

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 25/07/2025.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PREVISÃO DE DOENÇA EM CAFÉ UTILIZANDO INTELIGÊNCIA
ARTIFICIAL A PARTIR DE DADOS METEOROLÓGICOS DO
SISTEMA NASA-POWER**

**Karita Almeida Silva
Mestre em Agronomia**

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PREVISÃO DE DOENÇA EM CAFÉ UTILIZANDO INTELIGÊNCIA
ARTIFICIAL A PARTIR DE DADOS METEOROLÓGICOS DO
SISTEMA NASA-POWER**

Discente: Karita Almeida Silva

Orientador: Dr. Glauco de Souza Rolim

Coorientador: Dr. Newton La Scala Júnior

**Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Doutora em Agronomia (Produção
Vegetal)**

2024

S586p Silva, Karita Almeida
Previsão de doença em café utilizando inteligência artificial a partir de dados meteorológicos do sistema Nasa-Power / Karita Almeida Silva. -- Jaboticabal, 2024
81 f. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Glauco de Souza Rolim
Coorientador: Newton La Scala Júnior

1. Agrometeorologia. 2. Cafeicultura. 3. Inteligência artificial
4. Modelagem agrícola 5. Patossistema I. Título

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

A tese avança na previsão da ferrugem do cafeeiro ao mesmo tempo que inova na estimativa de DPM com modelos de IA. Com impactos educacionais e socioeconômicos, fortalece a agricultura inteligente, promovendo o desenvolvimento local e global. É um marco para a ciência e tecnologia no manejo de culturas, evidenciando a importância da integração de conhecimentos técnicos e realçando inovação e sustentabilidade.

Potential impact of this research

The thesis advances in predicting coffee rust while innovating in DPM estimation with AI models. With educational and socio-economic impacts, it strengthens smart agriculture, promoting local and global development. It is a milestone for science and technology in crop management, highlighting the importance of integrating technical knowledge and emphasizing innovation and sustainability.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: PREVISÃO DE DOENÇA EM CAFÉ UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL A PARTIR DE DADOS METEOROLÓGICOS DO SISTEMA NASA-POWER


AUTORA: KARITA ALMEIDA SILVA

ORIENTADOR: GLAUCO DE SOUZA ROLIM


COORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **GLAUCO DE SOUZA ROLIM**
Data: 29/01/2024 21:07:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. MÁRCIO JOSÉ DE SANTANA (Participação Virtual)
Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) / Uberaba/MG

Documento assinado digitalmente
 **MARCIO JOSE DE SANTANA**
Data: 01/02/2024 22:01:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dra. TAYNARA TUANY BORGES VALERIANO (Participação Virtual)
Departamento de Desenvolvimento de Mercado / Agronomic Preductive M
Uberlândia/MG

 **TAYNARA TUANY BORGES VALERIANO**
Data: 31/01/2024 21:20:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. TATIANA FERNANDA CANATA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **TATIANA FERNANDA CANATA**
Data: 30/01/2024 19:21:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Virtual)
Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia / FCA UNESP Botucatu

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE DAL PAI**
Data: 30/01/2024 11:02:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 25 de janeiro de 2024

