Ernani Lopes Possato e Gustavo Vieira Veloso

The *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) stands out as one of the main exotic pests of eucalyptus in Brazil, annually infesting thousands of hectares and impacting plantation productivity. Its rapid dispersion and adaptation have been evident, yet it is still unclear which environmental variables contribute to the potential distribution of areas susceptible to economic damage occurrence. Current control measures are proving insufficient, indicating the need for the development of new strategies for intelligent climate management. In this context, this study aims to model the geographical distribution of areas susceptible to economic damage caused by *G. brimblecombei* in the Brazilian territory, under present and future climate scenarios. In the initial data processing, 56 environmental predictors were employed (36 climatic variables, 19 bioclimatic variables, and 1 topographic variable). For each predictor, maximum, minimum, median, standard deviation (SD), and quartiles 0.05, 0.25, 0.75, and 0.95 values were extracted. The selection of predictor variables was conducted in a process subdivided into three complementary stages: removal by near-zero variance (1), removal based on correlation and evaluation (2) of variable importance (3). Seven widely used machine learning algorithms were applied to map the species distribution: Random Forest (RF), C5.0, Support Vector Machine Radial Sigma (SVM), k-Nearest Neighbors (KNN), Model Averaged Neural Network (AVNNET), Gradient Boosting Machine (GBM), and Partial Least Squares (PLS). Performance evaluation included accuracy metrics, balanced accuracy, F1-score, sensitivity, specificity, and Kappa. The most efficient model was then employed in modeling current and future scenarios. The climate scenarios IPSL-CM6A-LR, MIROC6, HadGEM3-GC31-LL, and UKESM1-0-LL were used for simulations in the SSP-2.45 and SSP-5.85 scenarios for the periods 2041-2060, 2061-2080, and 2081–2100. The variables that most influenced the potential distribution predictions included the 0.05 quartile of precipitation in the driest quarter (q05.BIO17), maximum maximum temperature of May (max.tmax_05), maximum maximum temperature of September (max.tmax_09), maximum maximum

temperature of November (max.tmax_11), minimum annual precipitation (min.BIO12), maximum minimum temperature of November (max.tmin_11), and minimum precipitation of November (min.prec_11). Although all seven models showed predictions of high accuracy, RF demonstrated the best performance in most evaluative metrics. In the present scenario, the Southeast, South, and Midwest regions concentrate the largest areas susceptible to economic damage, while the North and Northeast exhibit the smallest extents. For future scenarios, the model predicts a reduction in potential areas for economic damage occurrence, with the remaining susceptible areas concentrated in the Southeast and South of the territory.

Keywords: Machine learning; Economic damage; Forest pests; Species distribution model; Climate change.

CAPÍTULO I - *Glycaspis brimblecombei* (HEMIPTERA: APHALARIDAE) EM PLANTIOS FLORESTAIS DE EUCALIPTO: UMA REVISÃO

Figura 1 - Distribuição do *G. brimblecombei* no Brasil.28

CAPÍTULO II - MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE DANOS ECONÔMICOS DE *Glycaspis brimblecombei* (HEMIPTERA: APHALARIDAE) EM PLANTIOS DE *Eucalyptus spp.* NO BRASIL

Figura 1 - Mapa da divisão regional e estadual do Brasil.50

Figura 2 - Plantios florestais no Brasil. Adaptado de Projeto MapBiomas (2023).51

Figura 3 - Classificação climática de Köppen para o Brasil. Adaptado de Alvares *et al.*, (2014).52

Figura 4 - Fluxograma metodológico do estudo.54

Figura 5 - Distribuição de municípios amostrados por classe: (1) presença de *G. brimblecombei*; (2) presença *G. brimblecombei* associada a danos econômicos.62

Figura 6 - Importância relativa dos preditores para cada um dos modelos: (a) C5.0, (b) RF, (c) SVM Radial Sigma, (e) KNN, (d) AVNNET.64

Figura 7 - Mapas finais da ocorrência de danos econômicos de *G. brimblecombei* no território brasileiro, produzidos com os valores de modais das 100 execuções dos modelos: (a) RF e (b) C5.0. Mapas de erro de classificação para os modelos: (c) RF e (d) C5.0.69

CAPÍTULO III - PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL PRESENTE E FUTURA DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A DANOS ECONÔMICOS DE *Glycaspis brimblecombei* (HEMIPTERA: APHALARIDAE) EM PLANTIOS DE *Eucalyptus spp.* NO BRASIL UTILIZANDO MODELOS DE *MACHINE LEARNING*.

Figura 1 - Mapa da divisão regional e estadual do Brasil.93

Figura 2 - Plantios florestais no Brasil. Adaptado de Projeto MapBiomas (2023).94

Figura 3 - Classificação climática de Köppen para o Brasil. Adaptado de Alvares *et al.*, (2014).95

Figura 4 - Fluxograma metodológico do estudo.97

Figura 5 - Distribuição de municípios amostrados por classe: (1) presença de <i>G. brimblecombei</i> ; (2) presença <i>G. brimblecombei</i> associada a danos econômicos. ...	105
Figura 6 - Importância relativa dos preditores para cada um dos modelos: (a) C5.0, (b) RF, (c) GBM, (e) SVM Radial Sigma, (d) PLS.	108
Figura 7 - (a) Distribuição potencial prevista de danos econômicos de <i>G. brimblecombei</i> no território brasileiro para o cenário presente, (b) Mapa de erro de classificação para o modelo no cenário presente.....	111
Figura 8 - Distribuição potencial prevista de danos econômicos de <i>G. brimblecombei</i> no território brasileiro para o modelo MIROC6 nos cenários: SSP245 (a) 2041-2060, (b) 2061-2080, (c) 2081-2100; e SSP585 (d) 2041-2060, (e) 2061-2080, (f) 2081-2100.	114
Figura 9 - Distribuição potencial prevista de danos econômicos de <i>G. brimblecombei</i> no território brasileiro para o modelo IPSL-CM6A-LR nos cenários SSP245 (a) 2041-2060, (b) 2061-2080, (c) 2081-2100; e SSP585 (d) 2041-2060, (e) 2061-2080, (f) 2081-2100.	115
Figura 10 - Distribuição potencial prevista de danos econômicos de <i>G. brimblecombei</i> no território brasileiro para o modelo HadGEM3-GC3.1 nos cenários SSP245 (a) 2041-2060, (b) 2061-2080, (c) 2081-2100; e SSP585 (d) 2041-2060, (e) 2061-2080, (f) 2081-2100.	116
Figura 11 - Distribuição potencial prevista de danos econômicos de <i>G. brimblecombei</i> no território brasileiro para o modelo UKESM1-0-LL nos cenários SSP245 (a) 2041-2060, (b) 2061-2080, (c) 2081-2100; e SSP585 (d) 2041-2060, (e) 2061-2080, (f) 2081-2100.	117

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II - MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE DANOS ECONÔMICOS DE *Glycaspis brimblecombei* (HEMIPTERA: APHALARIDAE) EM PLANTIOS DE *Eucalyptus spp.* NO BRASIL

Tabela 1 - Dados de entrada para a seleção dos preditores para uso nos modelos selecionados.	55
Tabela 2 - Hiperparâmetros dos algoritmos utilizados no estudo em ambiente do software R.	57
Tabela 3 - Performance dos modelos, com valores médios de Acurácia, Acurácia Balanceada, Sensibilidade, Especificidade, F1-score e Kappa.....	65
Tabela 4 - Estimativa da distribuição geográfica potencial de áreas susceptíveis a ocorrência de danos econômicos de <i>G. brimblecombei</i> de acordo com os modelos RF e C5.0.....	66

CAPÍTULO III - PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL PRESENTE E FUTURA DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A DANOS ECONÔMICOS DE *Glycaspis brimblecombei* (HEMIPTERA: APHALARIDAE) EM PLANTIOS DE *Eucalyptus spp.* NO BRASIL UTILIZANDO MODELOS DE *MACHINE LEARNING*.

Tabela 1 - Dados de entrada para a seleção dos preditores utilizados na modelagem dos cenários atuais e futuros.....	98
Tabela 2 – Hiperparâmetros dos algoritmos utilizados no estudo em ambiente de software R.	101
Tabela 3 - Performance dos modelos, com valores médios de Acurácia, Acurácia Balanceada, Sensibilidade, Especificidade, F1-score e Kappa.....	106
Tabela 4 - Estimativa da distribuição geográfica potencial de áreas susceptíveis a ocorrência de danos econômicos de <i>G. brimblecombei</i> para o cenário presente (km ²).	109
Tabela 5 - Estimativa da distribuição geográfica potencial de áreas susceptíveis a ocorrência de danos econômicos de <i>G. brimblecombei</i> para o modelo atual e diferentes modelos climáticos (km ²).	112

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AVNNET	Model Averaged Neural Network
GBM	Gradient Boosting Machine
GCMs	Modelos Climáticos Globais
GEE	Gases do Efeito Estufa
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
KNN	<i>k-Nearest Neighbors</i>
MDE	Modelos de Distribuição de Espécies
MIP	Manejo Integra de Pragas
ML	<i>Machine Learning</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PLS	<i>Partial Least Squares</i>
RCPs	Vias de Concentração Representativa
RF	<i>Random Forest</i>
RFE	<i>Recursive Feature Elimination</i>
SSPs	<i>Shared Socio-economic Pathways</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	16
2 CAPÍTULO I - <i>Glycaspis brimblecombei</i> (HEMIPTERA: APHALARIDAE) EM PLANTIOS FLORESTAIS DE EUCALIPTO: UMA REVISÃO	19
2.1 INTRODUÇÃO	19
2.2 <i>Glycaspis brimblecombei</i>	21
2.2.1 Aspectos morfológicos e biológicos	21
2.2.2 Bioecologia.....	23
2.2.3 Distribuição geográfica do <i>Glycaspis brimblecombei</i>	27
2.2.4 Danos.....	29
2.2.5 Métodos de controle.....	31
2.3 CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS.....	36
3 CAPÍTULO II - MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE DANOS ECONÔMICOS DE <i>Glycaspis brimblecombei</i> (HEMIPTERA: APHALARIDAE) EM PLANTIOS DE <i>Eucalyptus</i> spp. NO BRASIL	47
3.1 INTRODUÇÃO	47
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	49
3.2.1 Área de estudo.....	49
3.2.2 Amostragem dos dados de presença de <i>G. brimblecombei</i> associado ou não à ocorrência de danos econômicos.....	52
3.2.3 Modelagem da presença de <i>G. brimblecombei</i> e do potencial de dano econômico em plantios de eucalipto	53
3.3 RESULTADOS.....	61
3.3.1 Análise dos questionários	61
3.3.2 Seleção dos preditores	62
3.3.3 Desempenho dos modelos	64
3.3.4 Previsão de áreas de susceptíveis à ocorrência de danos econômicos causados por <i>G. brimblecombei</i>	66
3.4 DISCUSSÃO	70
3.4.1 Análise dos questionários	70
3.4.2 Seleção dos preditores	70
3.4.3 Desempenho dos modelos	73
3.4.4 Zoneamento climático de áreas susceptíveis ao aumento da densidade populacional de <i>G. brimblecombei</i> , com probabilidade de dano econômico à cultura do eucalipto.....	74
3.4.5 Limitações nesta pesquisa e direções futuras	77

3.5 CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS	79
4 CAPÍTULO III - PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL PRESENTE E FUTURA DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A DANOS ECONÔMICOS DE <i>Glycaspis brimblecombei</i> (HEMIPTERA: APHALARIDAE) EM PLANTIOS DE <i>Eucalyptus</i> spp. NO BRASIL UTILIZANDO MODELOS DE MACHINE LEARNING.....	89
4.1 INTRODUÇÃO	89
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	91
4.2.1 Área de estudo.....	91
4.2.2 Amostragem dos dados de presença de <i>G. brimblecombei</i> associado ou não à ocorrência de dano econômico	95
4.2.3 Modelagem da presença de <i>G. brimblecombei</i> e do potencial de dano econômico em plantios de eucalipto em cenários presente e futuro.....	96
4.3 RESULTADOS.....	104
4.3.1 Análise dos questionários	104
4.3.2 Desempenho dos modelos	106
4.3.3 Seleção dos preditores	107
4.3.4 Distribuição potencial de áreas susceptíveis a danos econômicos causados por <i>G. brimblecombei</i> no cenário presente	109
4.3.5 Distribuição potencial de áreas susceptíveis a danos econômicos causados por <i>G. brimblecombei</i> em cenários climáticos futuros.....	112
4.4 DISCUSSÃO	118
4.4.1 Análise dos questionários	118
4.4.2 Desempenho dos modelos	119
4.4.3 Seleção dos preditores	120
4.4.4 Mapeamento potencial de áreas susceptíveis a danos econômicos causados por <i>G. brimblecombei</i> em cenários climáticos presentes e futuros	122
4.4.5 Limitações nesta pesquisa e direções futuras	126
4.5 CONCLUSÕES	127
REFERÊNCIAS	128
5 CONCLUSÃO GERAL.....	138
REFERÊNCIAS	139

1 INTRODUÇÃO GERAL

Dentre os fatores que exercem influência na produtividade e qualidade dos plantios florestais de eucalipto no Brasil, destacam-se a presença de pragas, sejam elas nativas ou exóticas (Barcik *et al.*, 2023; Lemes *et al.*, 2021; Silva, 2020). O psílídeo de concha, *Glycaspis brimblecombei* (Moore, 1964) (Hemiptera: Aphalaridae) é um inseto nativo da Austrália, caracterizado por alimentar-se exclusivamente de espécies de eucaliptos (Cuello, 2019). No campo, suas infestações são facilmente identificadas pela presença de uma estrutura cônica de coloração esbranquiçada, denominada “concha”. Esta estrutura é produzida pelas ninfas como mecanismo de proteção, sendo composta por uma combinação de *honeydew* (secreção açucarada) e ceras (Halbert *et al.*, 2001).

Os danos são causados tanto pelos adultos como pelas ninfas que sugam a seiva das folhas, com preferência por brotações jovens (Lemes *et al.*, 2021). Os efeitos diretos incluem desfolha, seca dos ponteiros, superbrotas e resultam na diminuição do tamanho, deformações e enrolamento do limbo foliar. De forma indireta, induz o aparecimento de fumagina, contribuindo para a diminuição da área fotossinteticamente ativa e aumento da susceptibilidade ao ataque de outros organismos (Santana, 2005; Sá e Wilcken, 2004). Segundo Gill (1998) infestações severas no primeiro ano podem acarretar em 15% da mortalidade nos plantios, e ataques consecutivos podem atingir até 40% no segundo ano.

O *G. brimblecombei* demonstrou uma elevada capacidade de disseminação, conseguindo se estabelecer globalmente nos cinco continentes (EPPO, 2023). O primeiro registro de ocorrência deste inseto-praga no Brasil ocorreu em 2003, no interior do estado de São Paulo. Desde então, o inseto se dispersou pela maioria dos estados brasileiros (Lemes *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021; Saliba *et al.*, 2019; Wilcken *et al.*, 2015). Devido à sua rápida capacidade de dispersão e prejuízos ocasionados, *G. brimblecombei* atualmente é considerada uma das pragas de maior importância econômica para a cultura do eucalipto no Brasil (Lemes *et al.*, 2021).

Embora tenha se adaptado em diversas regiões do território brasileiro, a sua presença não implica automaticamente na ocorrência de danos econômicos. As condições ambientais e as mudanças climáticas impactam na reprodução, sobrevivência, propagação e distribuição das pragas, bem como as relações entre as pragas, o meio ambiente e os inimigos naturais (Skendžić *et al.*, 2021). A temperatura

do ar e os índices pluviométricos são os principais fatores que influenciam a dinâmica populacional do *G. brimblecombei* (Barcik *et al.*, 2023; Ferreira Filho 2017; Ferreira Filho, 2010).

Na ecologia, para prever a distribuição geográfica de espécies são empregadas ferramentas estatísticas, dentre eles destacam-se os Modelos de Distribuição de Espécies (MDEs) (Sora *et al.*, 2023; Carter *et al.*, 2021). Esses modelos estabelecem relações entre dados demográficos de uma espécie e características ambientais, como temperatura, precipitação, altitude, entre outras (Zhao *et al.*, 2023; Saha *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020). Com base nessas relações, os MDEs mapeiam áreas adequadas para a habitat de uma determinada espécie em escalas geográficas diversas (Elith e Leathwick, 2009; Araújo e Guisan, 2006).

Assim, este trabalho tem como objetivo geral investigar a relação entre as condições ambientais e a susceptibilidade de áreas à ocorrência de danos econômicos causados por *G. brimblecombei* em plantios florestais de *Eucalyptus* spp. no território brasileiro para os cenários presente e futuro, em contraste com a abordagem convencional de muitas pesquisas, que se concentram na determinação da distribuição geográfica das espécies.

A dissertação apresentada é composta por três capítulos, o primeiro é estruturado em formato de referencial teórico, enquanto os dois seguintes seguem o formato de capítulo-artigo. A organização segue uma lógica em que cada capítulo fornece subsídios para o desenvolvimento dos capítulos subsequentes, com o objetivo de compreender as influências das condições ambientais na distribuição de áreas susceptíveis aos danos econômicos causados por *G. brimblecombei* no território brasileiro, tanto no cenário presente quanto futuro.

No capítulo I: *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) em plantios florestais de eucalipto: uma revisão foram abordados elementos relacionados aos impactos dos insetos-praga no setor florestal brasileiro. O capítulo abrange os aspectos biológicos, morfológicos e bioecológicos do *G. brimblecombei*, sua distribuição geográfica no Brasil e no mundo, os principais danos resultantes de suas infestações, além das técnicas empregadas para o seu controle.

No capítulo II: Modelagem da distribuição potencial de danos econômicos de *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) em plantios de *Eucalyptus* spp. no Brasil, buscou-se verificar a existência de relações entre as variáveis ambientais e a ocorrência de danos causados pelo *G. brimblecombei*. Além

de avaliar a eficiência de algoritmos de *machine learning* na modelagem da distribuição potencial das áreas.

No capítulo III: **Predição da distribuição potencial presente e futura de áreas susceptíveis a danos econômicos de *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) em plantios de *Eucalyptus* spp. no Brasil utilizando modelos de *machine learning***, investigou-se o potencial de novos algoritmos de *machine learning* na modelagem potencial das áreas susceptíveis a danos econômicos da praga para otimizar os resultados. E avaliou-se o impacto das mudanças climáticas sobre a capacidade do *G. brimblecombei* causar danos econômicos em plantios de eucalipto.

2 Capítulo I - *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) em plantios florestais de eucalipto: uma revisão

2.1 INTRODUÇÃO

A agroindústria florestal no Brasil destaca-se como uma das principais atividades econômicas contribuintes do Produto Interno Bruto nacional (PIB), (IBÁ, 2023; IBGE, 2023a). Além disso, impulsiona as economias locais e promove o desenvolvimento de regiões distantes dos grandes centros urbanos (Souza, 2023; AGEFLOR, 2020; Basso, 2015). Para além de sua relevância econômica, o setor desempenha um papel significativo na mitigação da degradação ambiental por meio da implementação de medidas de manejo florestal sustentável e da preservação de florestas nativas (IBÁ, 2023; Poyer, 2021).

A atividade florestal no Brasil abrange uma ampla cadeia produtiva, englobando diversos segmentos que resultam na produção de celulose, papel, madeira serrada, carvão vegetal, painéis de madeira, pisos laminados, móveis e produtos não madeireiros (IBÁ, 2023; IBGE 2023a; AGEFLOR, 2020). Cada produto possui sua própria cadeia produtiva específica, mas todos dependem de uma base florestal sólida e sustentável. O êxito desses produtos está diretamente relacionado ao equilíbrio entre aspectos econômicos, sociais e ambientais (IBÁ, 2023; Souza, 2023).

Em 2022, a extensão das áreas de floresta plantadas no país alcançou a marca de 9,94 milhões de hectares. Os plantios de eucalipto representam a maioria significativa, 76% desse total (7,6 milhões de ha), enquanto as áreas destinadas ao cultivo de pinus compreendem 19% (1,9 milhão de ha). As demais espécies, como seringueira, acácia, teca e paricá, compõem a parcela restante, ocupando cerca de 5% (440 mil ha) (IBÁ, 2023; IBGE 2023a). Os plantios se distribuem por todo o território brasileiro, os estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo concentram os principais produtores de floresta plantadas (IBÁ, 2023).

As características edafoclimáticas do Brasil, aliadas aos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, conferem ao país uma posição de destaque no mercado florestal (IBÁ, 2022). Espécies do gênero *Eucalyptus* tem sido as mais implantadas devido à sua alta produtividade, rápido crescimento, adaptabilidade e ampla gama de aplicações (Dallacort, 2020; Queiroz *et al.*, 2009). Segundo o IBÁ (2022), no Brasil, os plantios de eucalipto apresentam um potencial produtivo superior ao de outras regiões

do mundo. Estes índices têm evoluído ao longo dos anos, com as espécies desse gênero alcançando uma produtividade média estimada de 32,7 m³/ha/ano em um ciclo de 6,7 anos (IBÁ, 2023).

Nas últimas décadas as pragas florestais têm ganhado destaque como um dos principais fatores que impactam a produtividade e a qualidade da madeira (Litholdo, 2018). Dentre as principais pragas exóticas do eucalipto destacam-se o psílideo de concha (*Glycaspis brimblecombei*) (Hemiptera: Aphalaridae), o percevejo bronzeado (*Thaumastocoris peregrinus*) (Hemiptera: Thaumastocoridae), a vespa da galha do eucalipto (*Leptocybe invasa*) (Hymenoptera: Eulophidae) e o gorgulho-do-eucalipto (*Gonipterus platensis*) (Coleoptera: Curculionidae). Além disso, insetos nativos como formigas-cortadeiras (*Atta* spp. e *Acromyrmex* spp.) (Hymenoptera: Formicidae: Attini), cupins e lagartas desfolhadoras (*Thyrinteina arnobia*) (Lepidoptera: Geometridae) também contribuem para os desafios enfrentados pelo setor florestal (Lemes *et al.*, 2021; Wilcken, 2017).

Os impactos econômicos dessas pragas ainda não foram completamente determinados. Segundo Wilcken (2017), o percevejo bronzeado é capaz de provocar uma redução estimada de aproximadamente 15% a 20% no Incremento Médio Anual (IMA). O autor estimou que os danos econômicos durante o período de 2010 a 2015 atingiram a quantia de R\$ 1,1 bilhão. Valente *et al.* (2018) estimaram que uma infestação de *Gonipterus platenses* em Portugal, acarretaram em prejuízos de 648 milhões de euros em um horizonte de 20 anos.

Para mitigar os impactos e garantir a sustentabilidade do setor florestal, a silvicultura adota como estratégia o Manejo Integrado de Pragas (MIP). Essa abordagem visa garantir o ótimo desenvolvimento da floresta e, conseqüentemente, do produto final (Lemes *et al.*, 2021). O MIP abrange a integração de diversas táticas de manejo, como a seleção de materiais genéticos resistentes a pragas, a utilização de controle biológico, o emprego de produtos químicos e o monitoramento constante (Lemes e Zanuncio, 2021). Além disso, o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias inovadoras também desempenha um papel crucial na busca por soluções mais eficazes e sustentáveis para mitigar os efeitos adversos ocasionados pelas pragas.

2.2 *Glycaspis brimblecombei*

2.2.1 Aspectos morfológicos e biológicos

O *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera, Aphalaridae) comumente conhecido como psílideo de concha é um inseto-praga fitófago de hábito sugador que se alimenta exclusivamente de seiva das folhas de *Eucalyptus* spp. No contexto atual do setor florestal, a espécie assume um papel de destaque como uma das principais pragas exóticas do eucalipto (Barcik *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2021; Litholdo, 2018; Sá e Wilcken, 2004).

A espécie apresenta um desenvolvimento hemimetábolo, caracterizado por um ciclo de vida composto sequencialmente pelos estágios de ovo, ninfa e adulto (Ramirez *et al.*, 2003). De acordo com Firmino-Winckler *et al.* (2009), a duração total do ciclo, desde a fase embrionária até a morte dos indivíduos adultos, varia conforme a espécie do hospedeiro e as condições do ambiente.

Os ovos são depositados na superfície da folha com um pedúnculo, podendo ser agrupados em massas ou colocados individualizados. Os aglomerados assumem formatos circulares, alinhados em fileiras retas ou dispostos em semicírculos, sendo o último caso o mais comum em observações de campo (Sánchez *et al.*, 2002). Apresentam aspecto brilhante, formato oval e coloração amarelo-alaranjada (Ramirez *et al.*, 2003).

As ninfas passam por 5 estádios, sendo distinguidas pela estrutura e pelo número de segmentos da antena, variando de 3 a 9 (Ramirez *et al.*, 2003; Sánchez *et al.*, 2002). Nos 3 primeiros instares, apresentam coloração amarelada, enquanto nos 2 últimos assumem uma cor marrom-claro. Neste estágio, o *G. brimblecombei* possui corpo achatado dorsoventralmente (Favaro, 2006).

Ao eclodirem, as ninfas exploram a superfície foliar e escolhem o local adequado para permanência, onde inserem o estilete em busca dos vasos condutores de seiva, preferindo regiões próximas às nervuras (Phillips, 1992). Após fixação, a ninfa inicia sua alimentação e produz uma secreção açucarada, conhecida como “honeydew”, que é utilizada para a formação da concha (Favaro, 2006).

As conchas têm formato cônico, coloração esbranquiçada, e abrigam as ninfas até o estágio adulto (Cuello, 2019; Favaro, 2006). Durante a maior parte de seu período de desenvolvimento, as ninfas permanecem dentro da concha, e à medida

que crescem, ampliam gradualmente o tamanho dessa estrutura. Podem permanecer dentro da concha até a fase adulta ou se locomover, sendo necessário, neste caso, a construção de uma nova estrutura (Favaro, 2006).

Adultos de *G. brimblecombei* apresentam dimorfismo sexual, em que as fêmeas possuem comprimento ligeiramente superior ao dos machos, medindo entre 2,7 a 4,5 mm de comprimento, sendo que estes medem entre 2,7 até 3,95 mm (Favaro, 2006; Sá e Wilcken, 2004). A reprodução é sexuada, e as fêmeas possuem uma estrutura reprodutiva na porção terminal do abdômen, através da qual ocorre a postura dos ovos. Por outro lado, os machos detêm uma projeção na região superior do abdômen que auxilia na imobilização da fêmea durante a cópula. Ambos, possuem antenas filiformes com dez segmentos, assim como dois pares de asas transparentes e membranosas (Ramirez *et al.*, 2003; Favaro, 2006).

O *G. brimblecombei* caracteriza-se por ser uma espécie multivoltina, ou seja, manifesta múltiplos ciclos reprodutivos dentro de um único ano, com essas gerações ocorrendo de maneira contínua e sobreposta (Cuello, 2019; Favaro, 2006; Morgan, 1984). Segundo Collett (2001), o número de gerações é modulado pelas características biológicas do inseto, pelas condições do ambiente e disponibilidade de recursos do hospedeiro. Morgan, (1984) relata a ocorrência de duas a quatro gerações por ano, enquanto Cuello, (2019) observou o desenvolvimento de seis gerações em diferentes espécies de eucalipto.

Pragas multivoltinas apresentam uma capacidade acelerada de reprodução, o que resulta em sua presença constante e danos cumulativos ao longo do ano. Essa característica afeta a efetividade das ações de controle, uma vez que a sobreposição de gerações favorece a reinfestação de áreas controladas, requerendo sucessivas intervenções durante o ano.

Conforme observado por Silva (2010), o *G. brimblecombei* apresenta, em campo, uma distribuição espacial agregada em todos os seus estágios de desenvolvimento. Os autores também constataram que a densidade populacional não é influenciada pela posição dentro do talhão, seja no centro, nas laterais ou nas bordas. A distribuição espacial agregada cria condições favoráveis para que os surtos ocorram de forma concentrada, aumentando a pressão das pragas em determinados pontos da floresta. Esse padrão de distribuição sugere a necessidade de ajustes nas estratégias de monitoramento e controle, com foco nos pontos de agregação dos insetos. Além disso, a presença da espécie em várias posições dentro do talhão

implica na necessidade de uma amostragem mais intensa durante o monitoramento, com o intuito de obter informações mais representativas da floresta.

2.2.2 Bioecologia

A densidade de uma população e suas flutuações ao longo do tempo são influenciadas por uma variedade de fatores. Segundo Coulson e Witter (1990), esses elementos compreendem características climáticas, susceptibilidade do hospedeiro, disponibilidade de habitat apropriado, níveis de parasitismo e presença de enfermidades. A adoção dos plantios em mosaico em vez de blocos contínuos compreende uma estratégia adotada pelas empresas do setor florestal para contornar alguns desses fatores. Este manejo, ao criar sites com características distintas, contribui para a heterogeneidade do ecossistema, reduz o risco de ocorrência de pragas e doenças e favorece o desenvolvimento de inimigos naturais (Conrado *et al.*, 2014).

A detecção do *G. brimblecombei* foi registrada em várias regiões do país, no entanto, sua presença não necessariamente implica na ocorrência de danos econômicos. Os fatores ambientais não são capazes de restringir o desenvolvimento do psilídeo de concha, no entanto, desempenham um papel importante na regulação de sua densidade populacional (Favaro, 2006). As condições meteorológicas que exercem maior influência sobre a espécie são a temperatura do ar e o volume pluviométrico (Barcik *et al.*, 2023; Ferreira Filho *et al.*, 2017; Ferreira Filho 2010).

A água da chuva tem a capacidade de deslocar as conchas, resultando na remoção da proteção das ninfas. Esse deslocamento prejudica a aderência dos insetos sobre às folhas, criando condições desfavoráveis para sua sobrevivência e reprodução (Favaro 2006). Além disso, a umidade elevada durante a estação chuvosa contribui para o aumento da incidência de fungos entomopatogênicos capazes de matar ninfas do psilídeo (Rámirez *et al.*, 2002).

Oliveira *et al.* (2012), em uma pesquisa que envolveu a aplicação de chuva artificial, constataram que apenas 2 dias consecutivos de exposição à chuva foram suficientes para causar uma redução superior a 50% na população, atingindo uma eficácia de 96%, após 5 dias consecutivos. Os autores associaram essa diminuição ao umedecimento das folhas, que resulta no derretimento das conchas e, conseqüentemente, na exposição das ninfas a condições ambientais e predadores.

Estes resultados indicam que a precipitação demonstra efeito regulatório nas populações de psílideo.

No estudo conduzido por Ferreira Filho (2005), foi observado que a espécie demonstrou baixa incidência quando as chuvas eram uniformemente distribuídas na área de estudo. Entretanto, à medida que as precipitações se tornavam mais irregulares essa variabilidade promovia condições propícias para um aumento significativo em sua ocorrência. Tuller *et al.* (2017) verificaram a existência de uma forte relação entre os efeitos da chuva e a densidade de ovos e ninfas em *E. camaldulensis*, com aumento da densidade no período de estiagem e redução na estação chuvosa.

Rámirez *et al.* (2002) observaram a existência de uma relação entre os níveis de infestação do psílideo de concha e as taxas de precipitação. Os autores perceberam que a densidade populacional do *G. brimblecombei* permaneceu alta nos períodos secos e reduziu significativamente nos meses chuvosos. Resultados semelhantes foram observados por Barcik *et al.* (2023); Ferreira Filho *et al.* (2017); Camargo *et al.* (2014); Silva *et al.* (2013); Silva (2010); Ferreira Filho (2010); Ferreira *et al.* (2009); Ferreira Filho (2005); Sookar *et al.* (2003).

Existe uma grande variação nos padrões precipitação entre as regiões do território brasileiro. O Norte e Sul do país caracterizam-se por um elevado volume de precipitação anual, o qual é bem distribuído ao longo do ano, sem uma estação seca definida. No Nordeste, a maior parte da precipitação (55 a 70%) concentra-se em um período de três meses consecutivos, enquanto os demais meses podem experimentar condições mais secas. Em contraste, o Sudeste e Centro-Oeste tem uma distribuição mais uniforme ao longo do ano, com aproximadamente de 25 a 60% da precipitação total ocorrendo em três meses consecutivos (Nimer, 1989).

A heterogeneidade na distribuição das chuvas em todo o país pode estabelecer áreas com condições ambientais favoráveis ou desfavoráveis para o *G. brimblecombei*. Nas regiões Norte e Sul, por exemplo, onde as chuvas são uniformemente distribuídas ao longo do ano, é possível que a espécie apresente uma baixa densidade populacional quando se considera apenas a distribuição da precipitação.

Em condições de déficit hídrico, as espécies vegetais podem manifestar alterações fisiológicas e bioquímicas que afetam sua resistência contra insetos e outros estressores (Franco, 2018; Yihdego *et al.*, 2019). O déficit hídrico contribui para

o sucesso do estabelecimento do psíldeo de concha nos períodos de seca. Durante essa estação, há um aumento significativo na densidade de ovos e ninfas da espécie (Tuller *et al.*, 2017).

No bioma cerrado e na região Nordeste, onde o déficit hídrico é mais acentuado o *G. brimblecombei* tende a apresentar maior densidade populacional. Neste sentido, os programas de MIP devem ser adaptados para essas condições específicas. Isso implica em realizar um monitoramento frequente para detectar precocemente a presença do inseto-praga, especialmente durante os períodos de escassez de água. Outro aspecto importante nesse processo, é a seleção de materiais genéticos para o plantio que demonstrem tolerância tanto ao déficit hídrico quanto a praga.

Diferentes estudos realizados com o psíldeo de concha indicam que a temperatura é o principal fator envolvido na sua dinâmica populacional (Ramirez *et al.*; 2003; Paine *et al.*, 2000). No ambiente de laboratório, Firmino (2004), identificou que a temperatura ótima para o desenvolvimento e reprodução do inseto-praga foi de 26°C, enquanto a menos adequada foi 30°C. Em campo, Ferreira Filho (2005) encontrou resultados semelhantes, quando a temperatura máxima estava em torno de 31°C, as populações permaneceram baixas, e à medida que a temperatura diminuiu para cerca de 27°C a densidade populacional começou a aumentar.

Em um trabalho desenvolvido na região Sul do Brasil, Favaro (2006) identificou correlação negativa entre as ninfas e a temperatura máxima, sugerindo que temperaturas elevadas podem ter uma influência adversa no desenvolvimento da espécie. Em relação às temperaturas mínima e média, foram observadas correlações positivas; no entanto, nenhum dos resultados alcançou significância estatística.

Oposto a isso, nos Estados Unidos, Paine *et al.* (2000) e Dahlsten (2002) documentaram os picos de densidade populacional da praga nos meses mais quentes. Ferreira Filho (2005) atribuiu essa diferença às características climáticas específicas do Brasil, que se distinguem dos países do hemisfério norte. No contexto brasileiro, ocorre um aumento nas temperaturas durante o verão. No entanto, esse período é marcado por maiores índices pluviométricos, resultando na diminuição da densidade populacional. Enquanto isso, o inverno é marcado pelos meses mais secos e temperaturas mais amenas. Diferente ocorre no hemisfério norte o padrão sazonal é caracterizado por temperaturas severamente baixas no inverno e amenas no verão,

isso proporciona condições favoráveis para o desenvolvimento do *G. brimblecombei* no verão, uma vez que seu ciclo de vida é limitado no inverno.

Ferreira *et al.* (2009) verificaram que temperaturas mais baixas associadas a diminuição dos índices pluviométricos, proporcionam condições propícias para o estabelecimento e reprodução do psilídeo. Por outro lado, o aumento das temperaturas e a ocorrência frequente de chuvas contribuem para redução da população.

A espécie do hospedeiro também é um fator determinante para a densidade populacional do *G. brimblecombei*. A intensidade das infestações e a duração do ciclo de vida não são homogêneas entre as espécies de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia* spp. (Firmino-Winckler *et al.*, 2009; Pereira 2011). Em laboratório, Firmino-Winckler *et al.* (2009) realizaram testes com 6 espécies florestais comerciais e concluíram que 5 delas se comportaram como hospedeiros favoráveis para o desenvolvimento do psilídeo de concha. Entre essas espécies, *E. camaldulensis* e *E. tereticornis* se mostraram as mais adequadas, enquanto o *C. citriodora* exerceu um efeito letal sobre o inseto, inibindo seu desenvolvimento desde o primeiro estágio ninfal.

Ao monitorarem em campo 11 espécies de eucalipto no interior de São Paulo, Ferreira *et al.* (2009) constataram que as espécies *E. tereticornis* e *E. camaldulensis* foram as mais susceptíveis ao ataque da praga. Em contrapartida, os indivíduos de *C. citriodora*, *E. paniculata* e *E. torelliana* não foram infestados. Em um estudo sobre a preferência de oviposição em laboratório, Pereira *et al.* (2013) observaram que os genótipos de *E. urophylla* e *E. grandis* foram os menos visitados pelos adultos, enquanto houve uma elevada preferência pelo *E. camaldulensis*.

Brennan *et al.* (2001) conduziram uma avaliação da susceptibilidade de 21 espécies de eucalipto em São Francisco, Califórnia, EUA, e constataram que apenas três espécies (*E. camaldulensis*, *E. rudis* e *E. tereticornis*) apresentaram desfolha intensa, sendo classificadas como moderadamente a altamente susceptíveis. Diversos trabalhos têm demonstrado a alta susceptibilidade do *E. camaldulensis* (Camargo *et al.*, 2014; Montes e Raga, 2005; Wilcken *et al.*, 2003).

Apesar de ser altamente suscetível ao ataque do psilídeo de concha, o *E. camaldulensis* destaca-se como uma espécie de interesse econômico, devido a sua versatilidade de usos e capacidade de se adaptar em condições ambientais desfavoráveis, como o déficit hídrico (Costa *et al.*, 2017). Diante de cenários como esse, os programas de melhoramento genético têm se dedicado a produção de

híbridos que combinem elevada produtividade, com qualidade da madeira e maior resistência fatores bióticos e abióticos, como pragas e doenças.

As árvores do gênero *Eucalyptus* exibem características distintas que desempenham papéis significativos em sua resistência contra insetos fitófagos. Suas folhas apresentam glândulas que sintetizam óleos essenciais, frequentemente enriquecidos com terpenoides. Além disso, as folhas contêm metabólitos secundários, como taninos, fenóis e ceras, que têm potencial de torná-las menos palatáveis aos insetos. E a consistência foliar, conhecida como esclerofilia, acrescenta uma barreira física adicional (Ohmart e Edwards, 1991).

Diferentes espécies de eucalipto podem apresentar características foliares únicas que afetam a interação com os psílídeos (Reifenrath *et al.*, 2005). Segundo Brennan e Weinbaum (2001), a presença de cera epicuticular nas folhas jovens de *E. globulus* pode impactar negativamente a sobrevivência e o comportamento alimentar da espécie. Essa cera é capaz de reduzir a aderência das ninfas nas folhas e dificultar a sondagem do estilete.

2.2.3 Distribuição geográfica do *Glycaspis brimblecombei*

O *G. brimblecombei* é um inseto nativo da Austrália, sendo que os registros atuais demonstram sua distribuição por todos os continentes (EPPO, 2023). Sua primeira observação fora do ambiente natural foi relatada em junho de 1998, nas Américas. A infestação ocorreu em plantios de *Eucalyptus* spp. em El Monte, Los Angeles, EUA (Brennan *et al.*, 1999). No ano seguinte, a espécie foi detectada em diferentes cidades do México (Cibrian-Tovar e Iniguez-Herrera, 2001). Em 2003, já estava presente em 24 estados do país (Ramirez, 2003). Na América do Sul, sua primeira observação foi registrada no Chile em 2002, com infestações relatadas em diferentes regiões, como Santiago, Chacabuco, San Felipe e Los Andes (Sandoval e Rothmann, 2002).

