



VITÓRIA FERNANDA DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS E DA PAISAGEM NA
BIOECOLOGIA E ABUNDÂNCIA DAS FORMIGAS CORTADEIRAS EM
PLANTAÇÕES FLORESTAIS DE EUCALIPTO**

Botucatu

2023

VITÓRIA FERNANDA DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS E DA PAISAGEM NA
BIOECOLOGIA E ABUNDÂNCIA DAS FORMIGAS CORTADEIRAS EM
PLANTAÇÕES FLORESTAIS DE EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Ciência Florestal.

Orientador(a): Clayton Alcarde Alvares

Botucatu

2023

S237i

Santos, Vitória Fernanda dos

Influência das condições edafoclimáticas e da paisagem na bioecologia e abundância das formigas cortadeiras em plantações florestais de eucalipto / Vitória Fernanda dos Santos. -- Botucatu, 2023

74 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu

Orientador: Clayton Alcarde Alvares

1. Formigas Cortadeiras. 2. Machine Learning. 3. Manejo Integrado de Pragas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

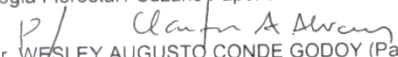
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS E DA PAISAGEM NA BIOECOLOGIA E ABUNDÂNCIA DAS FORMIGAS CORTADEIRAS EM PLANTAÇÕES FLORESTAIS DE EUCALIPTO

AUTORA: VITÓRIA FERNANDA DOS SANTOS

ORIENTADOR: CLAYTON ALCARDE ALVARES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência Florestal, pela Comissão Examinadora:


Pesquisador Dr. CLAYTON ALCARDE ALVARES (Participação Presencial)
Tecnologia Florestal / Suzano Papel e Celulose


Prof. Dr. WESLEY AUGUSTO CONDE GODOY (Participação Virtual)
Entomologia e Acarologia / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz


Prof. Dr. CARLOS FREDERICO WILCKEN (Participação Presencial)
Proteção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP

Botucatu, 21 de agosto de 2023

A minha amada família,

dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e Nossa Senhora Aparecida pelo dom da vida e pela força nos momentos difíceis.

Aos meus amados meus pais e irmã, Vanuza dos Santos (*in memoriam*), Marcos Antônio dos Santos e Vivian Carolina dos Santos, por me apoiarem e incentivarem em qualquer momento da vida. A toda minha família pelo constante apoio e compreensão nos momentos de ausência e a Matheus Polli, meu companheiro de vida, que me apoiou durante toda a jornada na pós-graduação.

Agradeço a meu orientador Clayton Alcarde Alvares, pela orientação, conversas e paciência no desenvolvimento desse projeto.

Agradeço aos membros da banca de qualificação e defesa, Everton Pires Soliman, Carlos Frederico Wilcken e Wesley Godoy, pelas contribuições realizadas.

Agradeço a Faculdade de Ciências Agronômicas – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” e aos professores da Pós-Graduação em Ciência Florestal, pelos ensinamentos compartilhados. Agradecimento especial a meus colegas da pós-graduação que prontamente me ajudaram quando mais precisei.

Agradeço a Suzano S.A., pela disponibilização dos dados necessários para o desenvolvimento dessa pesquisa e as oportunidades a mim geradas. Agradeço também aos meus colegas de empresa que foram verdadeiros professores que tive ao longo do desenvolvimento desse projeto, em especial Everton Pires Soliman, Edival Valverde Zauza e Italo Ramos Cegatta pelo acompanhamento próximo ao projeto. À Lara, Cristiane, Valter, Yhasmin e Athila, pelas muitas conversas e discussões sobre esse trabalho e o apoio sempre oferecido.

A todos que compreenderam a minha ausência para a realização do presente trabalho e que ajudaram direta ou indiretamente na realização do mesmo.

RESUMO

O setor florestal está presente em 10 milhões de hectares no Brasil e é um importante setor socioeconômico para o país. Entretanto limitantes da produção, como pragas, podem afetar a produtividade dos plantios. As formigas cortadeiras (*Atta* spp. e *Acromyrmex* spp.), nativas do país, são consideradas como as principais pragas florestais, gerando prejuízos anualmente e altos custos de controle e monitoramento. Identificar os locais mais propensos ao estabelecimento e crescimento dessa praga é essencial para ações de manejo mais efetivas. Nesse cenário, o modelo de aprendizagem de máquina Random Forest foi utilizado para avaliar padrões de respostas de um banco de dados com 10 anos de monitoramento de formigas cortadeiras e diferentes variáveis preditoras. O objetivo do trabalho foi avaliar a influência das variáveis edafoclimáticas e da paisagem no estabelecimento e crescimento de formigas cortadeiras em 5 macrorregiões do Brasil, com o uso do modelo Random Forest. Os modelos propostos apresentaram acurácia para detecção de reinfestação (83%), ninhos grandes (78%), além de apresentar sensibilidade para detecção de áreas de riscos (65% modelo com subamostragem). O trabalho demonstrou que há influência das variáveis edafoclimáticas e da paisagem de modo diferenciado para estabelecimento e crescimento de formigueiros e essas diferenças ocorrem também em cada macrorregião.

Palavras-chave: formigas cortadeiras; random forest; aprendizado de máquina; pragas florestais.

ABSTRACT

The forestry plantation sector in Brazil covers an area of 10 million hectares and holds significant socio-economic importance for the country. However, pests and diseases can affect the productivity of plantations. Leaf-cutting ants (*Atta* spp. and *Acromyrmex* spp.), native to the country, are considered the main forest pests, causing annual losses and high costs of control and monitoring. Identifying the places most likely to establish and grow this pest is essential for more effective management actions. In this scenario, the Random Forest machine learning model was used to evaluate response patterns from a database with 10 years of leaf-cutter ant monitoring and different predictor variables. The objective of this study was to evaluate the influence of edaphoclimatic and landscape variables on the establishment and growth of leaf-cutting ants in 5 macro-regions of Brazil, using the Random Forest model. The proposed models were accurate for detecting reinfestation (83%), large nests (78%), in addition to being sensitive for detecting risk areas (65% model with subsampling). The work demonstrated that there is influence of edaphoclimatic and landscape variables in a differentiated way for the establishment and growth of leaf-cutting ants and these differences also occur in each macro-region.

Keywords: leafcutter ants; random forest; machine learning; forest pests.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	A importância do setor florestal.....	17
2.2	Limitantes da produtividade: pragas florestais.....	17
2.3	Formigas cortadeiras.....	18
2.4	Formigas como pragas florestais.....	19
2.5	Ecologia dos insetos.....	20
2.6	Modelagem de pragas.....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1	Área de estudo.....	23
3.2	Monitoramento de formigas cortadeiras.....	25
3.3	Dados edafoclimáticos e da paisagem.....	27
3.4	Análise dos dados.....	29
3.4.1	Correlações individuais.....	29
3.4.2	Estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras.....	29
3.4.3	Áreas de risco à estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras.....	30
3.4.3.1	<i>Modelagem do risco.....</i>	30
3.4.3.2	<i>Mapa Hotspot.....</i>	31
4	RESULTADOS.....	33
4.1	Relações individuais da densidade de ninhos e variáveis edafoclimáticas e da paisagem.....	40
4.2	Estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras.....	44
4.3	Risco à estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras.....	52
5	DISCUSSÃO.....	57
5.1	Modelos de aprendizagem de máquina para presença de reinfestação.....	58
5.2	Modelos de aprendizagem de máquina para presença de ninhos grandes.....	59
5.3	Modelos de aprendizagem de máquina para identificação de áreas hotspots de formigas cortadeiras.....	61
6	CONCLUSÕES.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Presente em 10 milhões de hectares (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021), o setor brasileiro de florestas plantadas é referência mundial de produtividade e constitui um importante setor socioeconômico para o país, gerando cerca de 2 milhões de empregos diretos e indiretos em 2022 (IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores, 2021). A demanda pelo suprimento de madeira cresceu a longo dos anos e projeções da World Wide Fund for Nature - WWF (2011) indicam a necessidade de 250 milhões de hectares de florestas plantadas para suprir a demanda mundial, que irá chegar a 9,1 bilhões de pessoas, até o ano de 2050.

Entretanto, fatores bióticos e abióticos podem limitar e até mesmo reduzir a produtividade dos plantios florestais. Os fatores redutores, que se constituem por pragas, doenças, ervas daninhas e o fogo, afetam diretamente a produtividade das culturas (SENTELHAS *et al.*, 2016), sendo, dentre as pragas que acometem os plantios florestais, as formigas cortadeiras consideradas como principais (ARAÚJO; DELLA LUCIA; MAYHÉ-NUNES, 1997; SOLIMAN, 2017). Nativas do Brasil, elas podem levar a perdas de 0,04 a 0,13 m³ ha⁻¹ de madeira a cada unidade de m² de terra solta ha⁻¹ em florestas de *Eucalyptus* (SOUZA; ZANETTI; CALEGARIO, 2011), principal espécie plantada no país (IBGE, 2021), e podem representar 30% dos custos totais de uma implantação ao final do terceiro ciclo (MENDES FILHO, 1981; DELLA LUCIA, 2011). Segundo estimativas do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), em 2016 houve uma perda potencial de mais de 8 bilhões de reais devido ao ataque de formigas cortadeiras, considerando a então área florestal brasileira no mesmo ano (IPEF, 2016).

Fatores de clima e solo influenciam na presença e abundância de insetos (VARLEY; GRADWELL; HASSELL, 1973). Autores como Vieira-Neto e Vasconcelos (2010) e Carmargo, *et al.* (2013) estudaram o efeito do ambiente em ninhos de formigas cortadeiras e encontraram que o ambiente influencia diretamente no estabelecimento e desenvolvimento das colônias. Zanetti *et al.* (2000) avaliando a influência do material genético, idade e a presença e proximidade de faixas e fragmentos de vegetação nativa na densidade de saúveiros, em florestas de eucalipto na região de João Pinheiro, Minas Gerais, encontraram que todas as variáveis citadas influenciam na densidade de formigueiros.

Técnicas de *machine learning* (aprendizado de máquina) vem sendo utilizadas na análise de dados afim de identificar e prever padrões em diferentes áreas de conhecimento (USIO *et al.*, 2006; LIBBRECHT; NOBLE, 2015; KOUROU *et al.*, 2015; CAI-YUN, Z. *et al.*, 2017). As diferentes técnicas utilizadas, permitem a avaliação de grande volume de dados, determinando as variáveis independentes que influenciam na variável de interesse e evidenciando de que forma essa relação ocorre (De'ATH; FABRICIUS, 2000; USIO *et al.*, 2006, EDNEY-BROWNE; BROCKERHOFF; WARD, 2018; BARBOSA *et al.*, 2021). Acredita-se que através da metodologia de aprendizado de máquina seja possível identificar os locais mais propensos a presença e desenvolvimento de formigas cortadeiras, desenvolvendo uma ferramenta para identificação de Hotspots (áreas de risco) da praga.

Por estar presente em todas as regiões brasileiras (IBÁ, 2022), o setor florestal abrange uma grande diversidade edafoclimática e da paisagem. Compreender como essa diversidade influencia na presença e desenvolvimento das formigas cortadeiras é essencial para o manejo assertivo e sustentável das florestas. Nesse contexto, tem-se como hipóteses que (i) as condições ambientais e da paisagem exercem influência na distribuição e estabelecimento populacional das formigas cortadeiras, (ii) as variáveis edafoclimáticas estão diretamente relacionadas ao desenvolvimento dos formigueiros e (iii) técnicas de *machine learning* permitem a identificação de locais Hotspots deste inseto praga. Dessa forma, o presente trabalho objetiva avaliar se as características edafoclimáticas e da paisagem influenciam na bioecologia, controle e abundância de formigas cortadeiras.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A Importância do setor florestal

O setor brasileiro de florestas plantadas é referência mundial de produtividade florestal ao avaliar-se volume produzido por área e duração do ciclo de cultivo (IBÁ, 2022). Isso é possível devido a diversos fatores que propiciam a alta produtividade dos plantios, tais como condições edafoclimáticas, boas técnicas de manejo e melhoramento genético. O IBGE através do levantamento da Produção e Extração Vegetal e da Silvicultura, informou que em 2021 a área ocupada por florestas plantadas no país foi de 10 milhões de hectares, correspondentes principalmente a plantios de eucalipto (76,9%) e pinus (19,1%), o relatório informa também a geração de 30,1 bilhões de reais decorrentes da produção florestal bruta (IBGE, 2021), já a produção industrial de base florestal gerou 244,6 bilhões de reais em 2021 e aproximadamente 2 milhões de postos de trabalhos diretos, indiretos e resultantes do efeito renda da atividade de base florestal (IBÁ, 2022). Presente em todas as regiões do país (IBÁ, 2022), o setor de florestas plantadas vem crescendo ao longo dos anos e tem a promessa de ter sua área aumentada em 2 milhões de hectares, em relação ao ano de 2018, até 2030 (BRASIL, 2018).

2.2 Limitantes da produtividade: pragas florestais

Entretanto, fatores bióticos e abióticos podem limitar e até mesmo reduzir a produtividade desse importante setor socioeconômico. A produtividade das culturas agrícolas e florestais pode ser dividida em 3 tipos, sendo elas a produtividade potencial, a atingível e a real. Na produtividade potencial não há fatores limitantes ou redutores atuando sobre a cultura, a produtividade é máxima e é obtida pela interação do genótipo com o ambiente. Na produtividade atingível há a ação de fatores limitantes, como a água e características nutricionais e físicas do solo, enquanto na produtividade real, além da ação dos fatores limitantes, há ação de fatores redutores, caracterizados pelas pragas, doenças e plantas daninhas (SENTELHAS *et al.*, 2016). Stape *et al.*, 2014, citam que o estresse biótico causado pelo ataque de insetos tem estagnado, ou mesmo reduzido, a produtividade em vários sítios florestais. Para o setor florestal, 15 espécies de pragas e doenças, nativas e exóticas, são de importância para o país (STAPE *et al.*, 2018) e dentre estas, as formigas cortadeiras

são consideradas como principais (SOLIMAN, 2017; ARAÚJO; DELLA LUCIA; MAYHÉ-NUNES, 1997).

2.3 Formigas cortadeiras

As formigas cortadeiras tem ocorrência natural do sul dos Estados Unidos até o centro da Argentina (DELLA LUCIA, 2011) e são consideradas, portanto, nativas do Brasil. Os gêneros *Atta* e *Acromyrmex*, conhecidos popularmente por saúvas e quenquéns, são considerados os gêneros de maior importância econômica no país e ocorrem em todos os biomas brasileiros (IPEF, 2016). Pertencentes a tribo *Attini* da família Formicidae, as formigas cortadeiras tem hábitos de forrageamento de partes vegetais para dentro do ninho, onde são utilizadas como substrato para criação do fungo simbiote do qual se alimentam (ARNHOLD; MAGISTRALI; ANJOS, 2013). Embora tenham preferências por determinadas espécies, as formigas cortadeiras forrageiam uma grande diversidade de culturas florestais, podendo ser consideradas insetos polívoros (ARAÚJO; DELLA LUCIA; MAYHÉ-NUNES, 1997; ARNHOLD; MAGISTRALI; ANJOS, 2013; GARCIA *et al.*, 2003).

Em ecossistemas naturais as formigas cortadeiras tem funções importantes, atuam como bioperturbadoras do solo e alteram características físicas e químicas que beneficiam a vegetação, além de atuarem na dispersão secundárias de sementes (DELLA LUCIA, 2011). Entretanto, monoculturas como florestas plantadas favorecem para que formigas cortadeiras tornem-se pragas, devido à baixa diversidade de espécies que a facilita a busca por substrato vegetal, além da alta concentração de macronutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P) nas folhas, que é preferível as formigas, pois favorece o crescimento do fungo simbiote (MONTROYA-LERMA *et al.*, 2012).

No Brasil as principais espécies do gênero *Atta* e *Acromyrmex* consideradas pragas primárias são *Atta sexdens* e *Atta laevigata* para plantios de *Eucalyptus* e *Atta capiguara* Gonçalves e *Atta bisphérica* Forel para pastagens. No gênero *Acromyrmex* as mais importantes são *Acromyrmex* (*landolti*) *balzani* Emery para *Eucalyptus*, *Acromyrmex coronatus* (Fabricius) para plantas herbáceas, *Acromyrmex rugosus* para florestas arbustivas e *Acromyrmex landolti* (Forel) para plantações de *Pinus* (MONTROYA-LERMA *et al.*, 2012).

Com o intuito de proteger a prole e a rainha de inimigos naturais e criar um microambiente favorável para o desenvolvimento dos indivíduos e do fungo simbiote, as formigas constroem ninhos subterrâneos estruturados com túneis e câmaras para transporte, alimentação e ventilação, movendo grande quantidade de solo nesse processo. Este solo removido se dispõe acima do ninho e representa sua parte externa (acima do solo), comumente chamada de terra solta (MOREIRA *et al.*, 2004; CAMARGO *et al.*, 2016; CARDOSO *et al.*, 2014). Em estudo de 3 ninhos de *Atta laevigata* Moreira *et al.* 2004 evidenciaram que a profundidade e a quantidade de câmaras é função da área de terra solta, medida como a multiplicação das duas maiores dimensões do formigueiro (largura x comprimento). Demonstrando-se um parâmetro para avaliar o tamanho e o crescimento de formigueiros.

2.4 Formigas como pragas florestais

Um ninho de formigas cortadeiras se inicia após o voo nupcial das novas rainhas e posterior fundamento e sucesso no estabelecimento do túnel e câmara inicial. Após, ocorre o crescimento da colônia onde etapas como geração de novos indivíduos, estabelecimento e cultivo do fungo simbiote, escavação para criação de túneis e câmaras ocorrem. Em média, após 38 meses o ninho atinge a maturidade e há estabilização do crescimento. Neste momento, iniciam-se as revoadas que darão origem a novos ninhos (AUTUORI, 2010). Em formigueiros adultos, Forti (2008) afirma que existam cerca de 3.5 a 7 milhões de indivíduos em uma colônia.

Estudos indicam que um único formigueiro adulto, consome cerca de 1 tonelada de folhas de *Eucalyptus* em um ano, podendo representar até 30% do custo total de uma implantação florestal ao final do terceiro ciclo e levando a uma redução de 12% a 17% da produtividade do plantio florestal (MENDES FILHO, 1981; DELLA LUCIA, 2011).

Em trabalho realizado com 1, 2 e 3 desfolhas artificiais em mudas de eucalipto, aos 56, 143 e 278 dias após o plantio, Matrangolo *et al.* (2010), resultaram em uma perda de respectivamente 37,8%, 61,8% e 79,6% na produtividade ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) avaliada aos 92 meses de idade. Já Pizzi (2016), simulando a desfolha artificial em plantas de eucalipto, concluiu que 1, 2 e 3 desfolhas consecutivas aos 15, 19 e 23 meses de

idade, levaram a uma perda média de produtividade ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) de 46%, 57% e 67%, respectivamente, na avaliação aos 27 meses de idade.

O Instituto de Pesquisas Florestais (IPEF, 2016), estimou a perda potencial de mais de 8 bilhões de reais em 2016, devido ao ataque de formigas cortadeiras, considerando a então área florestal plantada no país de 6,6 milhões de hectares.

Souza, Zanetti e Calegario (2011) ao avaliar o nível de dano econômico causado por formigas cortadeiras em florestas de eucalipto, com diferentes potenciais produtivos, encontraram que há redução do volume de madeira de forma proporcional ao potencial produtivo da floresta, sendo a área dos formigueiros a principal variável para estimar essa perda (m^2 de terra solta ha^{-1}), onde o aumento de uma unidade de m^2 de terra solta ha^{-1} pode levar a uma redução de 0,04 a 0,13 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

Dada a importância das formigas cortadeiras na redução da produtividade de plantios florestais, o zoneamento de áreas mais propensas a serem atingidas por este inseto praga é uma importante ferramenta para planejamento de um controle assertivo e eficaz, reduzindo potenciais perdas econômicas.

2.5 Ecologia dos insetos

Varley, Gradwell e Hassell (1973) descrevendo sobre a ecologia de insetos, evidenciam que alterações climáticas como temperatura, umidade, chuva e radiação podem produzir efeitos fisiológicos na população através de alterações na atividade do sistema endócrino, na sobrevivência, desenvolvimento e na reprodução. Nesse aspecto, estudos demonstram a influência das condições edafoclimáticas no estabelecimento, riqueza, desenvolvimento e abundância de formigas cortadeiras (KUSNEZOV, 1957; ZANETTI *et al.*, 2000; CARMARGO *et al.*, 2013; ARNHOLD, 2013; ARNHOLD, 2017).