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

KARITA ALMEIDA SILVA – nascida em Prata, Minas Gerais, no dia 27 de julho de 1994, filha de Antônia Elizabeth Almeida Silva e Antônio da Silva Lima. Ingressou no curso de Engenharia Agrônoma no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM), Câmpus Uberaba, em fevereiro de 2013. No mesmo Câmpus, foi bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET) durante a gestão 2013-2017, no qual desenvolveu as áreas de pesquisa, ensino, extensão e gestão de pessoas. Realizou seu estágio obrigatório na área de P&D na Usina Bunge Brasil, entre agosto de 2017 e janeiro de 2018. Em fevereiro de 2018 obteve o título de Engenheira Agrônoma. Em março de 2018 ingressou no programa de mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Câmpus Jaboticabal, onde aproximadamente dois anos depois, defendeu sua dissertação intitulada “Associação entre El Niño-Oscilação Sul e a variação geográfica da produtividade do café” para obtenção do título de mestre em Agronomia (Produção Vegetal). Em março de 2020 ingressou no programa de doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Câmpus Jaboticabal, onde continuou seguindo as linhas de pesquisa em agrometeorologia e modelagem de cultivos agrícolas. Ainda em 2020 atuou como docente colaborada da disciplina de Climatologia para o curso de Ciências Biológicas na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Câmpus Jaboticabal. Em setembro de 2021 ingressou na empresa Brasilseg, atuando como analista de seguro rural. A partir de março de 2022 foi analista de clima e sustentabilidade na empresa Nutrien Soluções Agrícolas. Também atuou como docente do curso de pós-graduação em Agricultura Digital: Inteligência Artificial e Big Data aplicada no Campo, na PUCPR, sendo professora da disciplina de Machine Learning. E em julho de 2023, iniciou uma nova etapa de sua carreira na empresa Bayer Crop Science, onde atualmente atua como líder de práticas agrônomicas para a cultura do milho.

Aos meus pais, Antônia Elizabeth Almeida Silva e Antônio da Silva Lima, e à minha irmã Carolinne Almeida Silva que sempre me deram forças para que eu continuasse trilhando o caminho que eu sonhei. Há pessoas que nos dão sorte, mas há outras que nos dão norte.
A vocês, **DEDICO!**

Aos meus padrinhos e madrinhas, **OFEREÇO!**

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus, o qual sempre esteve à frente da minha caminhada. Me dando serenidade para aceitar as coisas que não podia modificar, coragem para modificar as que eu podia, e sabedoria para reconhecer a diferença entre ambas.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal).

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

Ao meu orientador Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim, por me ensinar o verdadeiro sentido da pesquisa científica, pelo exemplo de dedicação ao trabalho, bem como pela paciência com todos nós, seus orientandos. Muito obrigada por toda dedicação e ensinamentos.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Newton La Scala Júnior pela confiança, apoio, fidelidade ao projeto e colaboração para realização deste trabalho.

À toda minha família em especial minha mãe, Antônia Elizabeth; meu pai, Antônio; minha irmã Carolinne; meus padrinhos Carlos Daniel, José Antônio, Roberto e Armindo; minhas madrinhas Lilian Beatriz, Maria Elisabete, Marilene e Fabiana e; que sempre dedicaram tempo e conselhos a mim, nunca questionaram minhas decisões, mas sim apoiaram minhas escolhas durante todos esses anos de estudos até aqui. Obrigada por vocês acreditarem em mim!

Aos meus primos Arthur, Bruna, Carlos Victor, Izabella, Laila, Lauane, Lucas, Mateus, Maria Eduarda, Railla e Rogerio, agradeço pela cumplicidade, lealdade, carinho e amizade de todos esses anos.

Às minhas amigas de infância, Laila Góes, Bruna Sousa e Alessandra Vitalino que, sempre encurtaram a distância física entre nós com uma mensagem, uma ligação ou uma visita. Obrigada por fazer a distância parecer irrisória diante de nossa amizade!

Às minhas irmãs de coração, Rayeny Ávila, Tatiana Santos, Taynara Valeriano, e Stefany Souza que em meus momentos mais felizes estiveram ao meu lado e nos momentos mais tristes não hesitaram em me ajudar. Obrigada por sempre estarem ao meu lado, apesar da distância, e fazerem a minha vida mais feliz!

Aos amigos/irmãos que ganhei durante minha pós-graduação em Jaboticabal, Adão, Edgard, Kamila e Larissa, que fizeram meus dias mais felizes e preencheram meus almoços de domingo, assim como meu coração, amenizando a saudade de casa.

Às minhas colegas de moradia, as quais se tornaram amigas de coração: Jessica Spirandelli, Maria Albertina, Niquelle Andrade, Thayse Michielin e Thaise Mota que me deram apoio incondicional durante o doutorado e me presentearam com uma linda amizade.