No Brasil, o *G. brimblecombei* foi detectado pela primeira vez em 2003, no município de Mogi Guaçu, interior do estado de São Paulo. Em setembro do mesmo ano a praga já havia sido observada em mais 86 municípios do estado. Sua ocorrência foi registradas posteriormente em diversos estados brasileiros, incluindo Paraná, Goiás, Minas Gerais (Wilcken *et al.*, 2003), Mato Grosso do Sul (Sá e Wilcken, 2004); Santa Catarina (Lutinski *et al.*, 2006), Rio Grande do Sul (Oliveira *et al.*, 2006), Mato

Grosso (Silva, 2010), Espírito Santo (Resende e Santana, 2008), Bahia (Masson *et al.*, 2009), Pernambuco (Breda *et al.*, 2010); Rio de Janeiro, Tocantins, Piauí (Wilcken *et al.*, 2015); Pará (Saliba *et al.*, 2019) e Maranhão (Favoreto *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2021). Este inseto também foi detectado em outros países da América do Sul, como Argentina (Bouvet *et al.*, 2005), Equador (Onore e Gara, 2007), Venezuela (Rosales *et al.*, 2008), Colômbia (Rodas *et al.*, 2014), Paraguai (Díaz *et al.*, 2013) e Peru (Burckhardt *et al.*, 2008), (Figura 1).

Atualmente, o psíldeo de concha está presente em 16 estados brasileiros, que se distribuem pelas cinco regiões do país. A rápida expansão e dispersão da praga no território brasileiro são atribuídas, por Santana *et al.* (2003), à sua adaptabilidade ao clima do país e à extensa área plantada com eucalipto. Além disso, essa espécie apresenta alta capacidade de adaptação para colonizar novas áreas (Queiroz *et al.*, 2013).



Figura 1 - Distribuição do *G. brimblecombei* no Brasil.

A continua expansão dos plantios florestais de eucalipto tem contribuído para a disseminação da praga pelo território. A introdução do eucalipto em áreas anteriormente não povoadas cria um ambiente propício para a ocorrência do *G. brimblecombei*, uma vez que a espécie é específica na cultura e as condições climáticas não são limitantes para a sua incidência no Brasil. Tanto a temperatura quanto o volume de pluviométrico não atingem extremos que limitem a presença dessa espécie no país. Além disso, as extensas áreas oferecem uma abundância de recursos e abrigo para os insetos-praga (Firmino-Winckler *et al.*, 2009).

No período entre 2014 e 2022, os plantios florestais de eucalipto no Brasil registraram um crescimento de 2,6%. Durante esse intervalo, as regiões Sudeste (4,1%), Centro-Oeste (2,3%) e Nordeste (0,5%) destacaram-se como as de maior crescimento, enquanto a região Sul sofreu uma redução de 6,1% (IBGE, 2015; IBGE, 2023). Segundo Junqueira *et al.*, (2016) entre 2010 e 2015, o *G. brimblecombei* infestou uma área de aproximadamente 51 mil ha.

2.2.4 Danos

A intensidade dos danos causados por insetos, sejam eles de natureza qualitativa ou quantitativa, é moldado por uma interação complexa de diversos fatores (Favaro, 2006). Dentre esses, merecem destaque a densidade populacional da praga, a extensão temporal da exposição da planta à infestação, assim como o estágio de desenvolvimento e a estrutura vegetal do hospedeiro afetado. Além disso, a susceptibilidade das espécies vegetais pode sofrer variações ao longo do seu ciclo de vida.

Segundo Gallo *et al.* (2002), os danos causados por pragas apresentam variações entre países. Essa disparidade é influenciada por elementos intrínsecos a cada região, incluindo características climáticas, variedades cultivadas, práticas agrônômicas ou silviculturais adotadas, e a realidade socioeconômica. Desta forma, as estratégias de manejo de pragas precisam ser adaptadas e ajustadas com base nesses fatores para alcançar resultados eficazes.

A presença do *G. brimblecombei* em plantios de eucalipto pode resultar em diferentes tipos de danos. Esses danos surgem devido à alimentação das ninfas e dos adultos, que sugam folhas jovens e maduras, indicando a ocorrência de infestações em qualquer idade da floresta (Queiroz *et al.*, 2016). Estudos demonstraram

preferência desse inseto-praga pela parte superior da copa, onde se encontram as folhas e brotos jovens (Santana 2005; Montes e Raga, 2005; Pereira *et al.*, 2013; Carnielli, 2018). No entanto, Pereira *et al.* (2013) observaram, em condições de laboratório, que as folhas do terço superior e médio de mudas de foram preferidas para a oviposição. Esses autores sustentam a ideia de que o tecido menos lignificado facilita a alimentação do inseto-praga, pois apresenta características que facilitam a ingestão. Além disso, a região é atrativa devido à abundância de nitrogênio e outros nutrientes. Diferente dos demais autores, Jere *et al.*, (2020) verificaram que o inseto não demonstrou preferência por nenhuma parte específica da copa de *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. grandis* em povoamentos de eucalipto no Malawi, no sudeste da África.

As infestações de *G. brimblecombei* podem provocar diversas reações nas plantas, resultando em desfolha, ressecamento dos ponteiros, redução do tamanho das folhas, deformação e enrolamento do limbo foliar, (Sá e Wilcken, 2004; Wilcken *et al.*, 2003). De acordo com Gill (1998), os danos causados por este inseto-praga podem ocasionar até 15% de mortalidade das plantas no primeiro ano. Caso não sejam implementadas medidas de controle, a mortalidade pode atingir 40% no ano seguinte.

A presença do *G. brimblecombei* acarreta em impactos secundários, como a indução ao aparecimento de fumagina. A fumagina se desenvolve a partir da colonização de fungos saprófagos ao "*honeydew*", excretado pelo inseto-praga, resultando em uma película escura que cobre superfícies foliares, caulinares ou outras estruturas vegetais. Esse fenômeno resulta na redução da área fotossinteticamente ativa da planta, o que pode potencializar a susceptibilidade ao ataque de outros insetos (Ferreira Filho, 2010).

Durante o primeiro surto ocorrido em 2003 no Brasil, foi registrada uma taxa de desfolha entre 20% a 30%. Nas árvores dominadas, observou-se uma desfolha total, atingindo 100% da área da copa, sem possibilidade de recuperação (Wilcken *et al.*, 2003). A ocorrência de desfolha também foi identificada em Portugal e na Tunísia, onde os índices de infestação variaram de 5% a 75% e 8,8% a 80,5%, respectivamente (Dhahri *et al.*, 2014).

2.2.5 Métodos de controle

Para controle do *G. brimblecombei*, diversas técnicas podem ser adotadas, tais como métodos químicos, controle biológico, práticas silviculturais e seleção de genótipos resistentes (Oliveira, 2020). Santana *et al.* (2003) e Barbosa *et al.* (2021) sugerem o Manejo Integrado de Pragas (MIP) como a alternativa mais promissora para o controle desse inseto-praga dentro do contexto brasileiro. A justificativa para essa abordagem reside na extensa área ocupada pela monocultura, na adaptabilidade da espécie às condições ambientais e em sua rápida capacidade de dispersão pelo território nacional.

O monitoramento deste inseto-praga é base para as tomadas de decisão dos programas de MIP, pois tem como objetivo identificar locais de ocorrência e a necessidade de controle. O monitoramento é realizado de forma contínua e demanda mão de obra treinada para garantir a eficácia das medidas adotadas. Tais medidas visam garantir a identificação precoce de infestações, estabelecer áreas prioritárias para intervenções e avaliar a eficácia de diferentes métodos de controle.

As principais técnicas de monitoramento utilizadas são as armadilhas adesivas de coloração amarelas e a amostragem de folhagem. As armadilhas adesivas são preferidas devido a sua abordagem confiável, acessível e de baixo custo (Queiroz, *et al.* 2012). Por outro lado, a amostragem de folhagem, fornece informações detalhadas sobre a presença e a dinâmica populacional (Erbilgin *et al.*, 2004). Este método envolve a coleta das sete primeiras folhas dos três primeiros ramos de uma planta suspeita de infestação. As folhas são então colocadas em sacos plásticos para posterior análise da quantidade de indivíduos presentes, bem como dos diferentes estágios de desenvolvimento, ao longo de um período de quatro semanas. Outras técnicas tem sido pesquisadas, como o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) (Wantroba *et al.*, 2023).

Devido à ampla disseminação da espécie em diversas regiões do país, o controle químico se revela como uma medida de custo elevado e eficácia limitada (Santana *et al.*, 2003). Sá e Wilcken (2004) apontam ainda os impactos ambientais relacionados à aplicação destes produtos, bem como seu efeito temporário. Esse efeito pouco duradouro, está intrinsecamente ligado à sobreposição das gerações da espécie, implicando na necessidade de sucessivas pulverizações. Nesse cenário, os produtos com mecanismo de ação sistêmica destacam-se como os mais empregados

no controle da praga. Essa preferência deve-se à sua maior eficácia quando comparados aos produtos de ação por contato. Estes últimos enfrentam desafios para atingir as ninfas, devido à proteção conferida pela concha e à mobilidade reduzida durante o ciclo de vida (Wilcken *et al.*, 2003).

Doze anos após a identificação inicial da praga no Brasil, não havia registros de produtos químicos para o seu controle no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (Wilcken *et al.*, 2015). Atualmente, há sete produtos registrados no MAPA, provenientes de três ingredientes ativos: bifentrina, acetamiprido e etofenproxi. Esses produtos atuam por meio de mecanismos de ação sistêmica, de contato e de ingestão, em alguns casos ocorrendo a combinação desses mecanismos e, em outros, uma atuação isolada (MAPA, 2023).

Existem diversas espécies de inimigos naturais generalistas associadas ao psílideo de concha. No entanto, algumas delas tem eficiência limitada no controle dessa praga, pois apresentam taxa de parasitismo pouco significativa (Dahlsten, 2002; Wilcken *et al.*, 2015). Isso ocorre porque esses insetos não são especializados em uma única presa e podem se alimentar de uma variedade de espécies. Além disso, esses inimigos naturais não possuem adaptações específicas para perfurar as conchas protetoras das ninfas do psílideo (Wilcken *et al.*, 2003). Embora possam ocasionalmente preda as ninfas do psílideo, sua preferência alimentar geralmente se volta para presas mais abundantes ou de fácil acesso.

Foram documentados casos de predação ou parasitismo de ninfas ou adultos do psílideo de concha por espécies como: *Anoplolepis longipes* (Hymenoptera: Formicidae) (Sánchez-Martínez *et al.*, 2005), *Anthocoris nemoralis* (Hemiptera: Anthocoridae) (Garonna *et al.*, 2011), *Atopozelus opsimus* (Hemiptera: Reduviidae) (Dias, 2009), *Cycloneda sanguinea* (Coleoptera: Coccinellidae) (Berti Filho *et al.*, 2003), *Exochomus aethiops* (Coleoptera: Coccinellidae) (Sookar *et al.*, 2003), *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) (Wilcken *et al.*, 2015) e *Vespula sp.* (Garonna *et al.*, 2011), *Crhysoperla externa* (Neuroptera: Crysopidae) (Cuello *et al.*, 2019).

O *Psyllaephagus bliteus*, um parasitoide nativo da Austrália, é conhecido por ser específico do *G. brimblecombei*, e possuir uma relação de dependência com sua densidade populacional (Dias, 2013; Silva *et al.*, 2013). Este inseto tem a capacidade de parasitar as ninfas, mesmo quando estão protegidas pelas conchas.

No Brasil, sua introdução ocorreu de forma natural juntamente com a chegada da praga (Berti Filho *et al.*, 2003).

As fêmeas do parasitoide depositam seus ovos no tórax ou abdome das ninfas do psílídeo, preferencialmente nas do terceiro ou quarto estágio. Após cerca de duas semanas, os adultos do parasitoide emergem, deixando um orifício circular visível na concha. Além disso, as fêmeas do *P. bliteus* têm a capacidade de colocar ovos sem a necessidade de cópula, reproduzindo-se por partenogênese arrenótoca facultativa, em que na ausência de machos, elas colocam ovos férteis, mas que dão origem apenas a parasitoides machos (Plascencia-González *et al.*, 2005; Daane *et al.*, 2005; Montes e Raga, 2005).

Fatores bióticos e abióticos têm o potencial de influenciar a taxa de parasitismo do inseto (Margiotta *et al.*, 2017; Caleça *et al.*, 2018). Segundo Daane *et al.*, (2005) a temperatura desempenha um papel determinante no ciclo de vida da espécie. Os autores observaram uma diminuição na longevidade e na taxa de fecundidade com o aumento da temperatura.

Em países de clima quente, como o Brasil e a Califórnia, o estabelecimento do inseto tem sido desafiador (Ferreira Filho *et al.*, 2015; Daane *et al.*, 2012). Em plantios florestais de *E. camaldulensis* nos estados de São Paulo e Minas Gerais, a taxa de parasitismo natural demonstrou níveis reduzidos, variando 0,2% a 11%, indicando a necessidade de liberações massais sucessivas (Wilcken *et al.*, 2005). Em regiões onde ocorreu liberação massal do *P. bliteus* os resultados revelaram aumento dos níveis de parasitismo em campo, atingindo até 94% (Ferreira-Filho *et al.*, 2015; Huerta *et al.*, 2010).

Dentre os predadores generalistas, *Atopozelus opsimus* (Hemiptera: Reduviidae) tem demonstrado potencial para ser uma alternativa viável em programas de controle biológico. Essa perspectiva é reforçada pelo fato de o inseto ser nativo e ter adaptado sua alimentação à predação de pragas exóticas (Dias, 2013). O inimigo natural foi observado predando várias pragas, incluindo, *Glycaspis brimblecombei*, *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae), *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae) e *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae).

Segundo Dias (2009) o psílídeo é a fonte alimentar preferencial do *A. opsimus*. O inseto apresenta um padrão alimentar que abrange ninfas em diversos estágios de desenvolvimento, e também adultos de psílídeos, destacando-se por sua capacidade de erguer as estruturas protetoras das ninfas, a fim de capturar suas

presas (Dias, 2009). Nesse estudo, o autor observou que o inseto foi capaz de completar seu ciclo de vida alimentando-se exclusivamente de ninfas e adultos do psílideo.

O uso de fungos entomopatogênicos surge como uma alternativa viável para o controle biológico de *G. brimblecombei*, contudo, sua eficácia está relacionada com às condições ambientais. De acordo com Wilcken *et al.* (2003), essa técnica demonstra resultados expressivos apenas em ambientes caracterizados por uma umidade relativa superior a 60%. A eficácia do controle é particularmente influenciada pela proteção fornecida pela concha do psílideo, sendo viável principalmente durante o período de ecdise, quando a ninfa está exposta.

Favaro (2006) conduziu um estudo em laboratorial para avaliar a eficácia dos fungos *Lecanicillium* sp. e *Beauveria* sp. no controle da praga. Os resultados indicaram alta susceptibilidade das ninfas e adultos ao ataque desses fungos. Em condições de semi-campo, Dal Pogetto *et al.* (2011) observaram que os 3 produtos testados (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* e *Lecanicillium longisporum*) causaram redução na densidade populacional do psílideo. Os tratamentos com *B. bassiana* e *M. anisopliae* apresentaram os melhores resultados, alcançando eficiência superior a 80%.

Além da redução na produtividade da floresta, a presença do inseto pode aumentar os custos de produção. Estima-se que o custo da aplicação de inseticidas químicos para controlar o *G. brimblecombei* varie em torno de R\$ 85,00 por ha, requerendo no mínimo de três aplicações por ano (Sá *et al.*, 2014). O controle biológico vem ganhando destaque dentro das empresas do setor florestal no Brasil. Este método de controle é uma alternativa mais viável e econômica em comparação com o uso de inseticidas químicos.

O crescimento do uso do controle biológico é impulsionado pela pressão dos mercados consumidores por produtos mais sustentáveis. As certificadoras, como o FSC (*Forest Stewardship Council*), desempenham um papel crucial na promoção dessas práticas (Lemes e Zanuncio, 2021). As principais vantagens do controle biológico incluem sua especificidade à praga-alvo, capacidade de minimizar problemas como o desenvolvimento de resistência pelas pragas e a contaminação da água e do solo. Além disso, representa uma alternativa mais segura para a saúde humana e para o meio ambiente (Campanhola *et al.*, 2003).

Como resultado, as empresas florestais vêm adotando essa abordagem como parte de seus programas de MIP. Essas empresas tem investido na criação de laboratórios próprios para atender às suas necessidades no manejo de pragas. Os laboratórios são responsáveis pela produção e distribuição dos inimigos naturais necessários para o controle das principais pragas encontradas em suas plantações. Além disso, no Brasil, existem empresas privadas, que se dedicam à produção comercial de inimigos naturais específicos para o controle em áreas agrícolas e florestais. O mercado de produtos biodenstivos cresceu mais de 70% em um ano no país (MAPA, 2019).

2.3 CONCLUSÕES

A rápida disseminação do *Glycaspis brimblecombei* nos plantios florestais de eucalipto no Brasil é uma preocupação significativa do setor. Sua fácil adaptação às condições climáticas do país, aliada à extensão das áreas cultivadas com eucalipto e a baixa eficiência dos métodos de controle, sugerem a necessidade de um programa de manejo integrado. Esse programa deve considerar não apenas os aspectos da morfologia e biologia da praga, mas também sua interação complexa com o ambiente e outros organismos.

A introdução do *G. brimblecombe* foi capaz de influenciar diversos processos dentro do setor florestal, incluindo os programas de MIP e de melhoramento genético, nos setores de silvicultura, pesquisa e meio ambiente. No entanto, identificam-se algumas lacunas importantes em relação a esse inseto-praga. Compreender a relação entre os danos econômicos provocados pelo *G. brimblecombei* e as condições ambientais é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficazes, adaptadas às distintas regiões do Brasil. Assim como, estimar os impactos financeiros resultantes de suas infestações permite avaliar o custo dessa ameaça para a indústria florestal. O preenchimento dessas lacunas por meio de pesquisas é necessário para garantir a saúde dos plantios florestais e mitigar os prejuízos econômicos associados a praga.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS (AGEFLOR). **O setor de base florestal no Rio Grande do Sul - 2020**. Porto Alegre: AGEFLOR, 2020. 84 p.
- BARBOSA, L. R.; QUEIROZ, D. L. de; NICKELE, M. A.; QUEIROZ, E. C. de; REIS FILHO, W.; IEDE, E. T.; PENTEADO, S. do R. C. Pragas de eucaliptos. *In: OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento*. Brasília: Embrapa, 2021. p. 751-780.
- BARCIK, L. P.; CAMARGO, M. B.; GARRET, A. T. de A.; GARCIA, F. A. de O.; UKAN, D. lutuação populacional de *Glycaspis brimblecombei* mais em híbridos de *Eucalyptus camaldulensis* x *E. grandis*na região Sul do Brasil. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v.21, n.9, p. 11880-11894. 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv21n9-074>
- BASSO, V. M. **Desafios e oportunidades da certificação do manejo florestal pelo sistema fsc no continente americano**. 2015. 205 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.
- BERTI FILHO, E.; COSTA, V.A.; ZUPARKO, R.L., LASALLE, J. Ocorrência de *Psyllaephagus bliteus* Riek (Hymenoptera: Encyrtidae) no Brasil. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 78, n. 3, p. 304, 2003.
- BOUVET, J. P. R.; HARRAND, L.; BUCKHARDT D. Primera cita de *Blastopsylla occidentalis* y *Glycaspis brimblecombei* (Homoptera: Psyllidae) para la República Argentina. **Revista de la Sociedad Entomológica Argentina**, v. 64, n. 1-2, p. 99-102. ene./jul. 2005. ISSN 0373-5680.
- BREDA, M. O.; OLIVEIRA, J. V. de; MOREIRA, A. N.; QUEIROZ, D. L. de. Registro de *Glycaspis brimblecombei* em *Eucalyptus* spp. em Petrolina, Pernambuco. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 253-255, ago./out. 2010. DOI: <https://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.63.253>.
- BRENNAN, E. B.; GILL, E. B.; HRUSA, G. F.; WEINBAUM, S. A. First record of *Glycaspis brimblecombei* (Moore) (Homoptera: Psyllidae) in North America: initial observations of potentially serious pest of eucalyptus in California. **Pan-Pacific Entomologist**, v. 75, n. 1, p. 55-57, 1999. Disponível em: <https://www.biodiversitylibrary.org/part/268720>. Acesso em: 15 jul. 2023.
- BRENNAN, E. B.; WEINBAUM, S. A. Effect of epicuticular wax on adhesion of psyllids to glaucous juvenile and glossy adult leaves of *Eucalyptus globulus* Labillardière. **Australian Journal of Entomology**, v. 40, n. 3, p. 270–277, jul. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1440-6055.2001.00229.x>.
- BRENNAN, E.B.; HRUSA, F.; WEINBAUM, S.A.; LEVISON JUNIOR, W. Resistance of *Eucalyptus* species *Glycaspis brimblecombei* (Homoptera: Psyllidae) in the San Francisco Bay area. **Pan Pacific Entomologist**, v. 77, p.249-253, 2001.
- BURCKHARDT, D.; LOZADA, P.W.; DIAZ, W.B. First record of the red gum lerp

psyllid *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psylloidea) from Peru. **Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft**, v.81, p. 83–85, 2008.

CALECA, V.; BELLA, S.; LA PERGOLA, A.; LOMBARDO, G. V.; MALTES, M. NUCIFORA, S.; RIZZO, R.; SUMA, P.; TORTORICI, F.; RAPISARDA, C. Environmental factors impact and incidence of parasitism of *Psyllaephagus bliteus* riek (Hymenoptera Encyrtidae) on populations of *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera Aphalaridae) in mediterranean climatic areas. **Jornal de Zoologia**, v. 101, p. 89-100, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.19263/REDIA-101.18.12>.

CAMARGO, J. M. M.; ZANOL, K. M. R.; QUEIROZ, D. L. de; DEDECECK, R. A.; OLIVEIRA, E. B.; MELIDO, R. C. N. Resistência de clones de Eucalyptus ao psilídeo-de-concha. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 77, p. 91–97, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.77.504>.

CAMPANHOLA, C.; BETTIOL, W.; BETTIOL, W. **Métodos alternativos de controle fitossanitário**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. 279 p.

CARNIELLI, T. L. **Avaliação da eficiência de fungos entomopatogênicos no controle biológico de *Glycaspis brimblecombei* Moore, 1964 (Hemiptera: psyllidae)**. 2018. 42 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Biodiversidade) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/11727>. Acesso em: 15 out. 2022.

CIBRIAN-TOVAR, D.; INIGUEZ-HERRERA, G. Manual para la identificación y manejo de las plagas y enfermedades forestales dei estado de Jalisco. **Prodefo**, v. 32, p. 23-29, 2001 (Documento Técnico).

COLLET, N. Biology and control of psyllids, and the possible causes for defoliation of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. (river red gum) in south-eastern Australia – a review. **Australian Forestry**, v. 64, n. 2, p. 88-95, jun. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049158.2001.10676170>.

CONRADO, V. N.; SOUZA, G. S. A. de; MARTINS, B. F.; QUINTO, V. SILVA, E. Potencialidades da silvicultura em mosaico nas zonas de amortecimento de unidades de conservação. Viçosa: UFV. jun. 2014. (Relatório Técnico)

COSTA, A. C. S.; LEAL, C. S.; SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p. 10-20, 2017. DOI: <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n1p10-20>.

COULSON, R. N.; WITTER, J. A. **Entomología Forestal: ecología y control**. México: Limusa, 1990. 751 p.

CUELLO, E. M.; ANDORNO, A. V.; HERNÁNDEZ, C. M.; LÓPEZ, S. N. Prey consumption and development of the indigenous lacewing *Chrysoperla externa* feeding on two exotic *Eucalyptus* pests. **Biocontrol Science and Technology**, v. 29, n. 12, p. 1159-1171. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2019.1660958>.

CUELLO, E. M. **Estudio de la diversidad de insectos asociados a las principales plagas de Eucalyptus spp., para la selección de potenciales agentes de control biológico**. 2019. 183 f. Tesis (Doctorado) - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2019. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6592_Cuello. Acesso em: 16 de out.de 2023.

DAANE, K. M.; SIME, K. R.; DAHLSTEN, D. L.; ANDREWS JUNIOR, J. W.; ZUPARKO, R. L. The biology of *Psyllaephagus bliteus* Riek (Hymenoptera: Encyrtidae), a parasitoid of the red gum lerp psyllid (Hemiptera: Psylloidea). **Biological Control**, Amsterdam, v. 32, n. 2, p. 228-235, fev. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.09.015>.

DAANE, K. M.; SIME, K. R.; PAINE, T. D. Climate and the effectiveness of *Psyllaephagus bliteus* as a parasitoid of the red gum lerp psyllid. **Biocontrol Science and Technology**, v. 22, n.11, p. 1305-1320, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2012.724383>.

DAHLSTEN, J. D. **Center for biological control**. Berkeley: University of California; IPM, 2002. 34 p.

DAL POGETTO, M. H. F. do A.; WILCKEN, C. F.; GIMENES, M. J.; CHRISTOVAM, R. de S.; PRADO, E. P. Control of red-gum lerp psyllid with formulated mycoinsecticides under semi-field conditions. **International Journal of Tropical Insect Science**. v. 31; n. 2; p. 85-91, jun. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1017/s1742758411000166>.

DALLACORT, S. **Controle químico de larvas de *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae) em mudas de eucalipto e efeito no parasitoide *Quadrastichus mendeli* (Hymenoptera: Eulophidae)**. 2020. 61 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.

DHAHRI, S.; JAMAA, M. L.; GARCIA, A.; BOAVIDA, C.; BRANCO, M. Presence of *Glycaspis brimblecombei* and its parasitoid *Psyllaephagus bliteus* in Tunisia and Portugal. **Silva Lusitana**, v. 22, n. 1, p. 99-105, 2014.

DIAS, T. K. R. ***Atopozelus opsimus* (HEMIPTERA: REDUVIIDAE): presas alternativas, comportamento parental e predação sobre pragas exóticas**. 2013. 101 f. Tese (Doutorado) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2013.

DIAS, T. K. R. **Bionomia e comportamento de *Atopozelus opsimus* Elkins (HEMIPTERA: REDUVIIDAE) mantidos em *Glycaspis brimblecombei* Moore (HEMIPTERA: PSYLLIDAE)**. 2009. 112 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009.

DÍAZ, E. A. B.; CORONEL, R. S.; GODZIEWSKI, D. Consideraciones sobre dos nuevas plagas del eucalipto en Paraguay, el psílido de la concha o escudo *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) y la chinche marrón *Thaumastocoris*

peregrinus (Hemiptera: Thaumastocoridae). **Bol. Mus. Nac. Hist. Nat. Parag**, v. 17, n. 1, p. 72-75, ago. 2013.

ERBILGIN, N., DAHLSTEN, D. L., CHEN, P. Intraguild interactions between generalist predators and an introduced parasitoid of *Glycaspis brimblecombei* (Homoptera: Psylloidea). **Biological Control**, v. 31, n. 3, p. 329–337, nov. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.06.010>.

EUROPEAN AND MEDITERRANEAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION (EPPO). *Glycaspis brimblecombei*. **EPPO Global Database**. 2023. Disponível em: <https://gd.eppo.int/taxon/GLYSBR/distribution>. Acesso em: 15 set. 2023.

FAVARO, R. M. **Aspectos bionômicos de *Glycaspis (Glycaspis) brimblecombei* (Moore, 1964) (Hemiptera: Psyllidae) e seu controle com fungos entomopatogênicos**. 2006. 43p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

FAVORETO, A. L.; CARVALHO, V. R.; DOMINGUES, M. M.; RIBEIRO, M. F.; CAVALLINI, G.; LAWSON, S. A.; SILVA, W. M.; ZANUNCIO, J. C.; WILCKEN, C. F. *Wolbachia pipientis*: first detection in populations of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) and *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) in Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. 1-4, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.264475>.

FERREIRA FILHO, P. J.; WILCKEN, C. F.; MASSON, M. V.; TAVARES, W. S.; GUERREIRO, J. C.; DO CARMO, J. B.; PRADO, E. P.; ZANUNCIO, J. C. Influence of temperature and rainfall on the population dynamics of *Glycaspis brimblecombei* and *Psyllaephagus bliteus* in *Eucalyptus camaldulensis* plantations. **Revista Colombiana de Entomología**, v. 43, n. 1, p.1-6, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.25100/socolen.v43i1.6638>.

FERREIRA FILHO, P. J. **Dinâmica populacional do psílideo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) e parasitismo por *Psyllaephagus bliteus* Riek (Hymenoptera: Encyrtidae) em floresta de eucalipto**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2010.

FERREIRA FILHO, P. J. **Estudo de populações do psílideo-de-concha *Glycaspis Brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) e de seu parasitóide *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) em floresta de *Eucalyptus camaldulensis* por dois métodos de amostragem**. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2005.

FERREIRA FILHO, P. J.; WILCKEN, C. F.; LIMA, A. C. V.; SÁ, L. A. N. de; CARMO, J. B. do; GUERREIRO, J. C.; ZANUNCIO, J. C. Biological control of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) in eucalyptus plantations. **Phytoparasitica**, v. 43, p.151-157, apr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12600-014-0440-3>.

FERREIRA, R. de A.; BLAZIZA, A. A. B.; ANZONIN, M. G.; FIRMINO-WINCKLER, D. C. Flutuação populacional do psílideo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore

(Hemiptera: Psyllidae) em *Eucalyptus* spp. no município de Garça, SP. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 8, n. 14, p. 29-46, ago. 2009. ISSN:1678-3867.

FIRMINO, D.C. **Biologia do psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) em diferentes espécies de eucalipto e em diferentes temperaturas**. 2004. 49 f. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

FIRMINO-WINCKLER, D. C.; WILCKEN, C. F.; OLIVEIRA, N. C. DE; MATOS, C. A. O. de. Biologia do psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera, Psyllidae) em *Eucalyptus* spp. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 53, n. 1, p. 144-146, mar. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0085-56262009000100030>.

FRANCO, M. P. **Plasticidade de árvores de *Eucalyptus grandis* no contexto das mudanças climáticas: interação do déficit hídrico e da fertilização no crescimento e qualidade do lenho das árvores**. 2018. 171 f. Tese (Doutorado em) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2018.

GALLO, D.; NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R. P. L.; BATISTA, G. C.; BERTI FILHO, E.; PARRA, J. R. P.; Z UCCHI, R. A.; ALVES, S. B.; VENDRAMIN, J. D.; MARCHINI, L. C.; LOPES, J. R.; OMOTO, C. **Entomologia agrícola**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 920p.

GARONNA, A. P.; SASSO, R.; LAUDONIA, S. *Glycaspis brimblecombei* (Hem.: Psyllidae), la psilla dal follicolo bianco ceroso, altra specie aliena dell'Eucalipto rosso in Italia. **Foresta**, v. 18, p.71-77, may. 2011. DOI: <https://doi.org/10.3832/efor0654-008>.

GILL, R. J. New state records: Redgum lerp psyllid. **California Department of Food and Agriculture Plant Pest and Disease Report**, v. 17, p. 7-8, 1998.

HUERTA, A.; FAÚNDEZ, M.; ARAYA, J. E. Susceptibility of *Eucalyptus* spp. to an induced infestation of red gum lerp psyllid *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) in Santiago, Chile. **Ciencia e investigación agraria**, v. 37, n. 2, p.27-33. ago. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-16202010000200003>.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2022**. IBÁ, 2022. 96 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 06 de ago. 2023.

INDUSTRIA BRASILEIRO DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual IBÁ 2023**. IBÁ, 2023. 91 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2022**. Rio de Janeiro, v. 37, p. 1-8, 2023b. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2022_v37_informativo.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da extração vegetal e silvicultura 2015**. RIO DE JANEIRO: IBGE, v. 29, p.1-56, 2015. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2014_v29.pdf. Acesso em: 20 jan. 2023.

JERE, V.; MHANGO, J.; NJERA, D.; JENYA, H. Infestation of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) on three Eucalyptus species in selected ecological zones in Malawi. **African Journal Ecology**, v. 58, n. 2, p. 251-259, jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/aje.12686>.

JUNQUEIRA, L. R.; BARBOSA, L. R.; ZANUNCIO, J. C.; WILCKEN, C. F. Occurrence of forest pests in Eucalyptus plantations in Brazil during 2010-2015. CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENTOMOLOGIA, 25, 2016. Orlando. **Proceedings** [...]. Annapolis: Entomological Society of America, 2016. DOI: 10.1603/ICE.2016.112703.

LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C.; JACOBINE, L. A. G.; WILCKEN, C. F.; LAWSON, S. A. Forest Stewardship Council and Responsible Wood certification in the integrated pest management in Australian forest plantations. **Forest Policy and Economics**, v. 131, p. 1-12, oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102541>.

LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C. Manejo integrado de pragas florestais. In: LEMES, P. G. **Novo Manual de Pragas Florestais Brasileiras**. Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. p. 26-39.

LITHOLDO, M. G. **Dinâmica populacional e distribuição de insetos em plantios florestais na Estação Experimental de Anhembi (Anhembi, SP)**. 2020. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade São Paulo, Piracicaba, 2018. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11146/tde-13032019-174840/publico/Murilo_Gaspar_Litholdo.pdf. Acesso em: 17 out. 2022.

LUTINSKI, J. A.; LUTINSKI, C. J.; GARCIA, F. R. M. Primeiro registro de *Glycaspis brimblecombei* Moore 1964, (Hemiptera: Psyllidae) em Eucalipto no Estado de Santa Catarina, Brasil. **Ciência Rural**, v. 36, p. 653-655. mar./abr., 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000200046>.

MARGIOTTA, M.; BELLA S.; BUFFA F.; CALEGA V.; FLORIS I.; GIORNO V.; LO VERDE G.; RAPI SARDA C.; SASSO R.; SUMA P.; TORTORICI F.; LAUDONIA S. Modeling Environmental Influences in the *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) - *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) Parasitoid-Host System. **Journal of Economic Entomology**, v. 110, n. 2, p. 491-501, abr. 2017. <https://doi.org/10.1093/jee/tow253>.

MASSON, M.V.; MATOS, W.C.; SILVA, A. G. P. da; ALVES, J.M.; RIBEIRO, G. T.; WILCKEN; F. C. Occurrence and population distribution of red gum lerp psyllid *Glycaspis brimblecombei* Moore 1964, (Hemiptera: Psyllidae) in eucalyptus forests in the North coast of Bahia State, Brazil. **Boletim de Sanidad Vegetal - Plagas**, v. 35, n. 4, p. 563-569, 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). AGROFIT, Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários, 2023. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 15 de jul. 2023.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Mercado de biodefensivos cresce mais de 70% no Brasil em um ano. MAPA. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/feffmercado-de-biodefensivos-cresce-em-mais-de-50-no-brasil>. Acesso em: 20 jan. 2023.

MONTES, S. M. N. M.; RAGA, A. Dinâmica estacional do Psílideo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* MOORE (Hemiptera: Psyllidae) na região oeste do estado de São Paulo. **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, v. 72, n. 4, p.511-515, out./dez., 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/1808-1657v72p5112005>.

MORGAN F. D. **Psylloidea do Sul da Austrália**. Austria: Government of South Australia. 1984, 136 p. ISBN: 9780724345601.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 422 p.

OHMART, C. P.; EDWARDS, P. B. Insect herbivory on eucalyptus. **Annual Review of Entomology**, v. 36, p. 637-657, jan. 1991. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.en.36.010191.003225>.

OLIVEIRA, D. W. N. de. **Fertilização silicatada com microssílica pode ser usada para controlar o psílideo de concha em floresta de eucalipto?** 2020. 29 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciência Agrárias, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri Diamantina, 2020. Disponível em: <http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/handle/1/2452>. Acesso em: 08 de jul. 2023.

OLIVEIRA, K. N.; JESUS F. M.; SILVA J. O.; ESPÍRITO-SANTO, M. M.; FARIA M. L. An experimental test of rainfall as a control agent of *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera, Psyllidae) on seedlings of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn (Myrtaceae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 56, n. 1, p. 101-105, mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0085-56262012005000008>.

OLIVEIRA, L. da S.; COSTA, E. C.; GRELLMAN, M.; CANTARELLI, E. B.; PERRAND, E. R. Ocorrência de *Glycaspis brimblecombei* (Moore, 1964) (Hemiptera: Psyllidae) em *Eucalyptus* spp. no rio grande do sul, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 353-355, jul./set. 2006. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050981914>.

ONORE, G.; GARA, R. L. First record of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) in Ecuador, biological notes and associated fauna. *In*: European Hemiptera Congress, 4., 2007. Turin. **Anais** [...]. Turin, 2007. p. 41-42.

PAINE, T. D.; DAHLSTEN, D. L.; MILLAR, J. G.; HODDLE, M. S.; HANKS, L. M. UC scientists apply IPM techniques to new eucalyptus pests. **California Agriculture**, v.

54, n. 6, p. 8-13, 2000. Disponível em:<<http://www.acwm.co.la.ca./pdf/RedGumLerppsyllideng.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2023.

PEREIRA, J. M.; BALDIN, E. L. L.; SOLIMAN, E. PI.; WILCKEN, C. F. Attractiveness and oviposition preference of *Glycaspis brimblecombei* Moore in *Eucalyptus* spp. **Phytoparasitica**, 41, p. 117–124, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12600-012-0268-7>.

PEREIRA, J. M. **Resistência de genótipos de eucalipto ao psilídeo-de concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (HEMIPTERA: PSYLLIDAE)**. 2011. 88 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

PHILLIPS C. **Lerps insects**. Mount Gambier: PIRSA Forestry, 1992, 5 p.

PLASCENCIA–GONZÁLEZ, A.; CIBRIÁN–TOVAR, D.; LLANDERAL–CÁZARES, C.; LÓPEZ–PÉREZ, I.; ARRIOLA–PADILLA, V. Biología del parasitoide *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae). **Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v.11, n.1, p.11-17, 2005.

POYER, F. R. **A transparência na adoção dos green bonds no setor de papel e celulose no Brasil**. 2021. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) - Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.

QUEIROZ, D. L. de; MELISSA, J.; CAMARGO, M.; DEDECEK, R. A.; OLIVEIRA, E. B. Effect of silicon application to *Eucalyptus camaldulensis* on the population of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae). **Brazilian Journal of Forestry Research**, v. 36, n. 86, p. 85-94, abr./jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.86.976>.

QUEIROZ, D. L.; MAJER, J.; BURCKHARDT, D.; ZANETTI, R.; FERNÁNDEZ, J. I. R.; QUEIROZ, E. C. DE; GARRASTAZU, M.; FERNANDES, B. V.; ANJOS, N. DOS. Predicting the geographical distribution of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psylloidea) in Brazil. **Australian Journal of Entomology**, v. 52, n. 1, p. 20-30, fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/aen.12001>.

QUEIROZ, D. L.; BURCKHARDT, D.; MAJER, J. Integrated pest management of eucalypt Psyllids (Insecta, Hemiptera, Psylloidea). In: LARRAMENDY, M. L.; SOLONESKI, S. **Integrated pest management and pest control: current and future tactics**. Rijeka: InTech. v. 1. p. 385-412, 2012.

QUEIROZ, M. M.; LELES, P. S. dos S.; OLIVEIRA NETO, S. N. de; FERREIRA, M. A. Comportamento de materiais genéticos de eucalipto em Paty do Alferes, RJ. **Floresta e Ambiente**, v.16, n.1, p. 1 - 10, 2009.

RAMIREZ, A. L. G. **Fluctuación poblacional del psilido del eucalipto *Glycaspis brimblecombei* y el efecto del control biológico com la vispa parasitóide**

Psyllaephagus bliteus. 2003. 45 f. Tesis (Maestría en Ingeniería Agrícola) - Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Edo. De México, 2003.

RAMIREZ, A. L. G.; MANCERA, G. M.; GUERRA-SANTOS, J. J. **Análises Del efecto de las condiciones ambientales em la fluctuación poblacional del psílido del eucalipto em el estado de México**. Cuautitlán Izcalli: Editorial Habana. 2002. 5 p.