Carmargo, *et al.* (2013), ao avaliarem o desenvolvimento de formigueiros da espécie *Atta sexdens rubropilosa* em campo, comparativamente a formigueiros da mesma espécie desenvolvidos em condições controladas de laboratório, concluíram que o ambiente exerce influência no estabelecimento do formigueiro durante a fase de fundação da colônia. Vieira-Neto e Vasconcelos (2009), comparando a sobrevivência de *Atta laevigata* em floresta intacta de cerrado *stricto sensu* com áreas abandonadas, com e sem suplementação alimentar, encontraram que a espécie teve

maior sobrevivência na fase inicial e jovem em terras abandonadas com suplementação alimentar, seguidas de áreas com vegetação intacta e com suplementação alimentar.

A influência da temperatura (máxima e mínima), precipitação anual, textura do solo, latitude e longitude na ocorrência de formigas da Tribo *Attini*, estudada por Lima (1991) em 6 locais diferentes, evidenciaram que as variáveis edafoclimáticas influenciam de forma diferenciada para cada gênero. Sendo que a temperatura máxima tem correlação positiva com o número de colônias por hectare das formigas do gênero *Atta* e *Acromyrmex*, enquanto a precipitação anual possui uma correlação negativa para as formigas desses gêneros.

Ao avaliarem a influência do material genético, idade e a proximidade à fragmentos e faixas de vegetação nativa sobre densidade de saúveiros em florestas de eucalipto, no município de João Pinheiros, Minas Gerais, Zanetti *et al.* (2000) concluíram que florestas de *Eucalyptus grandis* possuem uma maior densidade de formigueiros do que florestas de *E. pellita* e *E. tereticornis*, sendo o terceiro ano da floresta o ano com maior densidade de formigueiros. Além disso, os autores também concluíram que a proximidade à fragmentos nativos intactos (sem controle de formigas) aumenta a densidade de formigueiros por talhão e a proximidade as faixas de vegetação nativa (vegetação controlada com formicida), diminuem a densidade de formigueiros.

2.6 Modelagem de pragas

Embora diferentes variáveis edafoclimáticas e da paisagem tenham sido correlacionadas com a presença e estabelecimento de formigas cortadeiras, pouco se conhece sobre como essas diferentes características se relacionam entre si e refletem na bioecologia da praga. Neste sentido, modelos de aprendizado de máquina têm sido utilizados para identificar padrões de resposta através da relação entre diferentes características. Estas técnicas têm como objetivo identificar as variáveis independentes que melhor predizem a variável de interesse, podendo ela ser categórica ou contínua (De'ATH; FABRICIUS, 2000; USIO *et al.*, 2006, EDNEY-BROWNE; BROCKERHOFF; WARD, 2018, BARBOSA *et al.*, 2021). Proposto por Breiman (2001), o RandomForest, é um modelo de aprendizagem de máquina que

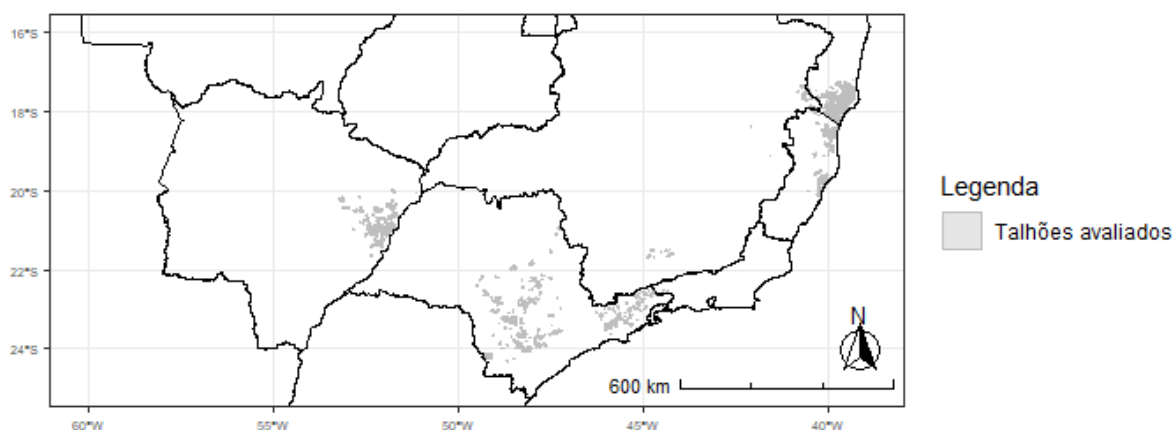
através de escolhas aleatórias de variáveis preditoras constrói múltiplas árvores de decisão, onde a classe ou o valor resultante mais popular dessas árvores é dada como resultado. Esse modelo permite análises de regressão e classificação supervisionada e o uso de extensos bancos de dados. Por utilizar múltiplas árvores de decisão, o modelo fornece boa acurácia e evita o sobreajuste (*overfitting*) (BIAU *et al.*, 2016; BREIMAN, 2001). Essa metodologia possibilita, por exemplo, evidenciar padrões de distribuição espacial de pragas de acordo com características edafoclimáticas e da paisagem que agrupem a sua ocorrência. Além disso, com essa ferramenta, é possível desenvolver mapas de risco de pragas de acordo com o cenário climático atual e projeções futuras, possibilitando aperfeiçoar as técnicas de manejo de pragas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em áreas florestais manejáveis de eucalipto pertencentes a empresa Suzano S.A., localizadas nos estados da Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Rio de Janeiro, totalizando 728.708 hectares e 33.182 talhões (Figura 1).

Figura 1 - Distribuição dos talhões florestais avaliados no período de 2010 a 2019



As áreas foram divididas em 5 grupos de acordo com a similaridade edáfica e climática utilizando a metodologia de clusterização K-means (DIDAY *et al.* 1979). Para a segregação dos clusters foram utilizadas as informações edáficas de quantidade de argila (%) e areia (%) (VASQUES *et al.*, 2021) e informações históricas (1980-2009) de precipitação anual (mm), coeficiente de variação da precipitação (%), temperatura média (°C), coeficiente de variação de temperatura média (%), temperatura mínima (°C) e temperatura máxima (°C) obtidas pela média mensal considerando o período de 1980 a 2009 obtidas em XAVIER *et al.*, 2015. A fim de realizar a análise de cluster as variáveis foram normalizadas utilizando a Equação 1.

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (1)$$

Onde:

X_{norm} = Valor da variável normalizado

X = Observação i da variável a ser normalizada

X_{min} = Menor valor encontrado para a variável X

X_{max} = Maior valor encontrado para a variável X

A distribuição percentual dos tipos climáticos é apresentada na Tabela 1, onde observa-se que Aw é o clima predominante, seguido pelos climas Af, Cfa e Am. Nas áreas avaliadas também há uma diversidade edáfica (Tabela 2), onde majoritariamente há Argissolos de textura média, seguidos de Latossolos com textura média e Neossolos de textura média (SUZANO S.A, 2023 (informação interna); ROSSI, 2017; SANTOS; CARVALHO JUNIOR; AGLIO; SOUSA; PARES; FONTANA; MARTINS; OLIVEIRA, 2011), VASQUES; COELHO; DART; CINTRA; BACA, 2021).

Tabela 1 – Distribuição da classificação climática, segundo Koppen, das áreas florestais monitoradas

Tipo climático	Distribuição da área avaliada
Aw	32,78%
Af	26,08%
Cfa	16,77%
Am	12,52%
Cfb	5,63%
Cwa	4,32%
Cwb	1,90%
Número total de talhões avaliados	33.182

Fonte: Adaptado de Alvares *et al.*, 2013

Tabela 2 – Distribuição da classificação edáfica das áreas florestais monitoradas

Ordem	Textura (0-30)**	Distribuição na área avaliada (%)
Argissolo	média	38,47
	arenosa	4,24
	argilosa	1,68
Latossolo	média	30,37
	argilosa	7,35
	arenosa	0,18
Neossolo	média	8,01
	argilosa	2,98
	arenosa	0,05
Cambissolo	argilosa	3,03
	média	1,15
Espodossolo	média	1,34
	arenosa	0,47
	argilosa	0,00
Planossolo	arenosa	0,15
	média	0,11
Outros		0,40
Número total de talhões avaliados		33.182

Fonte: SUZANO S.A, 2023 (informação interna); ROSSI, 2017; SANTOS *et al.*, 2011; VASQUES *et al.*, 2021. **Considerando a porcentagem de argila para as classificações arenosa (0-15,0%), média (15,1-35,0%), argilosa (35,1-60,0%) e muito argilosa (>60,1%).

3.2 Monitoramento de formigas cortadeiras

O monitoramento de formigas cortadeiras ocorreu anualmente em florestas acima de 1 ano e se estendeu até a idade de corte, ocorrendo majoritariamente entre os meses de fevereiro a agosto. Foram considerados apenas saúvas (*Atta spp.*) que tem como espécies predominantes a *Atta sexdens* e *Atta laevigata* nos locais estudados. Em cada talhão foram amostrados 5% da área total em forma de transectos, com o mínimo de 2 transectos a cada 30 hectares. A largura transecto é fixa (21 m) com área de observação de 10,5 m para cada lado, o comprimento varia de acordo com o tamanho do talhão (Figura 2). Durante o caminhar foram coletados o número de

formigueiros, seus respectivos tamanhos (m^2 de terra solta = maior comprimento x maior largura) e a distância da linha central do transecto.

Os dados de cada transecto foram extrapolados para a área total do talhão e a densidade de ninhos (número de ninhos ha^{-1}) por classes de tamanho (Tabela 3) foi gerada.

Figura 2 - Ilustração do transecto de 21 m de largura utilizado para amostragem de ninhos de formigas cortadeiras (manchas marrons), onde a linha vermelha representa o caminhamento central do observador que verifica a presença de ninhos, o respectivo tamanho e a distância da linha central, para ambos os lados.

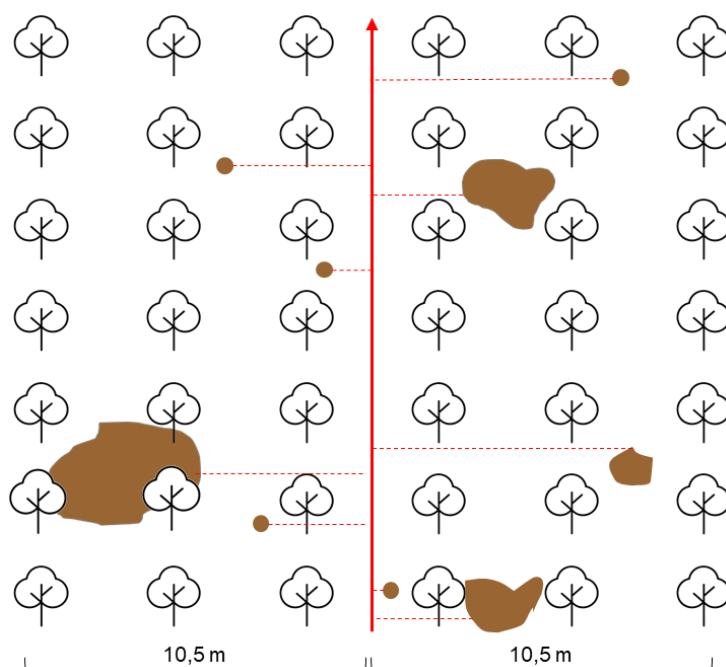


Tabela 3 – Classes de acordo com o tamanho de ninhos de formigas cortadeiras

Classe	Tamanho de ninhos (m^2 de terra solta)
1	0,10 a 0,50
2	0,51 a 1,00
3	1,01 a 10,00
4	10,01 a 50,00
5	> 50,10

A classe 1 representa os formigueiros iniciais, onde somente é possível visualizar o orifício que a rainha escavou para fundar o novo ninho, tendo pouca ou nenhuma terra solta ao redor. A classe 2 também se caracteriza por ninhos iniciais, onde a saúva já conseguiu mover até 1 m² de terra solta. Essas classes evidenciam a capacidade de reinfestação (colonização por novos ninhos) de formigueiros no local, visto que são oriundos de revoadas recentes. A classe 3 representa ninhos em desenvolvimento intermediário, que conseguiram se estabelecer. Já a classe 4 e 5 são formigueiros maiores e já adultos, sendo classe a 5 a mais difícil de se realizar o controle.

3.3 Dados edafoclimáticos e da paisagem

Informações mensais de precipitação (PPT), temperatura média (Tmed), temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), umidade relativa (UR) e radiação (RAD) no período de 2010 a 2019, foram obtidas através das estações meteorológicas públicas (INMET - Instituto Nacional de Meteorologia) em conjunto com as estações particulares da empresa. Após a obtenção de dados a nível de estação meteorológica, foi realizada a interpolação utilizando a metodologia IDW (Inverse Distance Weighting) considerando um raio máximo de 50 km para todas as variáveis citadas acima, obtendo como resultado variáveis meteorológicas a nível de talhão. Posteriormente, para os locais onde eventualmente houve falha de dados, as variáveis meteorológicas faltantes foram obtidas na plataforma NASA POWER (National Aeronautics and Space Administration/Prediction of Worldwide Energy Resources), que fornece informações meteorológicas adquiridas por satélites e modelagem (<https://power.larc.nasa.gov/>).

A partir dos dados meteorológicos das seis variáveis (PPT, Tmed, Tmin, Tmax, UR e RAD) foram geradas informações anuais que expressam sazonalidade, amplitudes e extremos, totalizando 83 variáveis climáticas. Dados históricos (1980-2009) (XAVIER *et al.*, 2015) também foram extraídos para cada talhão, com a finalidade de representar as condições climáticas médias.

A altitude (Shuttle Radar Topography Mission – SRTM) (FARR; KOBRICK, 2000), declividade (obtida através de dados SRTM), porcentagem de argila e areia

(VASQUES *et al.*, 2021) e Capacidade de Armazenamento de Água no Solo (CAD) (Agência Nacional de Águas, 2021), também foram obtidas.

A fim de avaliar a influência de diferentes usos de solos vizinhos às áreas monitoradas, para cada talhão foi delimitado um buffer de 600 metros ao redor do perímetro e a porcentagem de uso do solo foi extraída utilizando a coleção 6 do Projeto MapBiomas (PROJETO MAPBIOMAS, 2021), para cada ano do monitoramento. Os usos do solo considerados e os agrupamentos estão descritos na Tabela 4. Ao total, foram consideradas 97 variáveis edafoclimáticas e da paisagem (apêndice A).

Tabela 4 – Classificação de uso do solo utilizada pelo MapBiomas (Coleção 6) e os respectivos agrupamentos utilizados no presente trabalho

Uso do Solo (Mapbiomas)	Agrupamento
Agricultura	agricultura
Lavoura Temporaria	agricultura
Soja	agricultura
Cana	agricultura
Arroz (beta)	agricultura
Outras Lavouras Temporárias	agricultura
Mosaico de Agricultura e Pastagem	agricultura_pastagem
Lavoura Perene	agricultura_perene
Café (beta)	agricultura_perene
Citrus (beta)	agricultura_perene
Outras Lavouras Perenes	agricultura_perene
Campo Alagado e Área Pantanosa	area_pantanosa
Formação Campestre	formacao_campestre
Floresta	formacao_florestal
Formação Florestal	formacao_florestal
Formação Savânica	formacao_florestal
Mangue	formacao_florestal
Restinga Arborizada (beta)	formacao_florestal
Outras Formações não Florestais	outras_formacoes_naturais
Agropecuária	pastagem
Pastagem	pastagem
Silvicultura	silvicultura

3.4 Análise dos dados

3.4.1 Correlações individuais

A fim de compreender as relações individuais das variáveis edafoclimáticas e da paisagem com a densidade de ninhos (número de ninhos ha^{-1}) em cada talhão, foram realizadas análises de correlação de Spearman. A densidade de ninhos em cada classe de tamanho foi correlacionada com as 83 variáveis edafoclimáticas e da paisagem e entre o número de formigueiros das demais classes.

3.4.2 Estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras

Para verificar a influência conjunta das condições edafoclimáticas e da paisagem no estabelecimento de formigueiros em cada cluster, foi utilizada como variável dependente a presença ou a ausência de formigueiros iniciais (reinfestação), considerando para essa classificação a soma das densidades das classes de tamanho 1 e 2. Para verificar a influência das variáveis no potencial de desenvolvimento de formigueiros, a presença ou a ausência de ninhos grandes em cada talhão foi obtida através da soma das classes de tamanho 4 e 5. As duas variáveis dependentes foram relacionadas com as variáveis edafoclimáticas e da paisagem, utilizando o modelo de aprendizado de máquina RandomForest, com uso do software Python e pacote Sklearn. O modelo foi treinado com 80% dos dados (base treino) e validado com os 20% restantes (base teste), como o banco de dados é desbalanceado entre as classes presente e ausente, foi testado um método de sub-amostragem na base treino, onde o número de observações da maior classe se assemelha ao número de observações da menor classe por meio de escolha aleatória dentro do conjunto de dados da base treino original. Além dos modelos específicos com e sem subamostragem para cada cluster, também foi avaliado um modelo geral. Para a geração do modelo, foram utilizados os parâmetros padrões do pacote Sklearn, com exceção do número de árvores utilizadas para geração dos modelos e o número máximo de divisões para a classificação de cada nó (classe final) ($n_estimator = 500$ e $max_depth = 10$). Os modelos foram avaliados pela acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade (Eq. 2, Eq. 3, Eq. 4, Eq. 5), essas métricas foram calculadas com os resultados apresentados na matriz de confusão.

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

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

$$Sensibilidade = \frac{VP}{VP+FN} \quad (4)$$

$$Especificidade = \frac{VN}{VN+FP} \quad (5)$$

Onde:

VP = Verdadeiros Positivos

VN = Verdadeiros Negativos

FP = Falsos Positivos

FN = Falsos Negativos

3.4.3 Áreas de risco à estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras

3.4.3.1 Modelagem do risco

A análise de áreas de risco (HotSpots) visa identificar locais onde há intenso estabelecimento e potencial de desenvolvimento de formigas cortadeiras, o que maximiza os riscos de perda de produtividade. Para tanto, avaliou-se a frequência de reinfestação e de desenvolvimento de ninhos grandes em todos os talhões avaliados pelo menos 3 vezes entre 2010 e 2019 (Eq. 5 e Eq. 6). A sobreposição das duas informações para cada talhão gera um risco, conforme proposto na matriz de risco descrita na Figura 3.

$$F_{reinfestação} = \frac{NR}{N} \quad (6)$$

$$F_{ninhos grandes} = \frac{NNG}{N} \quad (7)$$

Onde:

NR = Número de vezes com reinfestação (presença de classe 1 ou 2)

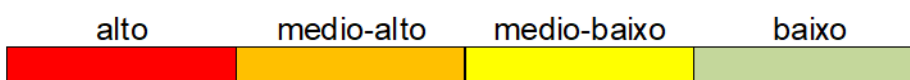
NNG = Número de vezes com presença de ninhos grandes (presença de classe 4 ou 5)

N = Total de avaliações

Figura 3 - Matriz proposta para avaliar o risco de infestações de acordo com a probabilidade de reinfestações e desenvolvimento de ninhos

Frequência de reinfestação (%)	Frequência de crescimento (%)				
	0-15	15-25	25-50	50-75	75-100
0-15					
15-25					
25-50					
50-75					
75-100					

Legenda de risco



Para avaliar a influência das condições edafoclimáticas e da paisagem no risco de cada talhão, o modelo Random Forest foi utilizado. A obtenção das variáveis independentes climáticas foi dada com o uso das médias meteorológicas (1980-2009) (XAVIER *et al.*, 2015), e o uso do solo foi dado pelas médias da porcentagem de ocupação dos agrupamentos descritos na Tabela 4, no período 2010 a 2019. A altitude (Shuttle Radar Topography Mission – SRTM) (FARR; KOBICK, 2000), declividade (obtida através de dados SRTM), porcentagem de argila e areia (VASQUES *et al.*, 2021) e Capacidade de Armazenamento de Água no Solo (CAD) (Agência Nacional de Águas, 2021) também foram obtidas, totalizando 58 variáveis edafoclimáticas e da paisagem, descritas no apêndice B. Devido ao número reduzido de observações para cada classe de risco, foram gerados apenas modelos gerais com e sem subamostragem. A avaliação dos modelos foi realizada com as métricas de precisão e sensibilidade (Eq. 3 e Eq. 4).

3.4.3.2 Mapa Hotspot

A fim de gerar um mapa Hotspot (mapa de risco) de formigas cortadeiras para o Brasil, o modelo de risco com subamostragem foi utilizado. Um grid de 0.25° foi obtido para todo o território brasileiro, totalizando 13058 grids. Para as variáveis preditoras, as médias meteorológicas foram utilizadas (1980-2009) (XAVIER *et al.*, 2015), assim como porcentagem de argila e areia (VASQUES *et al.*, 2021), Capacidade de Armazenamento de Água no Solo (CAD) (Agência Nacional de Águas, 2021), altitude

(Shuttle Radar Topography Mission – SRTM) (FARR; KOBICK, 2000), declividade (obtida através de dados SRTM) e para a paisagem, foi utilizado o uso do solo no ano de 2020, coleção 6 (PROJETO MAPBIOMAS, 2021). Na ausência de dados de CAD, foi utilizado o valor de 100 mm.

