

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 21/02/2025

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until Feb. 21, 2025

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

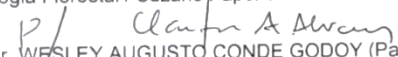
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS E DA PAISAGEM NA BIOECOLOGIA E ABUNDÂNCIA DAS FORMIGAS CORTADEIRAS EM PLANTAÇÕES FLORESTAIS DE EUCALIPTO

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 Agrônomicas 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.

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 Agronômicas, 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 Agronômicas**, 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	%