REIFENRATH K, RIEDERER M, MÜLLER C. Leaf surface wax layers of Brassicaceae lack feeding stimulants for *Phaedon cochleariae*. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 115, n. 1, p. 41-50, apr. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2005.00242.x>.

RESENDE, M. Q.; SANTANA, D. L. Q. Ocorrência de Três Espécies de Psílideo (Hemiptera: Psyllidae) Em Eucalipto No Espírito Santo, Brasil. *In*: Congresso Brasileiro de Entomologia, 22, 2008, Uberlândia. **Anais [...]** Uberlândia-MG: SEB, 2008.

RODAS, C. A.; SERNA, R.; HURLEY, B. P.; BOLAÑOS, M. D.; GRANADOS, G. M.; WINGFIELD, M. J. Three new and important insect pests recorded for the first time in Colombian plantations. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 76, n. 4, p. 245-252, oct. 2014. DOI: <https://doi.org/10.2989/20702620.2014.965983>.

ROSALES, C. J.; LOBOSQUE, O.; CARVALHO, P.; BERMÚDEZ, L.; ACOSTA, C. *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) "Red Gum Lerp": Nueva plaga forestal en Venezuela. **Entomotropica**, v. 23, n. 1, p. 103-104, abr. 2008. ISSN: 1317-5262.

SÁ, L. A. N. de; WILCKEN, C. F. Nova Praga Exótica no Ecosistema Florestal. Jaguariúna: **EMBRAPA**, 2004, 4 p. (Comunicado Técnico, 18).

SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P.; Y.; WILCKEN, C. G.; MEDEIROS, A. G. de B.; TEIXEIRA, J. T. **Monitoramento da praga exótica psílideo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* e de seu parasitóide exótico *Psyllaephagus bliteus* no controle biológico desta praga em florestas de eucalipto nos estados de SP e MG**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, p. 1-8, set. 2014.

SALIBA, I. L.; LUNZ, A. M.; BATISTA, T. F.; SCHWARTZ G.; QUEIROZ, D. L. First record of *Glycaspis brimblecombei* (Moore, 1964) and *Blastopsylla occidentalis* (Taylor, 1985) (Hemiptera, Aphalaridae) in eucalyptus plantations in State of Pará, Brazil. **Entomological Communications**, v. 1, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec01009>.

SÁNCHEZ, B. S. **Aspectos bionómicos del psílideo del eucalipto *Glycaspis brimblecombei* Moore (Homoptera: Psylloidea: Spondyliaepididae)**. Chapingo, Texcoco, Edo. de México, 2002. 76p. Tesis (Maestría) - Universidade Autónoma Chapingo. Division de Ciências Forestales, 2002.

SANCHEZ-MARTÍNEZ, G.; IÑIGUEZ-HERRERA, G.; GONZALEZ-GAONA, E.; EQUIHUA-MARTÍNEZ, A.; VILLA-CASTILLO, J. Biological control of the redgum lerp

psyllid in México. In: International Symposium on Biological Control of Arthropod, 2., 2005. Davos. **Anais** [...]. Davos: Forest Health Technology Enterprise Team, 2005. p. 9-11. Disponível em: <https://bugwoodcloud.org/resource/files/27754.pdf>. Acesso em: 22 de jul 2023.

SANDOVAL, A.; ROTHMANN, S. Detecção del psflido de los eucaliptos rojos, *Glycaspis brimblecombei* Moore, 1964, en Chile (Hemiptera: Psyllidae). In: CONGRESO NACIONAL DE ENTOMOLOGIA, 24,2002, Santiago. Resúmenes... Concepcion: Universidad de Concepcion, 2002. Disponível em: <http://www.udec.cl/~insectos/resumen.html>. Acesso em: 21 jun. 2004.

SANTANA, D. L. de Q.; BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A. *Ctenarytaina spatulata*, Taylor: Água no Solo, Nutrientes Minerais e suas Interações com a Seca dos Ponteiros do Eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 46, p. 57-67, jan./jun. 2003. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1618>. Acesso em: 21 set. 2023.

SANTANA, D. L. Q. Psilídeos em Eucaliptos no Brasil. Colombo: **IPEF**, 2005, 14 p. (Circular Técnica, 109). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/43220/1/circ-tec109.pdf>. Acesso em: 15 out. 2022.

SANTOS, F. A.; CORREA F. A.; NANINI, F.; NASCIMENTO, D. A.; JUNQUEIRA, L. R.; WILCKEN, C. F. Genetic diversity of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) and its parasitoid *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) in Brazil. **Braz. J. Biol.**, v. 81, n. 3, p. 838-841, jul./set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.230486>.

SILVA, G. L. B. e. Seleção de híbridos multi-espécies de eucalyptus tolerantes ao déficit hídrico, insetos e fungos. 2020. 117 f. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2020. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/30088/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 16 de out. de 2023.

SILVA, A. L. da. **Ocorrência, sinecologia de *Glycaspis Brimblecombei* (Moore, 1964) (Hemiptera: Psyllidae) e seus inimigos naturais em *Eucalyptus* spp. no município de de Cuiabá - MT.** 2010. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestais e Agrárias) Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2010.

SILVA, A. L.; PERES-FILHO, O.; DORVAL, A.; CASTRO, C. K. da C. e. Dinâmica Populacional de *Glycaspis brimblecombei* e Inimigos Naturais em *Eucalyptus* spp., Cuiabá-MT. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 1, p. 80-90, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.066>.

SOUZA, S. C. de. **O setor florestal como uma alternativa ao desenvolvimento socioeconômico na região da serra do sudeste do Rio Grande do Sul, Brasil.** 2023. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2023.

SOOKAR, P.; SEEWORUTHUN, S. I.; RAMKHELAWON, D. The redgum lerp psyllidae, *Glycaspis brimblecombei*, a new pest of *Eucalyptus* sp. in Mauritius. **AMAS**, p. 327- 332, 2003.

TULLER, J.; OLIVEIRA, K. N.; SILVA, J. O.; FARIA, M. L. de; ESPIRITO SANTO, M. M. do; SERRÃO, J. E. ZANUNCIO, J. C. *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) attack patterns on different *Eucalyptus* genotypes. **PeerJ**, p. 1-15, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.3864>.

VALENTE, C.; GONÇALVES, C. I.; MONTEIRO, F.; GASPAR, J.; SILVA, M.; SOTTOMAYOR, M.; PAIVA, M. R.; BRANCO, M. Economic Outcome of Classical Biological Control: A Case Study on the Eucalyptus Snout Beetle, *Gonipterus platensis*, and the Parasitoid *Anaphes nitens*. **Ecological Economics**, v. 149, p. 40–47, feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.03.001>.

WANTROBA, K. L.; BARCIK, L. Z.; MADEIROS, D. R.; CAMARGO, M. B.; GARRETT, A. T. A.; PESCK, V. A.; UKAN, D. Detecção de ataque por insetos-praga em plantios de *Eucalyptus* spp. por meio de índices de vegetação. **Revista Observatório De La Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 21, n. 9, p. 11497-11515. 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv21n9-054>.

WILCKEN, C. F.; COUTO, E. B.; ORLATO, C., FERREIRA FILHO, P.J.; FIRMINO, D. C.; Ocorrência do psilídeo-deconcha (*Glycaspis brimblecombei*) (Hemiptera: Psyllidae) em florestas de eucalipto no Brasil. Piracicaba: **IPEF**, 2003. 11 p. (Circular Técnica, 201).

WILCKEN, C. F.; FIRMINO-W INCKLER, D. C.; DAL POGETTO, M. H. F. A.; DIAS, T. K. R.; LIMA, A. C. V.; SÁ, L. A. N. DE; FERREIRA FILHO, P. J. Psilídeo-deconcha-do-eucalipto, *Glycaspis brimblecombei* Moore. In: VILELA, E. F.; ZUCCHI, R. A (org.). **Pragas introduzidas no Brasil** - Insetos e Ácaros. Piracicaba: FEALQ, 2015. p. 883-897.

WILCKEN, C. F.; SÁ, L. A. N. de; FIRRRÚNO, D. C.; COUTO, E. B. do; FERREIRA FILHO, P. J.; FRANCHLM, T. Controle biológico do psilídeo-de-concha (*Glycaspis brimblecombei*) (HEMIPTERA: PSYLLIDAE) em florestas de eucalipto. In: Congreso Virtual Iberoamericano sobre Gestión de Calidad en Laboratorios, 3., 2005. Virtual. **Resúmenes** [...]. Virtual: Iberolab, 2005. p. 303-307.

WILCKEN, C. L. As pragas exóticas que estão chegando. **Revista Opiniões - Florestal: celulose, papel, carvão, siderurgia, painéis e madeira**. Ribeirão Preto, p. 26-27. 2017. Disponível em: <https://issuu.com/opinioesbr/docs/opcp46?fr=sYjU5MDEzOTgzMDA>. Acesso em: 17 out. 2022.

YIHDEGO, Y.; SALEN, H. S.; MUHAMMED, H. H. Agricultural Pest Management Policies during Drought: Case Studies in Australia and the State of Palestine. **Natural Hazards Review**, v. 20, n. 1, fev. 2019. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000312](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000312).

3 Capítulo II - Modelagem da distribuição potencial de danos econômicos de *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) em plantios de *Eucalyptus* spp. no Brasil

3.1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro ocupa papel de destaque e competitividade no cenário global, especialmente nos segmentos de celulose e papel, carvão vegetal e painéis de madeira (IBÁ, 2023). A crescente demanda por produtos de base florestal nos mercados nacional e internacional consolidou o setor como uma das principais forças econômicas, refletindo em sua contribuição progressiva para o Produto Interno Bruto (PIB) nacional (Sousa *et al.*, 2021; IBÁ 2022). O valor da produção florestal atingiu a marca de R\$ 37,4 bilhões em 2022, projetando-se para manter uma trajetória de crescimento contínuo (IBGE, 2023a).

O Brasil detém cerca de 9,94 milhões de hectares de florestas plantadas para fins industriais. As espécies do gênero *Eucalyptus* ocupam 76% destas áreas, o equivalente a 7,6 milhões de hectares (IBÁ, 2023). Os cultivos são implantados por todo o país, devido à sua adaptabilidade às condições edafoclimáticas, diversidade de espécies, rápido crescimento e produtividade (Mora e Garcia, 2000). A maior parte da produção se concentra nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Bahia (IBÁ, 2023; IBGE 2023a).

As pragas e doenças estão entre os principais desafios associados à redução da produtividade dos plantios florestais (Silvares *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2021; Silva, 2020; Dallacort, 2020; Pereira *et al.*, 2013). Segundo Silva (2020), a ocorrência dos ataques de pragas está relacionada com condições do clima e do solo. Adicionalmente, as áreas de plantio extensas e uniformes, com baixa variabilidade genética e elevada disponibilidade de recursos impactam na dinâmica dos surtos (Vieira *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2016).

No contexto brasileiro, pragas nativas e exóticas têm influenciado nas estratégias de manejo da cadeia produtiva florestal (Dallacort, 2020). Dentre as pragas exóticas, destaca-se o *Glycaspis brimblecombei* Moore, 1964 (Hemiptera: Psyllidae), comumente conhecido como psílideo de concha (Santos *et al.*, 2021). Inseto diminuto, de hábito sugador, que se alimenta exclusivamente de seiva do eucalipto (Barcik *et al.*, 2023; Cuello, 2019). As infestações desse inseto-praga acarretam em perdas

significativas na produção florestal. Os principais danos incluem queda das folhas, seca dos ponteiros, redução, enrolamento e deformação do limbo foliar, além da indução do aparecimento de fumagina, resultando na diminuição da área fotossinteticamente ativa (Sá e Wilcken, 2004; Wilcken *et al.*, 2003). Infestações severas ou consecutivas têm potencial para resultar na mortalidade das árvores (Lemes *et al.*, 2021).

Fatores ambientais, embora incapazes de restringir a ocorrência do *G. brimblecombei*, influenciam na dinâmica da densidade populacional (Favaro, 2006), atuando diretamente na trajetória e padrão dos surtos (Bentz e Jonsson, 2015). De acordo com Ferreira Filho (2010), as características meteorológicas mais relevantes para a flutuação populacional do *G. brimblecombei* são a temperatura do ar e a precipitação.

Diversos estudos evidenciam a existência de uma relação entre os níveis de infestação da praga e variáveis ambientais. Essas pesquisas apontam que a densidade populacional do *G. brimblecombei* tende a aumentar nos períodos de seca e reduzir significativamente durante os meses chuvosos (Barick *et al.*, 2023; Ferreira Filho *et al.* 2017; Camargo *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2013; Silva, 2010; Ferreira Filho 2010; Ferreira *et al.*, 2009; Favaro, 2006; Ferreira Filho, 2005; Sookar *et al.*, 2003).

A ecologia faz uso dos Modelos de Distribuição de Espécies (MDEs) para investigar a relação entre a distribuição geográfica de espécies, sejam elas animais ou vegetais, e variáveis ambientais, a fim de prever e mapear os habitats adequados para sua ocorrência (Araújo e Guisan, 2006). A integração desses modelos com algoritmos de *Machine Learning (ML)* tem sido extensivamente empregada para prever as distribuições espaciais de espécies em diversas regiões do mundo (Aguiar, 2022; Rahman *et al.*, 2021; Carter *et al.*, 2021; Ahmed *et al.*, 2021; Fröh *et al.*, 2018).

Em diferentes regiões do Brasil onde o eucalipto é cultivado, o *G. brimblecombei* exibe a capacidade de se desenvolver e reproduzir. Contudo, a incidência de danos econômicos causados pela espécie varia em função das condições ambientais associadas à localização geográfica (Lemes *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021; Saliba *et al.*, 2019; Wilcken *et al.*, 2015). Diante deste cenário, a modelagem da distribuição das áreas susceptíveis à ocorrência de danos econômicos apresenta-se como um recurso fundamental para compreender a dinâmica desta perturbação e auxiliar na definição e implementação de medidas preventivas e de controle. Além disso, permite antecipar possíveis alterações na distribuição da praga,

estabelecer abordagens mais eficientes para alocar os plantios florestais e adaptar as estratégias do Manejo Integrado de Pragas (MIP).

Em termos de área de distribuição, o *G. brimblecombei* possui ampla adaptabilidade, embora pesquisas sobre sua capacidade de ocasionar danos econômicos sejam escassas. Diante desse cenário, este estudo visa estimar a distribuição geográfica de *Glycaspis brimblecombei* Moore no território brasileiro e identificar as regiões onde há potencial de ocorrência de danos econômicos em plantios de eucalipto, a partir de fatores ambientais. Especificamente, os objetivos delineados deste estudo são: 1) analisar as variáveis preditoras que influenciam o padrão espacial dos danos econômicos; 2) testar a eficiência de modelos de *Machine Learning* na previsão da distribuição de áreas com potencial de sofrer danos econômicos decorrentes da infestação de *G. brimblecombei*; e 3) prever o padrão de distribuição de áreas susceptíveis aos danos econômicos por infestação de *G. brimblecombei*, com base na área disponível para expansão dos plantios de *Eucalyptus*.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo abrange todo o território brasileiro, que se estende por 8.515.417 km², (IBGE, 2023b). Essa extensão posiciona o país como o maior da América do Sul e o quinto maior do mundo. O Brasil é dividido em cinco regiões: Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, englobando um total de 26 estados e o Distrito Federal (Figura 1). As divisões regionais e estaduais refletem características geográficas, climáticas e culturais únicas.



Figura 1 - Mapa da divisão regional e estadual do Brasil.

O setor de silvicultura representa cerca de 1,03% da cobertura e uso da terra no território nacional, com plantios de diferentes espécies florestais presentes em mais de 18% dos municípios (Projeto MapBiomass, 2023; IBÁ, 2022; Souza Júnior *et al.*, 2020), (Figura 2). A cultura do eucalipto predomina, ocupando 76% da área plantada, com maior concentração na região Sudeste (46%), seguida pelo Sul (18%) e Centro-Oeste (18%). As regiões Nordeste (13%) e Norte (5%) têm participações menos significativas (IBÁ, 2023).

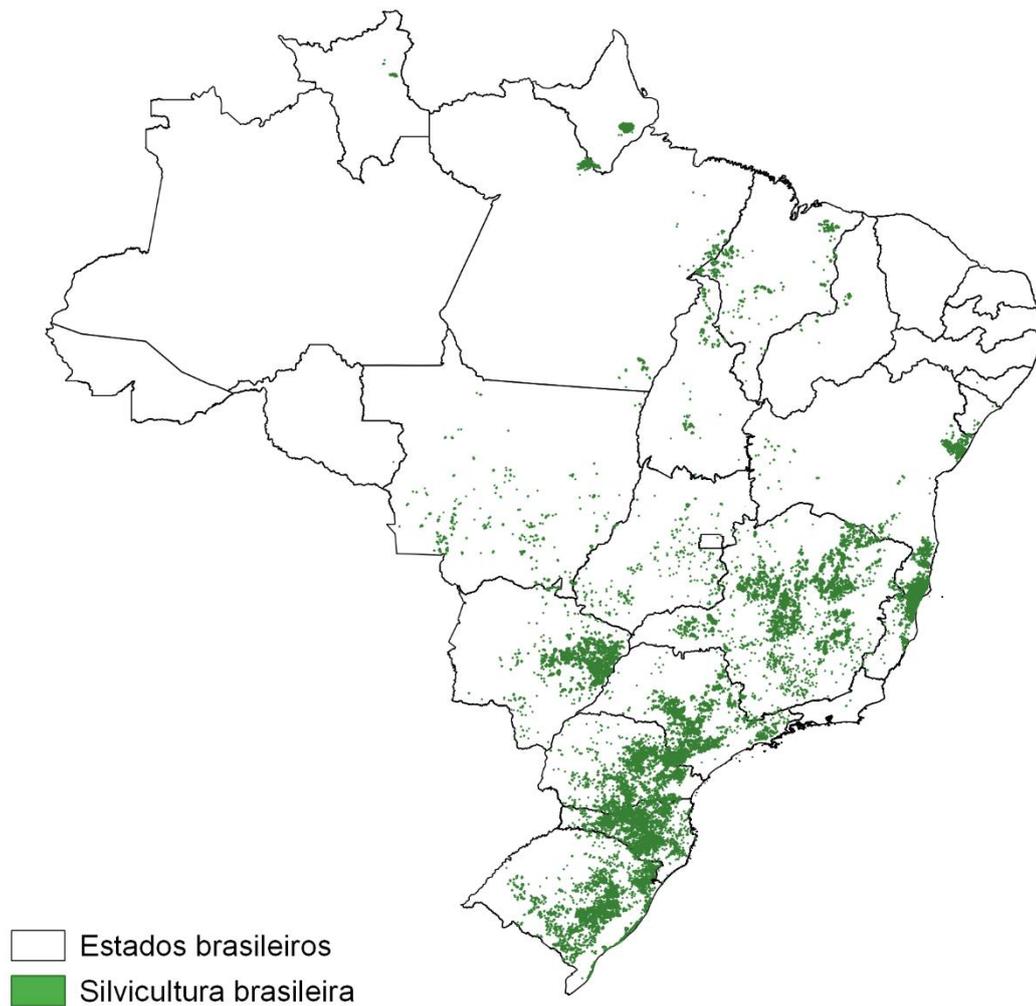


Figura 2 - Plantios florestais no Brasil. Adaptado de Projeto MapBiomass (2023).

A dimensão continental do país é caracterizada por uma heterogeneidade climática (Figura 3). Conforme a classificação de Köppen, o Brasil está inserido em três zonas climáticas A (81,4%), B (4,9%) e C (13,7%) (Alvares *et al.*, 2014). Essa variabilidade exerce influência sobre diversos processos do setor florestal. Isso inclui a definição dos objetivos da produção, a delimitação das áreas de plantio, a seleção do material genético e a orientação das práticas de manejo (Schumacher *et al.*, 2016; Santos e Estefano Filho, 2014).



Figura 3 - Classificação climática de Köppen para o Brasil. Adaptado de Alvares *et al.*, (2014).

3.2.2 Amostragem dos dados de presença de *G. brimblecombei* associado ou não à ocorrência de danos econômicos

Os registros de incidência e de anos econômicos causados por *G. brimblecombei* foram obtidos mediante a aplicação de um questionário direcionado a empresas do setor florestal, com plantios de *Eucalyptus* spp. em diversas regiões do território brasileiro. Os questionários foram enviados por *e-mail* aos responsáveis pelo setor de proteção das empresas, durante o período compreendido entre julho de 2023 e setembro de 2023. O questionário continha as seguintes questões:

1. Foi observada a presença do psíldeo de concha (*Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera, Aphalaridae)) em plantios florestais da empresa?
2. Nos municípios onde a empresa possui plantios, em quais foi constatada a presença do psíldeo de concha (em qualquer nível)?

3. Em quais desses municípios o psilídeo de concha foi capaz de causar danos econômicos?

Para cada município registrado no questionário, foram identificados os polígonos que representam área de silvicultura dentro de seus limites geográficos. Esses polígonos passaram a representar a informação sobre o inseto-praga no respectivo município. A extrapolação foi restrita a polígonos com área superior a 1 km². Os dados relativos à silvicultura foram obtidos do mapa de uso e cobertura da terra do Brasil, correspondente ao ano de 2022, proveniente da coleção 8 do MapBiomas, com resolução espacial de 30 metros (Projeto MapBiomas, 2023; Souza Júnior *et al.*, 2020) (Figura 2). Esses dados não fazem distinção entre as espécies florestais. Assim, todos os maciços florestais foram considerados como plantios de eucalipto neste estudo, refletindo a predominância dessa monocultura e a possibilidade de conversão de outras áreas para essa finalidade.

3.2.3 Modelagem da presença de *G. brimblecombei* e do potencial de dano econômico em plantios de eucalipto

A metodologia pode ser subdividida em quatro etapas principais: (1) extração e pré-processamento de dados, (2) remoção de preditores, (3) treinamento e espacialização das áreas susceptíveis a danos econômicos, e (4) apresentação dos resultados e mapas (Figura 4).

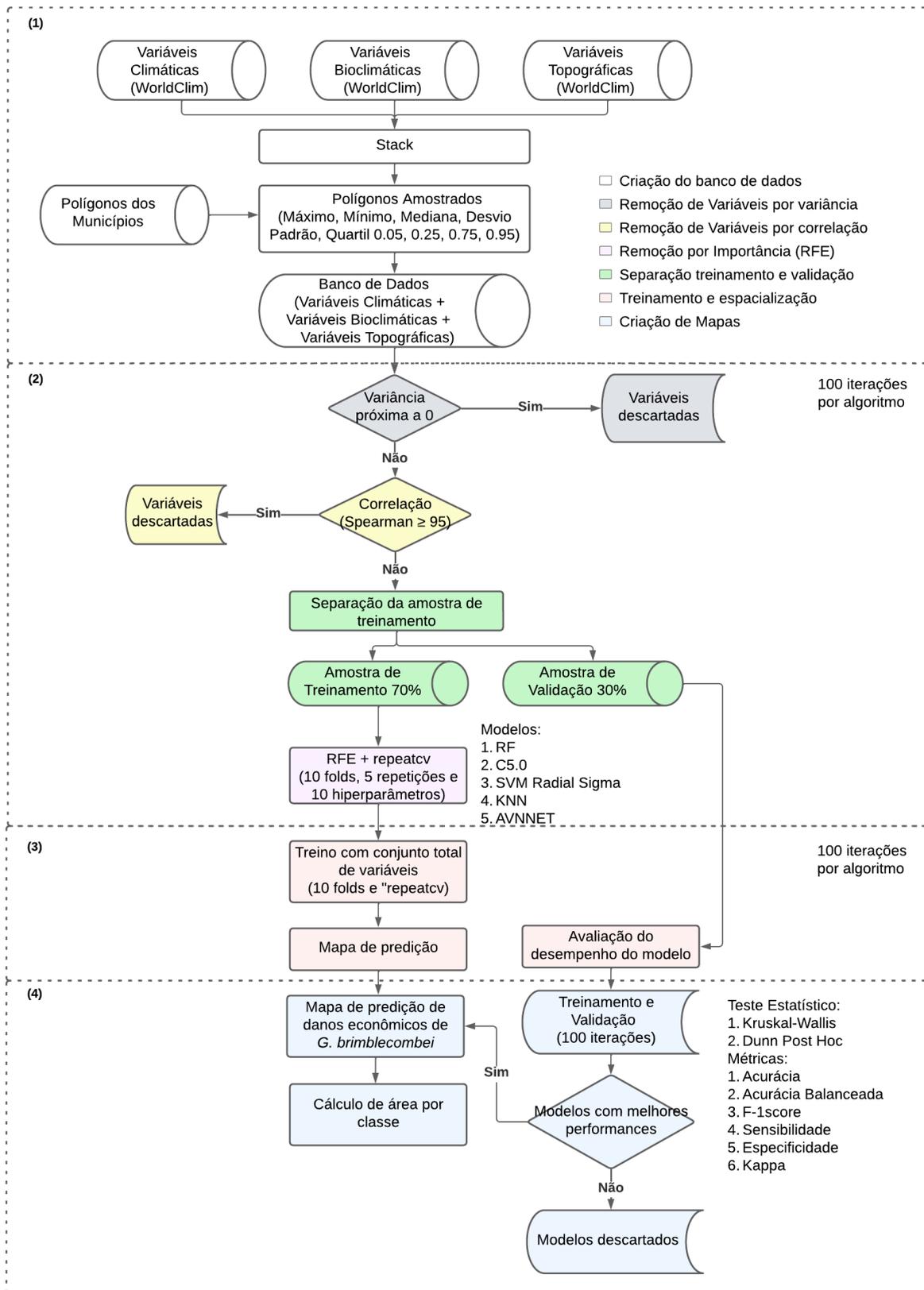


Figura 4 - Fluxograma metodológico do estudo.

3.2.3.1 Preditores e pré-processamento dos dados

Um conjunto de 56 preditores ambientais foram empregados no processamento dos dados: 36 preditores climáticos (temperatura máxima, mínima e precipitação média), 19 preditores bioclimáticos e 1 preditor topográfico (Tabela 1). As informações foram adquiridas da base de dados do WorldClim, versão 2.1 com resolução espacial de 30 segundos de arco (~1 Km²). As variáveis climáticas e bioclimáticas representam a média do intervalo temporal do presente, compreendido entre os anos de 1970-2000 (Fick e Hijmans, 2017).

Tabela 1 - Dados de entrada para a seleção dos preditores para uso nos modelos selecionados.

ID	Tipo	Código	Descrição
01		BIO1	Temperatura Média Anual (°C)
02		BIO2	Intervalo médio diurno (°C)
03		BIO3	Isotermidade (BIO2/BIO7) (* 100) (°C)
04		BIO4	Sazonalidade da temperatura (desvio padrão * 100) (°C)
05		BIO5	Temperatura máxima do mês mais quente (°C)
06		BIO6	Temperatura mínima do mês mais frio (°C)
07		BIO7	Faixa anual de temperatura (BIO5-BIO6) (°C)
08		BIO8	Temperatura média do trimestre mais chuvoso (°C)
09		BIO9	Temperatura média do trimestre mais seco (°C)
10	Bioclimáticas	BIO10	Temperatura média do trimestre mais quente (°C)
11		BIO11	Temperatura média do trimestre mais frio (°C)
12		BIO12	Precipitação anual (mm)
13		BIO13	Precipitação do mês mais chuvoso (mm)
14		BIO14	Precipitação do mês mais seco (mm)
15		BIO15	Sazonalidade da precipitação (Coeficiente de Variação) (mm)
16		BIO16	Precipitação do trimestre mais úmido (mm)
17		BIO17	Precipitação do trimestre mais seco (mm)
18		BIO18	Precipitação do trimestre mais quente (mm)
19		BIO19	Precipitação do trimestre mais frio (mm)
20	Topográfica	ELEV	Elevação (m)
21-32		Tmin	Temperatura mínima mensal (°C)
33-44	Climáticas	Tmax	Temperatura máxima mensal (°C)
45-56		Prec	Precipitação mensal (mm)

De cada preditor, foram extraídos os valores de máximo, mínimo, mediana, desvio padrão (SD) e os quartis 0,05, 0,25, 0,75 e 0,95 em cada polígono avaliado. Portanto, cada polígono foi representado por 448 diferentes informações (preditores). O processo de extração foi conduzido utilizando a função “*supercells*” do pacote *supercells* do R (Nowosad e Stepinski, 2022). Desta forma, gerou-se o conjunto de dados base para o processo de modelagem por técnicas de *ML*. Esse conjunto contém

as informações de presença da espécie (sem significância ou associada a danos econômicos) juntamente com os preditores estatísticos extraídos.

3.2.3.2 Seleção dos preditoras

Devido a quantidade de preditores disponíveis e ao custo computacional associado, foi necessário aplicar técnicas de mineração de dados com o propósito de selecionar as características mais relevantes do conjunto (Mello, 2023; Silva *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2018). Essa técnica elimina progressivamente as características menos pertinentes, permitindo um ajuste mais preciso do modelo aos dados remanescentes e reduz os custos computacionais. O processo de seleção utilizado foi subdividido em três etapas complementares: remoção por variância próxima a zero (1), remoção com base na correlação (2) e avaliação da importância das variáveis (3).

Na etapa inicial do processo de seleção dos preditores (1), o conjunto foi submetido a uma análise de variância, e aquelas que apresentaram variâncias aproximadas a zero foram removidas pela função “*nearZeroVar*” pacote *caret* do R. Os dados remanescentes deste processo foram usados como entrada na fase seguinte.

Na segunda fase do processo de remoção, o objetivo foi analisar os preditores que estão altamente correlacionadas entre si (2), pois apresentam informações de natureza equivalente ou redundante, gerando alto custo computacional e efeitos na terceira fase de seleção. O coeficiente de correlação de *Spearman* foi utilizado para medir e identificar os pares com uma correlação igual ou superior a 95%. Os pares identificados foram analisados em relação à sua correlação com as conjunto total de preditores. O critério de seleção é a soma da correlação absoluta de cada preditor com os demais. O preditor do par que apresentou a maior soma de correlação absoluta com os outros é eliminado. A remoção foi conduzida por meio da função “*findCorrelation*” do pacote *caret* (Kuhn, 2023). Nesta fase, os preditores foram agrupados levando em conta as classes, seguido pela subsequente divisão em conjuntos de treinamento e teste. O grupo de treinamento foi usado na terceira fase de seleção.

Na terceira fase, os preditores que permaneceram após a eliminação com base na correlação foram submetidos à remoção por importância (3). A função “*Recursive Feature Elimination (RFE)*” do pacote *caret* trabalha por meio da

eliminação iterativa das características menos importantes em cada algoritmo de *ML* avaliado no conjunto de dados. Esse processo é repetido até que o conjunto ideal de características seja alcançado. A abordagem é vantajosa, pois evita o ajuste de uma grande quantidade de modelos durante cada etapa da análise, decorrente do elevado número de preditores, além de contribuir para parcimônia do modelo (Kuhn e Johnson, 2013).

O RFE foi aplicado ao conjunto de preditores selecionado na etapa anterior, considerando 27 subconjuntos com 5, 6, 7, ..., 18, 19, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 preditores. A escolha do conjunto ideal de preditores foi realizada por meio de um processo de validação cruzada repetida (*repeatedcv*), composto por 10 folds, 5 repetições, e a avaliação de 10 valores distintos para cada um dos hiperparâmetros internos e a otimização de cada algoritmo avaliado (*tuneLength*). (Tabela 2). Foram utilizados cinco algoritmos de *ML*: *Random Forest* (RF), *C5.0*, *Support Vector Machine Radial Sigma* (SVM), *k-Nearest Neighbors* (KNN) e *Model Averaged Neural Network* (AVNNET). A métrica utilizada para determinar o subconjunto de preditores com melhor performance em cada modelo foi o F1-score. O subconjunto ideal resultante na seleção foi posteriormente empregado no treinamento de cada um dos algoritmos avaliados.

Tabela 2 - Hiperparâmetros dos algoritmos utilizados no estudo em ambiente do software R.

Algoritmo	Hiperparâmetros
<i>Random Forest</i>	<i>mtry</i>
<i>C5.0</i>	<i>trials, model e winnow</i>
<i>SVM Radial Sigma</i>	<i>cost e kernel</i>
<i>KNN</i>	<i>kmax, weights e distance</i>
<i>AVNNET</i>	<i>size, deca e bag</i>

3.2.3.3 Treinamento do Modelo

O conjunto base foi aleatoriamente dividido antes da terceira fase de seleção dos preditores em dois subconjuntos independentes, onde 70% dos dados foram destinados ao treinamento e os 30% restantes à validação, seguindo a abordagem (*hold-out test*). Para isso, foi utilizada a função “*createDataPartition*” presente no pacote *caret* (Kuhn, 2023). A abordagem permite avaliar a performance do modelo e sua capacidade de generalização em conjunto de dados não utilizados no treinamento.

Cada algoritmo teve seu próprio modelo treinado utilizando o subconjunto específico de preditores selecionados (RFE). Para otimizar o desempenho dos modelos, empregou-se a técnicas *repeated cross-validation (repeatedcv)* com 10 *folds*, 5 repetições e avaliação de 10 valores para cada um dos hiperparâmetros internos de otimização de cada algoritmo testado (*tuneLength*) (Tabela 2).

Este método consiste na divisão aleatória do conjunto original de dados em k partes igualmente dimensionadas, denominadas “*folds*”. Em cada interação, um modelo é construído utilizando $k - 1$ *folds* para treinamento, enquanto o *fold* restante compõe o conjunto de validação. O processo é repetido n vezes, com uma nova aleatorização dos dados a cada repetição.

3.2.3.4 Avaliação da Performance do Modelo

O processo de divisão dos dados, seleção de preditores, treinamento e validação foram repetidos 100 vezes para cada algoritmo. Essa abordagem visa mitigar o efeito da aleatoriedade e obter estimativas mais robustas da precisão do modelo (Gomes *et al.*, 2019; Kuhn e Johnson, 2013). A avaliação da performance dos modelos foi realizada por meio dos parâmetros estatísticos: Acurácia (Equação 1, Congalton, 1991), Acurácia Balanceada (Equação 2); Sensibilidade (Equação 3), Especificidade (Equação 4), F1-score (Equação 6), e *Kappa* (Equação 7, Cohen, 1960). Os resultados finais do desempenho foram derivados da média de 100 interações.

A acurácia é uma métrica amplamente utilizada na avaliação de modelos de *ML* (Loca, 2020). Segundo Monico *et al.* (2009), essa métrica quantifica o grau de proximidade entre os valores reais e as saídas do classificador, representando a proporção de previsões corretas sobre o número total de instâncias testadas (Equação 1).

$$Acurácia = \frac{VP + VN}{VP + FN + VN + FP} \quad (1)$$

A acurácia balanceada é geralmente empregada em contextos de problemas de classificação que envolvem desequilíbrio entre as classes do conjunto de dados (Matta, 2021). Em contraste com a acurácia tradicional, os resultados dessa

métrica não são afetados pela falta de proporção existente entre as classes, representando assim sua principal vantagem (Equação 2).

$$Acurácia\ Balanceada = \frac{1}{2} \left(\frac{VP}{VP+FN} + \frac{VN}{VN+FP} \right) \quad (2)$$

A sensibilidade mensura a proporção de positivos corretamente classificados em relação ao total de instâncias positivas (Equação 3). Por outro lado, a especificidade mede a capacidade do modelo de identificar corretamente as instâncias negativas em relação ao total de instâncias negativas (Equação 4), (Giannini *et al.*, 2012).

$$Sensibilidade = \frac{VP}{VP + FN} \quad (3)$$

$$Especificidade = \frac{VN}{VN + FP} \quad (4)$$

O F1-score, assim como a acurácia balanceada, constitui um parâmetro de avaliação essencial em problemas de classificação com desequilíbrio entre as classes no conjunto de dados (Paiva *et al.*, 2023). Essa métrica, configura-se como uma média harmônica entre a precisão e a sensibilidade, evidenciando uma relação de causa e efeito. Uma alta precisão pode impactar na redução da sensibilidade, e, de forma correspondente, uma sensibilidade elevada pode estar associada a uma precisão menos expressiva (Equação 6).

$$Precisão = \frac{VP}{VP + FP} \quad (5)$$

$$F1 - score = 2 \times \frac{Precisão \times Sensibilidade}{Precisão + Sensibilidade} \quad (6)$$

Onde: VP é a quantidade de exemplos positivos classificados corretamente; FP é a quantidade de exemplos classificados incorretamente como positivos; VN é a quantidade de exemplos negativos classificados corretamente; e FN é a quantidade de exemplos incorretamente classificados como negativos.

Nas equações anteriores, as métricas apresentam uma escala que varia de 0 a 1, o que permite uma avaliação quantitativa do desempenho do modelo. Os valores

próximos a 1 denotam um desempenho satisfatório do modelo na classificação do conjunto de dados. Em contraste, valores próximos a 0 sugerem que o modelo possa precisar de melhorias para lidar de maneira mais eficaz com os dados.

O Índice Kappa avalia a concordância entre os dados de classificados e os dados de referência, e indica quanto os dados classificados concordam com os dados de referência (Equação 7), (Cohen, 1960). A escala de avaliação dos resultados do Índice Kappa varia de -1 a 1. Quando o índice atinge ou supera 0,81, isso sugere que o modelo apresenta um desempenho excelente em termos de concordância entre as classificações e os dados de referência. Pontuações situadas na faixa entre 0,21 e 0,80 indicam um desempenho moderado a muito bom, enquanto valores inferiores a 0,2 denotam desempenho insatisfatório (Landis e Koch, 1977).

$$Kappa = \frac{n \sum_{i=1}^c n_{ii} - \sum_{i=1}^c n_{i+} + n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c n_{i+} + n_{+i}} \quad (7)$$

Onde: n_{ii} = valor na linha i e na coluna i ; n_{i+} = a soma da linha i ; n_{+i} = a soma da coluna i da matriz de confusão; n = o número total de amostras; e C = número total de classes.

3.2.3.5. Mapeamento das áreas com potencial de ocorrência de dano econômico causado por *G. brimblecombei* no cenário presente

Os resultados decorrentes das 100 iterações para cada modelo testado foram sintetizados com relação a parâmetros de performance. Esses parâmetros foram estaticamente comparados pelo teste de Kruskal-Wallis e Dunn Posthoc, com uma significância de 5%. A qualidade dos modelos foi avaliada com base nos parâmetros: F1-score, Acurácia balanceada e Kappa.

Os dois melhores modelos foram utilizados para predizer as áreas susceptíveis a danos econômicos provocados pelo *G. brimblecombei* no cenário presente. No contexto do desenvolvimento sustentável, a análise levou em consideração a potencial expansão da eucaliptocultura, limitando-se às áreas atualmente destinadas a fins agropecuários. Essa abordagem contrasta com uma expansão indiscriminada, sem considerar limites específicos como áreas de proteção ambiental e unidades de conservação. De acordo com o IBÁ (2022) a expansão do setor florestal tende a acontecer em terras de uso convertido.

Os dados utilizados nesta análise foram extraídos do mapa de cobertura e uso da terra do Brasil, referente ao ano de 2022, que faz parte da coleção 8 do projeto MapBiomas, com resolução espacial de 30 metros (Souza Júnior, 2020; Projeto MapBiomas, 2023). As classes de interesse, incluíram áreas ocupadas por pastagens, agricultura, e mosaicos de usos agropecuários. Essas categorias foram convertidas do formato *raster* para polígonos e excluiu-se às áreas inferiores a 1 km². Essa decisão levou em consideração a resolução mínima dos preditores, que corresponde a aproximadamente 1 km².