Além do mapa Hotspot de formigas cortadeiras considerando a normal climatológica (clima histórico 1980-2009), também foi investigado o comportamento da praga em cenários de mudanças climáticas no período 2030-2050. Para esse fim, os dados climatológicos (radiação, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura média, precipitação e umidade relativa) foram obtidos considerando as médias (*ensemble*) dos modelos climáticos globais ETA-HadGEM2 e ETA-MIROC5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5 (ALVARES *et al.*, 2021). Nesses cenários há restrição de chuvas e aumento da temperatura. As variáveis de entrada do *machine learning* de solos, do relevo e da paisagem foram as mesmas da modelagem para o Hotspot do clima médio.

4 RESULTADOS

As áreas avaliadas foram divididas em 5 clusters a partir da análise de agrupamentos, considerando médias climáticas (1980-2009) e variáveis edáficas (Figura 4). Como resultado, o cluster 1 (C1) abrange a região do Vale do Paraíba e sul do estado de São Paulo, o cluster 2 (C2) compreende parte dos talhões do sul do estado da Bahia, já o cluster 3 (C3) agrupou todos os talhões da região do Mato Grosso do Sul e alguns talhões do centro-oeste do estado de São Paulo, o cluster 4 (C4) inclui os talhões do estado do Espírito Santo e parte dos talhões do sul da Bahia e o cluster 5 (C5) compreende a região centro-sul do estado de São Paulo. As características dos agrupamentos podem ser observadas na Figura 5.

Figura 4 - Distribuição espacial do resultado da análise de agrupamentos (clusterização) considerando variáveis edafoclimáticas como preditoras

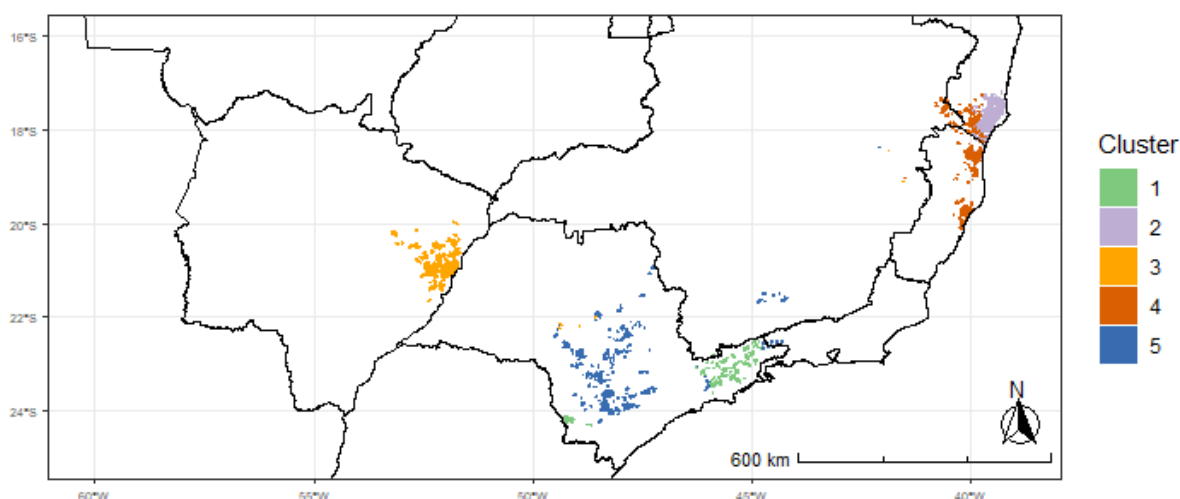
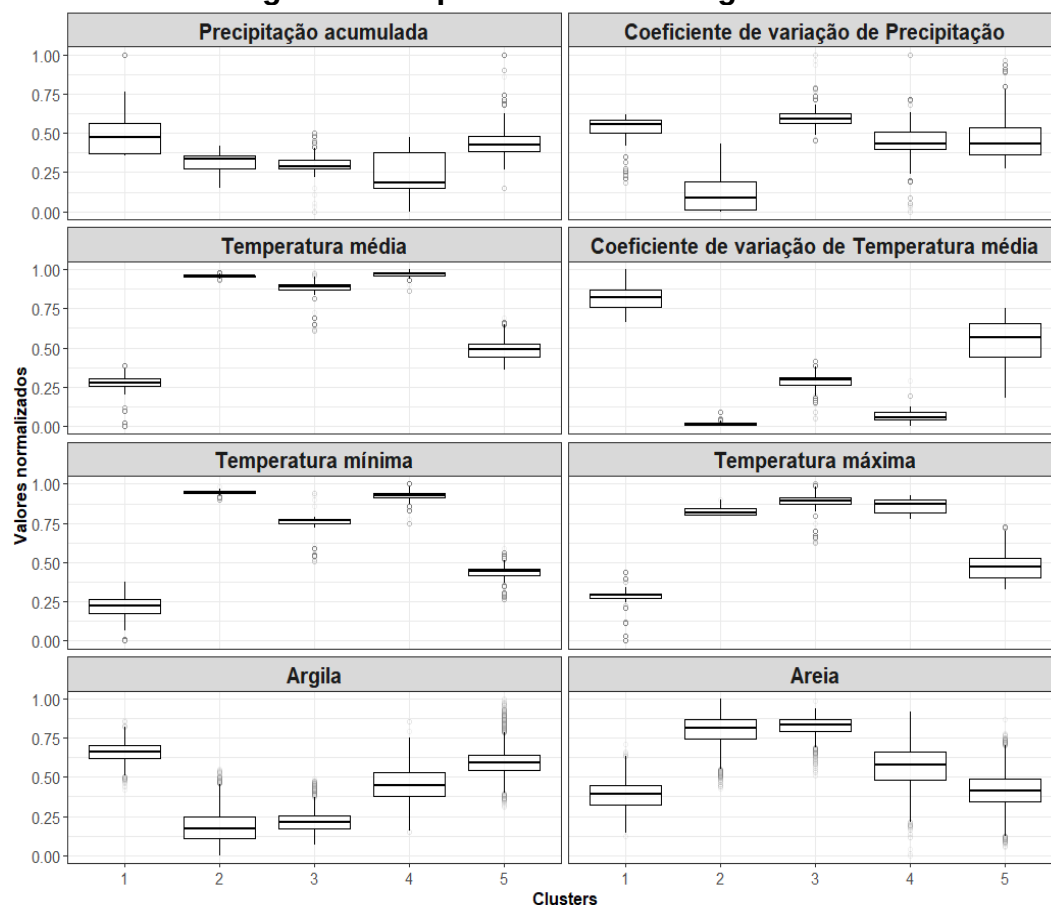


Figura 5 - Distribuição dos valores normalizados de precipitação acumulada, coeficiente de variação da precipitação, temperatura média, coeficiente de variação da temperatura média, temperatura mínima, temperatura máxima, argila e areia para os 5 clusters gerados



No período avaliado, foram encontradas máximas de 767, 647, 333, 321 e 193 ninhos de formigueiros totais por hectare nos clusters 2, 3, 5, 4 e 1 respectivamente. Para formigueiros classe 1, foram encontradas as máximas de 641 (C3), 638 (C2), 306 (C4), 231 (C5) e 131 (C1) ninhos por hectare, já para ninhos classe 5, as máximas encontradas foram 50 (C4), 33 (C3), 25 (C2), 17 (C5) e 10 (C1) ninhos por hectare.

Cerca de 75% (Q_3) dos dados de monitoramento avaliados apresentaram entre 0 e 3,07 ninhos por hectare no C1, 0 e 8,24 no C2, 0 e 38,38 no C3, 0 e 7,79 no C4 e 0 e 3,24 no C5 (Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9). O total de ninhos por hectare nas áreas avaliadas não segue uma distribuição normal, apresentando maior número de talhões com números baixos de formigueiros totais por hectare e alguns eventos extremos com valores maiores (Figura 6).

Tabela 5 – Área avaliada por ano e os Quartis (Q) da distribuição do total de ninhos por hectare em cada ano para o C1

Cluster	Ano	Área avaliada (ha)	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
1	2010	18.412,75	0,00	0,00	17,79	133,33
	2011	18.737,96	0,00	0,00	3,23	131,09
	2012	21.821,21	0,00	0,00	0,00	80,25
	2013	21.442,49	0,00	0,00	0,00	33,33
	2014	22.857,05	0,00	0,00	0,00	10,82
	2015	21.427,95	0,00	0,00	0,00	65,36
	2016	29.299,49	0,00	0,00	4,45	109,75
	2017	27.141,64	0,00	0,00	4,01	193,24
	2018	29.387,55	0,00	0,00	0,00	78,55
	2019	31.692,95	0,00	0,00	1,23	113,84
Média		24.222,10	0,00	0,00	3,07	94,96

Tabela 6 – Área avaliada por ano e os Quartis (Q) da distribuição do total de ninhos por hectare em cada ano para o C2

Cluster	Ano	Área avaliada (ha)	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
2	2010	49.235,39	2,79	5,69	8,37	124,14
	2011	55.945,39	3,39	8,37	10,05	271,24
	2012	74.430,93	2,69	5,47	8,54	233,78
	2013	73.405,81	3,65	5,69	15,27	189,40
	2014	77.402,56	2,50	4,19	7,88	103,49
	2015	76.832,77	0,00	0,00	5,84	163,40
	2016	82.044,17	0,00	0,00	1,26	130,72
	2017	65.482,62	0,00	0,00	0,00	88,89
	2018	61.864,62	0,00	0,00	4,86	204,91
	2019	148.078,86	0,00	4,21	20,37	766,67
Média		76.472,31	1,50	3,36	8,24	227,66

Tabela 7 – Área avaliada por ano e os Quartis (Q) da distribuição do total de ninhos por hectare em cada ano para o C3

Cluster	Ano	Área avaliada (ha)	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
3	2010	66.893,70	11,48	21,95	42,47	321,30
	2011	89.937,40	10,73	20,20	39,13	338,89
	2012	94.492,28	10,64	18,76	33,72	297,62
	2013	118.098,55	2,67	11,50	25,71	375,85
	2014	118.430,64	0,00	7,80	20,14	277,02
	2015	89.578,94	12,48	30,18	54,98	646,62
	2016	96.529,53	11,91	26,35	54,95	329,41
	2017	136.191,50	2,71	13,50	40,15	608,20
	2018	131.032,29	3,66	16,78	42,10	639,17
	2019	124.743,79	0,00	9,87	30,41	600,69
Média		106.592,86	6,63	17,69	38,38	443,48

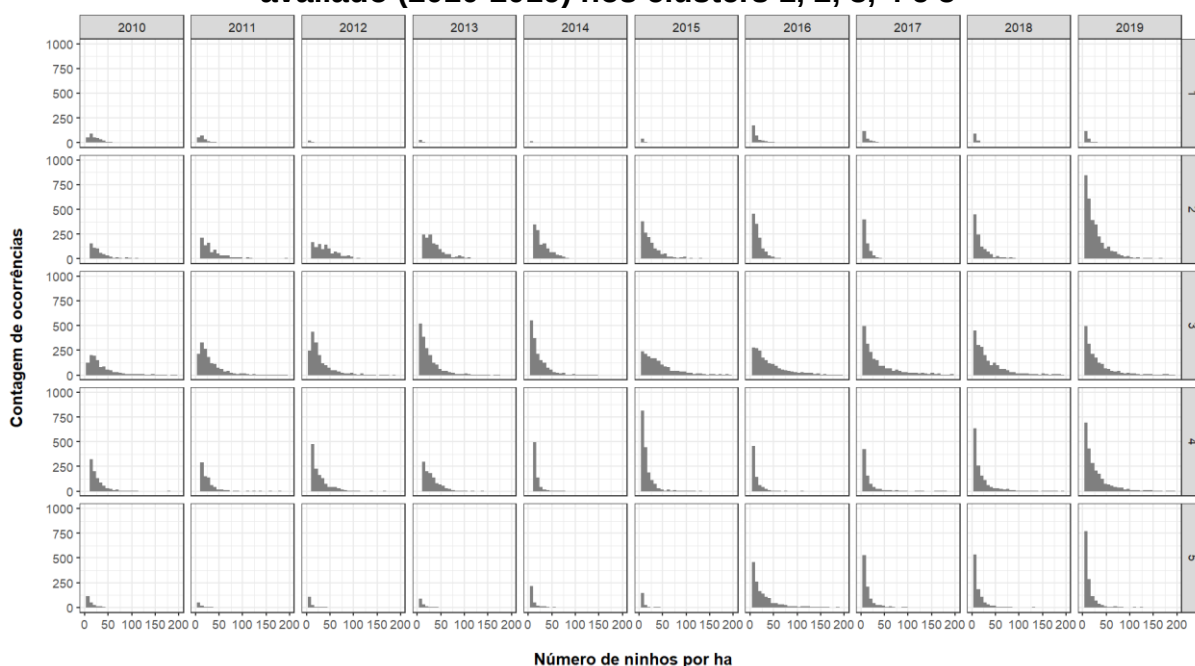
Tabela 8 – Área avaliada por ano e os Quartis (Q) da distribuição do total de ninhos por hectare em cada ano para o C4

Cluster	Ano	Área avaliada (ha)	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
4	2010	60.746,22	2,59	6,57	10,39	225,86
	2011	60.006,15	2,90	6,58	8,37	180,72
	2012	65.529,22	2,90	7,18	10,54	162,72
	2013	58.478,26	2,90	6,47	10,23	137,13
	2014	55.727,95	2,64	4,19	6,72	74,09
	2015	54.199,09	0,00	0,00	8,26	130,72
	2016	56.434,66	0,00	0,00	0,00	113,33
	2017	47.225,96	0,00	0,00	1,34	175,93
	2018	57.002,45	0,00	0,00	5,40	320,95
	2019	83.210,42	0,00	2,06	16,67	316,67
Média		59.856,04	1,39	3,31	7,79	183,81

Tabela 9 – Área avaliada por ano e os Quartis (Q) da distribuição do total de ninhos por hectare em cada ano para o C5

Cluster	Ano	Área avaliada (ha)	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
5	2010	36.863,90	0,00	0,00	0,00	333,33
	2011	36.311,85	0,00	0,00	0,00	37,61
	2012	33.647,97	0,00	0,00	0,00	61,27
	2013	36.110,23	0,00	0,00	0,00	66,67
	2014	39.348,00	0,00	0,00	0,00	55,28
	2015	37.884,15	0,00	0,00	0,00	44,44
	2016	102.043,36	0,00	2,29	15,95	254,82
	2017	91.289,96	0,00	0,83	6,01	130,21
	2018	101.277,66	0,00	0,00	4,92	142,73
	2019	114.837,89	0,00	0,00	5,52	217,80
Média		62.961,50	0,00	0,31	3,24	134,42

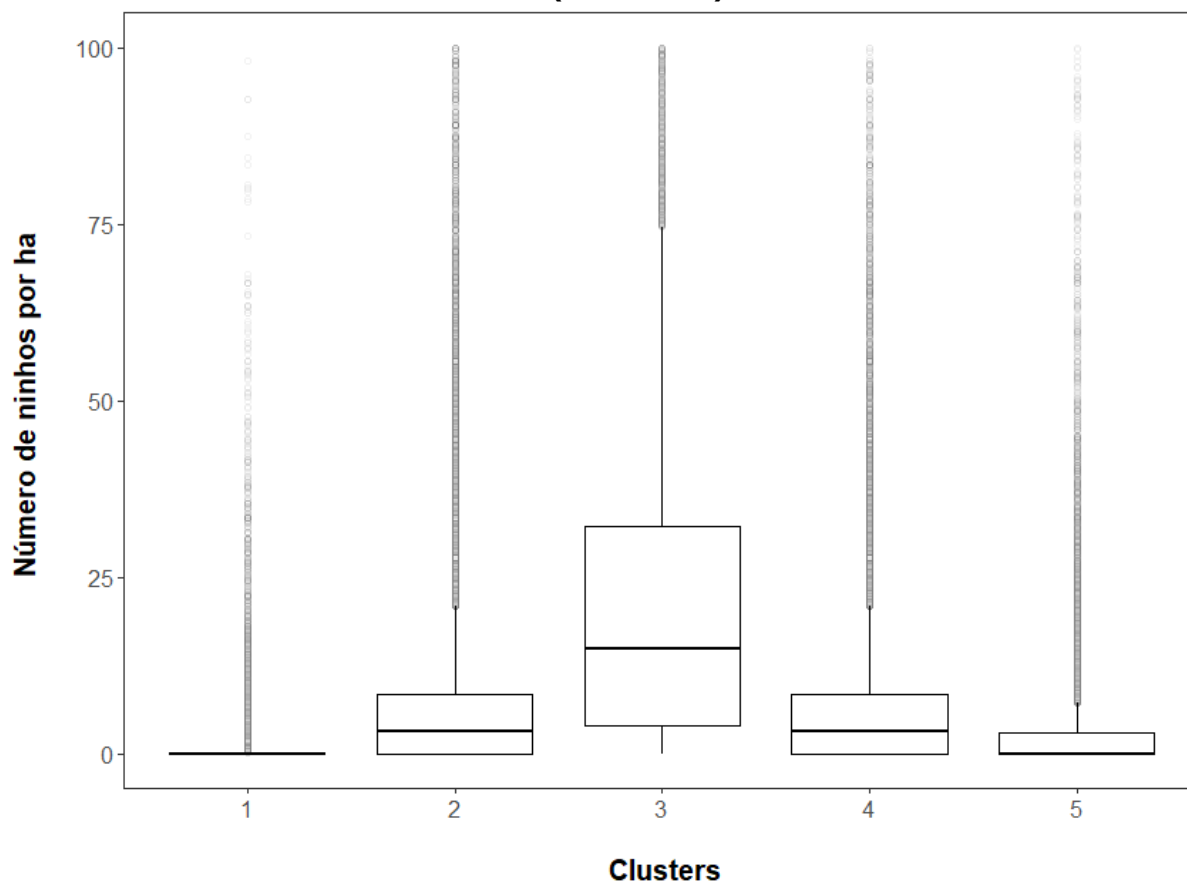
Figura 6 – Histograma anual do número total de ninhos por hectare no período avaliado (2010-2019) nos clusters 1, 2, 3, 4 e 5



*Para melhor visualização, o número de ninhos ha⁻¹ foi limitado a 200, excluindo no total 293 observações da visualização.

Na Figura 7 é possível observar a distribuição dos dados de densidade dos ninhos nos diferentes clusters, considerando os 10 anos de monitoramento (2010-2019).

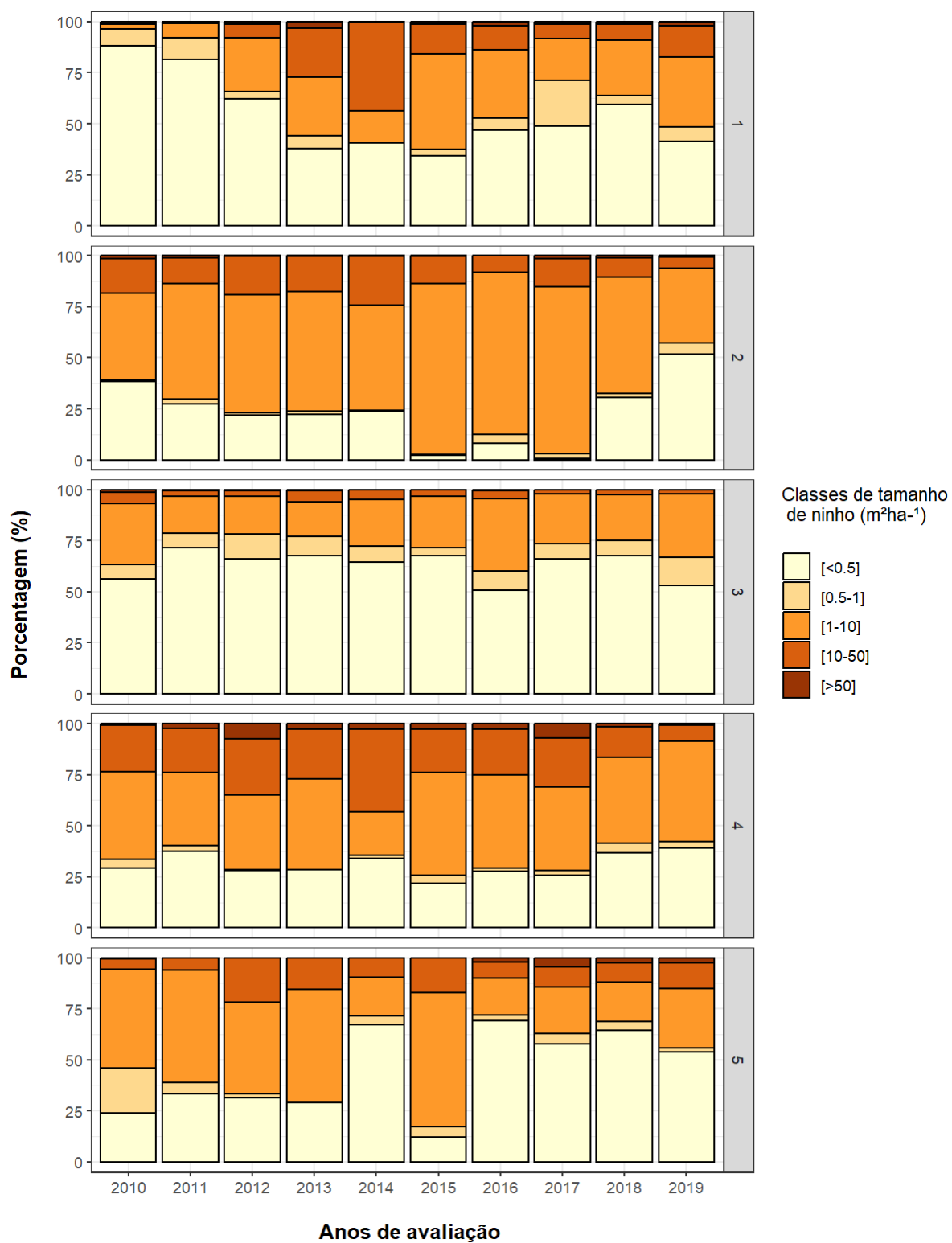
Figura 7 - Boxplot da densidade de ninhos por hectare ao longo dos 10 anos de monitoramento (2010-2019) nos 5 clusters



*Para melhor visualização, o número de ninhos ha^{-1} foi limitado a 100, excluindo no total 1886 observações da visualização.

As classes de tamanho de formigueiro mais frequentes nos talhões avaliados correspondem a formigueiros iniciais (classe 1) e intermediários (classe 3) (Figura 8). Sendo o cluster 3 (correspondente aos talhões presentes no Mato Grosso do Sul) o local em que a classe 1 se manteve constante ao longo dos anos da avaliação, correspondendo a pelo 50% dos ninhos mensurados anualmente.

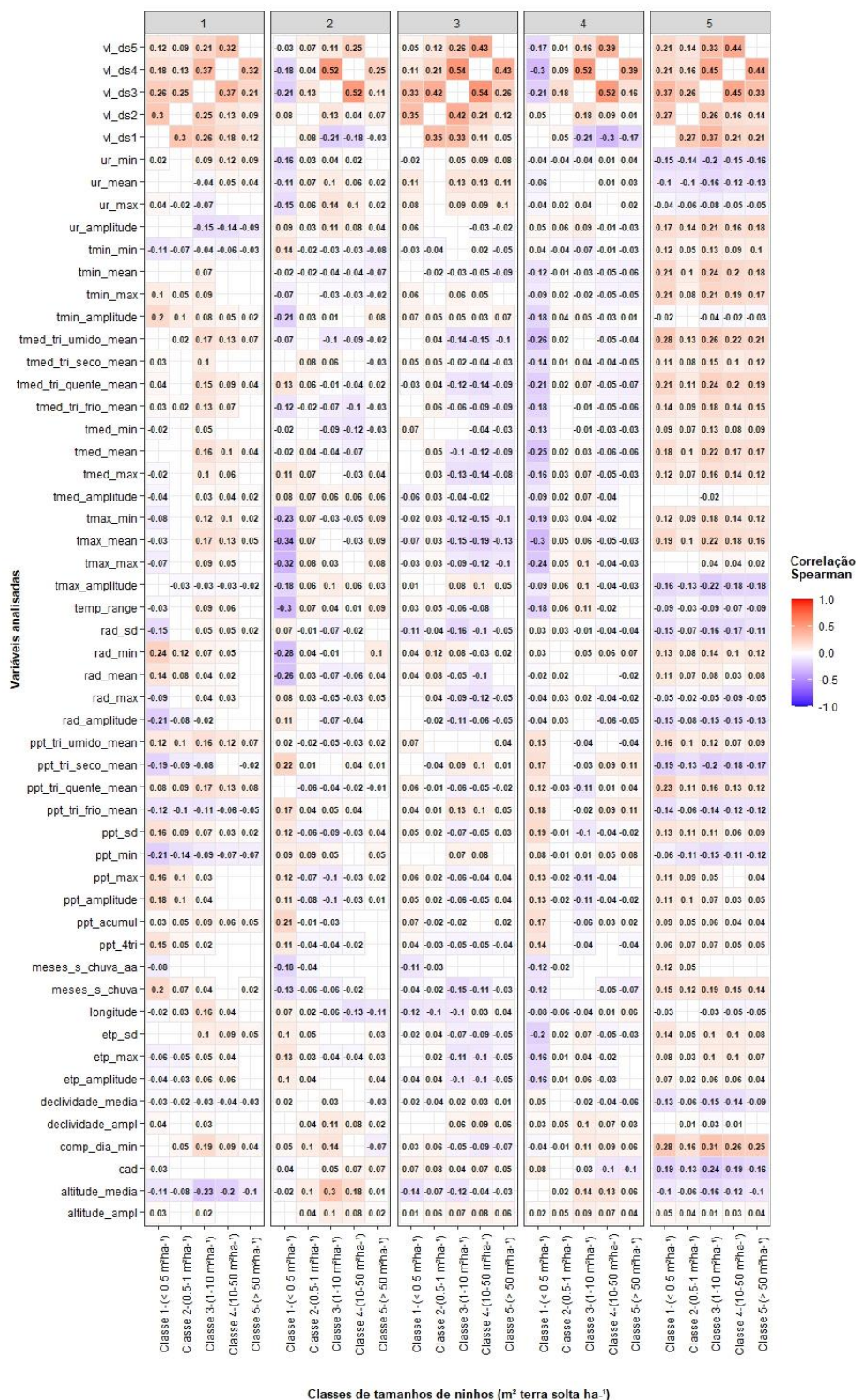
Figura 8 - Frequência (%) das diferentes classes de tamanho de ninho durante os anos de avaliação



4.1 Relações individuais da densidade de ninhos e variáveis edafoclimáticas e da paisagem

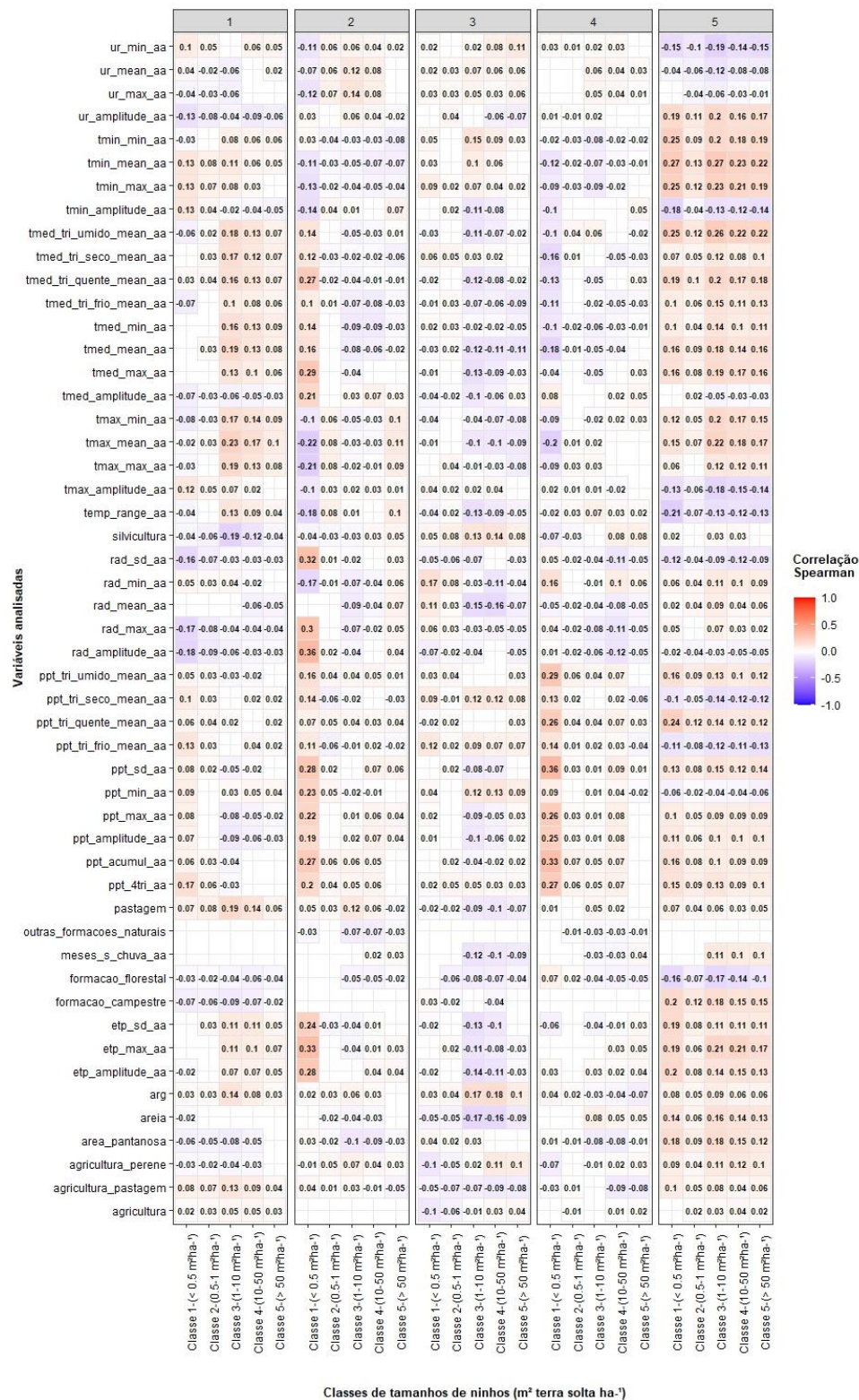
Ao correlacionar as variáveis edafoclimáticas, da paisagem com as densidades nas diferentes classes, as maiores correlações encontradas para todos os clusters se deram entre a densidade de ninhos da classe 4 com a densidade de ninhos da classe 3 ($r_s = 0.54, 0.52, 0.52, 0.45, 0.37$ para aos clusters 3, 2, 4, 5 e 1, respectivamente). Considerando apenas as variáveis edafoclimáticas e da paisagem, todas as relações apresentaram fraca correlação ($r_s < 0.5$) (Figura 9 e Figura 10), sendo as correlações mais altas dadas pela densidade de formigueiros da classe 1 e a amplitude de radiação do ano anterior ($\rho = 0.36, C2$), densidade de formigueiros da classe 1 e o desvio padrão da precipitação no ano anterior ($\rho = 0.36, C4$), densidade de formigueiros da classe 3 e o comprimento mínimo do dia ($\rho = 0.31, C5$), densidade de formigueiros da classe 1 e a radiação mínima ($\rho = 0.24, C1$) e a densidade de formigueiros da classe 4 e a média de temperatura máxima ($\rho = -0.19, C3$). A relação entre as três maiores correlações de densidade de formigueiros e as variáveis edafoclimáticas e da paisagem em cada cluster pode ser observada na Figura 11.

Figura 9 - Correlação de Spearman entre a densidade de ninhos das cinco classes de tamanho de formigueiro e as variáveis edafoclimáticas, da paisagem e entre o número de formigueiros das demais classes, nos 5 clusters avaliados (variáveis 1 a 51)



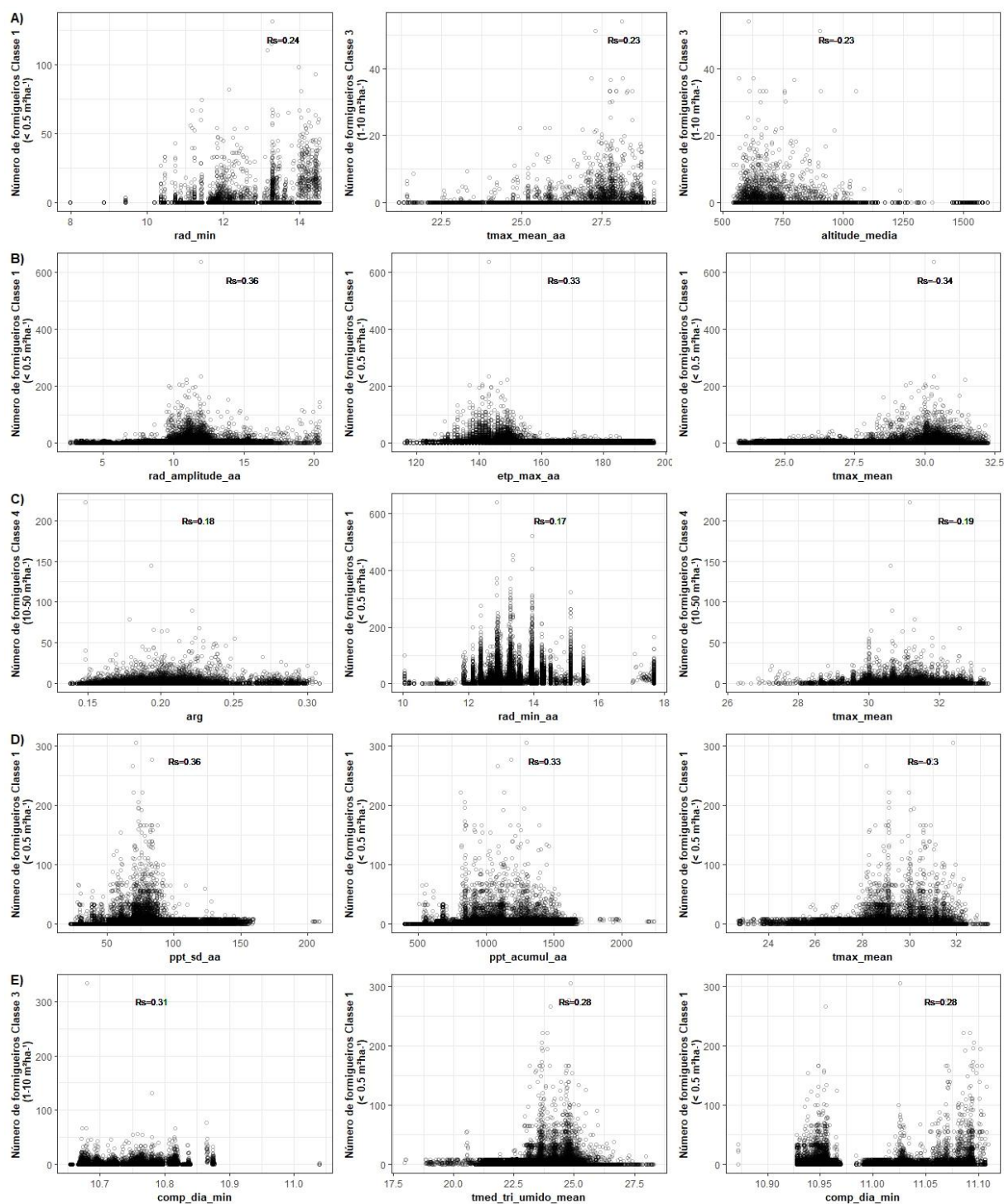
*As células vazias na figura correspondem a relações não significativas entre as variáveis ($p > 0.05$)

Figura 10 - Correlação de Spearman entre a densidade de ninhos das cinco classes de tamanho de formigueiro e as variáveis edafoclimáticas, da paisagem e entre o número de formigueiros das demais classes, nos 5 clusters avaliados (variáveis 52 a 103).



*As células vazias na figura correspondem a relações não significativas entre as variáveis ($p > 0.05$)

Figura 11 - Dispersão dos dados de densidade de formigueiros em função das três variáveis edafoclimáticas e da paisagem com a maior correção de Spearman (r_s) para cada cluster



Onde: A, B, C, D e E correspondem aos clusters 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

4.2 Estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras

No período avaliado, cerca de 39%, 78%, 90%, 73% e 48% dos talhões apresentaram reinfestação (ninhos classe 1 ou 2) nos clusters 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Enquanto 26% (1), 49% (2), 59% (3), 60% (4) e 44% (5) dos talhões apresentaram ninhos classe 4 ou 5 em algum momento. Nas Figuras (12, 13, 14, 15 e 16) é possível observar a dispersão espacial da presença da reinfestação durante os anos e nas figuras 17, 18, 19, 20 e 21 é possível observar a presença de ninhos grandes (classe 4 e 5) nos talhões avaliados.