Desse modo, a partir dos dois modelos selecionados foram produzidos mapa de classificação binária, distinguindo entre áreas propícias à presença do *G. brimblecombei* e áreas susceptíveis aos danos causados pela infestação desse inseto-praga. Esses mapas foram sintetizados calculando a moda dos 100 mapas em formato de polígono. Para avaliar a incerteza do processo de previsão, foi contabilizado o número de vezes em que o algoritmo não previu a classe modal em cada polígono, considerando os 100 mapas gerados. Além disso, a análise quantificou a distribuição das áreas por classe nas macrorregiões do país. Neste contexto, conduziu-se uma análise para indicar alocação de áreas para plantios de *Eucalyptus* spp., com base na adequabilidade climática do inseto-praga. Todo o processo foi conduzido por meio do software R, versão 4.3.1 (R Team, 2023).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Análise dos questionários

O *G. brimblecombei* foi identificado em 285 municípios brasileiros, distribuídos por 15 estados que abrangem as cinco regiões do país (Figura 4). O número de ocorrências variou por região: 128 no Sudeste, 66 no Nordeste, 32 no Sul, 35 no Norte e 24 no Centro-Oeste.

Das ocorrências totais registradas, 153 municípios evidenciaram exclusivamente a presença da espécie, enquanto 132 indicaram a sua presença associada a danos econômicos (Figura 4). As regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste concentraram o maior número de municípios com ocorrência de danos econômicos. Ao extrapolar os danos, identificou-se 7.749 polígonos com presença deste inseto-

praga. Em 2.543 desses polígonos, foi observada a presença da espécie, e em 5.206 foram registrados a presença do inseto-praga associada ao dano econômico.

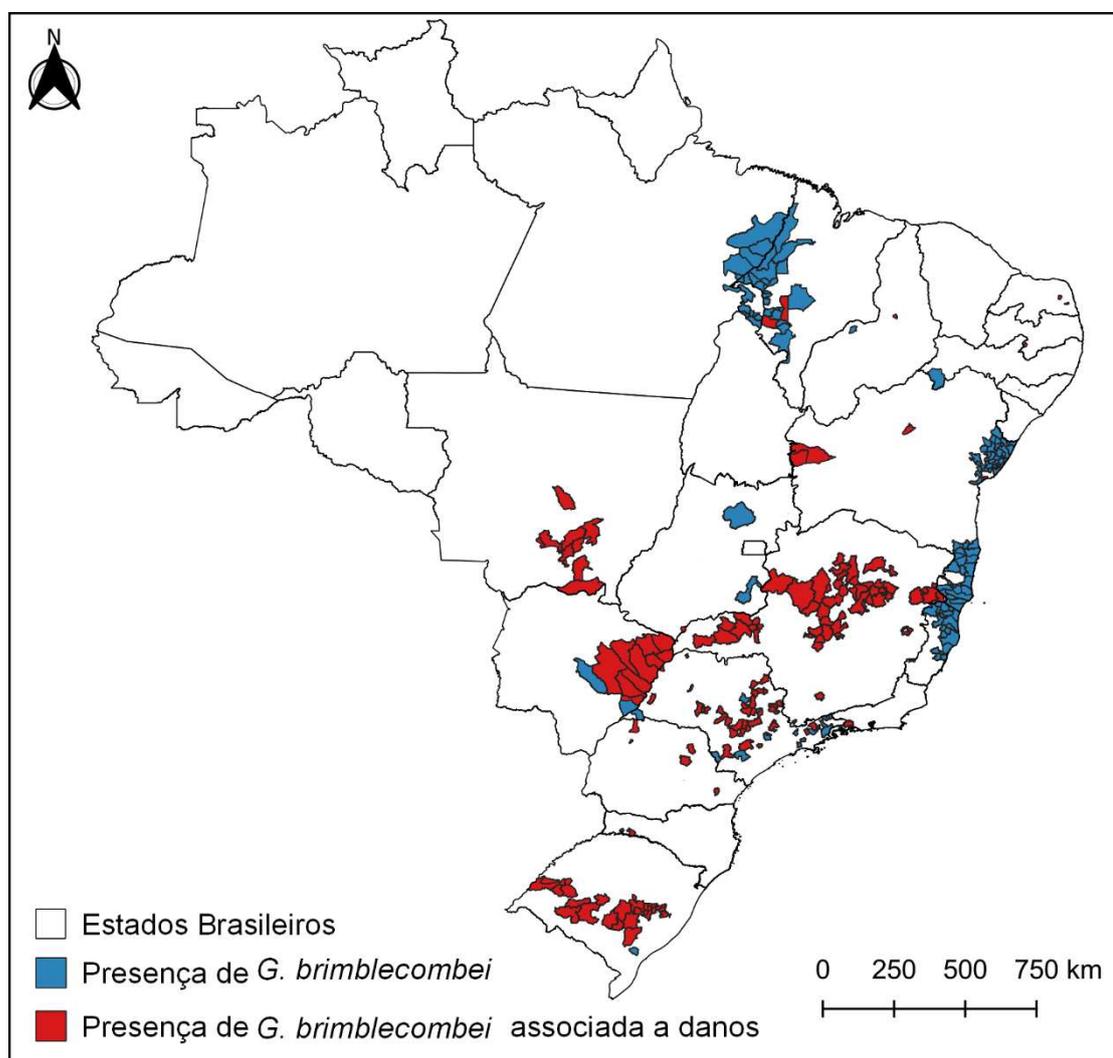


Figura 5 - Distribuição de municípios amostrados por classe: (1) presença de *G. brimblecombei*; (2) presença *G. brimblecombei* associada a danos econômicos.

3.3.2 Seleção dos preditores

Dentre os 448 preditores iniciais, cinco demonstraram relevância em todos os modelos avaliados (Figura 6). Esses preditores incluem o quartil 0,05 da precipitação do trimestre mais seco (q05.BIO17), máximo da temperatura máxima do mês de maio (max.tmax_05), máximo da temperatura máxima do mês de setembro (max.tmax_09), máximo temperatura máxima do mês de novembro (max.tmax_11), e o mínimo da precipitação anual (min.BIO12).

Notavelmente, em todos os modelos analisados, o preditor q05.BIO17 foi considerado o mais importante, com contribuição igual a 100% (Figura

6). Posteriormente, os preditores associados à temperatura máxima (max.tmax05, max.tmax_09, max.tmax_11) exibiram maior relevância, com contribuição superior a 52%, exceto para o AVNNET.

Entre os cinco preditores avaliados, o min.BIO12 evidenciou a menor importância para todos os modelos analisados, destacando também uma diferença significativa em sua contribuição para cada um deles (Figura 6). No caso do AVNNET, importância atribuída a esse preditor foi de 0%, o que sugere que, em relação aos outros preditores, sua influência é estatisticamente inferior, mas ainda pode desempenhar um papel na modelagem das áreas suscetíveis.

Os modelos baseados em árvores, como o RF e o C5.0, apresentaram uma tendência a incorporar um conjunto mais amplo de preditores associadas aos dados mensais de precipitação. No entanto, para o RF, estes não tiveram grande contribuição, ao contrário do que foi observado para o C5.0 (Figura 6). Em contrapartida, o SVM Radial Sigma e o KNN selecionaram uma maior quantidade de preditores bioclimáticos. As informações relacionadas a topografia não foram incorporadas por todos modelos, sendo representada exclusivamente pela elevação mínima (min.ELEV).

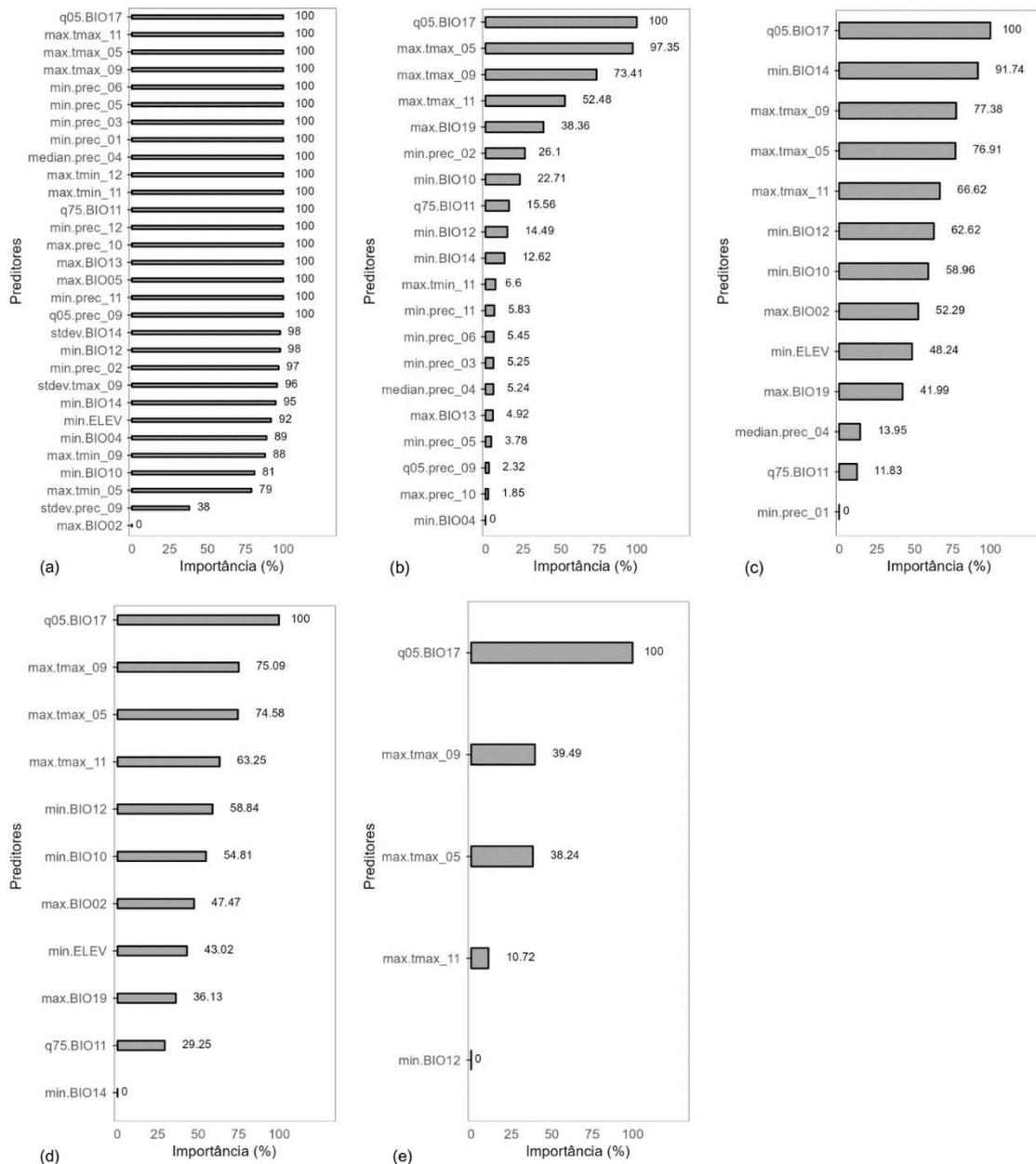


Figura 6 - Importância relativa dos preditores para cada um dos modelos: (a) C5.0, (b) RF, (c) SVM Radial Sigma, (e) KNN, (d) AVNNET.

3.3.3 Desempenho dos modelos

Os resultados das métricas refletem a capacidade dos cinco modelos em classificar áreas susceptíveis à ocorrência de danos econômicos causados por *G. brimblecombei* (Tabela 3). Todos os modelos apresentaram excelente desempenho na classificação, com acurácia global entre 0,9611 e 0,9611, e índice Kappa superior a 0,8963. De acordo com a escala de classificação proposta por Landis e Kock (1977),

índice Kappa acima de 0,81 indicam uma excelente concordância entre as classificações observadas e esperadas.

Tabela 3 - Performance dos modelos, com valores médios de Acurácia, Acurácia Balanceada, Sensibilidade, Especificidade, F1-score e Kappa.

Algoritmo	Acurácia	Acurácia Balanceada	Sensibilidade	Especificidade	F1-score	Kappa
RF	0,9921a	0,9921a	0,9871b	0,9970a	0,9905a	0,9859a
C5.0	0,9918b	0,9918b	0,9866bc	0,9969b	0,9901b	0,9853b
SVM Radial Sigma	0,9917bc	0,9917b	0,9884a	0,9951b	0,9892bc	0,9839bc
KNN	0,9906c	0,9906b	0,9857bc	0,9956c	0,9883c	0,9825c
AVnnet	0,9611c	0,9427b	0,8947c	0,9907c	0,9549c	0,8963c

* Letras iguais minúsculas na mesma coluna (entre modelos) não diferem entre si significativamente a 5% de probabilidade de acordo com teste de Kruskal-Wallis.

As métricas F1-score e acurácia balanceada superaram os valores de 0,9549 e 0,9427, respectivamente, evidenciando uma performance consistente, mesmo diante do desequilíbrio entre as classes no banco de dados. No geral, os valores de especificidade foram superiores aos de sensibilidade, indicando maior erro de omissão durante as previsões do que erros de comissão.

A análise de Kruskal-Wallis indicou diferenças estatisticamente significativas entre os modelos avaliados (Tabela 3). Os resultados foram agrupados em três categorias distintas, ("a", "b" e "c"), representando diferenças significativas. O modelo RF demonstrou desempenho estatisticamente superior, sendo classificado no grupo "a" para as métricas de Acurácia, Acurácia Balanceada, Especificidade, F1-score e Kappa, destacando-se significativamente dos demais modelos.

Não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre os modelos C5.0 e SVM Radial Sigma para as métricas mencionadas. Essa tendência também foi observada entre KNN e AVNNET. Em relação à métrica sensibilidade, observou-se um comportamento distinto, com o SVM Radial Sigma classificado no grupo "a" e o RF no grupo "b". Os modelos KNN e C5.0, por sua vez, demonstraram equivalência estatística em relação ao RF e ao AVNNET.

A quantidade ideal de preditores selecionados durante a RFE variou para cada modelo (Figura 6). Os modelos RF e C5.0 apresentaram desempenho superior ao empregar conjuntos maiores de variáveis, totalizando 20 e 30, respectivamente.

Por outro lado, o KNN, SVM Radial Sigma e AVNNET utilizaram conjuntos de 13, 11 e 5, respectivamente.

Os dois modelos que exibiram melhor desempenho, foram o RF e o C5.0, ambos baseados em árvore de decisão. Contudo, a sensibilidade foi a única métrica em que os modelos não apresentaram desempenho superior aos demais. O modelo SVM Radial Sigma obteve resultados intermediários, enquanto para o KNN e o AVNNET observadas performances inferiores.

3.3.4 Previsão de áreas de susceptíveis à ocorrência de danos econômicos causados por *G. brimblecombei*

Os modelos demonstraram uma baixa discrepância em relação às áreas previstas por classe (Tabela 4). Da área total (2.377.587,54 km²) passível de ser ocupada por plantios florestais, o RF previu que 42,10% (1.000.886,26 km²) são susceptíveis aos danos econômicos de *G. brimblecombei*, enquanto o C5.0 previu 43,74% (1.039.960,90 km²).

Tabela 4 - Estimativa da distribuição geográfica potencial de áreas susceptíveis a ocorrência de danos econômicos de *G. brimblecombei* de acordo com os modelos RF e C5.0.

Região		Random Forest		C5.0		Total
		Áreas susceptíveis a presença	Áreas susceptíveis aos danos	Áreas susceptíveis a presença	Áreas com adequabilidade de aos danos	
Sudeste	Área (km ²)	91066,74	376669,46	96231,92	371504,28	467.736
	Área (%)	19,47	80,53	20,57	79,43	
Sul	Área (km ²)	54029,80	173531,68	50027,38	177534,1	227.561
	Área (%)	23,74	76,26	21,98	78,02	
Centro Oeste	Área (km ²)	328455,10	358776,24	315743,46	371487,88	687.231
	Área (%)	47,79	52,21	45,94	54,06	
Nordeste	Área (km ²)	439777,48	83486,66	437182,18	86081,96	523.264
	Área (%)	84,05	15,95	83,55	16,45	
Norte	Área (km ²)	463372,16	8422,22	438441,7	33352,68	471.794
	Área (%)	98,21	1,79	92,93	7,07	

Total	Área (km ²)	1376701,28	1000886,26	1337626,64	1039960,9	2.377.587
	Área (%)	57,90	42,10	56,26	43,74	

A distribuição das áreas susceptíveis aos danos econômicas manifesta-se pelas 5 regiões brasileiras (Figura 5a e Figura 5b). A maior concentração é observada no Sudeste e Sul, representando mais de 76% para ambos os modelos. No Centro-Oeste, as classes exibem proporções semelhantes, onde as áreas propensas a danos ocupam pouco mais de 50%. Em contrapartida, as regiões Nordeste e Norte, registram as menores ocorrências de danos econômicos, com áreas inferiores a 16% e 7%, respectivamente.

O modelo C.50 demonstrou uma tendência a prever áreas susceptíveis a danos mais extensas do que RF, exceto para a região sudeste (Figura 7a e Figura 7b). A região Norte apresentou a maior diferença na área prevista entre os modelos, cerca de 24.930 km². Ao analisarmos visualmente o desempenho de ambos os modelos, observamos diferenças no aumento da representação das áreas susceptíveis a danos nos estados do Tocantins, Maranhão, e Piauí para o C5.0. Por outro lado, houve uma redução nos limites entre Minas Gerais e o Espírito Santo.

A maior extensão da região Sul demonstra propensão aos danos. Ao avançar para o Sudeste, as áreas de susceptibilidade estendem-se predominantemente pelos estados de Minas Gerais, São Paulo. No Centro-Oeste, a aptidão concentra-se no sul de Goiás, sudeste e centro-sul do Mato Grosso e abrange parte do norte, nordeste, extremo sudeste do Mato Grosso do Sul. Nas regiões Norte e Nordeste, as áreas susceptíveis a danos econômicos ocuparam pequenas extensões nos estados do Piauí, Maranhão, Roraima e Tocantins. No entanto, na Bahia, essas áreas demonstraram uma significância maior em termos de extensão (Figura 5a e Figura 5b).

Ao contrastar os mapas de erro gerados pelos dois modelos, fica evidente que a classificação do modelo RF apresentou uma menor incidência de erros em comparação com o C5.0 (Figura 7c e Figura 7d), embora o intervalo de erro tenha sido semelhante. A maior parte da confusão nos modelos ocorreu na classe que indica áreas com susceptibilidade à presença da espécie, sem associação a danos. Essas áreas estão distribuídas por todo o território, e não apresentam um padrão bem definido.

A distribuição geográfica dos erros é semelhante entre os dois modelos, porém o C5.0 abrange extensões territoriais mais amplas (Figura 7c e Figura 7d). As principais diferenças são identificadas no sul do Tocantins, no Mato Grosso do Sul e nas regiões centro-leste e centro-norte de Goiás, onde a expansão das áreas com erro foi bastante expressiva. Outra divergência, é observada na fronteira entre o Rio de Janeiro e Minas Gerais, o modelo C5.0 revela registros de erro consideravelmente reduzidos, em contraste com o modelo RF, que evidencia valores mais elevados.

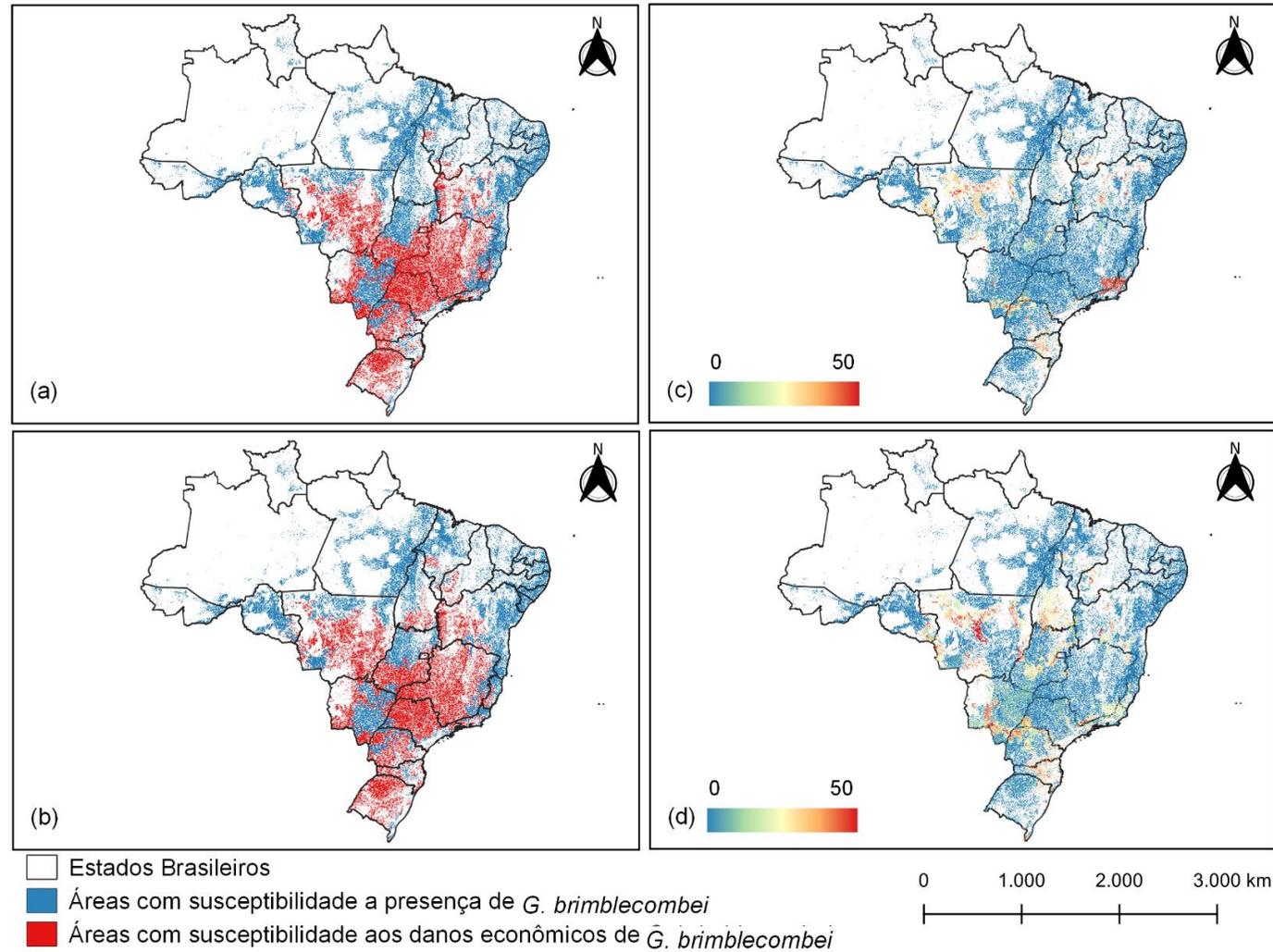


Figura 7 - Mapas finais da ocorrência de danos econômicos de *G. brimblecombei* no território brasileiro, produzidos com os valores de modais das 100 execuções dos modelos: (a) RF e (b) C5.0. Mapas de erro de classificação para os modelos: (c) RF e (d) C5.0.

3.4 DISCUSSÃO

3.4.1 Análise dos questionários

Em duas décadas este inseto-praga foi capaz de se propagar pela maioria dos estados brasileiros. Os 15 estados identificados na pesquisa estão de acordo com os relatos anteriores de ocorrência do *G. brimblecombei* no país (Lemes *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021; Saliba *et al.*, 2019; Wilcken *et al.*, 2015). Segundo Queiroz *et al.* (2013) o *G. brimblecombei* é uma espécie invasora que demonstra alta capacidade de adaptação para colonizar novas áreas (Queiroz *et al.*, 2013). Durante o estudo, não foram observados registros do inseto-praga em nenhum novo estado. Entre os estados onde a distribuição da praga já foi registrada, o Rio de Janeiro foi o único em que não obtivemos informações nessa pesquisa.

De acordo com o IBÁ (2022) o cultivo de florestas para fins industriais está localizado em mais de 1000 municípios. A presença do *G. brimblecombei* foi registrada em 285 desses, o que representa 28,5% dos municípios com cultivos florestais no país. A maior parte das áreas afetados pelos danos econômicos causados por este inseto-praga estão localizados nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste, onde se concentram os principais polos de produção florestal de eucalipto. Em contrapartida, nas regiões Norte e Nordeste, embora a espécie esteja presente, os níveis de dano econômico são atingidos com menor frequência.

3.4.2 Seleção dos preditores

As condições ambientais exercem influência sobre a densidade populacional e distribuição de insetos. Quando essas condições são favoráveis ao crescimento e desenvolvimento de uma espécie, observa-se aumento em sua densidade populacional, elevando a probabilidade da ocorrência de danos econômicos. Em contrapartida, a população passa por um declínio, e torna-se incapaz de atingir os níveis de danos econômicos (Gallo *et al.*, 2002).

A literatura relacionada ao *G. brimblecombei*, destaca a influência da temperatura e dos índices pluviométricos na densidade populacional da praga em diferentes regiões do país (Barcik *et al.*, 2023; Ferreira Filho *et al.*, 2017; Tuller *et al.*, 2017; Ferreira Filho, 2010). A precipitação no trimestre mais seco foi identificada como

o preditor mais relevante na modelagem, evidenciando a importância das chuvas na densidade da espécie.

O resultado do modelo previu uma alta probabilidade de danos em áreas onde os 5% dos menores índices acumulados de precipitação no trimestre mais seco variaram entre 0 e 95 mm. Barcik *et al.*, observaram que os picos populacionais da espécie aconteceram quando o acumulado de chuva mensal foi inferior a 50 mm no mesmo mês ou no mês anterior. Queiroz *et al.* (2013) identificaram a precipitação no mês mais seco como a variável mais influente para modelar a distribuição da espécie ao redor do mundo e no Brasil.

Esses resultados, demonstram que as regiões que registram o menor índice pluviométrico, principalmente na estação seca, tendem a apresentar maior susceptibilidade aos danos da praga. De acordo Tuller *et al.* (2017) durante a estação seca, ocorre um pico na densidade de ovos e ninfas do *G. brimblecombei*. As conchas destes insetos representam uma adaptação morfológica destinada a enfrentar a dessecação em ambientes áridos, desempenhando também, um papel de proteção contra predadores (Branco *et al.*, 2023). A relevância do volume de chuva é demonstrada ainda pela contribuição da variável referente ao acumulado anual (min.BIO12). Observamos que a mínima precipitação anual (<1.600 mm) pode influenciar positivamente na dinâmica dos danos econômicos deste inseto-praga.

A água da chuva atua na remoção mecânica e na solubilização das conchas que protegem as ninfas, afetando negativamente a sobrevivência e reprodução dos insetos, e aumentando a vulnerabilidade a predadores e fungos entomopatogênicos (Oliveira *et al.*, 2012; Ramirez *et al.*, 2003). A distribuição das chuvas também influencia a densidade da espécie, com menor incidência quando os períodos chuvosos são uniformes, enquanto chuvas irregulares favorecem o aumento da densidade populacional (Ferreira Filho 2005). Estudos utilizando aplicação de chuva artificial revelaram que a exposição em períodos curtos, mas consecutivos, resulta em uma redução expressiva na população de *G. brimblecombei*, alcançando eficácia de até 96% após 5 dias contínuos (Oliveira *et al.*, 2012).

Em relação a temperatura máxima dos meses de maio (max.tmax_05), setembro (max.tmax_09) e novembro (max.tmax_11) a maior susceptibilidade foi verificada nos intervalos entre 19,3 e 30,3 °C, 20,0 e 30,1°C e 20,5 e 30,0 °C, respectivamente. Os meses de maio e setembro marcam o início e o final da estação seca, enquanto novembro corresponde ao mês que dá início aos períodos de maior

volume pluviométrico em grande parte do país. Neste contexto, é possível observar que temperaturas acima de 30°C tendem a restringir a adequabilidade aos danos. Em ambientes com temperaturas elevadas, a insuficiência hídrica pode acarretar em uma alta taxa de mortalidade de insetos (Eskafi e Fernandez, 1990).

Estes resultados corroboram com Firmino (2004), que identificaram em laboratório que a temperatura mais adequada para o desenvolvimento e reprodução da praga foi 26°C, enquanto a menos adequada foi 30°C. O estudo de campo de Ferreira Filho (2005), observou que as populações dessa espécie apresentam baixa densidade quando a temperatura mínima e máxima média permanecem em torno de 19 e 31°C, respectivamente, com uma tendência a aumentar à medida que essas médias reduzem para cerca de 10 e 27°C. Além disso, Barcik *et al.* (2023) registraram os picos populacionais em períodos com temperatura entre 20 e 25°C.

Na modelagem de distribuição da espécie no Zimbábue, África, Ndlela *et al.* (2018) identificaram que variáveis como a temperatura média do trimestre mais quente, temperatura média anual, temperatura média do trimestre mais frio, temperatura máxima do mês mais quente e o índice de umidade anual desempenharam um papel significativo para a melhora do desempenho modelo. Além disso, Queiroz *et al.* (2013) destacaram a considerável importância do desvio padrão da temperatura média anual em sua pesquisa.

Diferente desses estudos, incorporamos informações mensais de temperatura e precipitação na modelagem, simultaneamente às informações sazonais. Em alguns casos, dados mensais podem capturar padrões de maneira mais eficaz, especialmente quando há variações significativas durante uma estação. Nesse sentido, as variáveis mensais de temperatura apresentaram uma contribuição mais expressiva neste trabalho, enquanto as sazonais foram incorporadas ao modelo com menor frequência e importância.

Deste modo, observamos que quando as temperaturas máximas estão no intervalo térmico de desenvolvimento da espécie nos meses que antecedem e encerram a estação seca, e esta registra um baixo volume de chuva, existe alta probabilidade de ocorrência de danos econômicos acarretados pela espécie. Segundo Eskafi e Fernandez (1990), a precipitação e a temperatura desempenham papéis interdependentes na fenologia e sobrevivência dos insetos.

Diversos trabalhos relatam que as temperaturas mais baixas, associadas a diminuição dos índices pluviométricos, criam condições favoráveis para o

estabelecimento e reprodução do *G. brimblecombei*. E que o aumento das temperaturas e as chuvas frequentes contribuem para redução da população desse inseto-praga (Barcik *et al.*, 2023; Ferreira Filho *et al.*, 2017; Tuller *et al.*, 2017; Camargo *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2013; Ferreira Filho 2010; Silva, 2010; Ferreira *et al.*, 2009; Ferreira Filho, 2005; Rámirez *et al.*; 2003; Sookar *et al.*, 2003).

3.4.3 Desempenho dos modelos

Nosso estudo ressalta o desempenho dos MDEs associados a modelos de *ML* na modelagem de áreas susceptíveis a danos econômicos causados por *G. brimblecombei*. O mapeamento destas áreas desempenha um papel estratégico ao oferecer suporte na tomada de decisões em vários processos do manejo florestal. Essas ações incluem a aquisição de novas áreas, seleção dos materiais genéticos para plantio e direcionam as medidas de monitoramento e controle de pragas.

Todos os cinco modelos apresentaram bons resultados para as métricas avaliadas. No entanto, o melhor desempenho foi observado para aqueles baseados em árvores de decisão, RF e C5.0. O sucesso destes resultados demonstra a capacidade aplicar essas ferramentas no mapeamento de danos de outras pragas florestais e agrícolas.

Diversas pesquisas evidenciam a eficácia superior de modelos fundamentados em árvores de decisão quando comparados a abordagens como SVM, KNN e ANN (Ramos-Lima *et al.*, 2022; Rahman *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2021). As árvores de decisão são métodos generalistas eficientes, capazes de gerar resultados consistentes mesmo em conjuntos de dados de pequena dimensão, devido à sua robustez preditiva (Wang *et al.*, 2018).

Para cada modelo, houve uma variação na quantidade ideal de preditores selecionados durante a RFE. O RF e C5.0 alcançaram desempenho otimizado ao empregar um número consideravelmente maior de preditores. Em contrapartida, SVM, KNN e SVM Radial Sigma, demonstraram desempenho inferior ao empregar um conjunto menor de preditores. De acordo com Orounla *et al.*, (2023) o desempenho do RF e C5.0 tende a melhorar com o aumento do número de preditores.

Quando comparados, o modelo RF composto por um conjunto de árvores de decisão, obteve precisão ligeiramente superior ao C5.0, que consiste em apenas uma árvore de decisão. Em estudos comparativos anteriores, esses modelos também

demonstram desempenho semelhante, com a RF frequentemente demonstrando resultados superiores (Meno *et al.*, 2023; Orounla *et al.*, 2023; Golkarian *et al.*, 2018).

A metodologia *bagging*, empregada para seleção de características pelo RF, oferece previsões precisas em diversas aplicações, permitindo a avaliação da importância de cada característica durante o treinamento do modelo. Ao construir as regras de classificação, o algoritmo realiza a seleção das características, ampliando sua utilidade para a escolha de variáveis. Em contraste com as tradicionais árvores de decisão, o RF não requer poda das árvores, uma vez que os esquemas de conjunto e *bootstrap* asseguram a superação de problemas de *overfitting* (Qi, 2012).

As redes neurais utilizaram o menor número de preditores durante o processo de modelagem e, ao mesmo tempo, apresentaram o desempenho menos satisfatório quando comparadas aos demais modelos. Dois fatores que possivelmente impactaram o desempenho do modelo foram o desequilíbrio do conjunto de dados e o número de variáveis de entrada. As redes neurais podem ser suscetíveis ao *overfitting* quando expostas a um elevado número de preditores (Srivastava *et al.*, 2014).

Malek *et al.* (2023), observaram que o desbalanceamento exerce influência mais acentuada no desempenho de algoritmos como ANN, SVM e KNN, em comparação com aqueles baseados em árvores de decisão. O treinamento de um conjunto de dados desequilibrado pode levar os classificadores a se ajustarem de forma excessiva à classe predominante, aumentando a chance de perda de informações cruciais associadas à classe minoritária.

Dentre as métricas de performance avaliadas, a sensibilidade foi a única em que outro modelo se destacou em relação ao RF e ao C5.0. No entanto, é relevante destacar que a sensibilidade, quando analisada isoladamente, pode não oferecer uma perspectiva abrangente do desempenho global, sendo crucial considerar o conjunto completo de métricas na avaliação. Malek *et al.* (2023) e Ghosh *et al.* (2021), ao empregarem métricas equivalentes às adotadas neste estudo, identificaram padrões similares para os resultados da sensibilidade. Ambos embasaram a seleção do modelo que apresenta melhor performance na avaliação global das métricas.

3.4.4 Zoneamento climático de áreas susceptíveis ao aumento da densidade populacional de *G. brimblecombei*, com probabilidade de dano econômico à cultura do eucalipto

Este estudo constitui uma investigação abrangente da influência das condições climáticas na ocorrência e reprodução do *G. brimblecombei* e dos possíveis danos econômicos causados pela espécie à cultura do eucalipto, no território brasileiro. Distingue-se da literatura existente ao não se limitar à avaliação da distribuição geográfica da espécie, mas também ao considerar as áreas susceptíveis aos danos econômicos. Acreditamos que nossa análise em escala nacional pode ser instrumento para os gestores florestais, ao auxiliar nas decisões estratégicas de expansão dos plantios florestais de eucalipto, de monitoramento e controle da praga.

O inseto demonstra capacidade de se desenvolver e de ocasionar danos econômicos de forma abrangente por todo o país. De acordo com Queiroz *et al.* (2013), a semelhança entre as condições climáticas do Brasil e a região de distribuição nativa do inseto torna o ambiente propício para o seu desenvolvimento e reprodução. As áreas com maior susceptibilidade aos danos econômicos da praga se distribuem nas regiões onde estão concentrados os principais plantios florestais do país, como Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo (IBÁ, 2023).

Em contrapartida, a modelagem aponta que a expansão de plantios de eucalipto para as regiões Norte e Nordeste possui baixa probabilidade de ocorrência de danos econômicos causados pelo *G. brimblecombei*. Durante a última década, observou-se um aumento pouco expressivo nessas áreas quando comparado com outras partes do país (IBÁ, 2023). Os principais estados que testemunharam essa expansão dos plantios florestais foram o Pará, Tocantins, Maranhão e Piauí (Oliveira, 2019).

O estudo conduzido por Queiroz *et al.* (2013) não identificou áreas com potencial para ocorrência da praga na região Norte, e constatou que o Sul apresenta maior propensão para a presença da espécie. Em contraste com os resultados obtidos nesta pesquisa, a região Norte exibe potencial para a presença do inseto, e em alguns estados, há potencial para a ocorrência de danos econômicos. Conforme destacado pelos autores, a expansão dos plantios florestais no Brasil e as mudanças climáticas podem modificar a dinâmica e ampliar o nicho de *G. brimblecombei*.

Para o *Thaumastocoris peregrinus*, uma praga florestal com exigências térmicas similares ao *G. brimblecombei*, Pessoa *et al.* (2019) também identificaram o Sul e o Sudeste com a maior proporção de áreas adequadas à ocorrência do inseto no território brasileiro. Um comportamento análogo aos desse estudo, foi observado para as demais regiões.

As regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste do Brasil compartilham características em relação à susceptibilidade aos danos da praga. No Sudeste, a presença marcante de áreas susceptíveis é associada a um acumulado anual de precipitação inferior a 1.500 mm, temperaturas médias entre 18 e 20°C, e uma diversidade climática que varia de curtos períodos de seca a longos meses de estiagem. Na região Sul, a maioria do território apresenta condições favoráveis aos danos econômicos, com precipitação acumulada variando de 1.000 a 2.000 mm/ano e temperaturas entre 18 e 23°C. O Centro-Oeste, por sua vez, exibe uma distribuição quase equitativa entre as classes analisadas, com média de precipitação em torno de 1.500 mm/ano e estações mais quentes registrando médias de 24 a 26 °C (Nimer, 1989). Essas características climáticas descrevem os diferentes cenários de susceptibilidade nas três regiões.

Em determinadas regiões, padrões climáticos distintos podem atuar como fatores inibidores da ocorrência de danos causados pelo inseto-praga. Como no leste de Minas Gerais, onde o acumulado de chuva é superior a média do estado, e no litoral do Rio Grande do Sul, onde as temperaturas máximas são elevadas e o volume de chuvas é próximo a 1.500 mm/ ano. Similarmente, nas regiões norte e sudoeste do Mato Grosso e norte de Goiás, os índices pluviométricos são superiores a 1.500 mm por ano, com médias de temperaturas máximas acima de 32 °C (Nimer, 1989; Cavalcanti *et al.*, 2009). Essa variação do clima também é verificada em regiões de maior altitude em Minas Gerais, bem como ao longo do litoral que se estende de Santa Catarina até o Rio de Janeiro.

O Norte e Nordeste estão predominantemente localizados na zona tórrida, e caracterizam-se por apresentarem temperaturas elevadas ao longo do ano, sem variações aparentes entre as estações. No Norte as médias anuais de pluviometria superam 2.000 mm, chegando a atingir 4.000 mm em algumas regiões, acompanhadas de temperaturas máximas absolutas anuais acima de 36°C. Enquanto no Nordeste, as precipitações apresentam uma distribuição complexa, indicando variações significativas nos padrões (Nimer, 1989; Cavalcanti *et al.*, 2009).

O leste de Rondônia, o sul do Tocantins, difere do clima geral da região norte e apresentam susceptibilidade aos danos econômicos causados pela praga (Roldão e Ferreira, 2019). Essas áreas registram temperaturas mais amenas e um menor volume acumulado de chuva. O mesmo acontece no centro-oeste da Bahia,

onde o relevo influencia no clima (Lima *et al.*, 2020; Reboita *et al.*, 2016; Azevedo e Silva, 2000; Nimer, 1989).