Figura 12 - Presença da reinfestação nos talhões avaliados 2010-2019 no C1

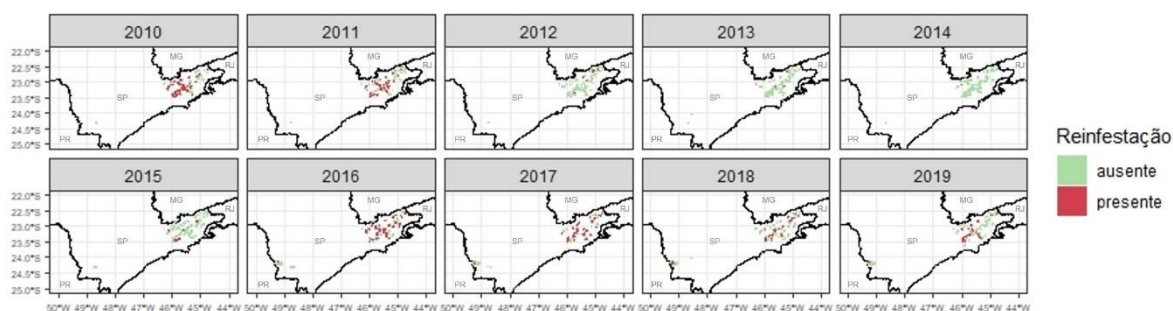


Figura 13 - Presença da reinfestação nos talhões avaliados 2010-2019 no C2

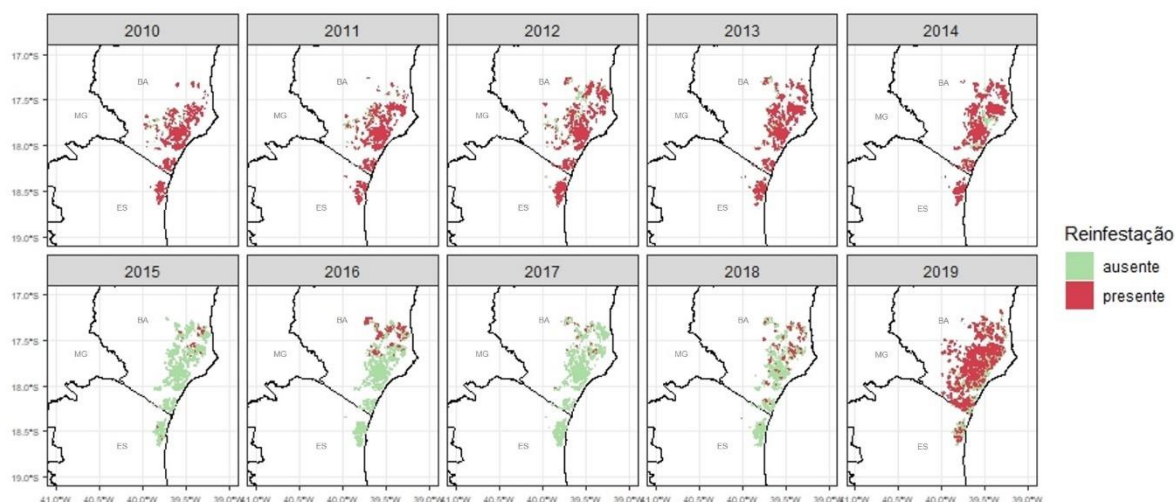


Figura 14 - Presença da reinfestação nos talhões avaliados 2010-2019 no C3

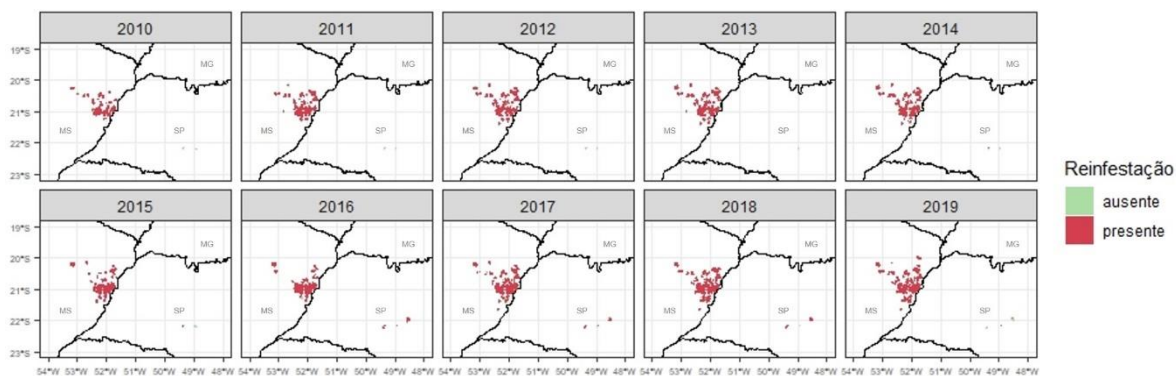


Figura 15 - Presença da reinfestação nos talhões avaliados 2010-2019 no C4

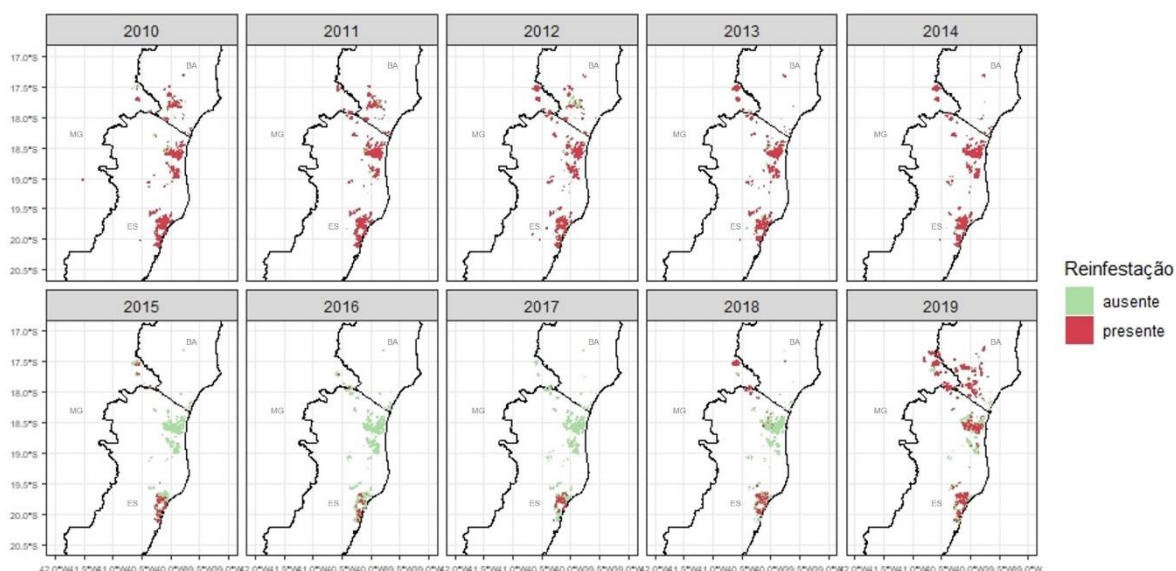


Figura 16 - Presença da reinfestação nos talhões avaliados 2010-2019 no C5

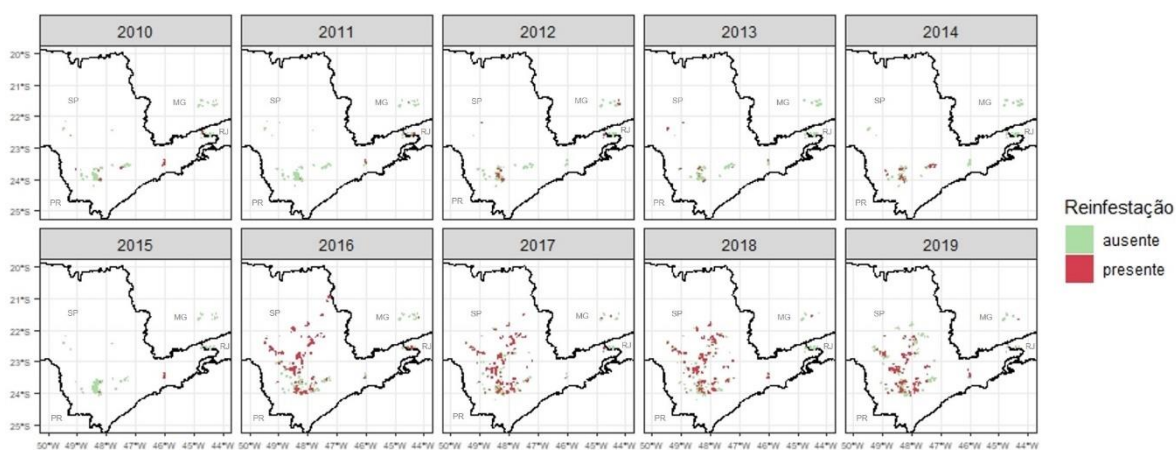


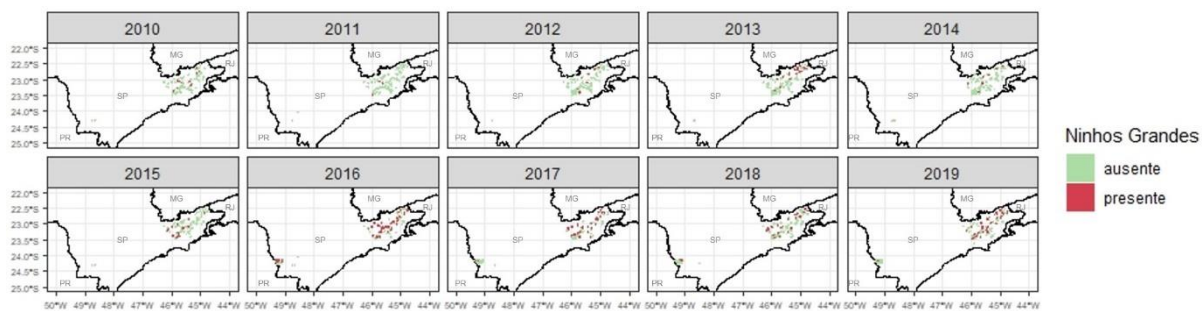
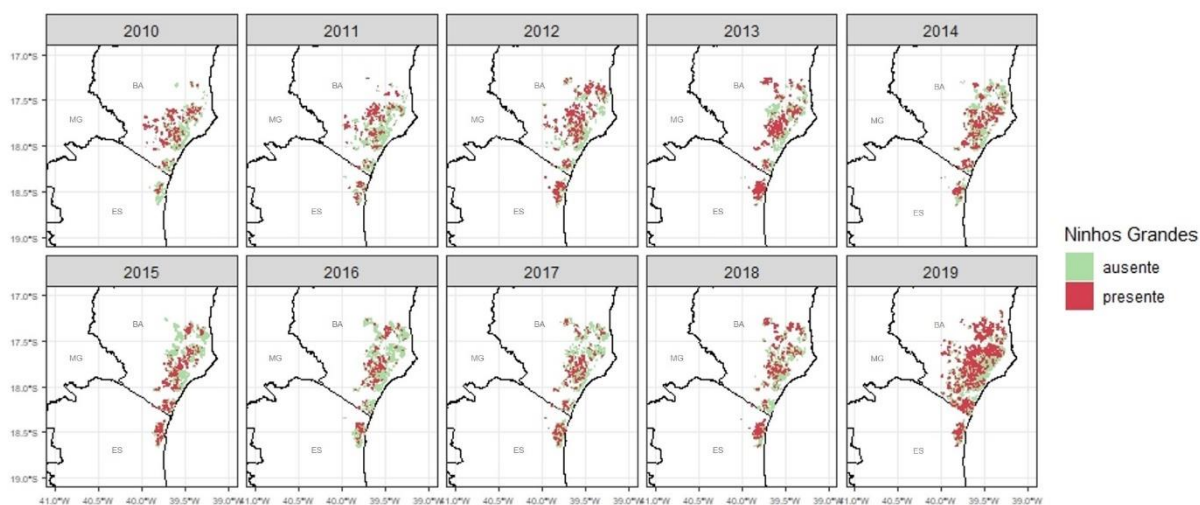
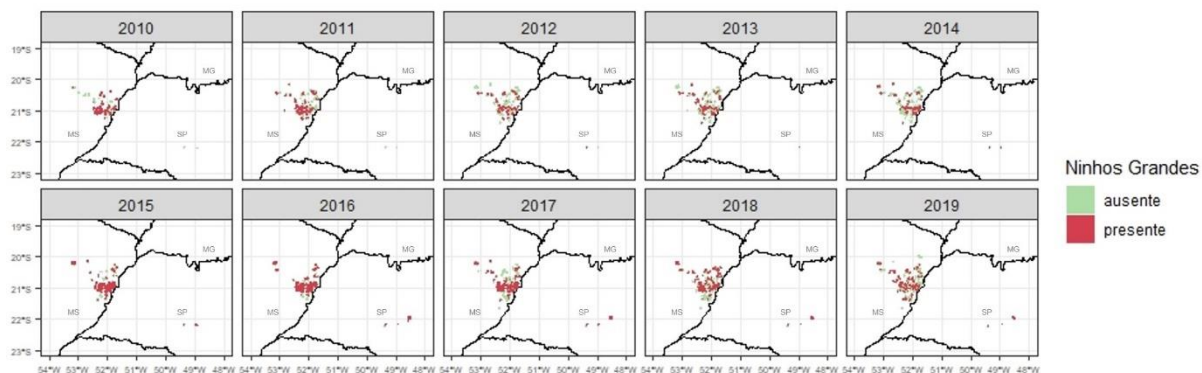
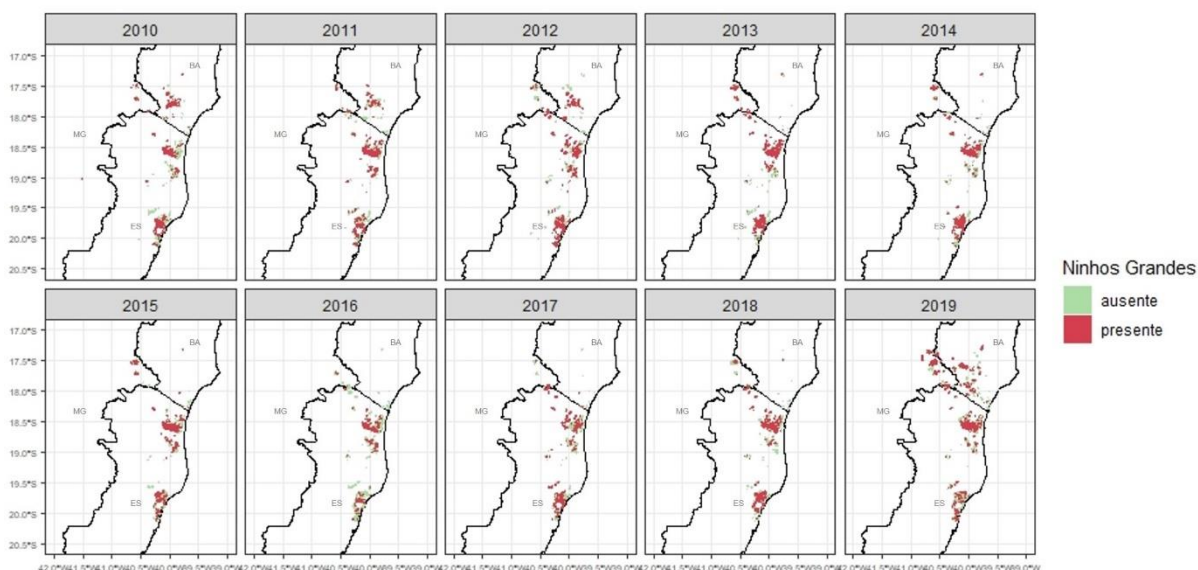
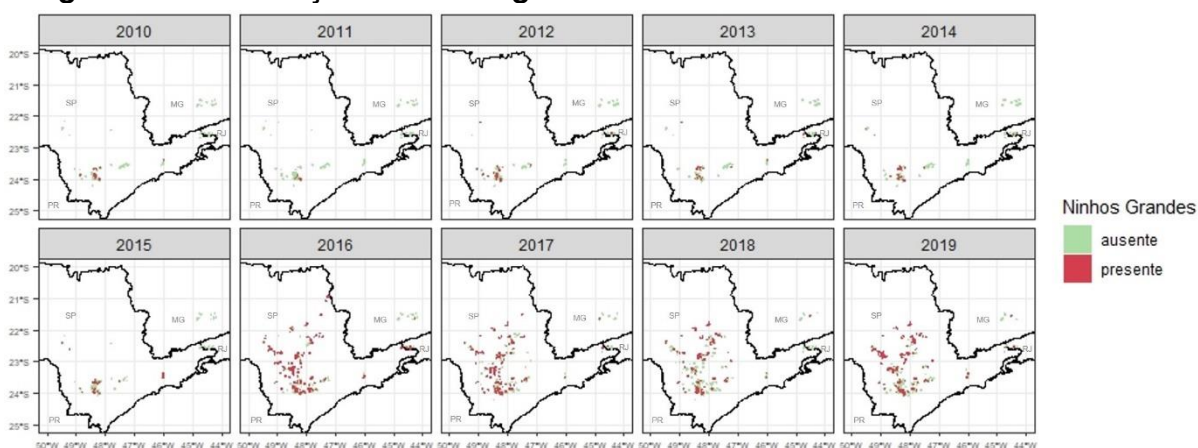
Figura 17 - Presença de ninhos grandes nos talhões avaliados 2010-2019 C1**Figura 18 - Presença de ninhos grandes nos talhões avaliados 2010-2019 C2****Figura 19 - Presença de ninhos grandes nos talhões avaliados 2010-2019 C3**

Figura 20 - Presença de ninhos grandes nos talhões avaliados 2010-2019 C4**Figura 21 - Presença de ninhos grandes nos talhões avaliados 2010-2019 C5**

Os modelos avaliados para reinfestação sem sub-amostragem apresentaram alta acurácia para todos os clusters, 84% (Geral), 89% (C1), 86% (C2), 81% (C3), 83% (C4) e 88% (C5), entretanto para os clusters onde a quantidade de observações positivas (presente) e negativas (ausentes) eram muito distintas (desbalanceadas) houve baixo nível de sensibilidade e especificidade nos modelos. Com a sub-amostragem a acurácia dos modelos diminui em todos os clusters, porém, a média da sensibilidade e a especificidade aumentam nos clusters C1, C3 e C4, já para os clusters C2, C4 e Geral os índices permanecem os mesmos na média (Tabela 11). O modelo geral para a caracterização nos sites específicos obteve um bom desempenho (85% de acurácia e 77% de sensibilidade) (Tabela 12).

Tabela 8 – Estatísticas dos modelos avaliados para presença de reinfestação

Modelo	Estatísticas do modelo									N treino	
	Acurácia		Precisão		Sensibilidade		Especificidade				
	RF	RF _{sub}	RF	RF _{sub}	RF	RF _{sub}	RF	RF _{sub}	RF	RF _{sub}	
Geral	0,84	0,83	0,76	0,74	0,86	0,89	0,82	0,79	1=48068, 0=72267	1=48068, 0=48068	
C1	0,89	0,75	0,72	0,34	0,33	0,85	0,98	0,73	1=1093, 0=7090	1=1093, 0=1093	
C2	0,86	0,85	0,79	0,76	0,88	0,92	0,84	0,80	1=15657, 0=22958	1=15657, 0=15657	
C3	0,81	0,75	0,82	0,90	0,97	0,75	0,30	0,74	1=13964, 0=4446	1=4446, 0=4446	
C4	0,83	0,82	0,74	0,71	0,86	0,90	0,81	0,76	1=13709, 0=21549	1=13709, 0=13709	
C5	0,88	0,81	0,76	0,49	0,53	0,82	0,96	0,81	1=3674, 0=16194	1=3674, 0=3674	

*RF = modelo Random Forest sem subamostragem, RF_{sub}= modelo Random Forest com subamostragem, N treino = Número de observações na base treino, sendo 1 = presença de reinfestação e 0 = ausência.

Tabela 9 – Validação do uso do modelo geral de reinfestação para regiões site-específicas

Modelo	Estatísticas do modelo				
	Acurácia	Precisão	Sensibilidade	Especificidade	N teste
C1	0,90	0,76	0,38	0,98	1=286, 0=1760
C2	0,84	0,74	0,92	0,78	1=3859, 0=5795
C3	0,79	0,79	0,99	0,13	1=3526, 0=1077
C4	0,81	0,70	0,91	0,75	1=3442, 0=5373
C5	0,90	0,77	0,66	0,95	1=931, 0=4036
Média	0,85	0,75	0,77	0,72	

*N teste = Número de observações na base teste, sendo 1 = presença de reinfestação e 0 = ausência.

De forma similar, os modelos avaliados para presença de ninhos grandes apresentaram alta acurácia no método sem subamostragem (80% Geral, 91% C1, 84% C2, 79% C3, 76% C4, 87% C5), porém possuem baixa sensibilidade, apresentando falsos negativos. Com o método da sub-amostragem, a acurácia diminuiu para todas as regiões, porém há um aumento na sensibilidade dos modelos: 81% Geral, 75% C1, 69% C2, 76% C3, 75% C4, 78% C5, permitindo identificar melhor as áreas com ocorrência de ninhos grandes (Tabela 13). O modelo geral para a

caracterização nos sites específicos obteve um bom desempenho (72% de acurácia e 77% de sensibilidade) (Tabela 14).

Tabela 10 – Estatísticas dos modelos gerais avaliados para presença de ninhos grandes

Modelo	Estatísticas do modelo									
	Acurácia		Precisão		Sensibilidade		Especificidade		N treino	
	RF	RF _{sub}	RF	RF _{sub}	RF	RF _{sub}	RF	RF _{sub}	RF	RF _{sub}
Geral	0,80	0,67	0,75	0,37	0,10	0,78	0,99	0,64	1=25946, 0=94389	1=25946, 0=25946
C1	0,91	0,72	0,67	0,23	0,15	0,81	0,99	0,71	1=713, 0=7470	1=713, 0=713
C2	0,84	0,72	0,63	0,35	0,15	0,75	0,98	0,72	1=6844, 0=31771	1=6844, 0=6844
C3	0,79	0,74	0,74	0,51	0,32	0,69	0,96	0,76	1=4834, 0=13576	1=4834, 0=4834
C4	0,76	0,70	0,69	0,48	0,27	0,76	0,95	0,67	1=10050, 0=25208	1=10050, 0=10050
C5	0,87	0,78	0,67	0,43	0,42	0,75	0,96	0,79	1=3501, 0=16367	1=3501, 0=3501

*RF = modelo Random Forest sem subamostragem, RF_{sub}= modelo Random Forest com subamostragem, N treino = Número de observações na base treino, sendo 1 = presença de reinfestação e 0 = ausência.

Tabela 11 – Estatísticas dos modelos gerais avaliados para presença de ninhos grandes

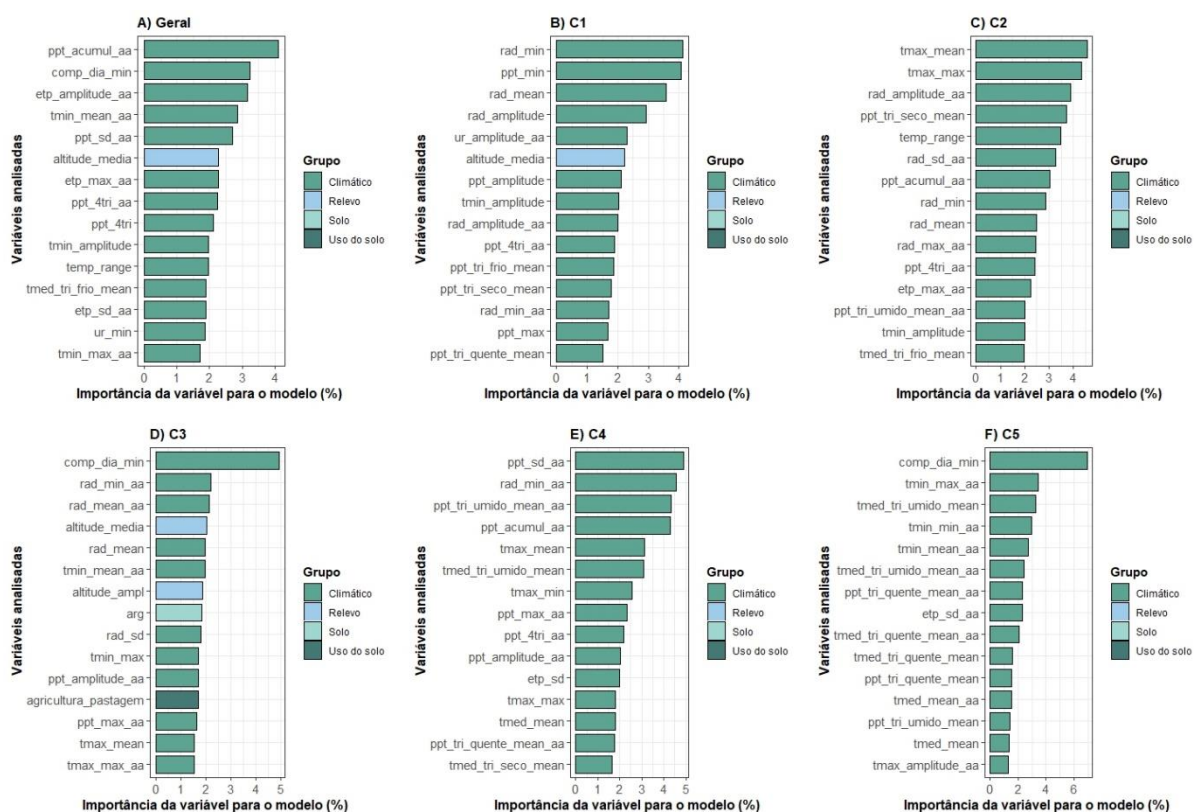
Modelo	Estatísticas do modelo				
	Acurácia	Precisão	Sensibilidade	Especificidade	N teste
C1	0,88	0,42	0,64	0,91	1=192, 0=1854
C2	0,76	0,39	0,70	0,78	1=1663, 0=7991
C3	0,60	0,39	0,86	0,51	1=1236, 0=3367
C4	0,56	0,38	0,92	0,41	1=2506, 0=6309
C5	0,82	0,48	0,74	0,83	1=853, 0=4114
Média	0,72	0,41	0,77	0,69	

*N teste = Número de observações na base teste, sendo 1 = presença de ninhos grandes e 0 = ausência.

A importância das 15 variáveis edafoclimáticas e da paisagem mais influentes para os modelos com sub-amostragem podem ser observadas na Figura 22 e Figura 23, o índice de importância indica o quanto a variável contribui para o resultado do modelo. Para reinfestação, as variáveis relacionadas a radiação, precipitação, temperatura, umidade relativa e fotoperíodo mínimo estão presentes em todos os

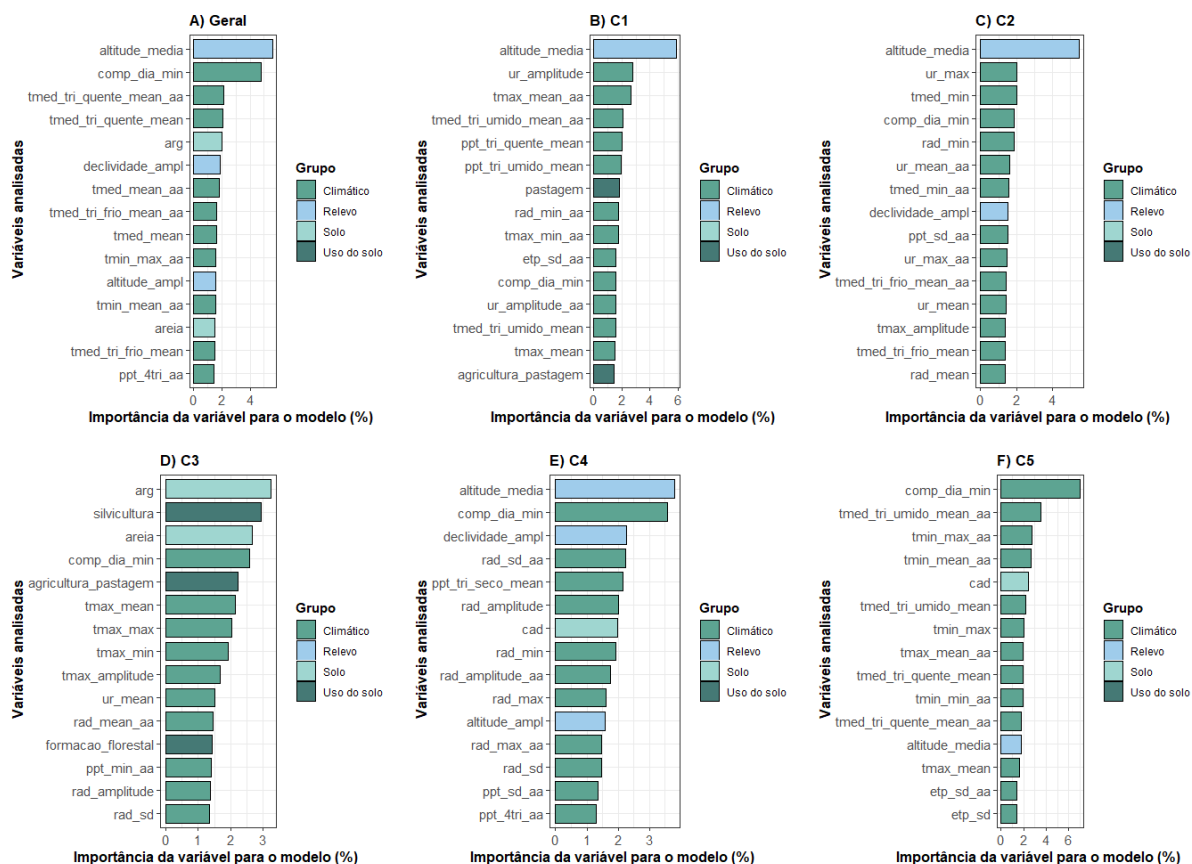
clusters, já para o modelo Geral, C1 e C3 outras variáveis relacionadas a altitude aparecem também como importantes. Para o C3, além das variáveis citadas acima destaca-se a relevância da porcentagem da agricultura e pastagem no buffer dos talhões avaliados. Para os modelos de ninhos grandes as variáveis de relevo, solo e paisagem ocorrem com maior frequência entre as regiões. A altitude média apresentou-se como importante variável preditora em todos os modelos, exceto para o C3.

Figura 22 - Importância das variáveis (%) para os modelos de reinfestação nas diferentes regiões



Onde: A-F correspondem as 15 variáveis mais importantes para os modelos de classificação de reinfestação com o método de sub-amostragem. A importância da variável indica quanto a variável contribui para o resultado do modelo.

Figura 23 - Importância das variáveis (%) para os modelos de ninhos grandes nas diferentes regiões

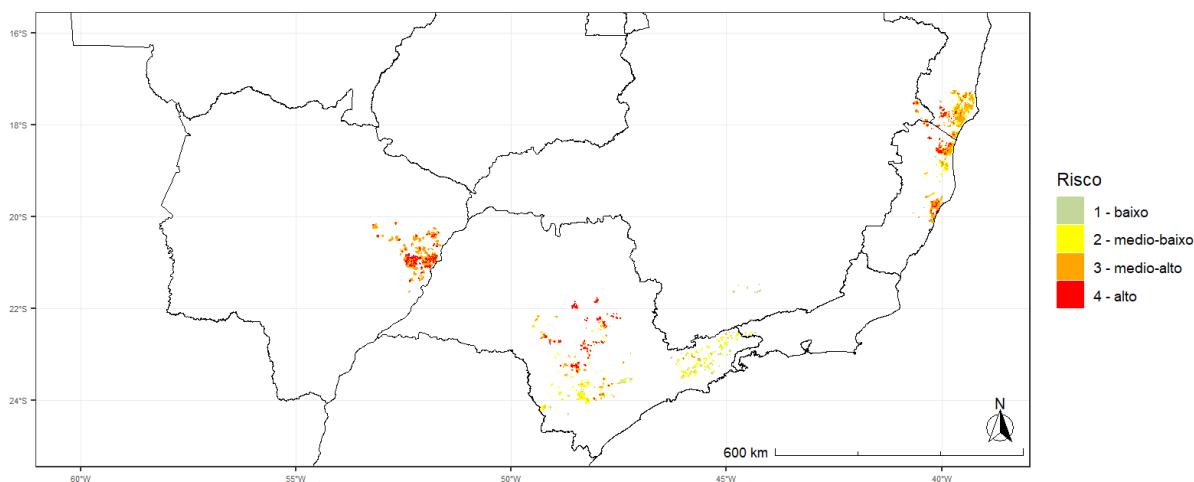


Onde: A-F correspondem as 15 variáveis mais importantes para os modelos de classificação de ninhos grandes com o método de sub-amostragem. A importância da variável indica quanto a variável contribui para o resultado do modelo.

4.3 Risco à estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras

Ao avaliar o risco de reinfestação e crescimento de ninhos de formigas cortadeiras, observou-se que 7% da área estudada corresponde a áreas de risco 1 (baixo), 36% de risco 2 (médio-baixo), 45% risco 3 (médio-alto) e 12% risco 4 (alto) (Figura 24). A maior porcentagem de área de risco alto observada é dada no cluster 3 (17.6%), seguido do cluster 5 (17.4%). Já em relação a áreas de risco baixo, o cluster 1 apresenta a maior porcentagem de área nessa classificação (39.5%), seguido pelo cluster 5 (28.8%), enquanto os clusters 2, 4 e 3 apresentam respectivamente 2.7%, 0.5%, 0.2% da área classificada como risco baixo.

Figura 24 - Distribuição do risco de infestação e crescimento de formigas cortadeiras nos talhões avaliados



O modelo de classificação das áreas de risco em função das variáveis edafoclimáticas e da paisagem, demonstrou precisão e sensibilidade de modo diferenciado entre as classes de risco (Tabela 12). A sensibilidade na detecção da classe 1 e 4 foi aumentada com o modelo de subamostragem.

Tabela 12 – Estatísticas dos modelos gerais de risco de reinfestação e crescimento de formigas cortadeiras

Estatísticas do modelo	Classe de risco	RF	RF _{sub}	N treino
Precisão	1	0,67	0,47	RF = 1402; RF _{sub} = 978
	2	0,66	0,69	RF = 8447; RF _{sub} = 978
	3	0,67	0,70	RF = 6077; RF _{sub} = 978
	4	0,78	0,28	RF = 978; RF _{sub} = 978
Sensibilidade	1	0,43	0,77	RF = 1402; RF _{sub} = 978
	2	0,87	0,72	RF = 8447; RF _{sub} = 978
	3	0,52	0,32	RF = 6077; RF _{sub} = 978
	4	0,14	0,79	RF = 978; RF _{sub} = 978

A importância das variáveis para o modelo geral com subamostragem pode ser verificado na Figura 25. A altitude média foi considerada a variável mais importante para o modelo geral, seguido por variáveis relacionadas a temperatura, radiação, comprimento do dia, declividade, porcentagem de argila, silvicultura e formação florestal, sendo observado, portanto, todos os grupos de variáveis (climáticas, edáficas, do relevo e da paisagem) influenciando nas áreas de risco de estabelecimento (reinfestação) e desenvolvimento de formigas cortadeiras. A Figura 26 mostra o comportamento da altitude média, temperatura mínima, porcentagem de argila e silvicultura em cada classe de risco.

Figura 25 - Importância das variáveis (%) para o modelo (subamostragem) de risco de reinfestação e crescimento

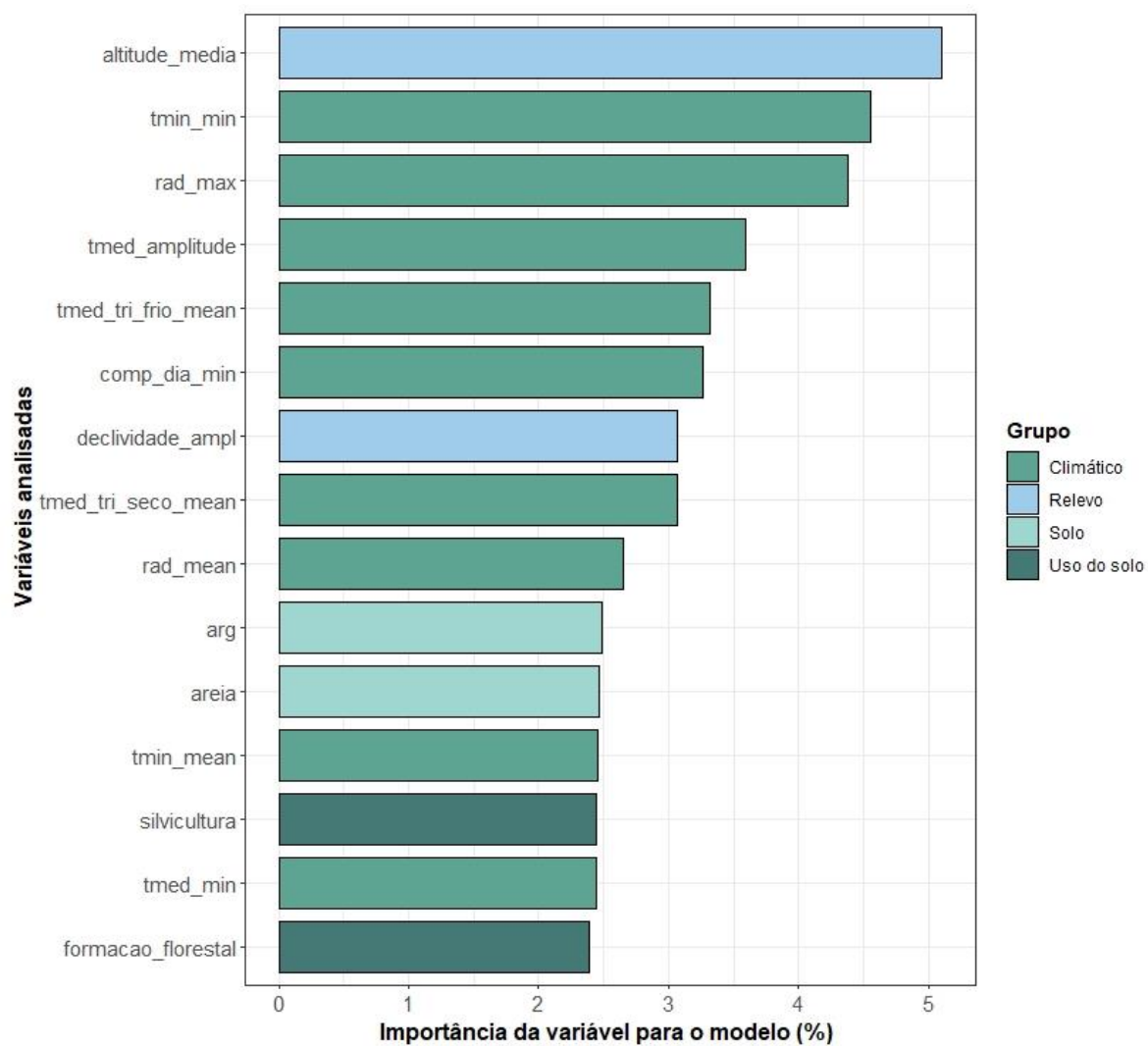
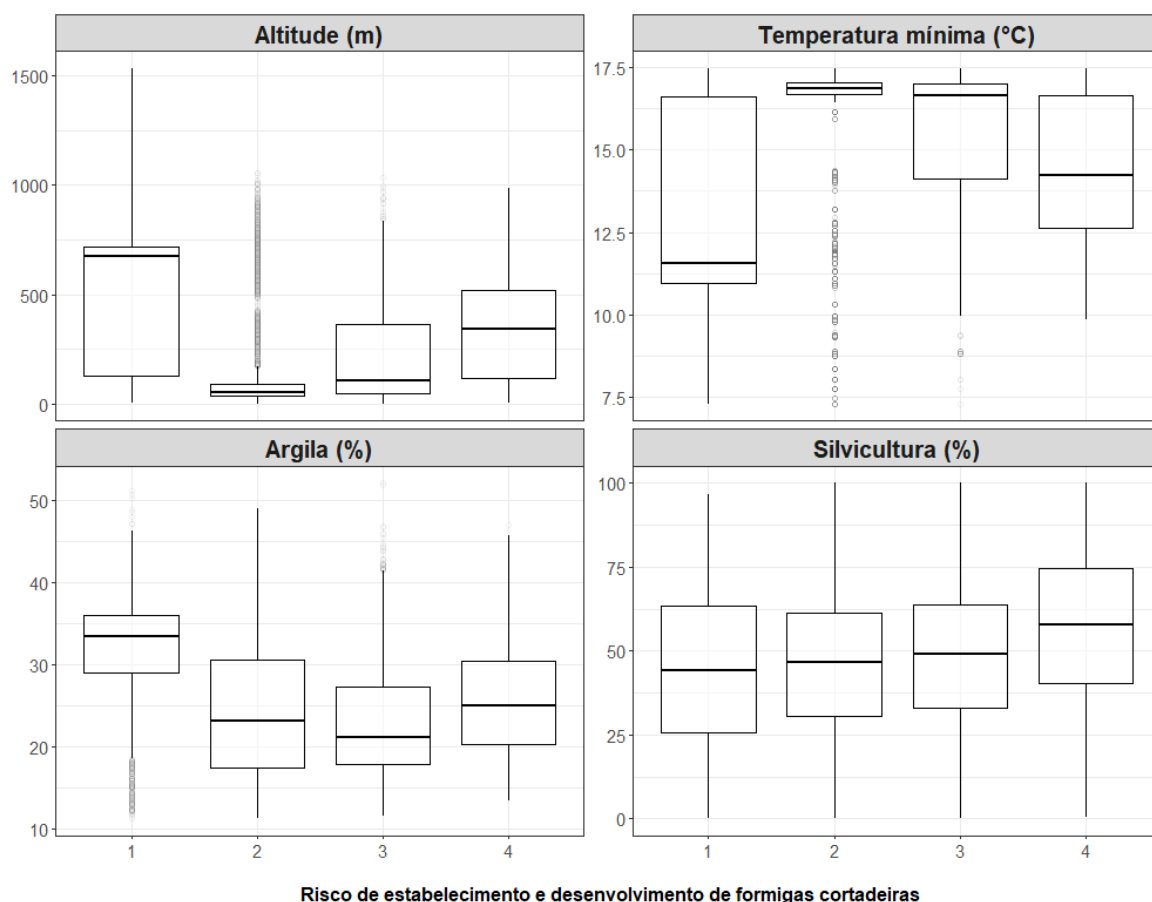


Figura 26 - Distribuição das variáveis altitude média (m), temperatura mínima (°C), porcentagem de argila (%) e silvicultura (%), em cada classe de risco de estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras



A partir do treinamento do modelo geral de risco com subamostragem foi possível o desenvolvimento do mapa de áreas Hotspots de formigas cortadeiras a nível nacional considerando a média climatológica 1980-2009, observado na Figura 27, e considerando as projeções conjuntas (médias) dos modelos climáticos globais ETA-HadGEM2 e ETA-MIROC5 e cenários de aquecimento RCP 4.5 e 8.5 (Figura 28).

Figura 27- Mapa HotSpot: Risco de estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras considerando a normal climática (1980-2009)

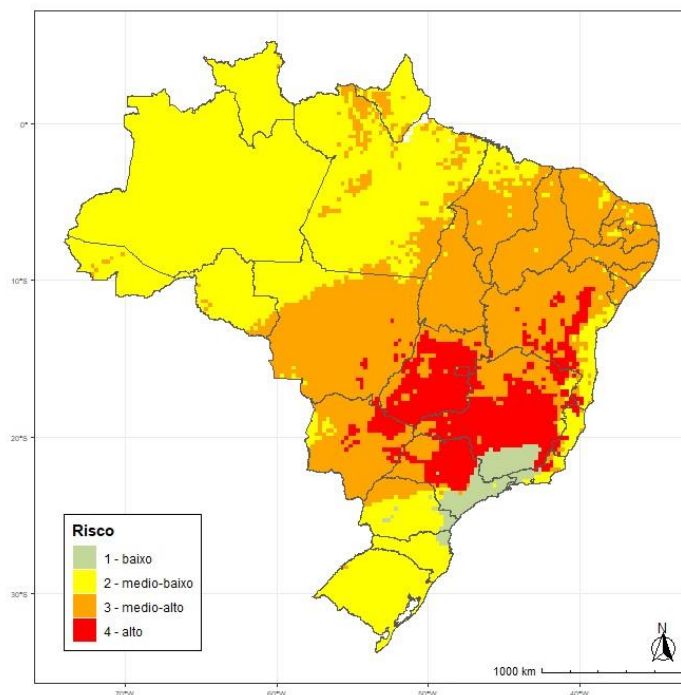
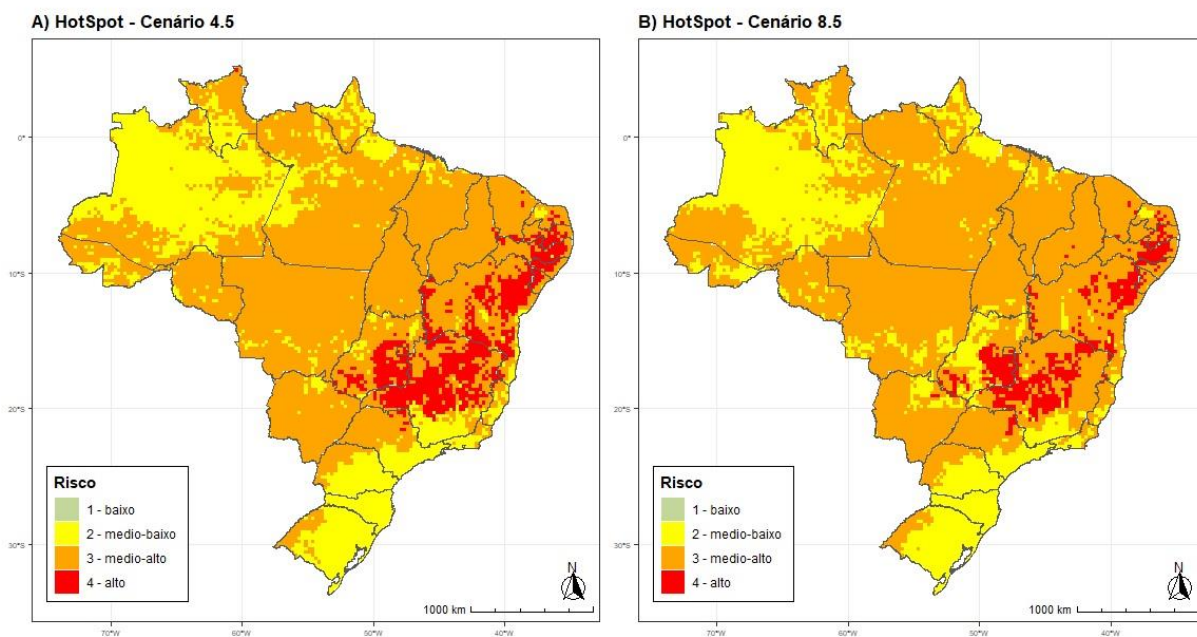


Figura 28 - Mapa HotSpot: Risco de estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras considerando as projeções médias dos modelos climáticos globais ETA-HadGEM2 e ETA-MIROC5 e cenários de aquecimento RCP 4.5 e 8.5



5 DISCUSSÃO

A análise dos dados de monitoramentos de formigas cortadeiras em florestas manejadas de eucalipto com o uso de modelos de aprendizagem de máquina, permitiu corroborar a hipótese de que as variáveis edafoclimáticas e da paisagem influenciam na presença, abundância e crescimento de ninhos de formigas cortadeiras.