Áreas no Rio de Janeiro, Espírito Santo e Santa Catarina, caracterizadas por um elevado volume pluviométrico acumulado, foram indicadas como susceptíveis aos danos econômicos decorrentes da praga, contrariando as expectativas. A falta de informações detalhadas nesses pontos pode ter contribuído para confusões durante o processo de classificação. No Mato Grosso do Sul, observou-se uma forte alternância entre as classes. Essa variabilidade pode ser atribuída à presença de municípios vizinhos nos quais ambas as classes foram registradas. Esse cenário pode ocasionar desafios para os modelos durante o processo de classificação devido à semelhança nas condições climáticas entre as áreas.

O processo de treinamento em um conjunto de dados desbalanceado pode induzir os classificadores a se adaptarem de maneira excessiva à classe predominante, aumentando a possibilidade de não capturar informações essenciais associadas à classe menos representativa, (Malek *et al.*, 2023; Ghosh *et al.*, 2021). O desequilíbrio é classificado como leve quando a proporção da classe minoritária está situada entre 20% e 40%, moderada quando é inferior a 20% dos dados, e extremo quando é inferior a 1% dos dados (Malek *et al.*, 2023).

A política nacional de florestas plantadas prevê uma expansão dos plantios para as regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste (BRASIL, 2011). Campos (2017), ao simular tal expansão para o ano 2025, observou uma clara tendência de crescimento em direção a essas regiões, destacando-se os estados do Pará, Maranhão e, sobretudo, Mato Grosso do Sul. De 2014 a 2022, houve um aumento de 2,6% nos plantios florestais de eucalipto no Brasil. Nesse período, as regiões Sudeste (4,1%), Centro-Oeste (2,3%) e Nordeste (0,5%) apresentaram as maiores taxas de crescimento (IBGE, 2015; IBGE 2023). Nesse contexto, compreender a distribuição da praga e seus potenciais danos torna-se uma estratégia fundamental na implementação do Manejo Integrado de Pragas (MIP).

3.4.5 Limitações nesta pesquisa e direções futuras

As principais limitações deste estudo estão relacionadas à previsão da distribuição de áreas suscetíveis a danos econômicos causados por *G. brimblecombei* no território brasileiro, sem considerar os diferentes níveis de danos e as espécies

específicas de *Eucalyptus* spp. implantadas. Além disso, a representatividade limitada da amostra em certas regiões do país pode afetar a generalização dos resultados para o conjunto do território. Assim a distribuição dessas áreas no cenário presente pode divergir daquela prevista pelo modelo. Para obter simulações mais precisas, seria necessário incorporar uma abordagem que leve em conta a variação nos níveis de danos, que faça diferenciação por espécies de *Eucalyptus* spp. e aumente o tamanho da amostra para melhor representar a diversidade geográfica do país.

3.5 CONCLUSÕES

A utilização dos cinco modelos de *Machine Learning*, permitiu mapear a distribuição dos danos econômicos do *G. brimblecombei* utilizando preditores ambientais. No entanto, o RF e o C5.0, modelos baseados em árvore de decisão, demonstraram a melhor performance. Acreditamos que estes modelos possam ser aplicados na identificação de áreas com potencial de danos econômicos ocasionados por outras espécies de pragas e em diferentes partes do mundo.

Os resultados demonstram que fatores ambientais são determinantes para a ocorrência de danos econômicos. Os principais preditores que influenciam a distribuição são a precipitação no trimestre mais seco (q05.BIO17), o volume de precipitação acumulado anual (min.BIO12) e as temperaturas máximas nos meses de maio, setembro e novembro (max.tmax_05, max.tmax_09; max.tmax_11).

O modelo prevê que as áreas susceptíveis aos danos econômicos causados pelo *G. brimblecombei* estão concentradas onde os 5% dos menores acumulados de precipitação no trimestre mais seco são inferiores a 95 mm, as máximas temperaturas máximas nos meses de maio, setembro e novembro variam entre 19,3 e 30,3 °C, 20,0 e 30,1°C e 20,5 e 30,0 °C, respectivamente, e a mínima precipitação anual é inferior a 1.600 mm. Os meses de maio e setembro marcam o início e o final da estação seca, enquanto novembro corresponde ao mês que dá início aos períodos de maior volume pluviométrico e temperatura em grande parte do país.

As regiões que abrigam os principais polos de produção florestal são as mais ameaçadas pela possibilidade de sofrer danos econômicos (Sudeste, Sul e Centro-Oeste). Por outro lado, a modelagem indica que a expansão dos plantios para as regiões Norte e Nordeste possui baixa probabilidade de sofrer perdas econômicas em decorrência de infestações de *G. brimblecombei*. Os resultados deste estudo

fornece subsidio para a implementação de um manejo de pragas integrado, que abrange desde a aquisição de novas áreas para plantio até o monitoramento e controle do inseto-praga.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C. V. S. de. **Distribuição potencial de *Scirtothrips Dorsalis* (Hood) (Thysanoptera: Thripidae) nas américas**. 2022. 57 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura no Trópico Úmido) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Manaus, 2022. Disponível em: https://repositorio.inpa.gov.br/bitstream/1/38733/2/caio_dissertacao.pdf. Acesso em: 18 de out. 2023.
- AHMED, N.; ATZBERGER, C.; ZEWDIE, W. Species Distribution Modelling performance and its implication for Sentinel-2-based prediction of invasive *Prosopis juliflora* in lower Awash River basin, Ethiopia. **Ecological Processes**, v. 10, n. 18, p. 1-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00285-6>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728. jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ARAÚJO, M. B.; GUIBAN, A. Five (or so) challenges for species distribution modelling. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 10, p. 1677-1688, ago. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x>.

AZEVEDO, P. V. de; SILVA, G. B. da. Potencial edafoclimático da “Chapada Diamantina” no Estado da Bahia para o cultivo de Citrus. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 1, p.133-139, 2000. ISSN: 0104-1347.

BARCIK, L. P.; CAMARGO, M. B.; GARRET, A. T. de A.; GARCIA, F. A. de O.; UKAN, D. lutação populacional de *Glycaspis brimblecombei* mais em híbridos de *Eucalyptus camaldulensis* x *E. grandis*na região Sul do Brasil. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v.21, n.9, p. 11880-11894. 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv21n9-074>

BENTZ, B.J.; JÖNSSON, A. Maria. Modeling bark beetle responses to climate change. In: VEGA, E. F.; HOFSTETTER, R. W. **Bark beetles**. Academic Press, 2015. p. 533-553. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417156-5.00013-7>.

BRANCO, M.; FRANCO, J. C.; MENDEL, Z. Sap-Sucking Forest Pests. In: ALISSON, J. D.; PAINE, T. D.; SLIPPERS, B.; WINGFIELD. **Forest Entomology and Pathology**. Springer, 2023. cap. 13. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11553-0>.

BRASIL. Diretrizes para a estruturação de uma política nacional de florestas plantadas. Brasília: Secretaria de Assuntos Estratégicos/Presidência da República, 2011. 104 p.

CAMARGO, J. M. M.; ZANOL, K. M. R.; QUEIROZ, D. L. de; DEDECECK, R. A.; OLIVEIRA, E. B.; MELIDO, R. C. N. Resistência de clones de Eucalyptus ao psílideo-de-concha. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 77, p. 91–97, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.77.504>.

CAMPOS, A. R. Análise espaço-temporal da expansão dos plantios florestais comerciais no Brasil sob a condição de minimização de impactos negativos e potenciais conflitos. **Revista Geografias**, v. Especial, p. 8–22, fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.35699/2237-549X.13453>.

CARTER, S.; VAN REES, C. B.; HAND, B. K.; MUHLFELD, C. C.; LUIKART, G.; KIMBALL, J. S. Testing a Generalizable Machine Learning Workflow for Aquatic Invasive Species on Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) in Northwest Montana. **Front. Big Data**, v. 4, p. 1-16, oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdata.2021.734990>.

CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J. da; DIAS, M. A. F. da **S.Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 464 p.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and psychological measurement**, v. 20, n. 1, p. 37-46, apr. 1960. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, jul.1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B).

CUELLO, E. M. **Estudio de la diversidad de insectos asociados a las principales plagas de Eucalyptus spp., para la selección de potenciales agentes de control biológico**. 2019. 183 f. Tesis (Doctorado) - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2019. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6592_Cuello. Acesso em: 16 de out.de 2023.

DALLACORT, S. **Controle químico de larvas de Leptocybe invasiva (Hymenoptera: Eulophidae) em mudas de eucalipto e efeito no parasitoide Quadrastichus mendeli (Hymenoptera:Eulophidae)**. 2020. 61 f. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2020. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/204388/dallacort_s_me_botfca.pdf?sequence=7&isAllowed=y. Acesso em: 16 de out. de 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.066>.

ESKAFI, F. M.; FERNANDEZ, A. Larval–Pupal Mortality of Mediterranean Fruit Fly (Diptera: Tephritidae) from Interaction of Soil, Moisture, and Temperature. **Environmental Entomology**, v. 19, n. 6, p. 1666–1670, dec. 1990. DOI: <https://doi.org/10.1093/ee/19.6.1666>.

FAVARO, R. M. **Aspectos bionômicos de *Glycaspis (Glycaspis) brimblecombei* (Moore, 1964) (Hemiptera: Psyllidae) e seu controle com fungos entomopatogênicos**. 2006. 43p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

FERREIRA-FILHO, P. J.; WILCKEN, C. F.; MASSON, M. V.; TAVARES, W. S.; GUERREIRO, J. C.; DO CARMO, J. B.; PRADO, E. P.; ZANUNCIO, J. C. Influence of temperature and rainfall on the population dynamics of *Glycaspis brimblecombei* and *Psyllaephagus bliteus* in Eucalyptus camaldulensis plantations. **Revista Colombiana de Entomología**, v. 43, n. 1, p.1-6, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.25100/socolen.v43i1.6638>.

FERREIRA FILHO, P. J. **Dinâmica populacional do psílideo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) e parasitismo por *Psyllaephagus bliteus* Riek (Hymenoptera: Encyrtidae) em floresta de eucalipto**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2010.

FERREIRA FILHO, P. J. **Estudo de populações do psílideo-de-concha *Glycaspis Brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) e de seu parasitoide *Psyllaephagus bliteus***

(Hymenoptera: Encyrtidae) em floresta de *Eucalyptus camaldulensis* por dois métodos de amostragem. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2005.

FERREIRA, R. de A.; BLAZIZA, A. A. B.; ANZONIN, M. G.; FIRMINO-WINCKLER, D. C. Flutuação populacional do psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) em *Eucalyptus* spp. no município de Garça, SP. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 8, n. 14, p. 29-46, ago. 2009. ISSN:1678-3867.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: novas superfícies climáticas com resolução espacial de 1 km para áreas terrestres globais. **Jornal Internacional de Climatologia**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, may. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

FIRMINO, D.C. **Biologia do psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) em diferentes espécies de eucalipto e em diferentes temperaturas.** 2004. 49 f. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

FRÜH, L.; KAMPEN, H.; KERKOW, A.; SCHAUB, G. A.; WALTHER, D.; WIELAND, R. Modelling the potential distribution of an invasive mosquito species: comparative evaluation of four machine learning methods and their combinations. **Ecological Modelling**, v. 388, p. 136-144, 24 nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.08.011>.

GALLO, D.; NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R. P. L.; BATISTA, G. C.; BERTI FILHO, E.; PARRA, J. R. P.; Z UCCHI, R. A.; ALVES, S. B.; VENDRAMIN, J. D.; MARCHINI, L. C.; LOPES, J. R.; OMOTO, C. **Entomologia agrícola.** Piracicaba: FEALQ, 2002. 920 p.

GHOSH, M.; SARKER RAIHAN, M. M.; RAIHAN, M.; AKTER, L.; BAIRAGI, A. K.; ALSHAMRANI, S. S.; MASUD, M. A Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms to Predict Liver Disease. **IASC**, v. 30, n. 3, p. 917-928, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32604/iasc.2021.017989>.

GIANNINI, T. C.; SIQUEIRA, M. F.; ACOSTA, A. L.; BARRETO, F. C. C.; SARAIVA, A. M.; ALVES-DOS-SANTOS, I. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. **Rodriguésia**, v. 63, n. 3, p. 733-749. Set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S2175-78602012000300017>

GOLKARIAN, A.; NAGHIBI, S. A.; KALANTAR, B.; PRADHAN, B. Groundwater potential mapping using C5.0, random forest, and multivariate adaptive regression spline models in GIS. **Environ Monit Assess**, v. 190, n. 149, p. 1-16, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6507-8>.

GOMES, L. C.; FARIA, R. M.; SOUZA, E. de; VELOSO, G. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES-FILHO, E. I. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 337-350, apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>.

HUANG, F.; YE, Z.; JIANG, S.-H.; HUANG, J.; CHANG, Z.; CHEN, J. Uncertainty study of landslide susceptibility prediction considering the different attribute interval numbers of environmental factors and different data-based models. **CATENA**, v. 202, p.1-17, jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105250>.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2022**. IBÁ, 2022. 96 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 06 de ago. 2023.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual IBÁ 2023**. IBÁ, 2023. 91 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2022**. Rio de Janeiro, v. 37, p. 1-8, 2023a. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2022_v37_informativo.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Malha Municipal Digital e Áreas Territoriais 2022. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2023b. 39 p. (Nota metodológica n. 01). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101998>. Acesso em: 06 de ago. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da extração vegetal e silvicultura 2015**. RIO DE JANEIRO: IBGE, v. 29, p.1-56, 2015. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2014_v29.pdf. Acesso em: 20 jan. 2023.

KUHN, M.; JOHNSON, K. Classification trees and rule-based models. In: **Applied Predictive Modeling**. New York, NY: Springer New York, 2013. p. 369-413.

KUHN. M. caret: Classification and Regression Training. R package Version 6.0-94, 2023.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, mar. 1977. DOI: <https://doi.org/10.2307/2529310>.

LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C.; JACOBINE, L. A. G.; WILCKEN, C. F.; LAWSON, S. A. Forest Stewardship Council and Responsible Wood certification in the integrated pest management in Australian forest plantations. **Forest Policy and Economics**, v. 131, p. 1-12, oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102541>.

LIMA, M. G. de; MORAES, A. M. de; NUNES, L. A. P. L.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de. **Climas do Piauí: interações com o ambiente**. Teresina: Edufpi, 2020. 144 p.

LOCA, A. L. da S. **Uma metodologia experimental para avaliar abordagens de aprendizado de máquina para diagnóstico de falhas com base em sinais de vibração**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Informática) Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020. Disponível em: https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_14522_Disserta%E7%E3o_Antonio_Loca.pdf. Acesso em: 10 de ago. de 2023.

MALEK, N. H. A., YAACOB, W. F. W., WAH, Y. B., NASIR, S. A. M., SHAADAN, N., INDRATNO, S. W. Comparison of ensemble hybrid sampling with bagging and boosting machine learning approach for imbalanced data. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 29, n. 1, p. 598-608, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v29.i1.pp598-608>.

MATTA, T. F. de. **Novos modelos de regressão binária usando funções de ligações simétricas e assimétricas**. 2021. 65 f. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

MELLO, D. C. de; VELOSO, G. V.; MOQUEDACE, C. M.; OLIVEIRA, I. A.; FRANCELINO, M. R.; OLIVEIRA, F. S.; SOUZA, J. J. L. L.; GOMES, L. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES-FILHO, E. I.; MEDEIROS JÚNIOR, E. B.; DEMATTÊ, J. A. M. Chemical weathering detection in the periglacial landscapes of Maritime Antarctica: New approach using geophysical sensors, topographic variables and machine learning algorithms. **Geoderma**, v. 438, p. 1-15, oct. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116615>.

MENO, L.; ESCUREDO, O.; ABULEY, I. K.; SEIJO, M. C. Predicting Daily Aerobiological Risk Level of Potato Late Blight Using C5.0 and Random Forest Algorithms under Field Conditions. **Sensors**, v. 23, p. 1-14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23083818>.

MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C. dos.; OLIVEIRA, L. C. de. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 469–483, jul./sep. 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/6655>. Acesso em: 10 de ago. 2023.
MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 112 p. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3519?show=full>. Acesso em: 16 de out. 2023.

NDLELA, S.; MANYANGADZE, T.; SACHISUKO, A.; VAN DER LINGEN, S.; MAKOWE, I. A. The Distribution and Management of Two Invasive Pests of Eucalyptus: The Red Gum Lerp Psyllid, *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psylloidea), and the Blue Gum Chalcid Wasp, *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae), in Zimbabwe. **African Entomology**, v. 26, n. 1, p. 104-115, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4001/003.026.0104>.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 422 p.

NOWOSAD, J.; STEPINSKI, T. F. Extended SLIC superpixels algorithm for applications to non-imagery geospatial rasters. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 112, p. 102935, 2022.

OLIVEIRA, A. B. Indústria de celulose e o avanço da silvicultura do eucalipto na fronteira agrícola da amazônia maranhense. **Geosul**, v. 34, n. 71 - Dossiê Agronegócios no Brasil, p. 301-327, abr. 2019. DOI: <http://doi.org/10.5007/1982-5153.2019v34n71p301>.

OLIVEIRA, K. N.; JESUS F. M.; SILVA J. O.; ESPÍRITO-SANTO, M. M.; FARIA M. L. An experimental test of rainfall as a control agent of *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera, Psyllidae) on seedlings of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn (Myrtaceae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 56, n. 1, p. 101-105, mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0085-56262012005000008>.

OROUNLA, B. R.; SODE, A. I.; SALAKO, K. V.; KAKA, R. G. Empirical Performance of CART, C5.0 and Random Forest Classification Algorithms for Decision Trees. **African Journal of Applied Statistics**, v. 10, n. 1, p. 1399-1418, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.16929/ajas/2023.1399.274>.

PAIVA, L. F.; MATTOS, A. F. O. de; SILVA, L. de A.; AVELINO, J. G.; CAVALCANTI, G. D. C. C. Avaliação de técnicas de balanceamento na classificação de aceitabilidade de carros. ENCONTRO NACIONAL DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E COMPUTACIONAL, 20., 2023. Belo Horizonte. **Anais [...]** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2023. p. 97-111. DOI: <https://doi.org/10.5753/eniac.2023.233712>.

PEREIRA, J. M.; BALDIN, E. L. L.; SOLIMAN, E. PI.; WILCKEN, C. F. Attractiveness and oviposition preference of *Glycaspis brimblecombei* Moore in *Eucalyptus* spp. **Phytoparasitica**, 41, p. 117–124, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12600-012-0268-7>.

PESSOA, M. C. P. Y.; MINGOTI, R.; MARINHO-PRADO, J. S.; SA, L. A. N. de; VALLE, L. B. do; LOVISI FILHO, E.; BERALDO, G. N.; FARIAS, A. R. Áreas brasileiras aptas a ocorrência mensal de *Thaumastocoris peregrinus* em *Eucalyptus* spp. In: JASPER, M. (ed.). **Coletânea nacional sobre entomologia**. Ponta Grossa: Atena, 2019. p. 74-89.

PROJETO MAPBIOMAS – Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 10 de ago. de 2023.

QI, Y. Floresta Aleatória para Bioinformática. In: Zhang, C., Ma, Y. (eds) **Ensemble Machine Learning**. Nova York: Springer, 2012. p. 307-323. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9326-7_11.

QUEIROZ, D. L.; MAJER, J.; BURCKHARDT, D.; ZANETTI, R.; FERNÁNDEZ, J. I. R.; QUEIROZ, E. C. DE; GARRASTAZU, M.; FERNANDES, B. V.; ANJOS, N. DOS. Predicting the geographical distribution of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera:

Psylloidea) in Brazil. **Australian Journal of Entomology**, v. 52, n. 1, p. 20-30, fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/aen.12001>.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023.

RAHMAN, M. S.; PIENTONG, C.; ZAFAR, S.; EKALAKSANANAN, T.; PAUL, R. E.; HAQUE, U.; ROCKLÖV, J.; OVERGAARD, H. J. Mapping the spatial distribution of the dengue vector *Aedes aegypti* and predicting its abundance in northeastern Thailand using machine-learning approach. **One Health**, v. 13, p. 1-10, dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2021.100358>.

RAMIREZ, A.L.G. **Fluctuacion poblacional del psilido del eucalipto *Glycaspis brimblecombei* y el efecto del control biológico con la avispa parasitóide *Psyllaephagus bliteus*** 2003. 45f. Tesis de Maestria (Entomología Agrícola) - Ingeniera Agrícola-Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan, Edo. de México.

RAMOS-LIMA, L. F.; WAIKAMP, V.; OLIVEIRA-WATANABE, T.; RECAMONDE-MENDOZA, M.; PIGATTO TECHE, S.; MELLO, M. F.; MELLO, A. F.; FREITAS, L. H. M. Identifying posttraumatic stress disorder staging from clinical and sociodemographic features: a proof-of-concept study using a machine learning approach. **Psychiatry Research**, v. 311, p. 1-8, may. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2022.114489>.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; ARMANDO, R. P.; FREITAS, C.; MARTINS, D.; MILLER, G. Causas da semi-aridez do sertão nordestino. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, n. 12, p. 253-277, jul./dez. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v19i0.42091>.

ROLDÃO, A. de F.; FERREIRA, V. de O. Climatologia do Estado do Tocantins – Brasil. **Caderno de Geografia**, v.29, n.59, p. 1161-1181. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29n59p1161>.

SÁ, L. A. N. de; WILCKEN, C. F. Nova Praga Exótica no Ecosistema Florestal. Jaguariúna: **EMBRAPA**, 2004,4 p. (Comunicado Técnico, 18).

SALIBA, I. L.; LUNZ, A. M.; BATISTA, T. F.; SCHWARTZ G.; QUEIROZ, D. L. First record of *Glycaspis brimblecombei* (Moore, 1964) and *Blastopsylla occidentalis* (Taylor, 1985) (Hemiptera, Aphalaridae) in eucalyptus plantations in State of Pará, Brazil. **Entomological Communications**, v. 1, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec01009>.

SANTOS, F. A.; CORREA A. S.; NANINI F.; NASCIMENTO D. A.; JUNQUEIRA L. R.; WILCKEN C. F. Genetic diversity of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) and its parasitoid *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) in Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 81, n. 3, p.838-841, jul./set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.230486>.

SANTOS, G.; GONÇALVES, R.; SILVA, N. dos A. Primeiro registro do besouro amarelo-do-eucalipto em plantio de eucalipto no Estado do Acre. **Revista Ceres**.

Viçosa, v. 63, n. 4, p. 584-587, jul./ago., 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663040020>.

SANTOS, P. E. T. dos; ESTEFANO FILHO, P. Critérios para escolha de eucaliptos para plantio. In: SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. C. dos R. **Transferência de tecnologia florestal**: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda. Brasília: EMBRAPA, 2014. p. 23-26. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/121607/1/Apostila-Serie-TT-Eucalipto.pdf>. Acesso em: 10 de ago. de 2023.

SCHUMACHER, M. V.; DICK, G.; VIERA, M.; LUDVICHAK, A. A. Silvicultura Aplicada – Parte I. 3 ed. **Santa Maria**: UFSM, 2016. 98 p. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/832/2020/12/Silvicultura-Aplicada-Parte-1_3a-Edicao-2016.pdf. Acesso em: 10 de ago. de 2023.

SILVA, A. L. da. **Ocorrência, sinecologia de *Glycaspis Brimblecombei* (Moore, 1964) (Hemiptera: Psyllidae) e seus inimigos naturais em *Eucalyptus* spp. no município de de Cuiabá - MT**. 2010. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestais e Agrárias) Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2010.

SILVA, A. L.; PERES-FILHO, O.; DORVAL, A.; CASTRO, C. K. da C. e. Dinâmica Populacional de *Glycaspis brimblecombei* e Inimigos Naturais em *Eucalyptus* spp., Cuiabá-MT. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 1, p. 80-90, 2013.

SILVA, G. L. B. e. **Seleção de híbridos multi-espécies de eucalyptus tolerantes 2020 ao déficit hídrico, insetos e fungos**. 2020. 117 f. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2020. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/30088/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 16 de out. de 2023.

SILVA, R. C.; CORRÊA, G. R.; ARRUDA, D. M.; VELOSO, G. V.; FERNANDES-FILHO, E. I.; CÂNDIDO, H. G.; OLIVEIRA, F. S.; ROSA, G. P.; BEHLING, H.; SCHAEFER, C. E. G. R. The Brazilian semiarid region over the past 21,000 years: Vegetation dynamics in small pulses of higher humidity. **Ecological Informatics**, v. 77, p. 102259, nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102259>.

SILVARES, P. H. dos S.; SANTOS, V. B. dos; CUPERTINO, G. F. M.; CIRILO, N. R.; BATISTA, D. C.; PAES, J. B.; MAFFIOLETTI, F. D.; QUEIROZ, É. P. P.; ARAÚJO, B. D. L.; VIDAURRE, G. B. Impactos das pragas florestais na qualidade da madeira de silvicultura: revisão de literatura. In: CARDOSO, R.; QUINTELA, J. B. **Open science research XI**. 1. ed. Guarujá: Científica Digital. 2023. p. 1184-1203. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/books/978-65-5360-350-9.pdf>. Acesso em: 16 de out. de 2023.

SOOKAR, P.; SEEWORUTHUN, S. I.; RAMKHELAWON, D. The redgum lerp psyllidae, *Glycaspis brimblecombei*, a new pest of *Eucalyptus* sp. in Mauritius. **AMAS**, p. 327- 332, 2003.

SOUSA, L. F. da C. e; OLIVEIRA, J. de; FERREIRA, P.S.A.; SANDIM, A. S. de A. Modelo de ranqueamento empresarial para análise da relevância das empresas no setor de florestas plantadas. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41, p. 1-10, jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.4336/2021.pfb.41e201901820>.

SOUZA JUNIOR, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W. de; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIEIRA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.

SOUZA, C. M. P.; THOMAZINI, A.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VELOSO, G. V.; MOREIRA, G. M. M.; FERNANDES FILHO, E. I. Multivariate analysis and machine learning in properties of Ultisols (Argissolos) of Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1-20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170419>.

SRIVASTAVA, N.; HINTON, G.; KRIZHEVSKY, A.; SUTSKEVER, I.; SALAKHUTDINOV, R. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. **Journal of Machine Learning Research**, v. 15, p. 1929–1958, 2014. ISSN 15337928.

TULLER, J.; OLIVEIRA, K. N.; SILVA, J. O.; FARIA, M. L. de; ESPIRITO SANTO, M. M. do; SERRÃO, J. E. ZANUNCIO, J. C. *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) attack patterns on different *Eucalyptus* genotypes. **PeerJ**, p. 1-15, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.3864>.

VIEIRA, R. L.; PESSOA, L. G. A.; LOUREIRO, E. S.; POERSH, N. L. Ocorrência de *Glycaspis brimblecombei* sobre *Eucalyptus* em Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul. **Revista de Agricultura Neotropical**. Cassilândia, v. 5, n. 1, p. 91-93, jan./mar., 2018. ISSN 2358-6303.

WANG, S., AGGARWAL, C.; LIU, H. Random-Forest-inspired neural networks. **ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology**, v. 9, n. 6, p. 1–25. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1145/3232230>.

WILCKEN, C. F.; COUTO, E. B.; ORLATO, C., FERREIRA FILHO, P.J.; FIRMINO, D. C.; Ocorrência do psilídeo-deconcha (*Glycaspis brimblecombei*) (Hemiptera: Psyllidae) em florestas de eucalipto no Brasil. Piracicaba: **IPEF**, 2003. 11 p. (Circular Técnica, 201).

WILCKEN, C. F.; FIRMINO-W INCKLER, D. C.; DAL POGETTO, M. H. F. A.; DIAS, T. K. R.; LIMA, A. C. V.; SÁ, L. A. N. DE; FERREIRA FILHO, P. J. Psilídeo-deconcha-do-eucalipto, *Glycaspis brimblecombei* Moore. In: VILELA, E. F.; ZUCCHI, R.

A (org.). **Pragas introduzidas no Brasil** - Insetos e Ácaros. Piracicaba: FEALQ, 2015. p. 883-897.

4 Capítulo III - Predição da distribuição potencial presente e futura de áreas susceptíveis a danos econômicos de *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) em plantios de *Eucalyptus* spp. no Brasil utilizando modelos de *machine learning*.

4.1 INTRODUÇÃO

O psílídeo de concha, *Glycaspis brimblecombei* (Moore, 1964) (Hemiptera: Aphalaridae) é um inseto nativo da Austrália, que se encontra distribuído pelos cinco continentes (EPPO, 2023). No Brasil, o *G. brimblecombei* foi registrado pela primeira vez, em 2003, no estado de São Paulo. Sua dispersão e adaptação ocorreram rapidamente pelo país, e atualmente, está presente em 16 estados (Lemes *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021; Saliba *et al.*, 2019; Wilcken *et al.*, 2015).

O *G. brimblecombei*, alimenta-se exclusivamente de eucalipto, demonstrando preferência por brotações e ponteiros (Montes e Raga, 2005). As infestações dessa praga resultam em significativa redução na produtividade e qualidade dos plantios florestais (Lemes *et al.*, 2021). O inseto pode provocar desfolha severa e até mortalidade de árvores em diversas espécies de *Eucalyptus* spp. (Lemes *et al.*, 2021). Os principais danos incluem desfolha, ressecamento dos ponteiros, redução, deformação e enrolamento do limbo foliar. Além disso, sua atividade induz a formação de fumagina, contribuindo para a redução da área fotossinteticamente ativa (Sá e Wilcken, 2004; Wilcken *et al.*, 2003). Segundo Gill (1998), a praga pode causar até 15% de mortalidade das plantas no primeiro ano, podendo atingir 40% no segundo ano, em caso de infestações consecutivas.

Caracterizada por um comportamento reprodutivo multivoltino, essa praga apresenta a capacidade de completar de duas a quatro gerações por ano em seu ambiente natural (Morgan, 1984). Sob condições ambientais neotropicais, o inseto demonstra uma taxa ainda maior, podendo atingir até seis gerações (Cuello *et al.*, 2017). A temperatura do ar e o volume pluviométrico correspondem às principais condições ambientais que influenciam a dinâmica populacional do *G. brimblecombei* (Ferreira Filho, 2010).

No Brasil, o *G. brimblecombei* tem demonstrado capacidade de se adaptar em diversas regiões, no entanto, sua presença não implica automaticamente em sua capacidade de ocasionar danos econômicos (Barcik *et al.*, 2023; Lemes *et al.*, 2021; Wilcken *et al.*, 2015). A presença de insetos em baixa densidade populacional não provoca danos relevantes do ponto de vista econômico. Tais danos surgem quando a espécie atinge um nível de densidade populacional capaz de causar prejuízos financeiros significativos que ultrapassam os custos associados à implementação das medidas de controle (Pedigo e Rice; 2009).

As mudanças climáticas e a expansão das monoculturas têm impactado na dinâmica das infestações de insetos pragas em florestas de todo o mundo (Nihal, 2020; Chávez *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2018). Sentis e Desneux (2019) destacam que fatores como o padrão de desenvolvimento, sobrevivência e dispersão de espécies invasoras podem ser afetados por tais mudanças. Como consequência, é previsto um aumento nos riscos de invasão biológica, surtos de pragas, mudanças de distribuição e perdas de habitat (Skendžić *et al.*, 2021; Nihal, 2020).

As alterações climáticas podem afetar também a interação entre a praga e seu inimigo natural, reduzindo a eficiência destes agentes de controle biológico. Adicionalmente, podem reduzir a eficácia de outras medidas, como o uso de inseticidas sintéticos, produtos botânicos, vírus entomopatogênicos, fungos, bactérias e nematóides, os quais são altamente susceptíveis às condições do ambiente. (Monticelli *et al.*, 2021; Nihal, 2020). Tais mudanças tornam os métodos de controle mais desafiadores, exigindo uma abordagem ainda mais integrada e adaptativa para lidar com os desafios no manejo de pragas.

Os modelos de distribuição de espécies (MDEs) são ferramentas estatísticas que estabelecem relações entre características demográficas das espécies e preditores ambientais com o intuito de prever sua distribuição geográfica potencial, mesmo em áreas onde ainda não foi observada (Elith e Leathwick, 2009). Diversos estudos têm utilizado esses modelos para prever a adequação geográfica de insetos-praga em cenários tanto no presente quanto no futuro (Zhao *et al.*, 2023; Sora *et al.*, 2023; Saha *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020). O emprego de algoritmos de *ML* associado aos MDEs tem sido cada vez mais frequentes nesses processos, visto que aumentam a precisão da modelagem e tem potencial para superar as técnicas tradicionais (Mi *et al.*, 2017; Elith e Leathwick, 2009).

O *G. brimblecombei* possui uma ampla distribuição geográfica, no entanto, pesquisas sobre o impacto das condições ambientais em sua capacidade de ocasionar danos econômicos em plantios florestais de *Eucalyptus* spp. são escassas. Assim, os principais objetivos deste estudo incluem: (1) examinar a eficiência de modelos de *ML* na modelagem de áreas susceptíveis aos danos econômicos decorrentes *G. brimblecombei*; (2) determinar os principais fatores ambientais que afetam a distribuição dos danos econômicos do inseto-praga; e (3) prever o potencial geográfico de distribuição dos danos econômicos nos cenários climáticos presente e futuro.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudo

Localizado na América do Sul, o Brasil é caracterizado por suas dimensões continentais, ocupando uma vasta extensão territorial de 8.515.417 km². Na fronteira

oeste, estabelece limites terrestres com 10 países sul-americanos, excluindo Equador e Chile. Á leste, suas fronteiras são demarcadas pelo oceano Atlântico. O país destaca-se pela presença de uma das maiores bacias hidrográficas do mundo. Em termos de biodiversidade, os conjuntos de fauna e flora agrupam-se em seis biomas distintos: Amazônia, Mata Atlântica, Cerrado, Caatinga, Pampa e Pantanal (IBGE, 2023).

Além disso, o Brasil é dividido em cinco regiões geográficas distintas: Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, que por sua vez abrangem um total de 26 estados e o Distrito Federal (Figura 1). Essas divisões regionais e estaduais refletem não apenas diferenças geográficas, mas também variações climáticas, culturais e econômicas significativas (IBGE, 2023).



Figura 1 - Mapa da divisão regional e estadual do Brasil.

A distribuição geográfica dos plantios florestais pelo território é extensa, compreendendo uma área de 9,94 milhões de ha, a qual se distribui por mais de 18% dos municípios brasileiros. Os plantios de eucalipto representam 76% das áreas plantadas, o equivalente a 7,60 milhões de ha. Os ciclos de produção têm em uma média de 6,7 anos, alcançado uma produtividade estimada de 32,7 m³/ha/ano (IBÁ, 2023). Esses plantios se concentram principalmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul do país, destacando-se nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo (Figura 2).

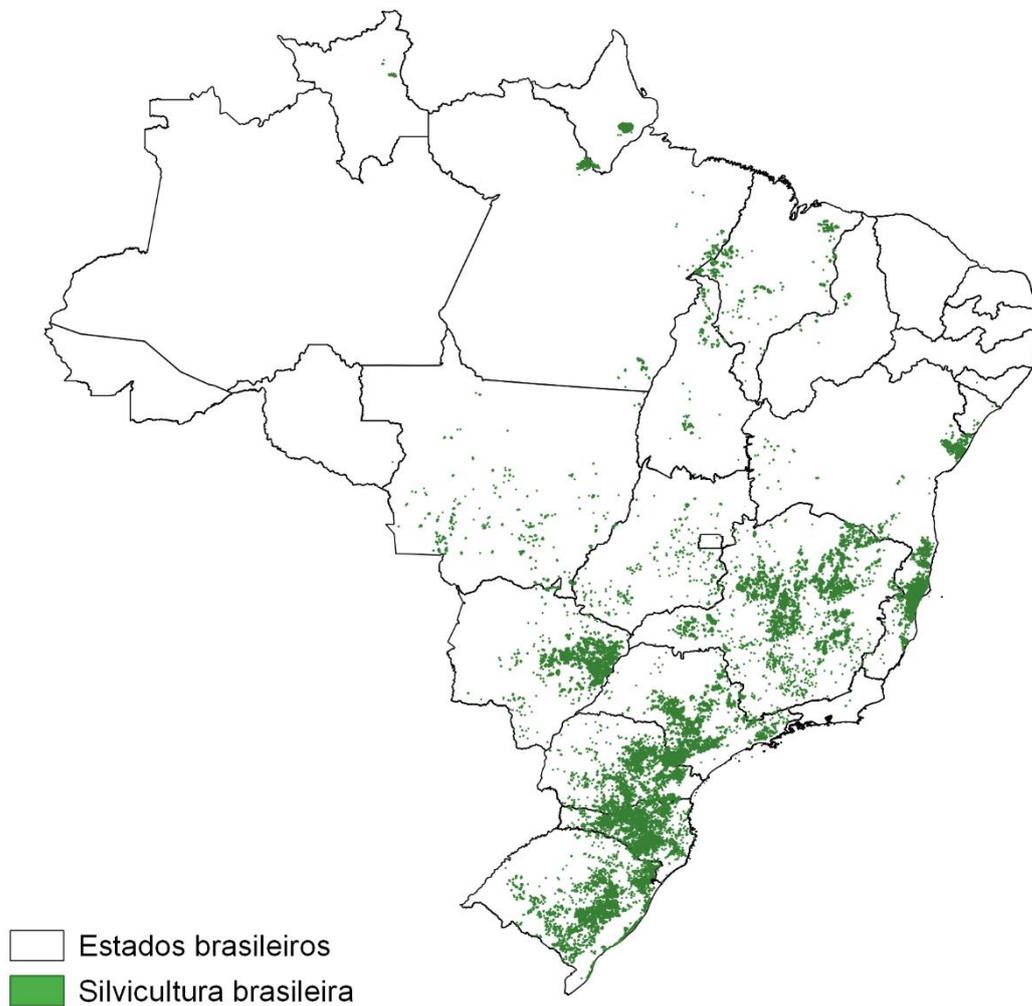


Figura 2 - Plantios florestais no Brasil. Adaptado de Projeto MapBiomass (2023).

Devido às suas dimensões continentais, o Brasil apresenta uma notável diversidade de climas, que vão desde o semiárido tropical, caracterizado por índices pluviométricos inferiores a 600 mm, até climas equatoriais, tropicais e subtropicais, com volumes de chuva superiores a 4.000 mm (Cavalcanti, 2009). Conforme a classificação climática de Köppen-Geiger, evidencia-se uma variedade de tipos climáticos, abrangendo o tropical (Af, Am, Aw, As), o semiárido (Bsh) e o subtropical úmido (Cfa, Cfb, Cwa, Cwb, Cwc, Csa, Csb) (Alvares *et al.*, 2014) (Figura 3). As variações climáticas exercem influência sobre as técnicas de manejo empregadas nos plantios florestais (Queiroz, 2023).