A divisão da área em 5 clusters permitiu a segregação de climas e solos distintos, diferenciando-se principalmente nos coeficientes de variação de precipitação e temperatura média, demonstrando as diferentes sazonalidades nas regiões avaliadas. Evidencia-se também as diferenças existentes entre estados e dentro do mesmo estado brasileiro.

Ao avaliar a densidade de formigueiros nas diferentes regiões, obteve-se um comportamento semelhante a outros estudos, onde há predominância de ninhos iniciais e poucos ninhos considerados adultos (≥ 10 m² de terra solta) (CHILES *et al.*, 2022; ZANETTI *et al.*, 2000). Destaca-se a distribuição da densidade de ninhos encontrada para a região C3 em que 75% dos menores dados (Q₃) apresentam em média até 38 ninhos por hectare, enquanto para as demais regiões esse índice é de 8 (C2 e C4) e 3 ninhos por hectare (C1 e C5), demonstrando o potencial de estabelecimento de ninhos nessa região, considerada um dos hotspots mundiais de biodiversidade (MYERS *et al.*, 2000), situado no cerrado brasileiro.

Canuto *et al.*, (2019), Lima (1991) e Zanetti *et al.* (2000) avaliando a densidade de formigueiros em florestas de eucaliptos distribuídas em diferentes locais, apresentaram a existência de correlação da densidade de ninhos ha⁻¹ com temperatura (correlação positiva), precipitação (correlação negativa), umidade relativa (correlação positiva), argila (correlação negativa) e proximidade a fragmentos de floresta nativa (correlação negativa). No presente estudo, as variáveis influenciaram de modo diferenciado a densidade de ninhos nos clusters. Para as regiões C2, C4, C1 as maiores relações foram dadas entre a densidade de ninhos iniciais e amplitude de radiação no ano anterior, desvio padrão da chuva no ano anterior e radiação mínima, respectivamente. Todas as variáveis apresentaram influência positiva na densidade de ninhos da classe 1. Já para C5 e C3, as maiores relações se deram entre a densidade de formigueiros da classe 3 e o comprimento mínimo do dia (correlação positiva) e a densidade de formigueiros da classe 4 e a média de

temperatura máxima (correlação negativa), respectivamente. Ao avaliar a distribuição da densidade dos formigueiros nas variáveis, percebe-se que há limites inferiores e superiores de uma faixa ótima de maior desenvolvimento de ninhos de formigas cortadeiras, o que pode explicar as divergências encontradas em relação ao comportamento da densidade em função de algumas variáveis citadas na literatura.

5.1 Modelos de aprendizagem de máquina para presença de reinfestação

Os modelos treinados para presença e ausência de ninhos iniciais de formigas cortadeiras (reinfestação) com o uso de variáveis edafoclimáticas e da paisagem, apresentaram alta acurácia para os modelos gerais e específicos, com alta sensibilidade nos modelos com subamostragem, evidenciando que as variáveis exercem influência na distribuição e estabelecimento populacional de formigas cortadeiras. O modelo geral apresentou alta acurácia para classificar a reinfestação em todos os clusters (acurácia média = 85%), entretanto apresentou menor sensibilidade na detecção da presença de reinfestação para o cluster 1 e 5 em relação ao modelo site-específico com subamostragem, provavelmente causado pelo desbalanceamento de presença e ausência na base teste dessas regiões (dados com ausência de reinfestação: 86% (C1), 81%(C5)). Portanto, o modelo genérico pode ser utilizado para classificação de reinfestação nas regiões de C2, C3 e C4, não sendo necessário o uso de modelos site-específicos. Para as regiões C1 e C5, recomenda-se o uso dos modelos site-específicos para que haja maior sensibilidade na detecção da reinfestação.

A importância das variáveis edafoclimáticas e da paisagem para os modelos ocorreu de forma diferenciada entre os clusters. As variáveis mais importantes para a identificação da reinfestação foram precipitação acumulada no ano anterior, radiação mínima e precipitação mínima, temperatura máxima e temperatura mínima, comprimento do dia mínimo e desvio padrão da precipitação no ano anterior. Os ninhos classe 1 e classe 2 (até 1m²) são oriundos de revoadas recentes que ocorreram na área, pois após a escavação do túnel principal, em cerca de um ano (13 a 14 meses) é aberto um novo olheiro e o ninho tem um pouco mais de 1 m² de terra solta (GRANDEZA, 1999), portanto é esperada que as condições climáticas do ano anterior ao monitoramento influenciem na infestação de novos ninhos. A influência das variáveis identificadas nos modelos pode ser explicada pela influência que o clima e suas sazonalidades causam na revoada e formação de novos ninhos. Usualmente, as

revoadas ocorrem com a retomada das chuvas, após um período de estiagem (DELLA LUCIA, 2011; STAAB, KLEINEIDAM, 2014). Staab e Kleineidam (2014), após a observação de 23 revoadas de *Atta vollenweideri* identificaram que as mesmas ocorrem em dias em que a temperatura esteja maior que 26°C ou preferencialmente próximo aos 32°C, essas características tornam o ambiente propício para o sucesso do novo ninho. A radiação solar influencia na temperatura do ambiente e do solo, afetando diretamente a profundidade das câmaras a serem escavadas pelas rainhas e consequentemente a sobrevivência das novas colônias (Souza *et al.*, 2022). Já o comprimento do dia (fotoperíodo), influencia na atividade de forrageamento dos insetos sociais (Lei *et al.*, 2019). Também é importante pontuar que o cálculo para a obtenção da variável comprimento do dia utiliza a informação de latitude, que pode influenciar em regiões com grandes gradientes, como é o caso da região C3 que possui alguns talhões na região de Minas Gerais e a região C5 que abrange o gradiente -24°S a -22°S no estado de São Paulo.

Em todas as regiões, a principal influência é dada por variáveis climáticas, a variável de relevo altitude média aparece no modelo geral e nas regiões C1 e C3. A região C3 foi a única região em que as variáveis de solo e paisagem também influenciaram entre as 15 variáveis mais influentes do modelo.

5.2 Modelos de aprendizagem de máquina para presença de ninhos grandes

Os modelos treinados para presença e ausência de ninhos grandes de formigas cortadeiras (potencial de crescimento) com o uso de variáveis edafoclimáticas e da paisagem, apresentaram acurácia para os modelos gerais e específicos, com sensibilidade nos modelos com subamostragem, evidenciando que as variáveis exercem influência no desenvolvimento dos formigueiros.

O modelo geral apresentou acurácia para classificar a presença de ninhos grandes em todos os clusters (acurácia média = 72%), porém a sensibilidade do modelo geral somente foi maior em relação aos modelos site-específicos para os clusters C3 e C4, no C5 foram encontrados valores próximos para ambos os modelos (geral: 74%, site específico: 75%). De forma similar ao ocorrido para o modelo de reinfestação, a diferença encontrada para C1 e C2 provavelmente foi causada pelo desbalanceamento de presença e ausência na base teste dessas regiões (dados com ausência de ninhos grandes: 90% (C1), 82% (C2)).

Ninhos adultos consomem até 1 tonelada de folhas por ano (MENDES FILHO, 1981), causando potenciais prejuízos a produtividade florestal. Portanto prioriza-se a sensibilidade na detecção de ninhos grandes em detrimento da acurácia e outros índices do modelo, admitindo-se maiores taxas de erros Tipo I (falso positivo). Nesse cenário, o modelo genérico pode ser utilizado para classificação de ninhos grandes nas regiões de C3, C4 e C5, não sendo necessário o uso de modelos site-específicos, porém para as regiões C1 e C2, recomenda-se o uso dos modelos site-específicos para que haja maior sensibilidade na detecção de ninhos grandes.

Em relação ao modelo de ninhos grandes, embora muito influenciado pelas variáveis climáticas, também há forte influência de variáveis do relevo, como a altitude (com exceção C3) e variáveis do solo (% argila e % areia para modelo geral e C3 e CAD para C4 e C5). Para o modelo C3 e C1 destaca-se também a influência das variáveis da paisagem, silvicultura, agricultura e pastagem e formação florestal.

Variáveis climáticas como temperatura e umidade do ar influenciam diretamente na atividade de forrageamento das formigas cortadeiras. Em estudo realizado no Cerrado com *Atta laevigata*, a atividade de forrageamento mostrou uma resposta bimodal ao longo do dia (VIANA *et al.*, 2004). Nesse mesmo estudo, os autores detectaram que não houve forrageamento em dias chuvosos, ressaltando a importância da sazonalidade do clima. A altitude, variável presente na maior parte dos modelos, relaciona-se com a temperatura e umidade, fatores essenciais para o desenvolvimento de formigueiros e para a atividade de forrageamento. As alterações na atividade do forrageamento tem influência direta na disponibilidade de recursos para a sobrevivência e desenvolvimento do ninho.

Extensas áreas de plantios de eucalipto podem favorecer o crescimento de ninhos de formigas cortadeiras por facilitarem a busca por substrato vegetal (MONTROYA-LERMA *et al.*, 2012). Além disso, talhões vizinhos a áreas que não possuem controle de formigas cortadeiras, podem ser consideradas fontes de novas infestações, que quando não controlas tem potencial de crescimento. Nesse cenário, Zanetti (2000) relata sobre as atividades de controle de formigas cortadeiras em florestas de eucalipto terem maior intensidade nos primeiros anos de plantio, favorecendo o crescimento de ninhos devido ao não controle.

É importante evidenciar que por se tratar de florestas manejadas de eucalipto, a presença de ninhos grandes sofre, também, influência de ações antrópicas, tais como

o controle de ninhos com o uso de formicidas, crises econômicas (acarretando o não controle ou priorização de áreas para controle) e incorporação de novas áreas que não possuem histórico de manejo de formigas cortadeiras.

5.3 Modelos de aprendizagem de máquina para identificação de áreas Hotspots de formigas cortadeiras

O modelo se mostrou adequado para identificar áreas de risco ao estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras. Embora a subamostragem não tenha apresentado sensibilidade na detecção de presença de risco 3 (médio – alto), possibilitou a maior sensibilidade para a detecção dos extremos: risco baixo (77%) e risco alto (79%). A utilização do modelo Random Forest com o uso de variáveis facilmente obtidas, permitiu o desenvolvimento do mapa Hotspot da praga a nível nacional tanto para a normal climática (1980-2009) quanto para projeções futuras de mudanças climáticas. Outros trabalhos utilizaram abordagens semelhantes para identificação de susceptibilidade ao estabelecimento e desenvolvimento de espécies nativas e exóticas (USIO *et al.*, 2006; ULRICHS e HOPPER, 2008; SCHNEIDER *et al.*, 2021). Para o Brasil, nota-se que as áreas de risco se alteram nos diferentes cenários de mudanças climáticas, com destaque para a ausência de locais com baixo risco ao estabelecimento e desenvolvimento da praga.

Ressalta-se que no local de estudo as principais espécies de formigas cortadeiras encontradas são *Atta sexdens* e *Atta laevigata*, portanto se desconhece se o estabelecimento, desenvolvimento e consequentemente o risco de outras espécies de formigas cortadeiras, encontradas em demais regiões do país, se assemelham ao abordado nesse estudo.

Os mapas Hotspots de formigas cortadeiras podem auxiliar no manejo integrado de pragas e na preparação para cenários futuros. Estudos posteriores são necessários para verificar a veracidade do risco de infestação em locais onde o modelo não foi treinado.

6 CONCLUSÕES

As variáveis edafoclimáticas e da paisagem influenciam no estabelecimento e desenvolvimento de formigas cortadeiras. Com o uso de modelos de aprendizagem de máquina, foi possível identificar as principais variáveis que influenciam nas classificações de ausência e presença de ninhos pequenos e grandes, em cada uma das 5 macrorregiões. A análise de risco com o modelo Random Forest, permitiu o mapeamento de áreas HotSpots de formigas cortadeiras considerando a normal climática (1980-2009) e cenários de mudanças climáticas. Os resultados encontrados podem auxiliar em diferentes estratégias de manejo integrado da praga.

Ressalta-se que o constante monitoramento de formigas cortadeiras em florestas manejadas de eucalipto é essencial para a validação e melhoria dos achados desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref. Acesso em: 19 maio 2021.
- ALVARES, C.A.; SENTELHAS, P.C.; CHAN, C.S. Future climate projections in South America and their influence on forest plantations. **IPEF**, Piracicaba, Brazil, p 96., 2021.
- ARAUJO, M. S.; DELLA LUCIA, T. M. C.; MAYHE-NUNES, A. J. Levantamento de Attini (Hymenoptera, Formicidae) em povoamento de *Eucalyptus* na região de Paraopeba, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 323-328, 1997. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-81751997000200006&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 19 maio 2021.
- ARNHOLD, A. **Influência de variáveis ambientais na distribuição espacial de espécies de formigas cortadeiras (HYMENOPTERA: FORMICIDAE) em eucaliptais cultivados no bioma Pampa**. 2013. 55 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Entomologia) - Universidade Federal de Lavras, 2013.
- ARNHOLD, A. **Riqueza e distribuição espacial de formigas cortadeiras (HYMENOPTERA: FORMICIDAE) em eucaliptais em biomas Mata Atlântica e Cerrado em Minas Gerais**. 2017. 85 f. Tese (Doutorado em Entomologia) - Universidade Federal de Lavras, 2017.
- ARNHOLD, A.; MAGISTRALI, I.C.; ANJOS, N. Espécies florestais e formigas cortadeiras (Hymenoptera: Formicidae) em Viçosa, Minas Gerais. **Pesquisa florestal brasileira**, [S. l.], v. 33, n. 74, p. 215–219, 2013. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/ojs-3.2.1-3/index.php/pfb/article/view/377>. Acesso em: 21 jul. 2021.
- AUTUORI, M. Investigações sobre a biologia da saúva. **Ciência e Cultura**. São Paulo, v. 62, n. spe1, p. 4-12, 2010. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252010000500002&lng=en&nrm=iso. Acesso em 14 maio 2023.
- BARBOSA DOS SANTOS, V.; SANTOS, A. M. F.; ROLIM, G. S. Estimation and forecasting of soybean yield using artificial neural networks. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 3193-3209, 2021. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/agj2.20729>. Acesso em: maio 2023.
- BIAU, G.; SCORNET, E. A random forest guided tour. **TEST**, v. 25, p.197–227, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11749-016-0481-7>. Acesso em 15 maio 2023.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas**. Brasília, DF: MAPA, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/outras-publicacoes/plano-nacional-de-desenvolvimento-de-florestas-plantadas.pdf/view>. Acesso em: 19 maio 2021.
- BREIMAN, L. Random Forests. **Machine Learning**, v.45, p. 5–32, 2001. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324>. Acesso: 15 maio 2023.
- CAI-YUN, Z. et al. Disentangling Environmental and Anthropogenic Impacts on the Distribution of Unintentionally Introduced Invasive Alien Insects in Mainland China. **Journal of Insect Science**, v. 17, n. 3, p. 1-7, May 2017. Disponível em: <https://academic.oup.com/jinsectscience/article/17/3/77/3860168>. Acesso em: 24 ago. 2021.

- CAMARGO, R. S.; FONSECA, J. A.; LOPES, J. F. S.; FORTI, C. F. Influence of environment on the development of initial colonies of leaf cutting ants (*Atta sexdens rubropilosa*). **Ciência Rural**, v.43, n.8, ago, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/KNF4s9gkPSgznZk5MXWwvTB/?lang=pt>. Acesso em: 19 maio 2021.
- CAMARGO, R. da S. Initial development and production of CO₂ in colonies of the leaf-cutting ant *Atta sexdens* during the claustral foundation. **Sociobiology**, Feira de Santana, Brazil, v. 63, n. 1, p. 720–723, 2016. DOI: 10.13102/sociobiology.v63i1.868. Disponível em: <http://periodicos.uefs.br/index.php/sociobiology/article/view/868>. Acesso em: 15 maio 2023.
- CANUTO, D. M. F.; DOS REIS, S. F.; GODOY, W. A. C. Spatial Statistics and Age Structure of Leaf Cutting Ant Nests. *Open Journal of Statistics*, v. 09, n. 02, p. 196–217, 2019.
- CARDOSO, S.; FORTI, L. C.; NAGAMOTO, N. S.; CAMARGO, R. First-year nest growth in the leaf-cutting ants *Atta bisphaerica* and *Atta sexdens rubropilosa*. **Sociobiology**, Feira de Santana, Brazil, v. 61, n. 3, p. 243–249, 2014. DOI: 10.13102/sociobiology.v61i3.243-249. Disponível em: <http://periodicos.uefs.br/index.php/sociobiology/article/view/191>. Acesso em: 15 maio 2023.
- DE'ATH, G.; FABRICIUS, K. E. CLASSIFICATION AND REGRESSION TREES: A POWERFUL YET SIMPLE TECHNIQUE FOR ECOLOGICAL DATA ANALYSIS. **Ecology Ecological Society of America**, v. 81, n. 11, p. 3178-3192, 2000. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/0012-9658%282000%29081%5B3178%3ACARTAP%5D2.0.CO%3B2>. Acesso em: 24 ago. 2021.
- DELLA LUCIA, T.M.C.; SOUZA, D.J. Importância e história de vida das formigas cortadeiras. In: DELLA LUCIA, T.M.C. **Formigas-cortadeiras: da bioecologia ao manejo**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2011.
- EDNEY-BROWNE, E.; BROCKERHOFF, E.G.; WARD, D. Establishment patterns of non-native insects in New Zealand. **Biological Invasions**, v. 20, p. 1657–1669, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10530-017-1652-5>. Acesso em: 24 ago. 2021.
- GARCIA, I. P. *et al.* Ecological Interaction Between *Atta sexdens* (Hymenoptera: Formicidae) and the Vegetation of a Mesophyll Semideciduous Forest Fragment in Botucatu, SP, Brasil. **Sociobiology**, v. 42, n. 2, p. 265-283, 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/67375>>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- GEVREY, M.; WORNER, S.P. Prediction of Global Distribution of Insect Pest Species in Relation to Climate by Using an Ecological Informatics Method. **Journal of Economic Entomology**, v. 99, n.3, p. 979-986, June, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jee/99.3.979>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- GRANDEZA, L. A. O.; MORAES, J. C.; ZANETTI, R. ECOLOGIA, COMPORTAMENTO E BIONOMIA Estimativa do Crescimento Externo de Ninhos de *Atta sexdens rubropilosa* Forel e *Atta laevigata* (F. Smith) (Hymenoptera: Formicidae) em Áreas de Reflorestamento com Eucalipto. **An. Soc. Entomol. Brasil**. [s.l: s.n.].
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2022**. 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2022.pdf>. Acesso em: 14 maio 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **MAPEAMENTO DE RECURSOS NATURAIS DO BRASIL**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 1 mapa, color.

Escala 1: 250.000. Disponível em:

https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geomorfologia/vetores/escala_250_mil/. Acesso em: 24 ago. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2021**. Rio de Janeiro, v.36, p. 1-8, 2021. Disponível em:

https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2021_v36_informativo.pdf. Acesso em: 14 maio 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Derrogação para uso de Deltametrina, Fenitrothion, Fipronil e Sulfluramida em florestas certificadas FSC® no Brasil: Período válido de abril de 2010 a abril de 2015. **Documentos Técnicos IPEF**, v.4, n.4, p.1-38, fev. 2016. Disponível em:

<<https://www.ipef.br/publicacoes/doctecnicos/dt004.pdf>> Acesso em: 18 maio 2021.