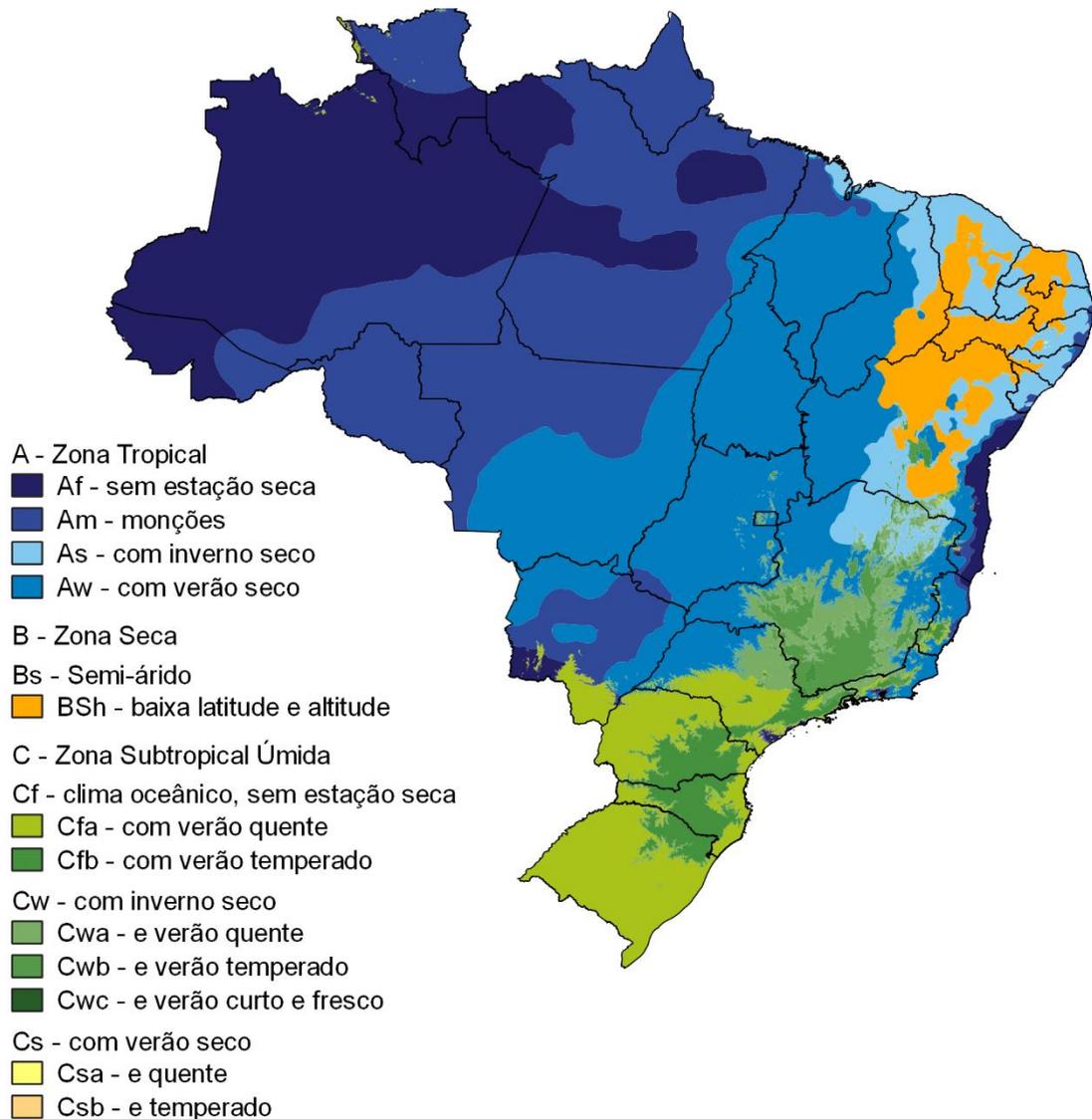


Figura 3 - Classificação climática de Köppen para o Brasil. Adaptado de Alvares *et al.*, (2014).

4.2.2 Amostragem dos dados de presença de *G. brimblecombei* associado ou não à ocorrência de dano econômico

A obtenção de dados para este estudo ocorreu por meio de uma pesquisa enviada para empresas do setor florestal em todo o Brasil. O critério utilizado para selecionar as empresas foi a existência de plantios de eucalipto em suas operações. Esse critério foi adotado para assegurar que as empresas incluídas na pesquisa estivessem diretamente envolvidas na produção da monocultura. A pesquisa foi conduzida durante os meses julho a setembro de 2023.

O método de coleta de dados utilizado consistiu no envio por e-mail de questionário aos responsáveis do setor de proteção florestal. O questionário continha três perguntas formuladas de maneira objetiva e clara, visando obter as informações essenciais para a análise do impacto do *G. brimblecombei* em florestas de *Eucalyptus* spp., no Brasil. As questões abordadas foram as seguintes:

(1) A empresa observou a ocorrência do psíldeo de concha (*Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera, Psyllidae)) em seus plantios florestais?

(2) Em quais municípios onde a empresa tem plantios, foi identificada a presença do psíldeo de concha?

(3) Em quais desses municípios o psíldeo de concha causou danos econômicos aos plantios?

As informações por municípios, obtidas por meio do questionário enviado às empresas, foram extrapoladas para área de plantio florestal utilizando os dados provenientes da classe silvicultura, do mapa de uso e cobertura da terra do Brasil, referente ao ano de 2022, pertencente à coleção 8 do MapBiomas e com resolução espacial de 30 metros (Projeto MapBiomas, 2023; Souza Júnior *et al.*, 2020), (Figura 2). Cada polígono classificado como silvicultura, dentro dos limites internos dos municípios identificados no questionário, passou a representar a informação real do seu respectivo município. A extrapolação foi limitada aos polígonos com área superior a 1 km². Os dados de silvicultura utilizados neste estudo, não fazem distinção das espécies florestais implantadas (Figura 2). Tendo em vista essa restrição, todos os maciços florestais foram considerados como plantios de eucalipto, devido à predominância desse tipo de monocultura e à viabilidade de áreas originalmente destinadas a outras espécies florestais serem convertidas em plantios de eucalipto.

4.2.3 Modelagem da presença de *G. brimblecombei* e do potencial de dano econômico em plantios de eucalipto em cenários presente e futuro

Essa abordagem foi subdividida em quatro etapas centrais: (1) extração, pré-processamento e compilação dos dados de entrada do modelo, (2) remoção/seleção dos preditores, (3) treinamento e espacialização de áreas susceptíveis a danos econômicos do presente e futuro, e (4) exibição dos resultados e mapas com os cenários presente e futuro (Figura 4).

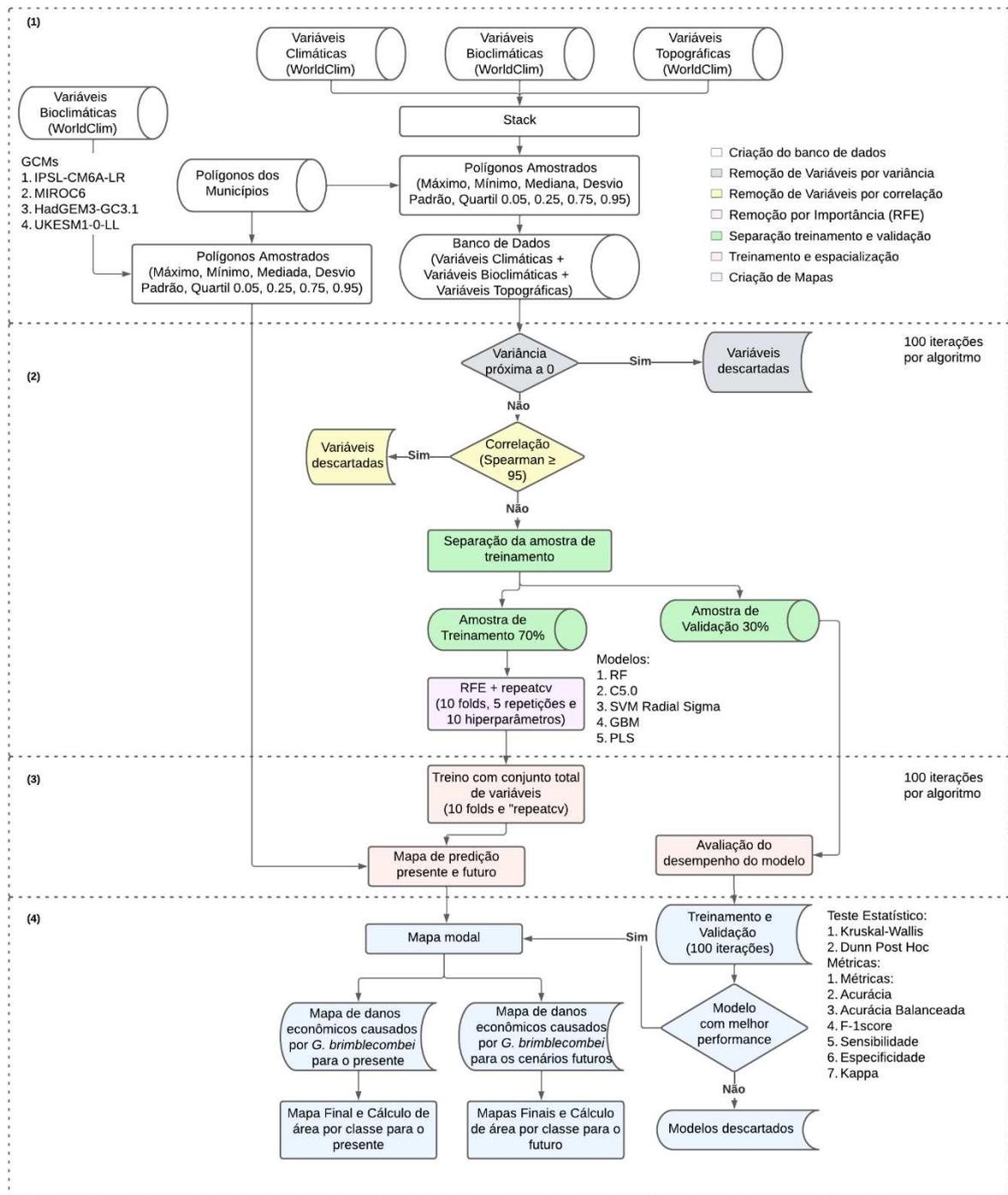


Figura 4 - Fluxograma metodológico do estudo.

4.2.3.1 Preditoras e pré-processamento dos dados dos cenários presente e futuro

Este estudo utilizou inicialmente 56 preditores ambientais no processamento de dados: 36 preditores climáticas (temperatura máxima, mínima e precipitação média), 19 preditores bioclimáticas e 1 preditor topográfica (Tabela 1). As

informações foram obtidas da base de dados do WorldClim, versão 2.1 com resolução espacial de 30 segundos de arco ($\sim 1 \text{ Km}^2$), abrangendo o intervalo temporal de 1970 a 2000 (Fick e Hijmans, 2017).

Tabela 1 - Dados de entrada para a seleção dos preditores utilizados na modelagem dos cenários atuais e futuros.

ID	Tipo	Código	Descrição
01		BIO1	Temperatura Média Anual (°C)
02		BIO2	Intervalo médio diurno (°C)
03		BIO3	Isotermidade (BIO2/BIO7) (* 100) (°C)
04		BIO4	Sazonalidade da temperatura (desvio padrão * 100) (°C)
05		BIO5	Temperatura máxima do mês mais quente (°C)
06		BIO6	Temperatura mínima do mês mais frio (°C)
07		BIO7	Faixa anual de temperatura (BIO5-BIO6) (°C)
08		BIO8	Temperatura média do trimestre mais chuvoso (°C)
09		BIO9	Temperatura média do trimestre mais seco (°C)
10	Bioclimáticas	BIO10	Temperatura média do trimestre mais quente (°C)
11		BIO11	Temperatura média do trimestre mais frio (°C)
12		BIO12	Precipitação anual (mm)
13		BIO13	Precipitação do mês mais chuvoso (mm)
14		BIO14	Precipitação do mês mais seco (mm)
15		BIO15	Sazonalidade da precipitação (Coeficiente de Variação) (mm)
16		BIO16	Precipitação do trimestre mais úmido (mm)
17		BIO17	Precipitação do trimestre mais seco (mm)
18		BIO18	Precipitação do trimestre mais quente (mm)
19	BIO19	Precipitação do trimestre mais frio (mm)	
20	Topográfica	ELEV	Elevação (m)
21-32		Tmin	Temperatura mínima mensal (°C)
33-44	Climáticas	Tmax	Temperatura máxima mensal (°C)
45-56		Prec	Precipitação mensal (mm)

Conduziu-se o processo de extração dos valores estáticos máximo, mínimo, mediana, desvio padrão (SD) e dos quartis 0,05, 0,25, 0,75 e 0,95 para cada preditor em cada polígono analisado. A operação foi realizada por meio da função "*supercells*" do pacote *supercells* na linguagem de programação/software (Nowosad e Stepinski, 2022). Como resultados, foram obtidas 448 diferentes informações para cada polígono. Nesse conjunto de dados, foram incluídas as informações de danos econômicos (sem significância ou negativo), sendo estabelecido como a base para a modelagem das previsões do cenário presente utilizando técnicas de *machine learning*.

Para os cenários futuros, o procedimento foi repetido usando como base quatro modelos climáticos globais (GCMs) disponibilizados pelo Painel

Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC). Esses modelos incluem: (1) MIROC6 desenvolvido de forma cooperativa pelo *Center for Climate System Research*, a *University of Tokyo*, o *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology* (JAMSTEC), e o *National Institute for Environmental Studies* (NIES) (Hajima *et al.*, 2020), (2) IPSL-CM6A-LR elaborado pelo *Institut Pierre-Simon Laplace* (Boucher *et al.*, 2020), o (3) UKESM1-0-LL e o (4) HadGEM3-GC31-LL, ambos desenvolvidos pelo *Met Office Hadley Centre/Reino Unido* (Tang *et al.*, 2023; Jones, 2023). A escolha desses modelos foi baseada na recomendação de Karger *et al.* (2017).

Para cada GCM, aplicamos dois cenários socioeconômicos compartilhados (*Shared Socio-economic Pathways* - SSPs): SSP 2-4.5 e SSP 5-8.5. Esses cenários foram desenvolvidos combinando as Vias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs) e as Vias de Concentração Representativa (RCPs), e desempenham um papel crucial nas projeções climáticas futuras. O cenário SSP2-4.5 adota uma trajetória de forçamento radiativo intermediário, buscando a estabilização em $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ até 2100. Isso é alcançado por meio do uso de tecnologias e estratégias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Por outro lado, o SSP5-8.5 destaca-se como um cenário de alto forçamento radiativo, buscando a estabilização em $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ até o final do século, caracterizado pelo aumento das emissões de GEE. Avaliamos esses cenários em três períodos de tempo distintos: 2041–2060, 2061–2080 e 2081–2100.

4.2.3.2 Seleção dos preditores

Para selecionar os preditores de maior importância para os algoritmos analisados, foi utilizado um processo de mineração de dados dividido em três etapas sequenciais: (1) remoção preditores com variância próxima a zero, (2) remoção pela correlação dos preditores e (3) avaliação da importância dos preditores. Na primeira etapa, removemos os preditores com variância próxima ou igual a zero (1) utilizando a função “*nearZeroVar*” pacote *caret* no software R. Essa remoção é necessária porque os preditores com variação baixa ou nula entre seus valores podem apresentar uma contribuição insignificante para a modelagem gerando somente aumento do tempo de treinamento do modelo final (Paes *et al.*, 2023; Mello, *et al.*, 2022). Os

preditores remanescentes deste processo foram usadas como entrada na etapa 2 (Figura 5).

Na segunda etapa, avaliou-se a correlação entre os preditores (2), através da função “*findCorrelation*” do pacote *caret* (Kuhn, 2008). O coeficiente de correlação de Spearman foi adotado como parâmetro estatístico para quantificar e identificar pares de preditores com uma correlação igual ou superior a 95%. Os pares de preditores que ultrapassaram esse limiar foram sujeitos a uma análise posterior quanto à correlação com os demais preditores do estudo. Aquele que apresentaram uma soma de correlação absoluta mais elevada em comparação com sua dupla de alta correlação foi descartado nesta etapa. Os preditores restantes avançaram para a terceira etapa do processo (Figura 5).

O algoritmo “*Recursive Feature Elimination (RFE)*” constitui a terceira etapa da seleção de preditores. O RFE realiza uma avaliação da importância individual do preditor em cada um dos algoritmos avaliados, classificando-os com base no índice de importância específico para o contexto analisado. Posteriormente, ocorre a remoção iterativa do preditor menos relevante, seguida por um reajuste do modelo. O processo é repetido diversas vezes até determinar o conjunto ideal de preditores para cada um dos modelos. A função “*Recursive Feature Elimination (RFE)*” do pacote *caret* foi executada no *software R* (Kuhn e Johnson, 2013).

Neste estudo, o RFE foi empregado no conjunto de preditores selecionado na etapa anterior (Figura 5). O número mínimo de preditores por conjunto foi estabelecido em 5, enquanto o máximo correspondeu ao número de preditores que passaram da segunda fase. No intervalo de 5 a 20, o incremento entre os conjuntos foi de 1 unidade, e a partir desse ponto, o incremento passou a ser de 5 unidades até atingir o valor 50. O conjunto ideal de preditores foi selecionado por meio da técnica de *repeated cross-validation (repeatedcv)* composto por 10 *folds*, 5 repetições e a avaliação de 10 valores distintos para os hiperparâmetros internos de otimização de cada algoritmo avaliado (*tuneLength*) (Tabela 2).

Cinco algoritmos de aprendizado de máquina foram empregados: *Random Forest (RF)*, *C5.0*, *Support Vector Machine Radial Sigma (SVM)*, *Gradient Boosting Machine (GBM)* e *Partial Least Squares (PLS)*. A métrica F1-score foi adotada para determinar o subconjunto de preditores com melhor desempenho em cada modelo. O subconjunto ideal resultante da seleção foi posteriormente aplicado no treinamento de cada um dos algoritmos.

Tabela 2 – Hiperparâmetros dos algoritmos utilizados no estudo em ambiente de software R.

Algoritmo	Hiperparâmetros
<i>Random Forest (RF)</i>	<i>mtry</i>
C5.0	<i>trials, model e winnow</i>
SVM Radial Sigma	<i>cost e kernel</i>
<i>Partial Least Squares (PLS)</i>	<i>ncomp</i>
<i>Gradient Boosting Machine (GBM)</i>	<i>ntrees, interaction.depth, shrinkage e n.minobsinnode</i>

4.2.3.3 Treinamento do modelo

Iniciando a etapa de seleção de preditores por importância (RFE), realizou-se divisão aleatória do conjunto de dados em subconjuntos de treinamento e validação. Nesse processo, 70% da amostra foram destinados para treinamento e 30% foram reservados para validação (*hold-out-test*) (Kuhn, 2008). Essa divisão foi realizada por meio da função “*createDataPartition*” disponível no pacote *caret* (Kuhn, 2023). A abordagem permite avaliar o comportamento do modelo e sua capacidade de generalização em conjuntos de dados não empregados no treinamento.

Para cada algoritmo, realizou-se o treinamento de um modelo próprio, empregando o subconjunto específico de preditores considerado ideal durante a etapa de seleção por importância (RFE). Com o intuito de otimizar o desempenho desses modelos gerados pelos algoritmos, adotou-se a técnica de *repeated cross-validation* (*repeatedcv*) com 10 *folds*, 5 repetições e a avaliação de 10 valores para cada um dos hiperparâmetros internos de otimização de cada algoritmo testado (*tuneLength*) (Tabela 2).

4.2.3.4 Avaliação da performance do modelo

A subdivisão dos dados, a seleção de preditores, assim como o treinamento e a validação, foram repetidos 100 vezes para cada algoritmo. Essa estratégia busca reduzir os impactos da aleatoriedade nos resultados (Kuhn; Johnson, 2013, Gomes *et al.*, 2019). Para testar o desempenho dos modelos, utilizamos a média de 100 interações em 6 diferentes métricas: Acurácia (Equação 1, Congalton, 1991), *Kappa* (Equação 2, Cohen, 1960), F1-score (Equação 4), Acurácia Balanceada (Equação 5); Sensibilidade (Equação 6), e Especificidade (Equação 7).

A acurácia quantifica o grau de proximidade entre os valores reais e as saídas do classificador, representando a proporção de previsões corretas sobre o número total de instâncias testadas (Equação 1). Por sua vez, o Índice Kappa (Equação 2) avalia a concordância entre os dados classificados e os dados de referência, indicando o grau de concordância entre esses conjuntos (Cohen, 1960).

$$Acurácia = \frac{VP + VN}{VP + FN + VN + FP} \quad (1)$$

$$Kappa = \frac{n \sum_{i=1}^C n_{ii} - \sum_{i=1}^C n_{i+} + n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^C n_{i+} + n_{+i}} \quad (2)$$

Onde: n_{ii} = valor na linha i e na coluna i ; n_{i+} = a soma da linha i ; n_{+i} = a soma da coluna i da matriz de confusão; n = o número total de amostras; e C = número total de classes.

A escala de avaliação do Índice Kappa varia de -1 a 1. Quando o índice atinge ou supera 0,81, sugere-se que o modelo apresenta um desempenho consistente em termos de concordância com os dados de referência. Pontuações na faixa entre 0,21 e 0,80 indicam um desempenho moderado a muito bom, enquanto valores inferiores a 0,2 denotam desempenho insatisfatório (Landis e Koch, 1977).

As métricas F1-score (Equação 4) e acurácia balanceada (Equação 5) foram incorporadas para avaliar o impacto do desbalanceamento do conjunto de dados no desempenho dos modelos. O F1-Score destaca o equilíbrio entre precisão e sensibilidade, enquanto a acurácia balanceada enfatiza a igualdade de desempenho entre as classes (Paiva *et al.*, 2023; Matta, 2021).

$$Precisão = \frac{VP}{VP + FP} \quad (3)$$

$$F1 - score = 2 \times \frac{Precisão \times Sensibilidade}{Precisão + Sensibilidade} \quad (4)$$

$$Acurácia\ Balanceada = \frac{1}{2} \left(\frac{VP}{VP + FN} + \frac{VN}{VN + FP} \right) \quad (5)$$

A sensibilidade (Equação 6) e a especificidade (Equação 7) foram calculadas para avaliar o desempenho do modelo em relação à identificação de positivos e negativos, respectivamente. A sensibilidade está associada a erros de omissão e a especificidade a erros de comissão (Giannini *et al.*, 2012).

(6)

$$\text{Sensibilidade} = \frac{VP}{VP + FN}$$

$$\text{Especificidade} = \frac{VN}{VN + FP} \quad (7)$$

Onde: VP é a quantidade de exemplos positivos classificados corretamente; FP é a quantidade de exemplos classificados incorretamente como positivos; VN é a quantidade de exemplos negativos classificados corretamente; e FN é a quantidade de exemplos incorretamente classificados como negativos.

As métricas de acurácia, F1-score, acurácia balanceada, sensibilidade e especificidade assumem valores em um intervalo de 0 a 1. Valores próximos a 1 indicam um desempenho satisfatório na classificação do conjunto de dados. Em contraste, valores próximos a 0 sugerem que o modelo possa precisar de melhorias para lidar de maneira mais eficaz com os dados.

Os resultados derivados das 100 iterações para cada algoritmo investigado foram resumidos em relação aos parâmetros de desempenho. A análise comparativa dos parâmetros foi realizada por meio do teste de Kruskal-Wallis e dos testes post-hoc de Dunn, com um nível de significância de 5%. A identificação do algoritmo superior foi conduzida com base nos parâmetros: F1-score, Acurácia Balanceada e Kappa.

4.2.3.5. Mapeamento das áreas com potencial de ocorrência de dano econômico causado por *G. brimblecombei* para os cenários presente e futuro

Após o ranqueamento dos modelos, foi selecionado aquele com melhor desempenho para a modelagem das áreas susceptíveis aos danos econômicos provocados pelo *G. brimblecombei*, abrangendo os cenários presente e futuro. O

resultado final consistiu na produção de mapas binários, distinguindo (0) áreas propícias à presença do *G. brimblecombei* e (2) áreas susceptíveis aos danos econômicos causados pelo *G. brimblecombei*.

Esses mapas resultaram de 100 iterações do algoritmo de melhor desempenho, com a avaliação do parâmetro F1-score. A consolidação desses mapas ocorreu por meio do cálculo da moda, identificando a classe mais frequente em cada polígono entre os 100 mapas. Para a avaliação da incerteza da previsão, registrou-se o número de ocasiões em que o algoritmo não previu a classe mais frequente em cada polígono, considerando todos os mapas gerados. Adicionalmente, a análise quantificou a distribuição das áreas por classe nas macrorregiões do país.

Na produção dos mapas, áreas atualmente utilizadas para atividades agropecuárias foram consideradas potencialmente aptas para a expansão da monocultura do eucalipto, alinhando-se à perspectiva do IBÁ (2022), que indica que a expansão do setor florestal ocorrerá preferencialmente em terras previamente convertidas. Os dados utilizados foram extraídos do mapa de cobertura e uso da terra do Brasil, referente ao ano de 2022, que faz parte da coleção 8 do projeto MapBiomass, com resolução espacial de 30 metros. As classes de interesse incluíram áreas ocupadas por pastagens, agricultura, e mosaicos de usos agropecuários. As quais foram convertidas do formato *raster* para polígonos. Na condução da análise, foram excluídos polígonos com área inferior a 1 km², considerando a resolução mínima dos preditores, que corresponde a aproximadamente 1 km².

Para os cenários futuros, os resultados foram obtidos por meio de 100 iterações do modelo que demonstrou melhor desempenho na modelagem do cenário referente ao presente. Nesse processo, a mesma metodologia de sintetização dos resultados gerados para o presente foi aplicada. Todo o processo foi executado por meio do software R, versão 4.3.1 (R Team, 2023).

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Análise dos questionários

A análise dos dados revelou a presença do *G. brimblecombei* em 285 municípios, abrangendo 15 estados brasileiros distribuídos por todas as cinco regiões do país (128 no Sudeste, 66 no Nordeste, 32 no Sul, 35 no Norte e 24 no Centro-

Oeste). Do número total identificado 153 municípios evidenciaram exclusivamente a presença da espécie, ao passo que 132 indicaram a sua presença associada a danos econômicos (Figura 5). As regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste concentraram um maior número de municípios com ocorrência de danos econômicos, enquanto as demais regiões exibiram um comportamento oposto.

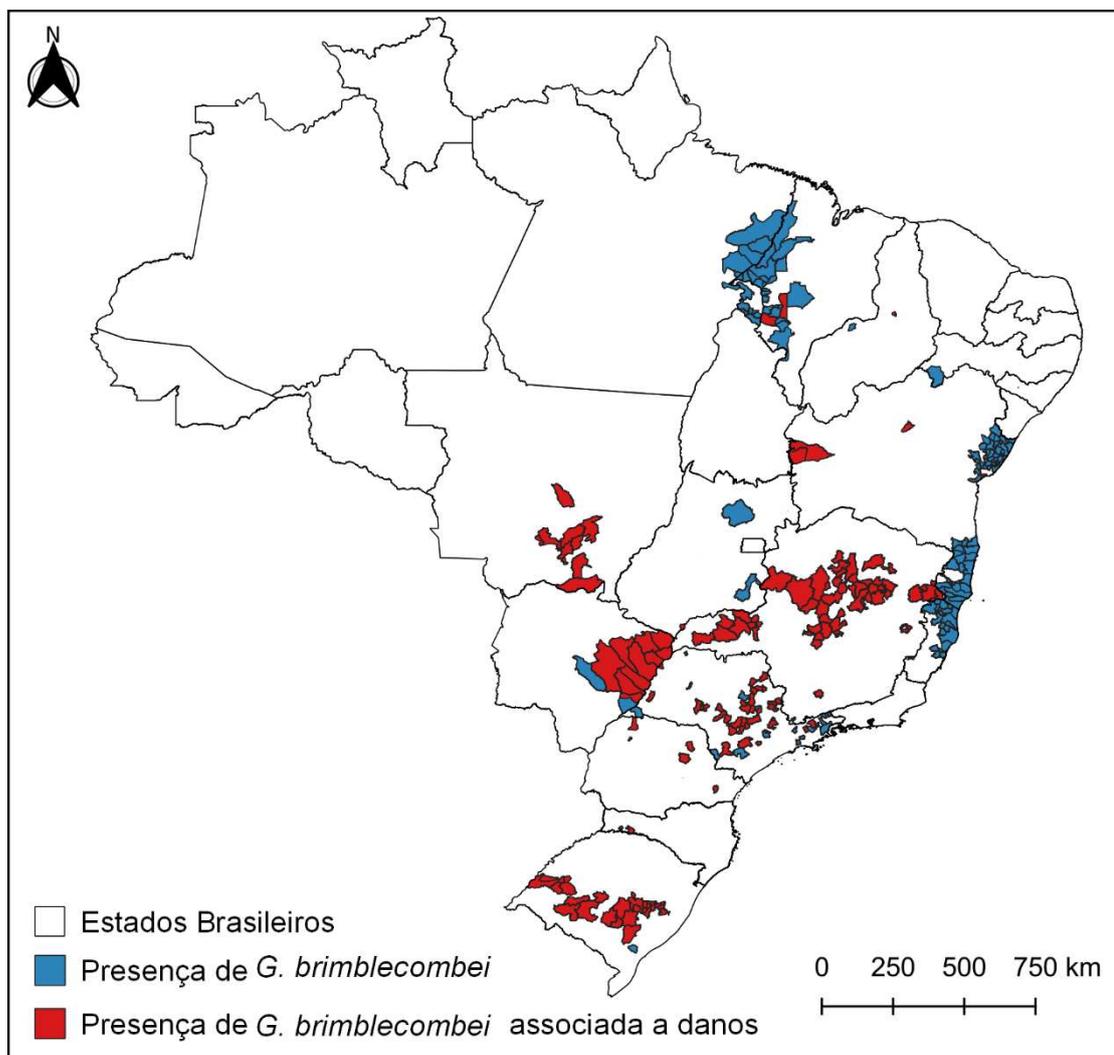


Figura 5 - Distribuição de municípios amostrados por classe: (1) presença de *G. brimblecombei*; (2) presença *G. brimblecombei* associada a danos econômicos.

Ao extrapolar as informações dos municípios para polígonos de silvicultura, identificou-se 7.749 polígonos com a presença do *G. brimblecombei*. Dentre esses, 2.543 polígonos estavam vinculados exclusivamente à detecção da espécie, enquanto em 5.206 casos os registros englobaram a sua presença associada a danos econômicos.

4.3.2 Desempenho dos modelos

Os resultados de classificação evidenciam a capacidade dos cinco modelos em prever áreas susceptíveis à incidência de danos econômicos causados por *G. brimblecombei* (Tabela 3). Os modelos exibiram acurácia global variando entre 0,9539 e 0,9938 e um índice Kappa na faixa de 0,8939 a 0,9859, caracterizando um desempenho de classificação excelente conforme a escala proposta por Landis e Koch (1977).

Tabela 3 - Performance dos modelos, com valores médios de Acurácia, Acurácia Balanceada, Sensibilidade, Especificidade, F1-score e Kappa.

Algoritmo	Acurácia	Acurácia Balanceada	Sensibilidade	Especificidade	F1-score	Kappa
RF	0,9938a	0,9920b	0,9871b	0,9970a	0,9905a	0,9859a
GBM	0,9937b	0,9921a	0,9874b	0,9969c	0,9904b	0,9858b
C5.0	0,9935b	0,9918b	0,9866b	0,9969b	0,9901b	0,9853b
SVM Radial Sigma	0,9929b	0,9917b	0,9884a	0,9951c	0,9892b	0,9829b
PLS	0,9539b	0,9413b	0,9047b	0,9779c	0,9279b	0,8940b

* Letras iguais minúsculas na mesma coluna (entre modelos) não diferem entre si significativamente a 5% de probabilidade de acordo com teste de Kruskal-Wallis.

As métricas que levam em consideração o desequilíbrio das classes, F1-score e acurácia balanceada variaram de 0,9279 a 0,9905 e 0,9413 a 0,9920, respectivamente. Esses resultados evidenciam uma performance consistente, mesmo diante do desequilíbrio das classes. Em relação a sensibilidade e especificidade, é relevante observar que os valores de especificidade foram superiores aos de sensibilidade, indicando que os erros de omissão foram mais comuns do que erros de comissão durante a previsão.

O modelo RF foi estatisticamente superior, sendo classificado no grupo "a" para as métricas de acurácia, especificidade, F1-score, e Kappa, destacando-se significativamente dos demais modelos (Tabela 3). Para essas métricas, não foram observadas diferenças significativas entre os modelos GBM, SVM Radial Sigma e PLS. Entretanto, para a especificidade, observou-se um padrão distinto. O GBM e o SVM Radial Sigma destacaram-se em relação às métricas de acurácia balanceada e sensibilidade, respectivamente, apresentando resultados superiores e diferenças estatisticamente significativas em relação aos demais modelos.

Com base em todos os resultados, o modelo RF foi selecionado na modelagem dos cenários presente e futuro uma vez que obteve o melhor desempenho na previsão de áreas susceptíveis à ocorrência de danos econômicos causados pelo *G. brimblecombei* para a maioria das métricas.

4.3.3 Seleção dos preditores

O modelo RF incluiu 20 preditores, sendo eles derivados de dados bioclimáticas e mensais de precipitação e temperatura máxima e mínima. Dentre esses preditores, cinco apresentaram uma importância superior a 55% para a modelagem. Desta forma, os principais preditores selecionados foram o quartil 0,05 da precipitação do trimestre mais seco (q05.BIO17), a máxima temperatura máxima do mês de maio (max.tmax_05), a máxima temperatura máxima do mês de setembro (max.tmax_09), a máxima temperatura mínima no mês de novembro (max.tmin_11) e o mínimo da precipitação no mês de novembro (min.prec_11) (Figura 6).

Os resultados demonstram que os preditores de precipitação e de temperatura mensal apresentam maior importância na modelagem. O preditor de sazonalidade mínima da temperatura (min.BIO04) foi identificado como o de menor para o modelo (Figura 6). Além disso, o RF não incluiu preditores derivados de informações topográficas. Esses foram incorporados apenas aos modelos PLS, C5.0 e SVM Radial Sigma, com diferentes valores de importância.

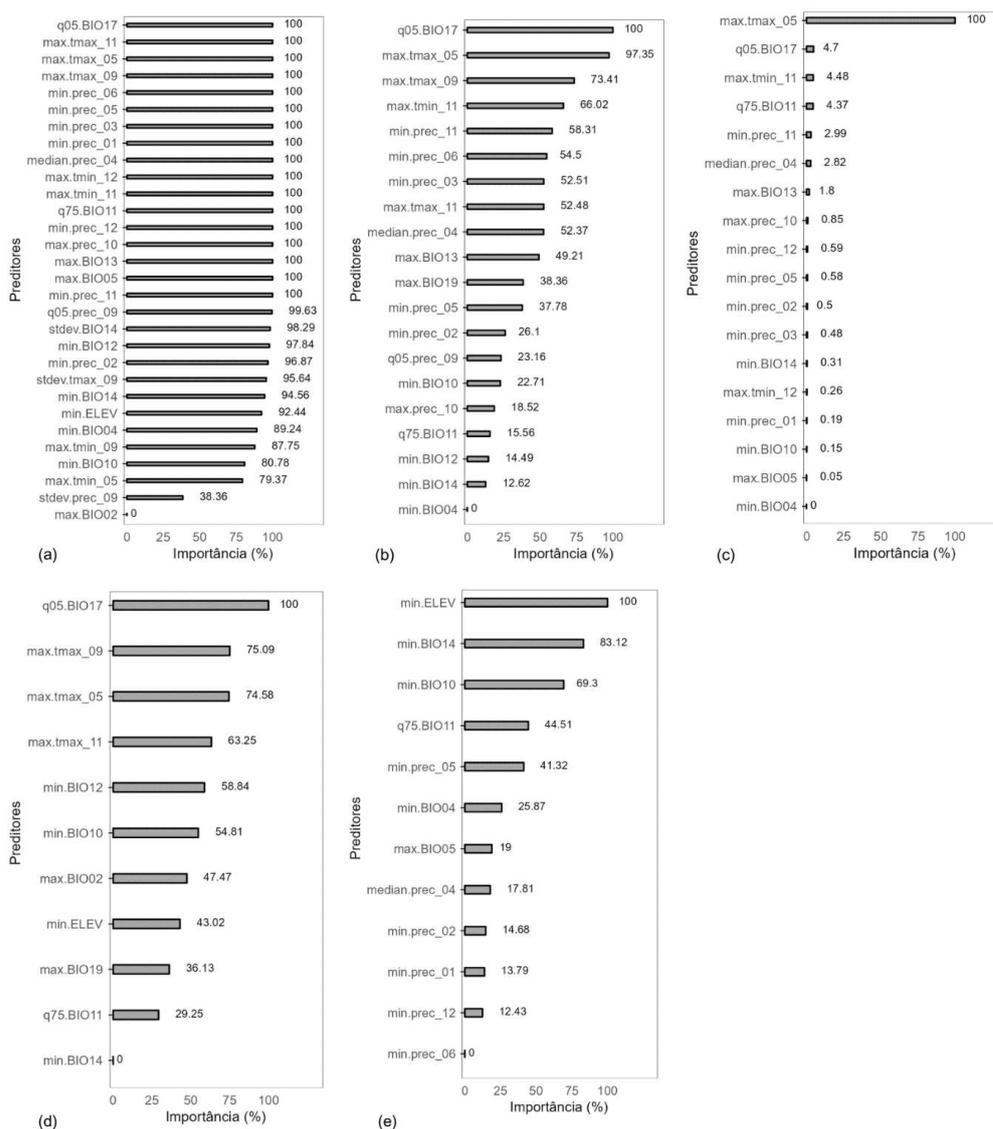


Figura 6 - Importância relativa dos preditores para cada um dos modelos: (a) C5.0, (b) RF, (c) GBM, (e) SVM Radial Sigma, (d) PLS.

De modo geral, os modelos RF, GBM, C5.0 e SVM Radial Sigma atribuíram as maiores pontuações a um conjunto de preditores semelhantes, enquanto para o PLS esse conjunto divergiu (Figura 6). Os preditores associados às informações de precipitação mensal predominaram na composição da maioria dos modelos, seguidos pelas preditores bioclimáticas.

Os modelos, C5.0, RF e GBM alcançaram melhor desempenho ao empregar conjuntos que incluíam um maior número de preditores, 30, 20 e 18 respectivamente. Por outro lado, SVM Radial Sigma e PLS obtiveram resultados inferiores ao utilizar conjuntos compostos por um menor número de preditores, 11 e 12 respectivamente (Figura 6).

4.3.4 Distribuição potencial de áreas susceptíveis a danos econômicos causados por *G. brimblecombei* no cenário presente

As áreas susceptíveis aos danos econômicos causados por *G. brimblecombei* distribuem-se pelas cinco regiões brasileiras (Tabela 4). A área potencialmente susceptível aos danos corresponde a 992.047 km² (42,10%), enquanto as áreas propícias apenas a ocorrência da espécie totalizam 1.364.545 km² (57,90%). As regiões Sudeste (50,53%) e Sul (76,23%) concentram as maiores extensões de áreas susceptíveis aos danos econômicos, enquanto Norte (15,95%) e Nordeste (1,79) exibem as menores extensões. No Centro-Oeste (52,21%), há uma distribuição quase equivalente entre as classes.

Tabela 4 - Estimativa da distribuição geográfica potencial de áreas susceptíveis a ocorrência de danos econômicos de *G. brimblecombei* para o cenário presente (km²).

Região	Classe		Total
	Áreas susceptíveis a ocorrência do inseto-praga	Áreas susceptíveis aos danos econômicos	
Sudeste	Área (km ²)	91.067	467.736
	Área (%)	19,47	
Sul	Área (km ²)	54030	227.561
	Área (%)	23,74	
Centro Oeste	Área (km ²)	328.455	687.231
	Área (%)	47,79	
Nordeste	Área (km ²)	439.777	523.264
	Área (%)	84,05	
Norte	Área (km ²)	463.372	471.794
	Área (%)	98,21	
Total	Área (km ²)	1.376.701	2.377.588
	Área (%)	57,90	

Na região Sudeste, as áreas de susceptibilidade a danos predominam nos estados de Minas Gerais e São Paulo (Figura 7a). Ao avançar para a região Sul, observa-se que sua maior extensão demonstra susceptibilidade à ocorrência de

danos. No Centro-Oeste, a aptidão concentra-se no sul de Goiás, centro-sul do Mato Grosso, abrangendo parte do norte, nordeste, extremo sudeste, além de fragmentos do centro-norte e do pantanal do Mato Grosso do Sul. Nas regiões Norte e Nordeste, as áreas susceptíveis a danos econômicos ocuparam pequenas extensões nos estados do Piauí, Maranhão, Roraima e Tocantins. No entanto, na Bahia, essas áreas demonstraram uma significância maior em termos de extensão.

A análise dos resultados revelou que a maior parte da confusão do modelo ocorreu na classe correspondente as áreas com susceptibilidade à presença da espécie sem associação (Figura 7b). Essas áreas estão distribuídas por todo o território, e não apresentam um padrão bem definido. Da extensão total de erro, apenas 7,0% da área apresentou valores superiores a 26%. Esses valores concentraram-se nos limites entre o Rio de Janeiro, Minas Gerais e o Espírito Santo, no norte do Mato Grosso e no centro-oeste de Santa Catarina.

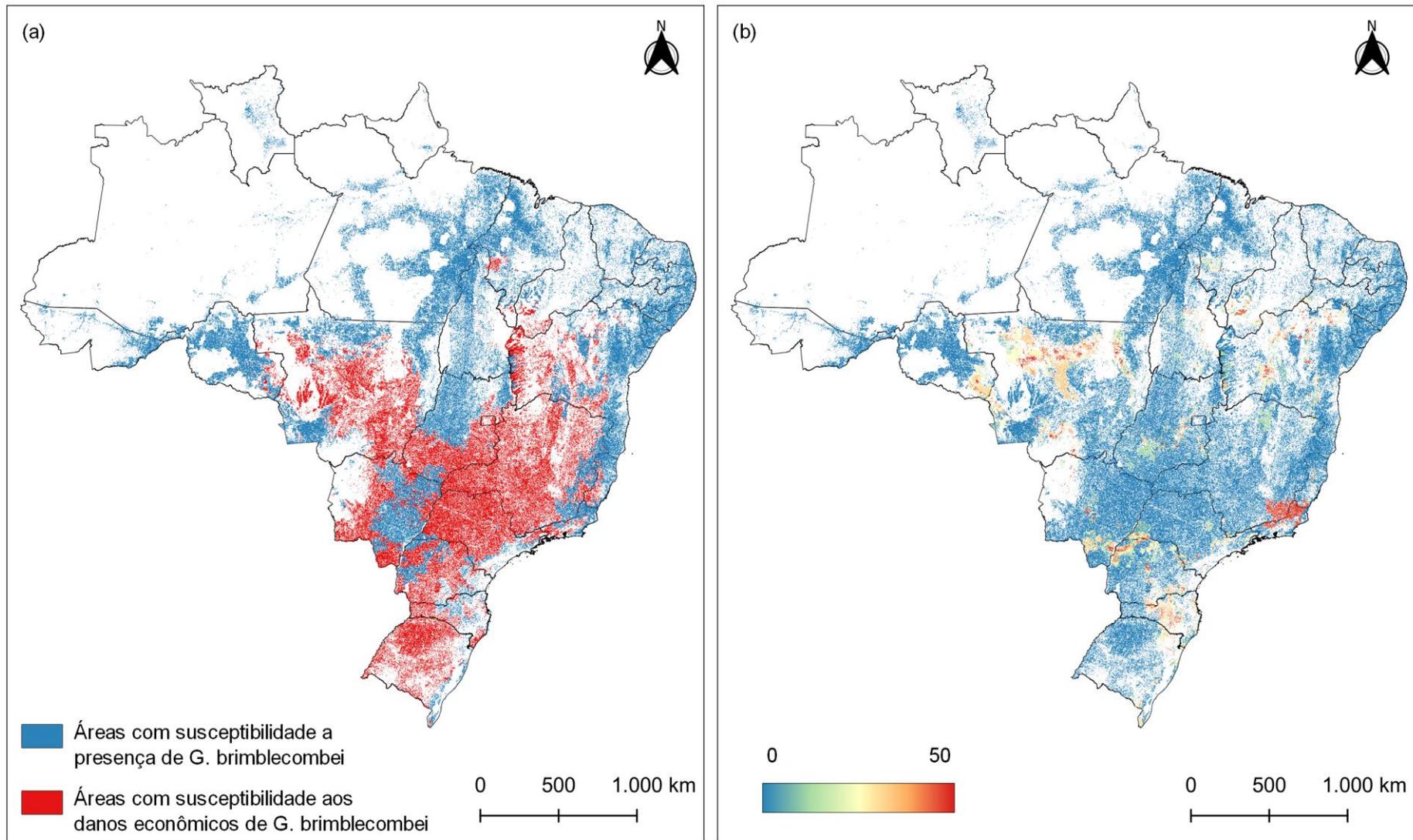


Figura 7 - (a) Distribuição potencial prevista de danos econômicos de *G. brimblecombei* no território brasileiro para o cenário presente, (b) Mapa de erro de classificação para o modelo no cenário presente.

4.3.5 Distribuição potencial de áreas susceptíveis a danos econômicos causados por *G. brimblecombei* em cenários climáticos futuros

Os resultados indicam uma redução na extensão total das áreas susceptíveis aos danos econômicos causados pelo *G. brimblecombei*, com variações mais proeminentes no cenário de emissões mais elevadas (SSP585). Nos dois cenários analisados, as menores reduções foram observadas durante o período de 2041-2060, enquanto as maiores foram registradas entre 2081-2100, sugerindo uma tendência de diminuição gradual com o avanço das décadas (Tabela 5 e Figuras 8, 9, 10 e 11).

Tabela 5 - Estimativa da distribuição geográfica potencial de áreas susceptíveis a ocorrência de danos econômicos de *G. brimblecombei* para o modelo atual e diferentes modelos climáticos (km²).

Cenário Atual						
Cenário	Período	Áreas susceptíveis a presença		Áreas susceptíveis aos danos		Total
		(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	
-	Atual	1.376.701	57,90	1.000.886	42,10	2.377.588
MIROC6						
Cenário	Período	Áreas susceptíveis a presença		Áreas susceptíveis aos danos		Total
		(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	
SSP 245	41-60	1.518.648	63,87	858.940	36,13	2.377.588
	61-80	1.586.406	66,72	791.182	33,28	2.377.588
	81-100	1.650.528	69,42	727.060	30,58	2.377.588
SSP 585	41-60	1.590.966	66,92	786.622	33,08	2.377.588
	61-80	1.747.270	73,49	630.318	26,51	2.377.588
	81-100	1.856.759	78,09	520.829	21,91	2.377.588
IPSL-CM6A-LR						
Cenário	Período	Áreas susceptíveis a presença		Áreas susceptíveis aos danos		Total
		(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	
SSP 245	41-60	1.673.907	70,40	703.681	29,60	2.377.588
	61-80	1.741.407	73,24	636.181	26,76	2.377.588
	81-100	1.793.092	75,42	584.496	24,58	2.377.588

IPSL-CM6A-LR						
Cenário	Período	Áreas susceptíveis a presença		Áreas susceptíveis aos danos		Total
		(km²)	(%)	(km²)	(%)	
SSP 585	41-60	1.733.202	72,90	644.386	27,10	2.377.588
	61-80	1.847.473	77,70	530.115	22,30	2.377.588
	81-100	2.083.062	87,61	294.526	12,39	2.377.588
HadGEM3-GC3.1						
Cenário	Período	Áreas susceptíveis a presença		Áreas susceptíveis aos danos		Total
		(km²)	(%)	(km²)	(%)	
SSP 245	41-60	1.669.687	70,23	707.901	29,77	2.377.588
	61-80	1.776.175	74,70	601.413	25,30	2.377.588
	81-100	1.812.098	76,22	565.490	23,78	2.377.588
SSP 585	41-60	1.714.270	72,10	663.318	27,90	2.377.588
	61-80	1.917.006	80,63	460.582	19,37	2.377.588
	81-100	2.136.327	89,85	241.261	10,15	2.377.588
UKESM1-0-LL						
Cenário	Período	Áreas susceptíveis a presença		Áreas susceptíveis aos danos		Total
		(km²)	(%)	(km²)	(%)	
SSP 245	41-60	1.701.556	71,57	676.032	28,43	2.377.588
	61-80	1.789.848	75,28	587.740	24,72	2.377.588
	81-100	1.864.729	78,43	512.859	21,57	2.377.588
SSP 585	41-60	1.772.223	74,54	605.365	25,46	2.377.588
	61-80	1.923.861	80,92	453.727	19,08	2.377.588
	81-100	2.132.445	89,69	245.143	10,31	2.377.588

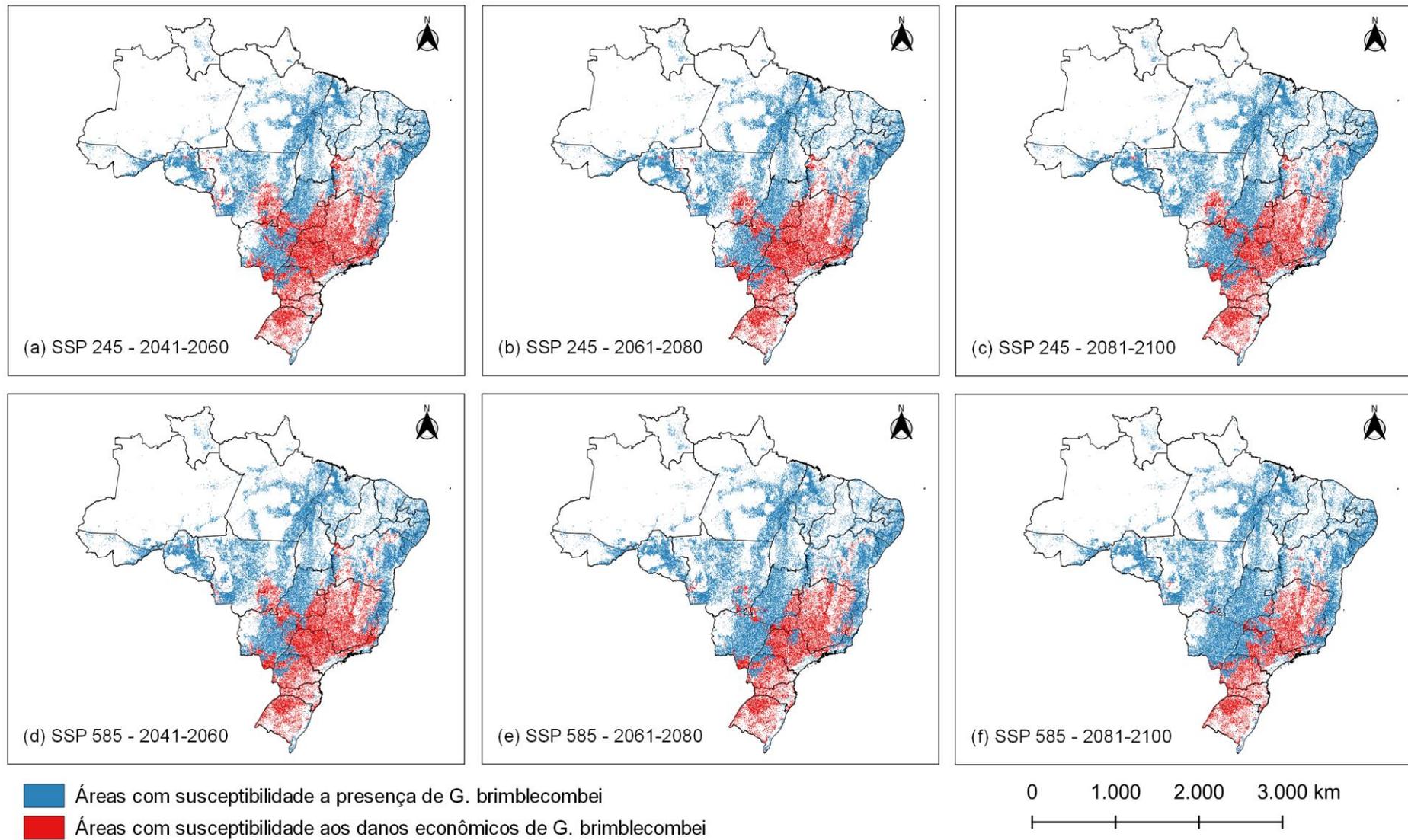


Figura 8 - Distribuição potencial prevista de danos econômicos de *G. brimblecombei* no território brasileiro para o modelo MIROC6 nos cenários: SSP245 (a) 2041-2060, (b) 2061-2080, (c) 2081-2100; e SSP585 (d) 2041-2060, (e) 2061-2080, (f) 2081-2100.

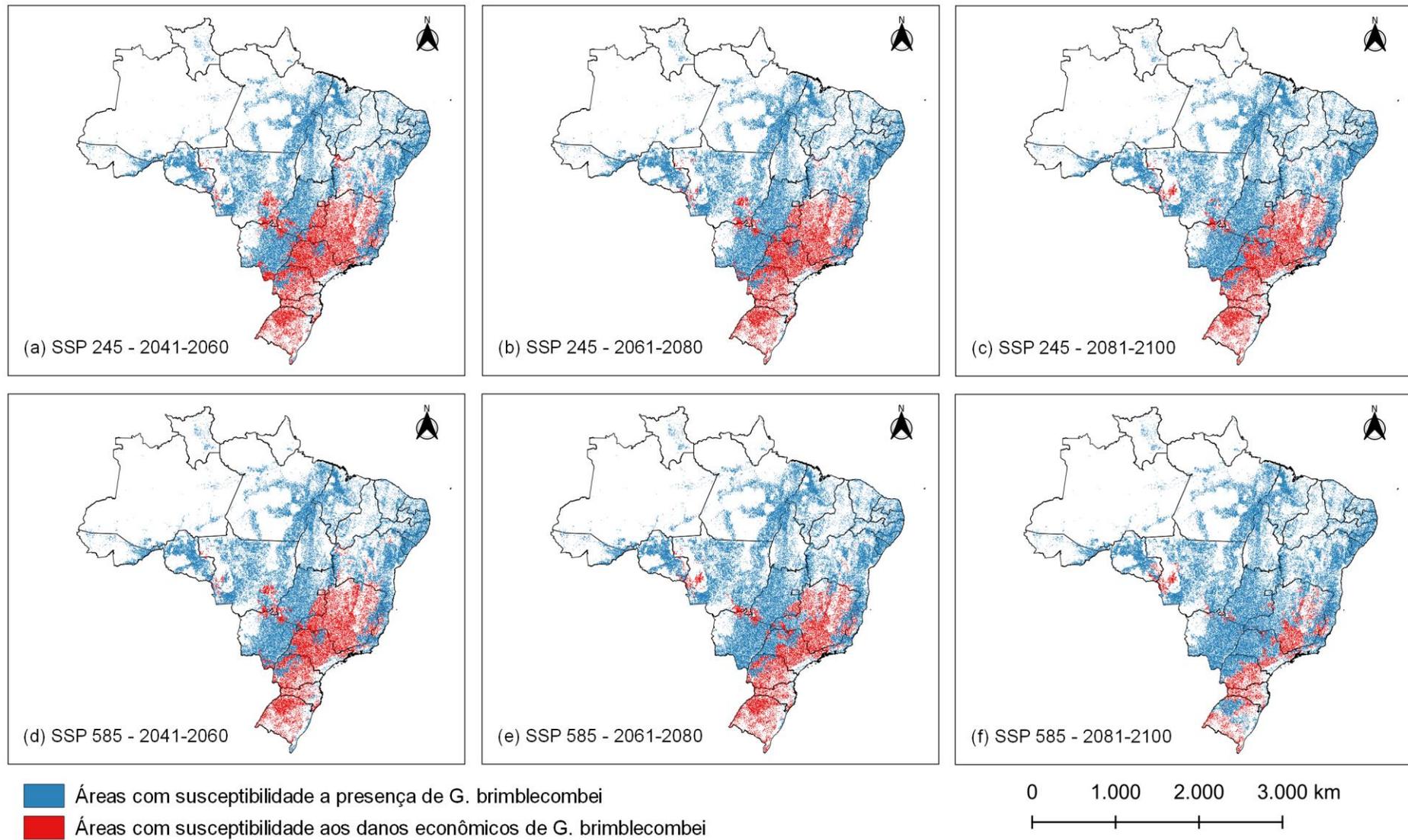


Figura 9 - Distribuição potencial prevista de danos econômicos de *G. brimblecombei* no território brasileiro para o modelo IPSL-CM6A-LR nos cenários SSP245 (a) 2041-2060, (b) 2061-2080, (c) 2081-2100; e SSP585 (d) 2041-2060, (e) 2061-2080, (f) 2081-2100.

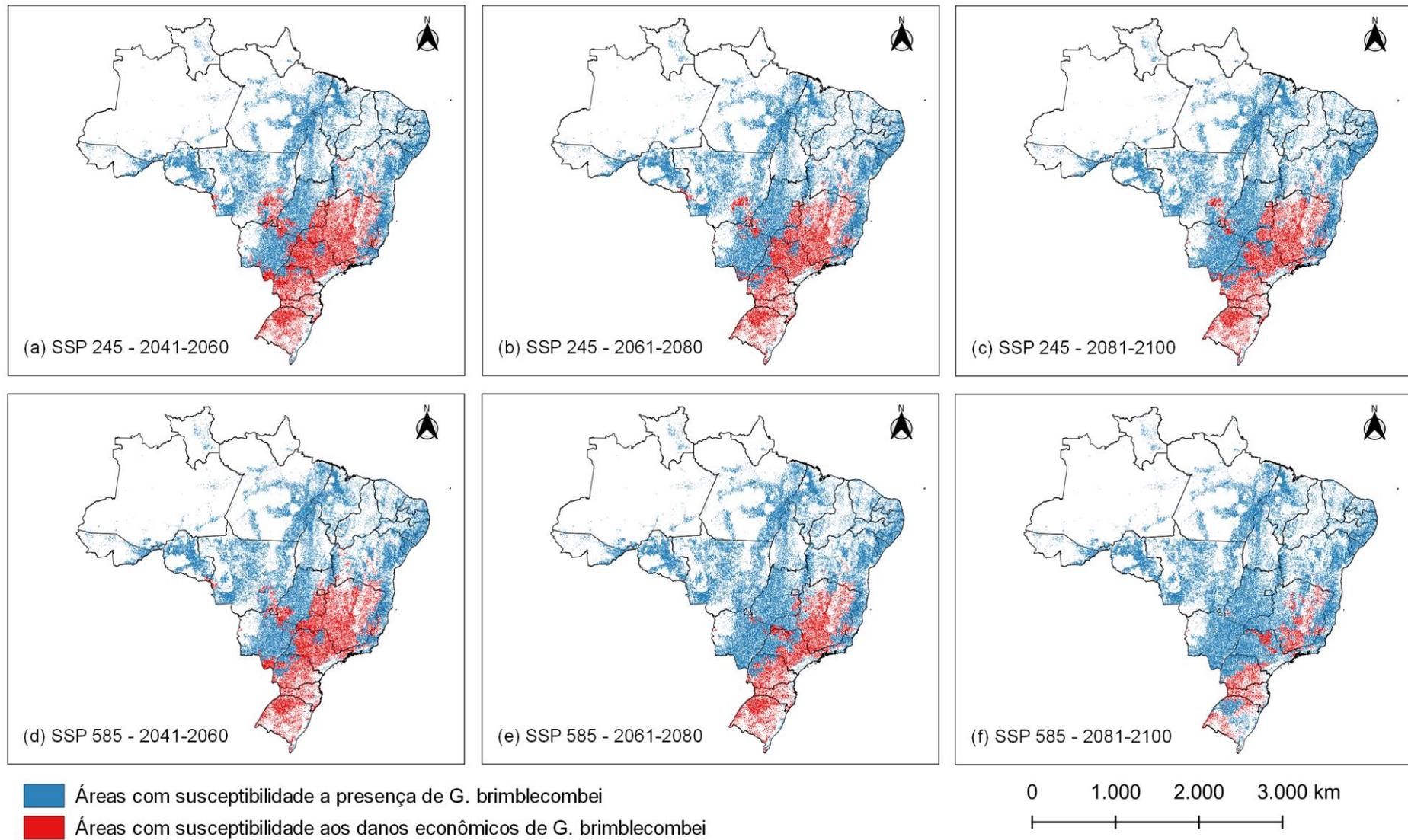


Figura 10 - Distribuição potencial prevista de danos econômicos de *G. brimblecombei* no território brasileiro para o modelo HadGEM3-GC3.1 nos cenários SSP245 (a) 2041-2060, (b) 2061-2080, (c) 2081-2100; e SSP585 (d) 2041-2060, (e) 2061-2080, (f) 2081-2100.

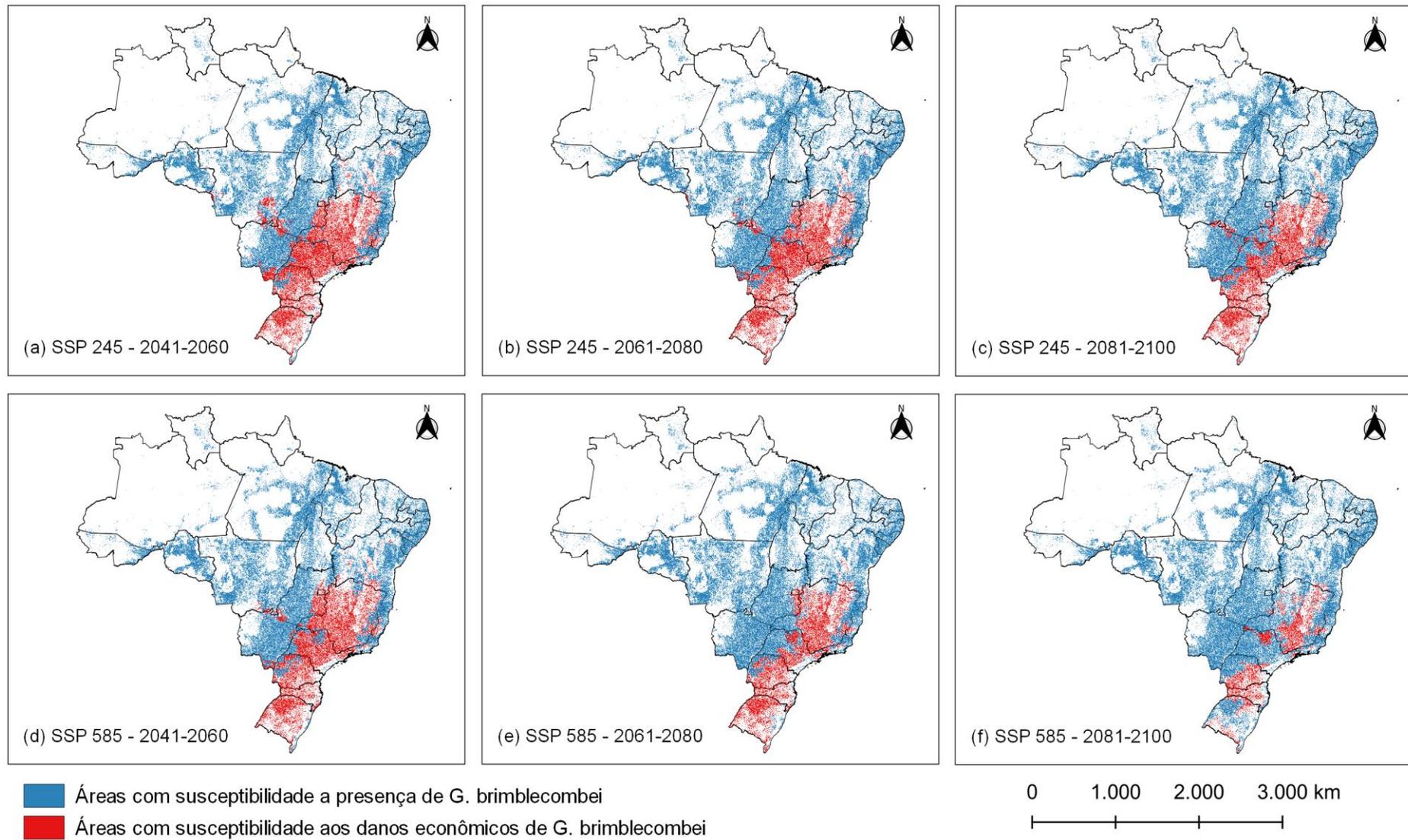


Figura 11 - Distribuição potencial prevista de danos econômicos de *G. brimblecombei* no território brasileiro para o modelo UKESM1-0-LL nos cenários SSP245 (a) 2041-2060, (b) 2061-2080, (c) 2081-2100; e SSP585 (d) 2041-2060, (e) 2061-2080, (f) 2081-2100.

Os quatro modelos climáticos exibiram um comportamento semelhante na distribuição geográfica das áreas pelo território brasileiro (Figuras 8, 9, 10 e 11). As reduções tiveram um impacto mais expressivo nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste ao longo de todos os períodos analisados. Na região Norte, por exemplo, as áreas susceptíveis chegaram a alcançar valores próximos a zero. Em termos proporcionais de área, observou-se a maior redução no Centro-Oeste desde as décadas iniciais.

O Sul e o Sudeste mantiveram a maior extensão de áreas susceptíveis aos danos econômicos (Figuras 8, 9, 10 e 11). Inicialmente, no período de 2041-2060 a redução foi pouco expressiva nessas regiões, porém, tornou-se mais intensa com o avanço das décadas. No Sudeste, Minas Gerais foi o estado que onde ocorreram as menores alterações, enquanto São Paulo foi o mais impactado pelas reduções.

O modelo MIROC6 demonstrou a maior proximidade com os valores do cenário presente, indicando uma menor redução na área susceptível aos danos econômicos (Tabela 5, Figura 8). Por outro lado, o modelo UKESM1-0-LL apresentou as maiores reduções, destacando-se pelo contraste significativo com o período de referência. O ápice das reduções foi identificado no cenário SSP585, com estimativas apontando que, entre 2081 e 2100, a área total susceptível alcançará 245.143 km², refletindo em uma redução de 31,79% em comparação com a área estimada para as condições atuais (Tabela 5, Figura 11). Os modelos IPSL-CM6A-LR e HadGEM3-GC3.1 exibiram reduções intermediárias.

4.4 DISCUSSÃO

4.4.1 Análise dos questionários

Os estados identificados na pesquisa concordam com os relatos prévios de ocorrência do *G. brimblecombei* no território brasileiro (Lemes *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021; Saliba *et al.*, 2019; Wilcken *et al.*, 2015). Entre os estados onde a distribuição da praga já foi registrada, o Rio de Janeiro foi o único em que não obtivemos informações nessa pesquisa. Durante o estudo, não foram observados registros do inseto-praga em nenhum novo estado.

A maioria dos municípios afetados pelos danos econômicos causados por este inseto-praga estão localizado nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste, onde se

concentram os principais polos de produção florestal de eucalipto. Por outro lado, nas regiões Norte e Nordeste, embora a espécie esteja presente, os níveis de dano econômico são atingidos com menor frequência.

4.4.2 Desempenho dos modelos

Neste estudo, empregamos cinco modelos de *ML*, incluindo RF, GBM, C5.0, SVM Radial Sigma e PLS, para prever a distribuição de áreas susceptíveis à ocorrência de danos econômicos causados pelo *G. brimblecombei*. Entre os cinco modelos avaliados, o RF demonstrou o melhor desempenho, sendo adequado para mapear os danos econômicos da praga. Apesar disso, os demais modelos alcançaram resultados ligeiramente menos precisos.

O destaque do RF em termos de desempenho é atribuído à sua habilidade em evitar o *overfitting*. A técnica *ensemble*, que envolve a combinação das previsões de diversas árvores individuais por meio da votação majoritária, é responsável pela eficácia desse processo (Breiman, 2001). Adicionalmente, o RF apresenta outras vantagens, como a capacidade de lidar com alta dimensionalidade e multicolinearidade dos dados, além de uma menor sensibilidade à qualidade das amostras de treinamento (Belgiu e Dragut, 2016).

Diversos estudos, ressaltam a eficácia do RF na modelagem da distribuição de espécies, quando comparado com outros algoritmos de *ML* (Sora *et al.*, 2023; Carter *et al.*, 2021; Rahman *et al.*, 2021; Mi *et al.*, 2017). O RF também tem demonstrado sucesso em lidar com problemas em bancos de dados desequilibrados (Mustofa *et al.*, 2023; Aburbeia e Ashqar, 2023). Além disso, Mi *et al.* (2017) enfatizam o potencial deste algoritmo na modelagem da distribuição de espécies em áreas subamostradas.

Houve variação entre os modelos no número de preditores selecionados durante a RFE. Os modelos baseados em árvore de decisão, RF e o C5.0, mostraram-se mais eficazes ao incluir uma maior quantidade de preditores e obtiveram um melhor desempenho. Orounla *et al.*, (2023) destacaram que o desempenho do RF e C5.0 tende a melhorar à medida que o número de preditores aumenta, uma tendência que não foi observada nos outros modelos.

A pesquisa conduzida por Carter *et al.* (2021) comparou seis algoritmos de *ML* na modelagem de distribuição de *Oncorhynchus mykiss* no noroeste de Montana,

obtendo o melhor resultado o algoritmo RF em relação aos demais avaliados. De forma análoga, Shiferaw *et al.*, (2019) investigaram a eficiência de cinco algoritmos no mapeamento da cobertura de *Prosopis juliflora* no ecossistema de terras áridas da região de Afar, Etiópia, e o RF também apresentou melhor desempenho. Em ambos, o GBM foi identificado como o segundo algoritmo de melhor performance, corroborando os resultados encontrados neste trabalho.

4.4.3 Seleção dos preditores

Os preditores ambientais surgem como ferramentas poderosas na análise da distribuição de espécies e na previsão das possíveis expansões de seus habitats a nível regional e global (Wei *et al.*, 2020). Neste estudo, um total de 56 preditores ambientais foram utilizados (36 preditores climáticos (temperatura máxima, mínima e precipitação média), 19 preditores bioclimáticas e 1 preditor topográfico). A seleção desses foi conduzida em três etapas, envolvendo a remoção por variância próxima a zero (1), remoção com base na correlação (2) e avaliação da importância dos preditores (3).

Com base nesse processo, os resultados indicaram que o quartil 0,05 da precipitação do trimestre mais seco (q05.BIO17), máximo da temperatura máxima do mês de maio (max.tmax_05), máximo da temperatura máxima do mês de setembro (max.tmax_09) máximo da temperatura mínima no mês de novembro (max.tmin_11) e mínimo da precipitação no mês de novembro (min.prec_11) foram os principais preditores que afetaram a distribuição das áreas com susceptibilidade aos danos econômicos causados pelo inseto-praga.

Portanto, a distribuição das áreas propensas aos danos econômicos é influenciada por fatores tanto de temperatura quanto de precipitação. Segundo Kocmánková *et al.* (2009) a temperatura é um dos fatores ambientais que exercem maior influência no comportamento, distribuição, desenvolvimento e reprodução dos insetos. Tal influência se deve ao fato de os insetos serem poiquilotérmicos, ou seja, a temperatura de seus corpos varia de acordo com a temperatura do ambiente.

Um estudo anterior realizado no interior, realizado do estado de São Paulo, sobre o limiar de temperatura para o *G. brimblecombei* destacou que o intervalo entre 10 e 27°C (mínima e máxima média) é o ideal para a sobrevivência do inseto no campo (Ferreira Filho, 2005). Barcik *et al.* (2023) verificaram que a faixa de temperatura ótima

para o desenvolvimento da espécie na região Sul, varia entre 20 e 25°C. Laudonia *et al.*, (2023) constataram que o início do período favorável para o aumento da densidade populacional ocorre quando a temperatura média ultrapassa os 20°C. Resultados obtidos em condições de laboratório corroboraram esses achados, indicando 26°C como a temperatura ótima para o desenvolvimento e reprodução dessa espécie (Firmino, 2004).

Nosso modelo demonstrou picos da ocorrência de danos em regiões onde as máximas temperaturas máximas de maio e setembro variam de 25.5 a 29.4°C (max.tmax_05) e 26.4 a 32.9°C (max.tmax_09), respectivamente. Esses meses representam o início e o final da estação seca em grande parte do Brasil, respectivamente (Nimer, 1989). Associado a isso, a faixa estimada para o quartil 0,05 da precipitação do trimestre mais seco foi de 7,3 a 146 mm (q05.BIO17).

Observa-se que a combinação de condições térmicas ideais nos meses de maio e setembro, juntamente com um baixo índice pluviométrico durante o período, é crucial para o desenvolvimento e reprodução do inseto, e conseqüente ocorrência de danos econômicos. Esses resultados corroboram com a pesquisa conduzida por Queiroz *et al.* (2013), na qual, ao modelarem a distribuição potencial do *G. brimblecombei* no Brasil e em escala global, identificaram a precipitação média no mês mais seco como o preditor de maior influência para o modelo.

No mês de novembro, as áreas susceptíveis aos danos econômicos estavam concentradas onde a máxima temperatura mínima oscilou entre 14,3 e 19,7°C (max.tmin_11) e a precipitação mínima variou entre 63,2 e 152 mm (min.prec_11). Observou-se que os danos econômicos são negativamente impactados pela elevação das máximas temperaturas mínimas e da precipitação mínima nesse mês. Novembro precede o verão, estação marcada por elevações nos volumes de chuva e temperatura. Ferreira Filho *et al.*, (2017) observou redução no crescimento populacional com o início do verão e aumento do volume de chuvas.

A precipitação exerce efeitos significativos na distribuição dos danos econômicos. A ação mecânica da chuva tem a capacidade de remover as conchas que protegem as ninfas do *G. brimblecombei* (Favaro, 2006). Oliveira *et al.* (2012) realizaram um experimento em mudas de *E. camaldulensis*, para avaliar os impactos da chuva artificial na redução da densidade populacional da espécie. Houve uma redução de 96% da infestação em 5 dias consecutivos de chuva. Os autores atribuem essa diminuição ao umedecimento das folhas que leva ao derretimento das conchas,

e resulta na exposição das ninfas a condições ambientais e predadores, ao mesmo tempo em que induz a ação de fungos entomopatogênicos.

A irregularidade das chuvas também pode estar associada à densidade populacional da espécie. Ferreira Filho (2005) observou que em períodos de precipitações regulares e bem distribuídas ao longo do tempo, a densidade se mantinha relativamente baixa. Contudo, à medida que as precipitações se tornavam mais irregulares, isso propiciava condições favoráveis para um aumento significativo na ocorrência da espécie.

Tuller *et al.* (2017) constataram que a densidade de ovos e ninfas em *E. camaldulensis* está significativamente relacionada aos efeitos da chuva. Houve aumento na densidade durante o período de estiagem, seguido de uma redução na estação chuvosa. Além disso, plantas sob estresse hídrico, tornam-se mais susceptíveis ao ataque de insetos devido a alterações fisiológicas que reduzem a produção de metabólitos secundários, essenciais para sua defesa (Yihdego *et al.*, 2018).

Nesse cenário, estabelece-se uma relação entre a temperatura e o volume pluviométrico. Segundo Eskafi e Fernandez (1990), esses fatores ambientais desempenham papéis interdependentes na fenologia e sobrevivência dos insetos. Ambientes com temperaturas mais amenas e menor precipitação propiciam a proliferação do *G. brimblecombei*, ao passo que condições mais quentes e chuvas frequentes exercem um efeito inibidor, resultando na diminuição da população dessa praga (Ferreira *et al.*, 2009).

4.4.4 Mapeamento potencial de áreas susceptíveis a danos econômicos causados por *G. brimblecombei* em cenários climáticos presentes e futuros

A potencial distribuição de áreas susceptíveis a danos econômicos de *G. brimblecombei*, no cenário climático presente, se concentra predominantemente nas regiões Sudeste, Sul e Centro Oeste, corroborando com os relatos de danos coletados durante a pesquisa. Essas áreas abrangem predominantemente as latitudes entre 10° e 40° e são distribuídas nas zonas climáticas tropicais e subtropicais, apresentando condições ambientais propícias para o desenvolvimento, reprodução e danos econômicos da espécie.

A zona de clima tropical é caracterizada por médias térmicas anuais que variam de 20 a 26°C, acompanhadas por um volume médio anual de precipitação situado na faixa de 2.000 a 3.000 mm, predominantemente concentrado no verão. Já nas regiões de clima subtropical, as médias anuais de temperatura oscilam de 14 a 22°C, e o índice pluviométrico varia de 1.250 a 2.000 mm (Mendonça e Danni-Oliveira, 2007). Pelo contrário, a maior parte das áreas situadas nas regiões norte e nordeste não apresentavam condições favoráveis aos danos econômicos da espécie, devido às elevadas temperaturas e ao volume de chuva.

Deve-se notar que determinadas regiões, tais como o litoral de Santa Catarina até o Rio de Janeiro, o noroeste do Paraná, o leste de Rondônia e o centro-oeste da Bahia, apresentam um comportamento climático distinto. Nesses locais, o clima é influenciado pelo relevo. O relevo, associado a outros fatores geográficos e estáticos, exerce influência nas condições de temperatura e precipitação (Cavalcanti, 2009; Nimer, 1989).

As áreas que registram maiores valores de erro estão situadas na divisa entre os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, além de abranger o norte do Mato Grosso, o sudoeste de São Paulo, e as região centro-norte de Santa Catarina. A limitada disponibilidade de informações sobre essas regiões no banco de dados pode ter impactado negativamente no processo de treinamento do modelo. Nas áreas compreendidas no centro-norte, leste e sudeste do estado do Mato Grosso do Sul, também é observado um elevado valor de erro, entretanto, este pode ser atribuído à presença de municípios vizinhos nos quais ambas as classes avaliadas foram registradas.

O treinamento de modelos em conjuntos de dados desbalanceados pode levar os classificadores a se ajustarem excessivamente à classe majoritária, o que aumenta a probabilidade de não capturar informações essenciais associadas à classe menos representativa. Essa falta de representação adequada da classe minoritária gera dificuldades para o algoritmo prevê-la com precisão, resultando em previsões enviesadas em favor da classe majoritária e tornando o modelo mais susceptível a erros (Malek *et al.*, 2023; Ghosh *et al.*, 2021).

Este estudo também previu a distribuição de áreas susceptíveis aos danos econômicos de *G. brimblecombei* em dois cenários climáticos futuros (SSP-2.45 e SSP-5.85) de 2041 a 2100 para os modelos climáticos globais (GCMs) IPSL-CM6A-LR, MIROC6, HadGEM3-GC31-LL e UKESM1-0-LL. As áreas com susceptibilidade a

danos demonstraram uma tendência de redução por todo território brasileiro, com as regiões remanescentes predominantemente concentradas no Sul e Sudeste do país.

Para os dois cenários climáticos analisados (SSP-2.45 e SSP-5.85), observou-se uma diferença pouco significativa nos períodos 2041-2060 e 2061-2080. As diferenças mais notáveis entre os cenários tornaram-se evidentes no período 2081-2100. De maneira geral, para o SSP-5.85 são projetadas reduções superiores nas áreas susceptíveis aos danos econômicos da praga, principalmente para o intervalo de 2081-2100. Isso se deve ao fato que SSP-5.85 prevê um aumento considerável nas concentrações de GEE na atmosfera, levando a um aquecimento global mais acentuado e a impactos mais severos das mudanças climáticas.

Também foram identificadas diferenças entre os GCMs. Os modelos UKESM1-0-LL e HadGEM3-GC3.1 demonstraram as maiores reduções nas áreas susceptíveis aos danos econômicos causados pela praga, ao passo que o MIROC6 revelou as menores reduções. Segundo Meehl *et al.* (2020), o UKESM1-0-LL e HadGEM3-GC3.1 exibem uma alta sensibilidade climática, indicando uma maior elevação na temperatura global em resposta ao aumento das emissões de GEE. Os autores indicam que projeções baseadas neles devem ser tratadas com cuidado, pois podem superestimar eventos de chuvas intensas. Nesse mesmo estudo, o MIROC6 apresentou o menor valor de sensibilidade.

As mudanças climáticas globais exercem impactos diretos e indiretos em insetos-praga. Os efeitos diretos se manifestam nos processos reprodutivos, de desenvolvimento, sobrevivência, dispersão e distribuição geográfica. Indiretamente, esses impactos influenciam as interações entre as pragas, seu ambiente e outras espécies de insetos, incluindo inimigos naturais (Skendžić *et al.*, 2021).