KOUROU, K. *et al.* Machine learning applications in cancer prognosis and prediction.

Computational and Structural Biotechnology Journal, v. 13, p. 8-17, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2001037014000464?via%3Dihub>.

Acesso em: 26 ago. 2021.

KUSNEZOV, N. Numbers of species of ants in faunae of different latitudes. **Evolution Lawrence**, v.11, n.3, p. 298-299, 1957. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1558-5646.1957.tb02898.x>. Acesso em: 20 jul. 2021.

LEI, Y. *et al.* Rhythms in Foraging Behavior and Expression Patterns of the Foraging Gene in *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in relation to Photoperiod.

Journal of Economic Entomology, v. 112, n. 6, p. 2923–2930, 1 dez. 2019.

LIBBRECHT, M.; NOBLE, W. Machine learning applications in genetics and genomics.

Nature Reviews Genetics, v. 16, p.321-332, 2015. Disponível em:

<https://www.nature.com/articles/nrg3920>. Acesso em: 26 ago. 2021.

LIMA, P.P.S. **Formigas cortadeiras (Hymenoptera, Formicidae) com ênfase às culturas de pinos e eucaliptos**. 1991. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

MATRANGOLO, C. A. R. *et al.* Crescimento de eucalipto sob efeito de desfolhamento artificial. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 45, n. 9, p. 952-957, 2010.

Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2010000900003&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 17 maio 2021.

MENDES FILHO, J. M. A. Técnicas de Combate às Formigas. In: MARICONI, F. A. M.;

MENDES FILHO, J. M. A.; MORAES, T. S. A. Reunião Técnica sobre: “Formigas

Cortadeiras em Povoamentos Florestais”. **IPEF – Série Técnica**. Piracicaba, v.2 n.7 p. 1 – 29 Out. 1981. Disponível em:

<https://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr07/cap01.pdf>. Acesso em: 19 maio 2021.

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **NATURE**. 403, 853-858, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/35002501>. Acesso em: 16 jul. 2023.

MONTOYA-LERMA, J.; GIRALDO-ECHEVERRI, C.; ARMBRECHT, I.; FARJI-BRENER, A.; CALLE, Z. Leaf-cutting ants revisited: Towards rational management and control. **International Journal of Pest Management**. 58:3, 225-247, 2012. Disponível

em: DOI: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09670874.2012.663946>. Acesso em: 14 maio 2023.

MOREIRA, A.; FORTI, L. C.; ANDRADE, A. P.; BOARETTO, M. A.; LOPES, J. Nest Architecture of *Atta laevigata* (F. Smith, 1858) (Hymenoptera: Formicidae). **Studies on Neotropical Fauna and Environment**, 39:2, 109-116, 2004. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01650520412331333756>. Acesso em: 14 maio 2023.

NILO DA COSTA, A. **Padrões de forrageamento e biomassa vegetal consumida por *Atta laevigata* (Hymenoptera: Formicidae) em uma área do Cerrado Brasileiro**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais) – Instituto de Biologia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

PIZZI, M. B. **Perdas de produtividade de 12 clones de eucalipto submetidos a desfolhas artificiais sucessivas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2016.

PROJETO MAPBIOMAS – **Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/>. Acesso em: 14 maio 2023.

SANTOS, H. G. dos; CARVALHO JUNIOR, W. de; DART, R. de O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S. de; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. da S.; OLIVEIRA, A. P. de. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (**Embrapa Solos. Documentos**, 130.) 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123772/1/DOC-130-O-novo-mapa-de-solos-do-Brasil.pdf>. Acesso em: 14 maio 2023.

SCHNEIDER, K.; MAKOWSKI, D.; VAN DER WERF, W. Predicting hotspots for invasive species introduction in Europe. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 11, p. 114026, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac2f19/meta>. Acesso em: 08 out. 2023.

SENTELHAS, P. C. *et al.* Yield gap: conceitos, definições e exemplos. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 155, p. 9-12, 2016. Disponível em: <http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/9C05063FB033C24A83258042004C8594/>. Acesso em: 19 maio 2021.

SOLIMAN, E. P. Sistema de proteção contra as pragas florestais. **Revista Opiniões**. n.46, p. 31-32, dez-fev 2017. Disponível em: <https://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/leitura/online/protecao-que-plantacoes-florestais-exigem/>. Acesso em: 19 maio 2021.

SONG, Y.; LU, Y. Decision tree methods: applications for classification and prediction. **Shanghai Arch Psychiatry**, v. 27, n. 2, p. 130-135, 25 Apr. 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26120265/>. Acesso em: 24 ago. 2021.

SOUZA, A.; ZANETTI, R.; CALEGARIO, N. Nível de Dano Econômico para Formigas-Cortadeiras em Função do Índice de Produtividade Florestal de Eucaliptais em uma Região de Mata Atlântica. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 40, n. 4, p. 483-488, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ne/a/pjHvbWJyJvbYk7NWNGSKZ3p/?lang=pt>. Acesso: 20 jun. 2021.

SOUSA, K. K. A. *et al.* The ideal habitat for leaf-cutting ant queens to build their nests. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2022.

STAPE, J.L.; ALVARES, C.; SIQUEIRA, L.; BENATTI, T. R.; HALL, K. B.; ZAUZA, E. V.; BENTIVENHA, S. R.; AGUINALDO, J. S. Dealing with genotype x environmental interactions in Eucalyptus forest companies. Eucalyptus 2018: Managing Eucalyptus plantations under global changes. **Abstracts Book**. Montpellier - France, set. 2018.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; GRATTAPAGLIA, D.; CAMPOE, O.; ALVARES, C.; GOMES, F.; MATTOS, E.; OTTO, M.; HAKAMADA, R.; MORAES, M. T. Fatores hídricos e as decisões silviculturais de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura. In: Encontro Brasileiro de Silvicultura, 3, 2014, Campinas. **Anais...** Campinas, 2014, p. 81-98. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304023945_Fatores_hidricos_e_as_decisoess_silviculturais_de_melhoramento_e_de_protecao_na_eucaliptocultura. Acesso em: 18 maio 2021.

ULRICHS, C.; HOPPER, K. R. Predicting insect distributions from climate and habitat data. **BioControl**, v. 53, p. 881–894, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10526-007-9143-8#article-info>. Acesso em: 08 out. 2023.

USIO, N. *et al.* Predicting the distribution of invasive crayfish (*Pacifastacus leniusculus*) in a Kusiro Moor marsh (Japan) using classification and regression trees. **Ecological Research**, v. 21, n. 2, p. 271–277, 2006. Disponível em: <https://esj-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1007/s11284-005-0120-3>. Acesso: 24 ago. 2021.

VASQUES, G.M., COELHO, M.R., DART, R.O., CINTRA, L.C., BACA, J.F.M. Soil Clay, Silt and Sand Content Maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm Depth Intervals with 90 m Spatial Resolution. Version 2021. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brazil.

VARLEY, G. C.; GRADWELL, G. R.; HASSELL, M. P. **Insect Population Ecology – An analytical approach**. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1973.

VIEIRA-NETO, E.; VASCONCELOS, H. Developmental changes in factors limiting colony survival and growth of the leaf-cutter ant *Atta laevigata*. **Ecography**, v. 33, p. 538-544, 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1600-0587.2009.05875.x>. Acesso em: 15 jun. 2021.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE. LIVING FORESTS REPORT: FORESTS FOR A LIVING PLANET. **WWF Report**, p. 1-35, 2011. Disponível em: http://awsassets.panda.org/downloads/living_forests_chapter_1_26_4_11.pdf. Acesso em: 21 jun. 2021.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v.36, p.2644-2659, 2016. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.4518>. Acesso em: 15 maio 2023.

ZANETTI, R. *et al.* Influência da espécie cultivada e da vegetação nativa circundante na densidade de saúveiros em eucaliptais. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p.1911-1918, out. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/j83rzRQHCFtwZF83CzTGB3m/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 24 ago. 2021.

APÊNDICE A – Tabela descritiva das variáveis edafoclimáticas e da paisagem utilizadas nos modelos de classificação de reinfestação e crescimento (ninhos grandes)

Grupo	Variável	Descrição	Unidade
Climático	meses_s_chuva	Meses com precipitação abaixo de 20 mm no ano	unitário
Climático	comp_dia_min	Comprimento mínimo do dia no ano avaliado	horas
Climático	etp_amplitude	Amplitude da ETP (Evapotranspiração) no ano	mm
Climático	etp_amplitude_aa	Amplitude da ETP (Evapotranspiração) no ano anterior	mm
Climático	etp_max	ETP (Evapotranspiração) máxima no ano	mm
Climático	etp_max_aa	ETP (Evapotranspiração) máxima no ano anterior	mm
Climático	etp_sd	Desvio padrão da ETP (Evapotranspiração) no ano	mm
Climático	etp_sd_aa	Desvio padrão da ETP (Evapotranspiração) no ano anterior	mm
Climático	meses_s_chuva_a a	Meses com precipitação abaixo de 20 mm no ano anterior	unitário
Climático	ppt_4tri	Precipitação no 4 trimestre do ano (Out-Dez)	mm
Climático	ppt_4tri_aa	Precipitação no 4 trimestre do ano anterior (Out-Dez)	mm
Climático	ppt_acumul	Precipitação acumulada no ano	mm
Climático	ppt_acumul_aa	Precipitação acumulada no ano anterior	mm
Climático	ppt_amplitude	Amplitude da precipitação no ano	mm
Climático	ppt_amplitude_aa	Amplitude da precipitação no ano anterior	mm
Climático	ppt_max	Precipitação mensal máxima no ano	mm
Climático	ppt_max_aa	Precipitação mensal máxima no ano anterior	mm
Climático	ppt_min	Precipitação mensal mínima no ano	mm
Climático	ppt_min_aa	Precipitação mensal mínima no ano anterior	mm
Climático	ppt_sd	Desvio padrão da precipitação no ano	mm
Climático	ppt_sd_aa	Desvio padrão da precipitação no ano anterior	mm
Climático	ppt_tri_frio_mean	Precipitação do trimestre mais frio do ano	mm
Climático	ppt_tri_frio_mean_ aa	Precipitação do trimestre mais frio do ano anterior	mm

Climático	ppt_tri_quente_me an	Precipitação acumulada no trimestre mais quente no ano	mm
Climático	ppt_tri_quente_me an_aa	Precipitação acumulada no trimestre mais quente no ano anterior	mm
Climático	ppt_tri_seco_mean	Precipitação acumulada no trimestre mais seco no ano	mm
Climático	ppt_tri_seco_mean _aa	Precipitação acumulada no trimestre mais seco no ano anterior	mm
Climático	ppt_tri_umido_me an	Precipitação acumulada no trimestre mais umido no ano	mm
Climático	ppt_tri_umido_me an_aa	Precipitação acumulada no trimestre mais umido no ano anterior	mm
Climático	rad_amplitude	Amplitude de variação da radiação no ano (radiação máxima - radiação mínima)	MJ
Climático	rad_amplitude_aa	Amplitude de variação da radiação no ano anterior (radiação máxima - radiação mínima)	MJ
Climático	rad_max	Máxima radiação no ano	MJ
Climático	rad_max_aa	Máxima radiação no ano anterior	MJ
Climático	rad_mean	Radiação média no ano	MJ
Climático	rad_mean_aa	Radiação média no anterior	MJ
Climático	rad_min	Radiação mínima no ano	MJ
Climático	rad_min_aa	Radiação mínima no anterior	MJ
Climático	rad_sd	Desvio padrão da radiação no ano	MJ
Climático	rad_sd_aa	Desvio padrão da radiação no ano anterior	MJ
Climático	temp_range	Temperatura máxima - Temperatura mínima no ano	°C
Climático	temp_range_aa	Temperatura máxima - Temperatura mínima no ano anterior	°C
Climático	tmax_amplitude	Amplitude de temperatura máxima no ano	°C
Climático	tmax_amplitude_a a	Amplitude de temperatura máxima no ano anterior	°C
Climático	tmax_max	Temperatura máxima no ano	°C
Climático	tmax_max_aa	Temperatura máxima no ano anterior	°C
Climático	tmax_mean	Média de temperatura máxima no ano	°C
Climático	tmax_mean_aa	Média de temperatura máxima no ano anterior	°C
Climático	tmax_min	Mínima de temperatura máxima no ano	°C
Climático	tmax_min_aa	Mínima de temperatura máxima no ano anterior	°C

Climático	tmed_amplitude	Amplitude de temperatura média no ano	°C
Climático	tmed_amplitude_a a	Amplitude de temperatura média no ano anterior	°C
Climático	tmed_max	Temperatura média máxima no ano	°C
Climático	tmed_max_aa	Temperatura média máxima no ano anterior	°C
Climático	tmed_mean	Temperatura média mensal no ano	°C
Climático	tmed_mean_aa	Temperatura média mensal no ano anterior	°C
Climático	tmed_min	Temperatura média mínima no ano	°C
Climático	tmed_min_aa	Temperatura média mínima no ano anterior	°C
Climático	tmed_tri_frio_mean	Temperatura média no trimestre mais frio do ano	°C
Climático	tmed_tri_frio_mean_aa	Temperatura média no trimestre mais frio do ano anterior	°C
Climático	tmed_tri_quente_mean	Temperatura média no trimestre mais quente do ano	°C
Climático	tmed_tri_quente_mean_aa	Temperatura média no trimestre mais quente do ano anterior	°C
Climático	tmed_tri_seco_mean	Temperatura média no trimestre mais seco do ano	°C
Climático	tmed_tri_seco_mean_aa	Temperatura média no trimestre mais seco do ano anterior	°C
Climático	tmed_tri_umido_mean	Temperatura média no trimestre mais umido do ano	°C
Climático	tmed_tri_umido_mean_aa	Temperatura média no trimestre mais umido do ano anterior	°C
Climático	tmin_amplitude	Amplitude de temperatura mínima no ano	°C
Climático	tmin_amplitude_aa	Amplitude de temperatura mínima no ano anterior	°C
Climático	tmin_max	Máxima de temperatura mínima no ano	°C
Climático	tmin_max_aa	Máxima de temperatura mínima no ano anterior	°C
Climático	tmin_mean	Média de temperatura mínima no ano	°C
Climático	tmin_mean_aa	Média de temperatura mínima no ano anterior	°C
Climático	tmin_min	Mínima de temperatura mínima no ano	°C
Climático	tmin_min_aa	Mínima de temperatura mínima no ano anterior	°C
Climático	ur_amplitude	Amplitude de umidade relativa no ano	%

Climático	ur_amplitude_aa	Amplitude de umidade relativa no ano anterior	%
Climático	ur_max	Máxima umidade relativa no ano	%
Climático	ur_max_aa	Máxima umidade relativa no ano anterior	%
Climático	ur_mean	Média de umidade relativa no ano	%
Climático	ur_mean_aa	Média de umidade relativa no ano anterior	%
Climático	ur_min	Mínima de umidade relativa no ano	%
Climático	ur_min_aa	Mínima de umidade relativa no ano anterior	%
Relevo	altitude_ampl	Amplitude da altitude do talhão	m
Relevo	altitude_media	Altitude média	m
Relevo	declividade_ampl	Amplitude da declividade do talhão	%
Relevo	declividade_media	Declividade média	%
Solo	areia	Porcentagem média de areia no horizonte 0-30 cm	%
Solo	arg	Porcentagem média de argila no horizonte 0-30 cm	%
Solo	cad	Capacidade de armazenamento de água no solo	mm
Uso do solo	agricultura	Porcentagem de ocupação com agricultura no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	agricultura_pastagem	Porcentagem de ocupação com agricultura e pastagem no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	agricultura_perene	Porcentagem de ocupação com agricultura e perene no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	area_pantanosa	Porcentagem de ocupação com área pantanosa no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	formacao_campestre	Porcentagem de ocupação com formação campestre no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	formacao_florestal	Porcentagem de ocupação com formação florestal no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	outras_formacoes_naturais	Porcentagem de ocupação com outras formacoes naturais no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	pastagem	Porcentagem de ocupação com pastagem no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	silvicultura	Porcentagem de ocupação com silvicultura no buffer de 600m de cada talhão	%

APÊNDICE B – Tabela descritiva das variáveis edafoclimáticas e da paisagem utilizadas nos modelos de risco de reinfestação e crescimento (ninhos grandes)

Grupo	Variável	Descrição	Unidade
Climático	comp_dia_min	Comprimento mínimo do dia no ano avaliado	horas
Climático	etp_amplitude	Amplitude da ETP (Evapotranspiração) no ano	mm
Climático	etp_max	ETP (Evapotranspiração) máxima no ano	mm
Climático	etp_min	ETP (Evapotranspiração) mínima no ano	mm
Climático	etp_sd	Desvio padrão da ETP (Evapotranspiração) no ano	mm
Climático	meses_s_chuva	Meses com precipitação abaixo de 20 mm no ano	unitário
Climático	ppt_4tri	Precipitação no 4 trimestre do ano (Out-Dez)	mm
Climático	ppt_acumul	Precipitação acumulada no ano	mm
Climático	ppt_amplitude	Amplitude da precipitação no ano	mm
Climático	ppt_max	Precipitação mensal máxima no ano	mm
Climático	ppt_min	Precipitação mensal mínima no ano	mm
Climático	ppt_sd	Desvio padrão da precipitação no ano	mm
Climático	ppt_tri_frio_mean	Precipitação do trimestre mais frio do ano	mm
Climático	ppt_tri_quente_mean	Precipitação acumulada no trimestre mais quente no ano	mm
Climático	ppt_tri_seco_mean	Precipitação acumulada no trimestre mais seco no ano	mm
Climático	ppt_tri_umido_mean	Precipitação acumulada no trimestre mais umido no ano	mm
Climático	rad_amplitude	Amplitude de variação da radiação no ano (radiação máxima - radiação mínima)	MJ
Climático	rad_max	Máxima radiação no ano	MJ
Climático	rad_mean	Radiação média no ano	MJ
Climático	rad_min	Radiação mínima no ano	MJ
Climático	rad_sd	Desvio padrão da radiação no ano	MJ
Climático	temp_range	Temperatura máxima - Temperatura mínima no ano	°C
Climático	tmax_amplitude	Amplitude de temperatura máxima no ano	°C

Climático	tmax_max	Temperatura máxima no ano	°C
Climático	tmax_mean	Média de temperatura máxima no ano	°C
Climático	tmax_min	Mínima de temperatura máxima no ano	°C
Climático	tmed_amplitude	Amplitude de temperatura média no ano	°C
Climático	tmed_max	Temperatura média máxima no ano	°C
Climático	tmed_mean	Temperatura média mensal no ano	°C
Climático	tmed_min	Temperatura média mínima no ano	°C
Climático	tmed_tri_frio_mean	Temperatura média no trimestre mais frio do ano	°C
Climático	tmed_tri_quente_mean	Temperatura média no trimestre mais quente do ano	°C
Climático	tmed_tri_seco_mean	Temperatura média no trimestre mais seco do ano	°C
Climático	tmed_tri_umido_mean	Temperatura média no trimestre mais umido do ano	°C
Climático	tmin_amplitude	Amplitude de temperatura mínima no ano	°C
Climático	tmin_max	Máxima de temperatura mínima no ano	°C
Climático	tmin_mean	Média de temperatura mínima no ano	°C
Climático	tmin_min	Mínima de temperatura mínima no ano	°C
Climático	ur_amplitude	Amplitude de umidade relativa no ano	%
Climático	ur_max	Máxima umidade relativa no ano	%
Climático	ur_mean	Média de umidade relativa no ano	%
Climático	ur_min	Mínima de umidade relativa no ano	%
Relevo	altitude_ampl	Amplitude da altitude do talhão	m
Relevo	altitude_media	Altitude média	m
Relevo	declividade_ampl	Amplitude da declividade do talhão	%
Relevo	declividade_media	Declividade média	%
Solo	areia	Porcentagem média de areia no horizonte 0-30 cm	%
Solo	arg	Porcentagem média de argila no horizonte 0-30 cm	%
Solo	cad	Capacidade de armazenamento de água no solo	mm
Uso do solo	agricultura	Porcentagem de ocupação com agricultura no buffer de 600m de cada talhão	%

Uso do solo	agricultura_pastagem	Porcentagem de ocupação com agricultura e pastagem no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	agricultura_perene	Porcentagem de ocupação com agricultura e perene no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	area_pantanosa	Porcentagem de ocupação com área pantanosa no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	formacao_campestre	Porcentagem de ocupação com formação campestre no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	formacao_florestal	Porcentagem de ocupação com formação florestal no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	outras_formacoes_naturais	Porcentagem de ocupação com outras formacoes naturais no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	pastagem	Porcentagem de ocupação com pastagem no buffer de 600m de cada talhão	%
Uso do solo	silvicultura	Porcentagem de ocupação com silvicultura no buffer de 600m de cada talhão	%