Os modelos climáticos preveem que a temperatura média do globo aumentará entre 1,4 e 5,7^o °C até o final do século presente (IPCC, 2023). Os insetos são organismos poiquilotérmicos; ou seja, a temperatura do ambiente influencia diretamente a temperatura de seus corpos, assim, revelam-se sensíveis às variações térmicas. Conforme indicado por Bale *et al.* (2002), o aumento da temperatura resulta em uma aceleração nos processos de consumo, desenvolvimento e locomoção dos insetos. Essa influência impacta fatores essenciais como fecundidade, sobrevivência, tempo de geração, tamanho populacional e distribuição geográfica. Diante das condições térmicas em constante elevação, espécies que não conseguem adaptar-se ou evoluir enfrentam desafios na manutenção de suas populações, ao passo que

outras exibem capacidade para se desenvolver e reproduzir-se de forma acelerada (Skendžić *et al.*, 2021).

No que se refere à precipitação, os modelos indicam uma redução na frequência dos eventos e um aumento em sua intensidade, o que favorece a ocorrência de secas e inundações (IPCC, 2023). Em períodos de chuvas intensas, pragas de pequeno porte, como pulgões, cigarrinhas, moscas brancas, ácaros, entre outras, podem ser eliminadas (Pathak *et al.*, 2012). Além disso, durante a ocorrência desses fenômenos, ovos e larvas de insetos podem ser arrastados, afetando a dinâmica de suas populações (Shrestha, 2019).

Lehmann *et al.* (2020) avaliaram as respostas às mudanças climáticas de 31 insetos fitófagos e constataram que 59% reduzirão a taxa de danos devido à contração da área de distribuição e à diminuição do desempenho fisiológico. Os pesquisadores sustentam que essas reduções ocorrem simultaneamente com a diminuição da densidade populacional de pragas e a retração do alcance geográfico, fatores que podem potencializar os efeitos observados. Outra pesquisa, envolvendo cerca de 1.100 espécies de insetos, indicou que as mudanças climáticas associadas ao aquecimento global levarão a extinção de aproximadamente 15% a 37% dessas espécies até o ano de 2050 (Thomas *et al.*, 2004).

Nas regiões onde a susceptibilidade a danos persiste as infestações podem apresentar maior severidade. A elevação da concentração CO_2 tende a aumentar as taxas de consumo das plantas por determinados grupos de pragas, devido às alterações na composição química das folhas (Lincoln, 1993). Algumas pragas apresentam comportamento compensatório, consumindo maior quantidade de tecido vegetal para obter um nível equivalente de nutrientes, o que resulta em danos mais acentuados às plantas (Hamilton *et al.*, 2005).

Outra possível consequência em decorrência das mudanças climáticas é a redução da eficácia dos agentes de controle biológico (Skendžić *et al.*, 2021). Segundo Gilman *et al.* (2010), os inimigos naturais específicos apresentam maior probabilidade de serem impactados pelas mudanças climáticas em comparação com os generalistas. A susceptibilidade é atribuída à sua menor capacidade em se adaptar às alterações espaciais e temporais associadas às comunidades hospedeiras.

Nesse cenário, os impactos em surtos do *G. brimblecombei* podem ser mais expressivos. O *Psyllaephagus bliteus*, principal inimigo natural deste inseto-praga, é um parasitoide específico, necessitando da presença do *G. brimblecombei*

para sobreviver e se reproduzir. De acordo com Cuello *et al.* (2017) existe uma relação de dependência entre a população desse inseto-praga e do seu inimigo natural. Além disso, as condições climáticas são determinantes para estabelecimento desse inimigo natural no campo (Barcik *et al.*, 2023; Ferreira Filho *et al.*, 2017).

As áreas com susceptibilidade a danos econômicos de *G. brimblecombei* reduziram em todos os contextos analisados como consequência às alterações climáticas, resultando na concentração da praga em regiões específicas. Diante desse cenário, torna-se necessário adaptar as técnicas de Manejo Integrado de Pragas (MIP), aprimorar os sistemas de monitoramento climático e de pragas, e empregar novas ferramentas de modelagem. Tais medidas são fundamentais para mitigar os impactos das pragas diante das mudanças climáticas, contribuindo para a sustentabilidade e produtividade dos plantios florestais do futuro.

Neste contexto, a expansão dos plantios florestais de *Eucalyptus* spp., considerando a ocorrência de danos econômicos ocasionados pelo *G. brimblecombei*, é indicado para as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do país. Essa indicação não se limita apenas ao cenário presente, mas também se estende a projeções futuras, onde o modelo prevê reduções na susceptibilidade das áreas aos danos desse inseto-praga.

4.4.5 Limitações nesta pesquisa e direções futuras

As espécies invasoras demonstram uma notável capacidade de se adaptar às novas condições ambientais (Lee e Park, 2020; Skendžićet *et al.*, 2021). De acordo com Walther *et al.* (2009), essas espécies costumam possuir uma faixa de tolerância bioclimática mais ampla em comparação com insetos nativos, permitindo que encontrem habitats adequados em uma variedade maior de ambientes. Os resultados deste estudo apresentaram uma tendência contrária, no entanto, não foram incluídos fatores como as condições físicas do habitat e a capacidade de adaptação das espécies invasoras como preditivos, elementos que podem impactar os modelos (Lee e Park, 2019). Além disso, não foram considerados os diferentes níveis de danos causados pela praga e as espécies específicas de *Eucalyptus* spp. implantadas. Portanto, estudos adicionais tornam-se essenciais para avaliar a distribuição dos danos do *G. brimblecombei* considerando esses fatores.

4.5 CONCLUSÕES

Todos os modelos testados foram considerados adequados para prever as áreas susceptíveis aos danos econômicos causados pelo *G. brimblecombei* nos cenários presente e futuro. No entanto, o RF obteve a melhor performance, exibindo resultados superiores em relação a maioria das métricas avaliadas. Os principais preditores ambientais que determinam a distribuição dessas áreas estão associados à temperatura e ao volume pluviométrico durante a estação seca (q05.BIO17, max.tmax_05, max.tmax_09), assim como, no período que antecede o verão (max.tmin_11; min.prec_11).

No cenário presente, as áreas susceptíveis a danos econômicos estão concentradas nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste, indicando condições de temperatura e precipitação favoráveis para a ocorrência desses danos. Essas regiões também são as que apresentam produção florestal mais intensiva. Por outro lado, no Norte e Nordeste, essas áreas são menos predominantes, o que sugere potencial para a expansão dos plantios nessas regiões.

O modelo prevê uma contração nessas áreas nos cenários climáticos futuros, principalmente no Norte, Nordeste e Centro-Oeste, as áreas remanescentes tendem a se concentrar no Sul e Sudeste do país. As mudanças climáticas poderão criar condições desfavoráveis para a ocorrência de danos econômicos causados pelo *G. brimblecombei*. Esse efeito é resultado do aumento previsto nas temperaturas médias e das mudanças nos padrões sazonais de chuva. O cenário caracterizado pelas previsões mais pessimistas em relação as emissões de GEE (SSP5-8.5) demonstrou as maiores reduções nas áreas susceptíveis aos danos econômicos.

Conforme indicado neste estudo, as principais regiões produtoras de eucalipto no país permanecem ameaçadas por este inseto-praga em cenários futuros. Neste contexto, as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste destacam-se com maior potencial de expansão dos plantios de eucalipto. Esses resultados podem orientar o desenvolvimento de estratégias de gestão climática nos programas de Manejo Integrado de Pragas, visando minimizar os prejuízos econômicos ocasionados pelo *G. brimblecombei*.

REFERÊNCIAS

ABURBEIAN; A. M.; ASHQAR, H. I.; Credit Card Fraud Detection Using Enhanced Random Forest Classifier for Imbalanced Data. *In: Proceedings of the 2023 International Conference on Advances in Computing Research (ACR'23)*, 1, 2023. **Proceedings** [...]. Suíça: Springer Nature, 2023. p. 605-616.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728. jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

BALE, J. S.; MESTRES, G. J.; HODKINSON, I. D.; AWMACK, C.; BEZEMER, T. M.; BROWN, V. K.; BUTTERFIELD, J.; BUSE, A.; COULSON, J. C.; FARRAR, J.; BOM, J. E.; HARRINGTON, R.; HARTLEY, S.; JONES, T. H.; LINDROTH, R. L.; PRESS, M. C.; SYMRNIODIS, I.; WATT, A. D.; WHITTAKER, J. B. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. **Global Change Biology**, v. 8, n. 1, p. 1-16, jan. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x>.

BELGIU, M.; DRAGUT, L. Random Forest in remote sensing: A review of applications and future directions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 114, p. 24–31, apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.

BOUCHER O.; SERVONNAT, J.; ALBRIGHT, A. L.; AUMONT, O.; BALKANSKI, Y.; BASTRIKOV, V.; *et al.* Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 7, p. 1-52, may. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>.

BARCIK, L. P.; CAMARGO, M. B.; GARRET, A. T. de A.; GARCIA, F. A. de O.; UKAN, D. lutuação populacional de *Glycaspis brimblecombei* mais em híbridos de *Eucalyptus camaldulensis* x *E. grandis*na região Sul do Brasil. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v.21, n.9, p. 11880-11894. 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv21n9-074>

BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1010933404324.pdf>. Acesso em: 08 out 2022.

CARTER, S.; VAN REES, C. B.; HAND, B. K.; MUHLFELD, C. C.; LUIKART, G.; KIMBALL, G. Testing a Generalizable Machine Learning Workflow for Aquatic Invasive Species on Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) in Northwest Montana. **Front. Big Data**, v. 4, p. 1-16, oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdata.2021.734990>.

CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J. da; DIAS, M. A. F. da **S.Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 464 p.

CHÁVEZ, R. O.; ROCCO, R.; GUTIERREZ, A. G.; DORNER, M.; ESTAY, S. A. A Self-Calibrated Non-Parametric Time Series Analysis Approach for Assessing Insect Defoliation of Broad-Leaved Deciduous *Nothofagus pumilio* Forests. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 1-20, jan. 2019, DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11020204>.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and psychological measurement**, v. 20, n. 1, p. 37-46, apr. 1960. DOI: <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, jul.1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B).

CUELLO, E. M.; LÓPEZ, S. N.; ANDORNO, A. V.; HERNÁNDEZ, C. M.; BOTTO, E. N. Development of *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Aphalaridae) on *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. and *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 20, n. 1, p. 73-80, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/afe.12230>.

ELITH, J.; LEATHWICK, J. R. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.**, v. 40, p. 677–697, sep. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>.

ESKAFI, F. M.; FERNANDEZ, A. Larval–Pupal Mortality of Mediterranean Fruit Fly (Diptera: Tephritidae) from Interaction of Soil, Moisture, and Temperature. **Environmental Entomology**, v. 19, n. 6, p. 1666–1670, dec. 1990. DOI: <https://doi.org/10.1093/ee/19.6.1666>.

EUROPEAN AND MEDITERRANEAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION (EPPO). *Glycaspis brimblecombei*. **EPPO Global Database**. 2023. Disponível em: <https://gd.eppo.int/taxon/GLYSBR/distribution>. Acesso em: 15 set. 2023.

FAVARO, R. M. **Aspectos bionômicos de *Glycaspis (Glycaspis) brimblecombei* (Moore, 1964) (Hemiptera: Psyllidae) e seu controle com fungos entomopatogênicos**. 2006. 43p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

FERREIRA-FILHO, P. J.; WILCKEN, C. F.; MASSON, M. V.; TAVARES, W. S.; GUERREIRO, J. C.; DO CARMO, J. B.; PRADO, E. P.; ZANUNCIO, J. C. Influence of temperature and rainfall on the population dynamics of *Glycaspis brimblecombei* and *Psyllaephagus bliteus* in *Eucalyptus camaldulensis* plantations. **Revista Colombiana de Entomología**, v. 43, n. 1, p.1-6, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.25100/socolen.v43i1.6638>.

FERREIRA FILHO, P. J. **Dinâmica populacional do psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) e parasitismo por *Psyllaephagus bliteus* Riek (Hymenoptera: Encyrtidae) em floresta de eucalipto**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2010.

FERREIRA FILHO, P. J. **Estudo de populações do psilídeo-de-concha *Glycaspis Brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) e de seu parasitóide *Psyllaephagus Bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) em floresta de *Eucalyptus camaldulensis* por dois métodos de amostragem**. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2005.

FERREIRA, R. de A.; BLAZIZA, A. A. B.; ANZONIN, M. G.; FIRMINO-WINCKLER, D. C. Flutuação populacional do psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) em *Eucalyptus* spp. no município de Garça, SP. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 8, n. 14, p. 29-46, ago. 2009. ISSN:1678-3867.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: novas superfícies climáticas com resolução espacial de 1 km para áreas terrestres globais. **Jornal Internacional de Climatologia**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, may. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

FIRMINO, D.C. **Biologia do psílideo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) em diferentes espécies de eucalipto e em diferentes temperaturas**. 2004. 49 f. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

GHOSH, M.; SARKER RAIHAN, M. M.; RAIHAN, M.; AKTER, L.; BAIRAGI, A. K.; ALSHAMRANI, S. S.; MASUD, M. A Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms to Predict Liver Disease. **IASC**, v. 30, n. 3, p. 917-928, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32604/iasc.2021.017989>.

GILL, R. J. New state records: Redgum lerp psyllid. **California Department of Food and Agriculture Plant Pest and Disease Report**, v. 17, p. 7-8, 1998.

GILMAN, S. E.; URBAN, M. C.; TEWKSBURY, J.; GILCHRIST, G. W.; HOLT, R. D. A framework for community interactions under climate change. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 25, n. 6, p. 325-331, apr. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2010.03.002>.

GOMES, L. C.; FARIA, R. M.; SOUZA, E. de; VELOSO, G. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES-FILHO, E. I. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 337-350, apr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>.

HAJIMA, T.; WATANABE, M.; YAMAMOTO, A.; TATEBE, H.; NOGUCHI, M. A.; ABE, M.; OHGAITO, R.; ITO, A.; YAMAZAKI, D.; OKAJIMA, H.; ITO, A.; TAKATA, K.; OGOCHI, K.; WATANABE, S.; KAWAMIYA, M. Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 5, p. 2197–2244, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>.

HAMILTON, J. G.; DERMODY, O.; ALDEA, M.; ZANGERL, A. R.; ROGERS, A.; BERENBAUM, M. R.; DELUCIA, E. H. Anthropogenic Changes in Tropospheric Composition Increase Susceptibility of Soybean to Insect Herbivory. **Environmental Entomology**, v. 34, n. 2, p. 479-485, apr. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1603/0046-225X-34.2.479>.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2022**. IBÁ, 2022. 96 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 06 de ago. 2023.

INDUSTRIA BRASILEIRO DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual IBÁ 2023**. IBÁ, 2023. 91 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Malha Municipal Digital e Áreas Territoriais 2022. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2023. 39 p. (Nota metodológica n. 01). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101998>. Acesso em: 06 de ago. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Geneva, Switzerland, p. 1-34, DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.

JONES, G. IPCC DDC: saída do modelo MOHC HadGEM3-GC31-LL preparada para CMIP6 DAMIP hist-aer. **Centro Mundial de Dados para o Clima (WDCC) em DKRZ**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26050/WDC/AR6.C6DAMOHGLHA>.

KARGER, D. Nikolaus.; CONRADO, O.; BÖHNER, J.; KAWOHL, T.; KREFT, H.; SORIA-AUZA, R. W.; ZIMMERMANN, N. E.; LINDER, H. P.; KESSLER, M. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. **Sci. Data**, v. 4. set.2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>.

KOCMÁNKOVÁ, E.; TRNKA, M.; JUROCH, J.; DUBROVSKÝ, M.; SEMERÁDOVÁ, D.; MOŽNÝ, M.; ŽALUD, Z. Impact of climate change on the occurrence and activity of harmful organisms. **Plant Protect. Sci**, v. 45, n. Special, p.48–52, 2009. DOI: <https://doi.org/10.17221/2835-PPS>.

KUHN, M. Building Predictive Models in R Using the caret Package. **Journal of Statistical Software**, v. 28, n. 5, p. 1-26, nov. 2008. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>.

KUHN, M.; JOHNSON, K. Classification trees and rule-based models. In: **Applied Predictive Modeling**. New York, NY: Springer New York, 2013. p. 369-413.

KUHN, M. caret: Classification and Regression Training. R package Version 6.0-94, 2023.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, mar. 1977. DOI: <https://doi.org/10.2307/2529310>.

LAUDONIA, S., MARGIOTTA, M. E SASSO, R. Seasonal occurrence and adaptation of the exotic *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Aphalaridae) in Italy. **Journal of Natural History**, v. 48, n. 11-12, 675–689, dec. 2023. DOI: <https://10.1080/00222933.2013.825021>.

LEE, D.-S.; PARK, Y.-S. Factors Affecting Distribution and Dispersal of *Pomacea canaliculata* in South Korea. **Korean Journal of Ecology and Environment**, v. 53, n. 2, p. 185-194, jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.11614/KSL.2020.53.2.185>.

LEE, D.-S.; PARK, Y.-S. Evaluation of Potential Distribution Area of the Red Swamp Crayfish (*Procambarus clarkia*) in South Korea. **Korean Journal of Ecology and Environment**, v. 52, n. 4, p. 340-347, dec. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.11614/KSL.2019.52.4.340>.

LEHMANN, P.; AMMUNÉT, C.; BARTON, M.; BATTISTI, A.; EIGENBRODE, S. D.; JEPSEN, J. U.; KALINKAT, G.; NEUVONEN, S.; NIEMELÄ, P.; TERBLANCHE, J. S.; ØKLAND, B.; BJÖRKMAN, C. Complex responses of global insect pests to climate warming. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 18, n. 3, p. 113-168, apr. 2020. DOI: <https://10.1002/fee.2160>.

LEMES, P. G.; NASCIMENTO, D. A. do.; COSTA, R. F.; MATOS, M. F. de; SOARES, I. J. A. *Glycaspis brimblecombei*. In: LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C. **Novo Manual de Pragas Florestais**. Montes Claros: ICA UFMG. 2021. p. 834-839. ISBN: 978-65-88389-05-8.

LINCOLN, D. E. The influence of plant carbon dioxide and nutrient supply on susceptibility to insect herbivores. **Vegetatio**, v. 104, p. 273–280, jan. 1993. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00048158>.

MALEK, N. H. A., YAACOB, W. F. W., WAH, Y. B., NASIR, S. A. M., SHAADAN, N., INDRATNO, S. W. Comparison of ensemble hybrid sampling with bagging and boosting machine learning approach for imbalanced data. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 29, n. 1, p. 598-608, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v29.i1.pp598-608>.

MATTA, T. F. de. **Novos modelos de regressão binária usando funções de ligações simétricas e assimétricas**. 2021. 65 f. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; EYRING, V.; FLATO, G.; LAMARQUE, J.-F.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E.; SCHLUND, M. Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models. **Science Advances**, v. 6, n. 26, p. 1-10, jun. 2020. DOI: <https://10.1126/sciadv.aba198>.

MELLO, D. C.; FERREIRA, T. O.; VELOSO, G. V.; LANA, M. G. de; MELLO, F. A. de O.; RAIMO, L. A. D. L. D.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; FERNANDES-FILHO, E. I.; DEMATTE, J. A. M. Pedogenetic processes operating at different intensities inferred by geophysical sensors and machine learning algorithms. **Catena**, v. 216, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106370>.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 p.

MI, C.; HUETTMANN, F.; GUO, Y.; HAN, X.; WEN, L. Why choose Random Forest to predict rare species distribution with few samples in large undersampled areas?

Three Asian crane species models provide supporting evidence. *PeerJ*, v. 5, p. 1-22, jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.2849>.

MONTES, S. M. N. M.; RAGA, A. Dinâmica estacional do Psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* MOORE (Hemiptera: Psyllidae) na região oeste do estado de São Paulo. **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, v. 72, n. 4, p.511-515, out./dez., 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/1808-1657v72p5112005>.

MONTICELLI, L. S.; BISHOP, J.; DESNEUX, N.; GURR, G. M.; JAWORSKI, C. C.; MCLEAN, A. H. C.; THOMINE, E.; VANBERGEN, A. J. Chapter Six - Multiple global change impacts on parasitism and biocontrol services in future agricultural landscapes. **Advances in Ecological Research**, v. 65, p. 245-304, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2021.10.002>.

MORGAN F. D. **Psylloidea do Sul da Austrália**. Austria: Government of South Australia. 1984, 136 p. ISBN: 9780724345601.

MUSTOFA, F.; SAFRIANDONO, A. N.; MUSLIKH, A. R.; SETIADI, D. R. I. M. Dataset and Feature Analysis for Diabetes Mellitus Classification using Random Forest. **Journal of Computing Theories and Applications**, v. 1, n. 1, p. 41-49, set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.33633/jcta.v1i1.9190>.

NIHAL, R. Global Climate Change and its Impact on Integrated Pest Management. **Agro Economist - An International Journal**, v. 7, n. 2, p. 133-137, nov. 2020. DOI: ISSN: 2394-8159.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 422 p.

NOWOSAD, J.; STEPINSKI, T. F. Extended SLIC superpixels algorithm for applications to non-imagery geospatial rasters. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 112, p. 102935, 2022.

OLIVEIRA, K. N.; JESUS F. M.; SILVA J. O.; ESPÍRITO-SANTO, M. M.; FARIA M. L. An experimental test of rainfall as a control agent of *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera, Psyllidae) on seedlings of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn (Myrtaceae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 56, n. 1, p. 101-105, mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0085-56262012005000008>.

OROUNLA, B. R.; SODE, A. I.; SALAKO, K. V.; KAKA, R. G. Empirical Performance of CART, C5.0 and Random Forest Classification Algorithms for Decision Trees. **African Journal of Applied Statistics**, v. 10, n. 1, p. 1399-1418, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.16929/ajas/2023.1399.274>.

PAES, É. DE C.; VELOSO, G. V.; SILVA, D. L. DE A.; FERNANDES-FILHO, E. I.; FONTES, M. P. F.; SOARES, E. M. B. Use of modeling to map potentially toxic elements and assess the risk to human health in soils affected by mining activity. **Catena**, v. 220, p. 106662, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106662>.

PAIVA, L. F.; MATTOS, A. F. O. de; SILVA, L. de A.; AVELINO, J. G.; CAVALCANTI, G. D. C. C. Avaliação de técnicas de balanceamento na classificação de

aceitabilidade de carros. ENCONTRO NACIONAL DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E COMPUTACIONAL, 20., 2023. Belo Horizonte. **Anais** [...] Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2023. p. 97-111. DOI: <https://doi.org/10.5753/eniac.2023.233712>.

PATHAK, H.; AGGARWAL, P.K.; SINGH, S. D. **Climate Change Impact, Adaptation and Mitigation in Agriculture: Methodology for Assessment and Applications**. Indian Agricultural Research Institute, New Delhi. 2012. 322p.

PEDIGO, L. P.; RICE, M. E. **Entomology and pest management**. New Jersey: Prentice Hall, 2009. 784 p.

PROJETO MAPBIOMAS – Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 10 de ago. de 2023.

QUEIROZ, D. L.; MAJER, J.; BURCKHARDT, D.; ZANETTI, R.; FERNÁNDEZ, J. I. R.; QUEIROZ, E. C. DE; GARRASTAZU, M.; FERNANDES, B. V.; ANJOS, N. DOS. Predicting the geographical distribution of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psylloidea) in Brazil. **Australian Journal of Entomology**, v. 52, n. 1, p. 20-30, fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/aen.12001>.

QUEIROZ, T. B.; FRANSOZI, A. A.; SILVA, J. S.; OLIVEIRA, L. S.; FERRAZ, S. F. B. 26 anos de monitoramento hidrológico de uma microbacia sob manejo florestal – uma revisão do passado e prospecção do futuro. **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, p. 157-161, maio 2023. DOI: <https://doi.org/10.18671/sertec.v26n48.030>.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023.

RAHMAN, M. S.; PIENTONG, C.; ZAFAR, S.; EKALAKSANANAN, T.; PAUL, R. E.; HAQUE, U.; ROCKLÖV, J.; OVERGAARD, H. J. Mapping the spatial distribution of the dengue vector *Aedes aegypti* and predicting its abundance in northeastern Thailand using machine-learning approach. **One Health**, v. 13, p. 1-10, dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2021.100358>.

SÁ, L. A. N. de; WILCKEN, C. F. Nova Praga Exótica no Ecosistema Florestal. Jaguariúna: **EMBRAPA**, 2004,4 p. (Comunicado Técnico, 18).

SAHA, A.; RAHMAN, S.; ALAN, S. Modeling current and future potential distributions of desert locust *Schistocerca gregaria* (Forskål) under climate change scenarios using MaxEnt. **Journal of Asia-Pacific Biodiversity**, v. 14, n. 3, p. 399-409, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.japb.2021.05.001>.

SALIBA, I. L.; LUNZ, A. M.; BATISTA, T. F.; SCHWARTZ G.; QUEIROZ, D. L. First record of *Glycaspis brimblecombei* (Moore, 1964) and *Blastopsylla occidentalis* (Taylor, 1985) (Hemiptera, Aphalaridae) in eucalyptus plantations in State of Pará, Brazil. **Entomological Communications**, v. 1, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec01009>.

SANTOS, F. A.; CORREA F. A.; NANINI, F.; NASCIMENTO, D. A.; JUNQUEIRA, L. R.; WILCKEN, C. F. Genetic diversity of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) and its parasitoid *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) in Brazil. **Braz. J. Biol.**, v. 81, n. 3, p. 838-841, jul./set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.230486>.

SENTIS, A.; DESNEUX, N. Editorial overview: Global change: integrating ecological and evolutionary consequences across time and space. **Curr. Opinião. Inseto Sci**, v. 35, out. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.09.006>.

SHIFERAW, H.; BEWKET, W.; ECKERT, S. Performances of machine learning algorithms for mapping fractional cover of an invasive plant species in a dryland ecosystem. **Ecology and Evolution**, v. 9, n. 5, p. 2337-3011, mar. 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/ece3.4919open_in_newISSN2045-77.

SHRESTHA, S. Effects of Climate Change in Agricultural Insect Pest. **Acta Scientific Agriculture**, v. 3, n. 12, p. 74-80, dec. 2019. DOI: <https://doi.org/10.31080/ASAG.2019.03.0727>.

SKENDŽIĆ, S.; ZOVKO, M.; ŽIVKOVIĆ, P.; LEŠIĆ, V.; LEMIĆ, D. The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. **Insects**, v. 12, n. 440, p. 1-31, may. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects12050440>.

SORA, N. D.; MANNU, R.; ROSSINI, L.; CONTARINI, M.; GALLEGU, D.; SPERANZA, S. Using Species Distribution Models (SDMs) to Estimate the Suitability of European Mediterranean Non-Native Area for the Establishment of *Toumeyella Parvicornis* (Hemiptera: Coccidae). **Insects**, v. 14, n. 46, p. 1-16, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects14010046>.

SOUZA JUNIOR, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W. de; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIEIRA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.

TANG, Y.; RUMBOLD, S.; ELLIS, R.; KELLEY, D.; MULCAHY, J.; SELLAR, A.; WALTON, J.; JONES, C. MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 CMIP. World **Centro Mundial de Dados para o Clima (WDCC) em DKRZ**, 2023. Disponível em: https://www.wdc-climate.de/ui/entry?acronym=C6_4662099. Acesso em: 05 de dez. de 2023.

THOMAS, C. D.; CAMERON, A.; VERDE, R. E.; BAKKENES, M.; BEAUMONT, L. J.; COLLINGHAM, Y. C.; ERASMO, B. F. N.; SIQUEIRA, M. F. DE; GRAINGER, A.; HANNAH, L.; HUGHES, L.; HUNTLEY, B.; VAN JAARVELD, A. S.; MIDGLEY, C. F.; MILES, L.; ORTEGA-HUERTA, M. A.; PETERSON, A. T.; PHILLIPS, O. L.;

WILLIAMS, S. E. Extinction risk from climate change. **Nature**, v. 427, p. 145–148, jan. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature02121>.

TULLER, J.; OLIVEIRA, K. N.; SILVA, J. O.; FARIA, M. L. de; ESPIRITO SANTO, M. M. do; SERRÃO, J. E. ZANUNCIO, J. C. *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) attack patterns on different *Eucalyptus* genotypes. **PeerJ**, p. 1-15, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.3864>.

WALTHER, G.-R.; ROQUES, A.; HULME, P. E.; SYKES, M. T.; PYSĚK, P.; KUHN, I.; ZOBEL, M.; BACHER, S.; BOTTA-DUKA, Z.; BUGMANN, H.; CZURCZ, B.; DAUBER, J.; HICKLER, T.; JAROSÍK, V.; KENIS, M.; KLOTZ, S.; MINCHIN, D.; MOORA, M.; NENTWIG, W.; OTT, J.; PANOV, V. E.; REINEKING, B.; ROBINET, C.; SEMENCHENKO, V.; SOLARZ, W.; THUILLER, W.; VILÀ, M.; VOHLAND, K.; SETTELE, J. Alien species in a warmer world: risks and opportunities. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 24, n. 12. p. 686-693, ago. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.008>.

WANG, F.; WANG, D.; GUO, G.; ZHANG, M.; LANG, J.; WEI, J. Potential Distributions of the Invasive Barnacle Scale *Ceroplastes cirripediformis* (Hemiptera: Coccidae) Under Climate Change and Implications for Its Management. **Journal of Economic Entomology**, v. 114, n. 1, p. 82–89, fev. 2020. DOI: 89, <https://doi.org/10.1093/jee/toaa245>.

WEI, J.; PENG, L.; HE, Z.; LU, Y.; WANG, F. Potential distribution of two invasive pineapple pests under climate change. **Pest Manag Sci**, v. 76, p. 1652–1663, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.5684>.

WILCKEN, C. F.; COUTO, E. B.; ORLATO, C., FERREIRA FILHO, P.J.; FIRMINO, D. C.; Ocorrência do psilídeo-de-concha (*Glycaspis brimblecombei*) (Hemiptera: Psyllidae) em florestas de eucalipto no Brasil. Piracicaba: **IPEF**, 2003. 11 p. (Circular Técnica, 201).

WILCKEN, C. F.; FIRMINO-W INCKLER, D. C.; DAL POGETTO, M. H. F. A.; DIAS, T. K. R.; LIMA, A. C. V.; SÁ, L. A. N. DE; FERREIRA FILHO, P. J. Psilídeo-de-concha-do-eucalipto, *Glycaspis brimblecombei* Moore. In: VILELA, E. F.; ZUCCHI, R. A (org.). **Pragas introduzidas no Brasil** - Insetos e Ácaros. Piracicaba: FEALQ, 2015. p. 883-897.

YIHDEGO, Y.; SALEM, H. S.; MUHAMMED, H. H. Agricultural Pest Management Policies during Drought: Case Studies in Australia and the State of Palestine. **Natural Hazards Review**, v. 20, n. 1, p. 1-10, sep. 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000312](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000312).

ZHANG, N.; ZHANG, X.; YANG, G.; ZHU, C.; HUO, L.; FENG, H. Assessment of defoliation during the *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu disaster outbreak using UAV-based hyperspectral images. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 323-339, nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.024>.

ZHAO, C.; BAI, C.; WANG, D. Predicting current and future potential distribution of *Cynaenus angustus* (Coleoptera: Tenebrionidae) in global scale using the MaxEnt

model. **Journal of Stored Products Research**, v. 101, p. 1-10, mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102089>.

5 CONCLUSÃO GERAL

Todos os oito modelos de *machine learning* apresentaram bom desempenho no mapeamento da distribuição de áreas susceptíveis aos danos econômicos de *G. brimblecombei* em plantios florestais de eucalipto no território brasileiro para os cenários presente e futuro. No entanto, o modelo RF destacou-se como mais eficiente, ao apresentar o melhor desempenho para a maioria das métricas avaliadas. Os principais preditores ambientais que determinam a distribuição dessas áreas estão associados à temperatura e ao volume pluviométrico durante a estação

seca (q05.BIO17, max.tmax_05, max.tmax_09), assim como, no período que antecede o verão (max.tmax_11, max.tmin_11, min.prec_11).

No cenário presente, as áreas com susceptibilidade aos danos econômicos estão predominantemente localizadas no Sudeste, Sul e Centro-Oeste, regiões que abrigam os principais polos de produção silvicultural no país. Enquanto o Norte e Nordeste as condições ambientais são menos favoráveis para a ocorrência de danos, apresentando dessa forma potencial para expansão dos plantios de eucalipto. As mudanças climáticas serão capazes de influenciar a distribuição dessas áreas nos cenários futuros. Os modelos preveem uma redução nas áreas susceptíveis à ocorrência de danos econômicos por todo o território, no entanto as regiões Sul e Sudeste ainda apresentarão significativas extensões de áreas vulneráveis aos danos.

Os resultados desta pesquisa forneceram informações valiosas sobre a distribuição da susceptibilidade de áreas a sofrerem danos econômicos ocasionados pelo *G. brimblecombei* no Brasil. Esses dados são essenciais para a compreensão da extensão dos danos causados por essa espécie, fornecendo informações estratégicas para o monitoramento da praga. Além disso, podem ser utilizados para orientar a expansão dos plantios florestais pelo país, bem como para o desenvolvimento de novas estratégias destinadas ao controle e gestão de riscos associados à praga.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. B.; GUISAN, A. Five (or so) challenges for species distribution modelling. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 10, p. 1677-1688, ago. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x>.

BARCIK, L. P.; CAMARGO, M. B.; GARRET, A. T. de A.; GARCIA, F. A. de O.; UKAN, D. lntuação populacional de *Glycaspis brimblecombei* mais em híbridos de *Eucalyptus camaldulensis* x *E. grandis*na região Sul do Brasil. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v.21, n.9, p. 11880-11894. 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv21n9-074>

CUELLO, E. M. **Estudio de la diversidad de insectos asociados a las principales plagas de Eucalyptus spp., para la selección de potenciales agentes de control biológico**. 2019. 183 f. Tesis (Doctorado) - Facultad de Ciencias Exactas y

Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2019. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6592_Cuello. Acesso em: 08 out 2022.

CARTER, S.; VAN REES, C. B.; HAND, B. K.; MUHLFELD, C. C.; LUIKART, G.; KIMBALL, J. S. Testing a Generalizable Machine Learning Workflow for Aquatic Invasive Species on Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) in Northwest Montana. **Front. Big Data**, v. 4, p. 1-16, oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdata.2021.734990>.

ELITH, J.; LEATHWICK, J. R. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.**, v. 40, p. 677–697, sep. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>.

EUROPEAN AND MEDITERRANEAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION (EPPO). *Glycaspis brimblecombei*. **EPPO Global Database**. 2023. Disponível em: <https://gd.eppo.int/taxon/GLYSBR/distribution>. Acesso em: 15 set. 2023.

FERREIRA-FILHO, P. J.; WILCKEN, C. F.; MASSON, M. V.; TAVARES, W. S.; GUERREIRO, J. C.; DO CARMO, J. B.; PRADO, E. P.; ZANUNCIO, J. C. Influence of temperature and rainfall on the population dynamics of *Glycaspis brimblecombei* and *Psyllaephagus bliteus* in *Eucalyptus camaldulensis* plantations. **Revista Colombiana de Entomología**, v. 43, n. 1, p.1-6, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.25100/socolen.v43i1.6638>.

FERREIRA FILHO, P. J. **Dinâmica populacional do psílideo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) e parasitismo por *Psyllaephagus bliteus* Riek (Hymenoptera: Encyrtidae) em floresta de eucalipto**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Proteção de Plantas) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2010.

GILL, R. J. New state records: Redgum lerp psyllid. **California Department of Food and Agriculture Plant Pest and Disease Report**, v. 17, p. 7-8, 1998.

HALBERT, S. E.; GILL, R. J.; NISSON, J. N. Two *Eucalyptus* psyllids new to Florida (Homoptera:Aphalaridae). **Entomology circular**, v; 407, p. 1-2, 2001.

LEMES, P. G.; NASCIMENTO, D. A. do.; COSTA, R. F.; MATOS, M. F. de; SOARES, I. J. A. *Glycaspis brimblecombei*. In: LEMES, P. G.; ZANUNCIO, J. C. **Novo Manual de Pragas Florestais**. Montes Claros: ICA UFMG. 2021. p. 834-839. ISBN: 978-65-88389-05-8.

SÁ, L. A. N. de; WILCKEN, C. F. Nova Praga Exótica no Ecosistema Florestal. Jaguariúna: EMBRAPA, 2004,4 p. (Comunicado Técnico, 18).

SAHA, A.; RAHMAN, S.; ALAN, S. Modeling current and future potential distributions of desert locust *Schistocerca gregaria* (Forskål) under climate change scenarios using MaxEnt. **Journal of Asia-Pacific Biodiversity**, v. 14, n. 3, p. 399-409, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.japb.2021.05.001>.

SALIBA, I. L.; LUNZ, A. M.; BATISTA, T. F.; SCHWARTZ G.; QUEIROZ, D. L. First record of *Glycaspis brimblecombei* (Moore, 1964) and *Blastopsylla occidentalis* (Taylor, 1985) (Hemiptera, Aphalaridae) in eucalyptus plantations in State of Pará, Brazil. **Entomological Communications**, v. 1, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec01009>.

SANTANA, D. L. Q. Psilídeos em Eucaliptos no Brasil. Colombo: **IPEF**, 2005, 14 p. (Circular Técnica, 109). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/43220/1/circ-tec109.pdf>. Acesso em: 15 out. 2022.

SANTOS, F. A.; CORREA A. S.; NANINI F.; NASCIMENTO D. A.; JUNQUEIRA L. R.; WILCKEN C. F. Genetic diversity of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) and its parasitoid *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) in Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 81, n. 3, p.838-841, jul./set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.230486>.

SILVA, G. L. B. e. **Seleção de híbridos multi-espécies de eucalyptus tolerantes 2020 ao déficit hídrico, insetos e fungos**. 2020. 117 f. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2020. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/30088/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 16 de out. de 2023.

SKENDŽIĆ, S.; ZOVKO, M.; ŽIVKOVIĆ, P.; LEŠIĆ, V.; LEMIĆ, D. The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. **Insects**, v. 12, n. 440, p. 1-31, may. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects12050440>.

SORA, N. D.; MANNU, R.; ROSSINI, L.; CONTARINI, M.; GALLEGGO, D.; SPERANZA, S. Using Species Distribution Models (SDMs) to Estimate the Suitability of European Mediterranean Non-Native Area for the Establishment of *Toumeyella Parvicornis* (Hemiptera: Coccidae). **Insects**, v. 14, n. 46, p. 1-16, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects14010046>.

WILCKEN, C. F.; FIRMINO-W INCKLER, D. C.; DAL POGETTO, M. H. F. A.; DIAS, T. K. R.; LIMA, A. C. V.; SÁ, L. A. N. DE; FERREIRA FILHO, P. J. Psilídeo-de-concha-do-eucalipto, *Glycaspis brimblecombei* Moore. In: VILELA, E. F.; ZUCCHI, R. A (org.). **Pragas introduzidas no Brasil - Insetos e Ácaros**. Piracicaba: FEALQ, 2015. p. 883-897

WANG, F.; WANG, D.; GUO, G.; ZHANG, M.; LANG, J.; WEI, J. Potential Distributions of the Invasive Barnacle Scale *Ceroplastes cirripediformis* (Hemiptera: Coccidae) Under Climate Change and Implications for Its Management. **Journal of Economic Entomology**, v. 114, n. 1, n. 82–89, fev. 2020. DOI: 89, <https://doi.org/10.1093/jee/toaa245>.

ZHAO, C.; BAI, C.; WANG, D. Predicting current and future potential distribution of *Cynaenus angustus* (Coleoptera: Tenebrionidae) in global scale using the MaxEnt model. **Journal of Stored Products Research**, v. 101, p. 1-10, mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102089>.