Aos meus amigos e parceiros do GAS e do departamento de Ciências Exatas, Aline Moreno, Bruna Oliveira, Fernando Morais, Gustavo André, José Reinaldo, Kleve Canteral, Ludhanna Veras, Nayane Maia, Washington Pereira [*in memoriam*]. Obrigada pela convivência e troca de experiência durante esse tempo, vocês fizeram do departamento de exatas o melhor da UNESP.

Aos colegas do Departamento de Ciências Exatas, Prof. Alan, Prof. Peruzzi, Zezé, Shirlei, Adriana e Carlão, muito obrigada pela convivência durante esse tempo.

A todos que de alguma forma contribuíram para que chegasse até aqui, o meu muito obrigada!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	iv
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais	1
INTRODUÇÃO	1
REVISÃO DE LITERATURA	2
A importância da cultura do café	2
DPM e influência na incidência de doenças	3
Modelos de estimativa de DPM	5
Modelos de previsão de doenças	6
REFERÊNCIAS.....	8
CAPÍTULO 2 – Estimativa da Duração do Período de Molhamento Foliar por Modelos de Aprendizado de Máquina	14
RESUMO	14
INTRODUÇÃO	15
MATERIAL E MÉTODOS.....	16
Obtenção de dados meteorológicos	16
Duração do período de molhamento foliar observada	17
Dados de entrada dos modelos de aprendizado de máquina.....	19
Modelos utilizados para estimativa de DPM	19
Avaliação do desempenho dos modelos	20
RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS.....	33
CAPÍTULO 3 – Previsão de Ferrugem-do-cafeeiro por Modelos de Aprendizado de Máquina.....	39
RESUMO	39
INTRODUÇÃO	40
MATERIAL E MÉTODOS.....	41
Obtenção de dados meteorológicos	41
Dados de incidência de Ferrugem-do-cafeeiro	42
Previsão da Ferrugem-do-cafeeiro	43
Redução da dimensionalidade dos dados	45

Avaliação do desempenho dos modelos	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS.....	58
CAPÍTULO 4 – Considerações finais	63
Apêndice A: Dispersão entre a incidência da ferrugem-do-cafeeiro observada e a incidência da ferrugem-do-cafeeiro prevista pelos modelos Multilayer Perceptron, Random Forest e Support Vector Machine para as lavouras de baixa carga de frutos situadas no Triângulo Mineiro.	65
Apêndice B: Dispersão entre a incidência da ferrugem-do-cafeeiro observada e a incidência da ferrugem-do-cafeeiro prevista pelos modelos Multilayer Perceptron, Random Forest e Support Vector Machine para as lavouras de baixa carga de frutos no Sul de Minas.....	66
Apêndice C: Dispersão entre a incidência da ferrugem-do-cafeeiro observada e a incidência da ferrugem-do-cafeeiro prevista pelos modelos Multilayer Perceptron, Random Forest e Support Vector Machine para as lavouras de alta carga de frutos situadas no Triângulo Mineiro	67
Apêndice D: Dispersão entre a incidência da ferrugem-do-cafeeiro observada e a incidência da ferrugem-do-cafeeiro prevista pelos modelos Multilayer Perceptron, Random Forest e Support Vector Machine para as lavouras de alta carga de frutos no Sul de Minas.....	68

PREVISÃO DE DOENÇA EM CAFÉ UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL A PARTIR DE DADOS METEOROLÓGICOS DO SISTEMA NASA-POWER

RESUMO – O café é uma das commodities mais valiosas do mercado mundial e a bebida mais consumida no mundo. Um dos principais fatores que afetam a produtividade da cultura está relacionado a incidência de doenças, as quais podem ser responsáveis por prejuízos de até 50% na produção. Apesar de muitas doenças fúngicas serem fortemente controladas pelas condições climáticas, prever ou estimar o nível de incidência de doenças em relação à variabilidade climática e às mudanças climáticas em plantios comerciais é problemático devido à falta de dados climáticos locais, principalmente de dados climáticos horários. O objetivo deste trabalho é calibrar e avaliar três modelos de aprendizado de máquina para a estimativa da duração do período de molhamento foliar (DPM) e para a previsão da ferrugem-do-cafeeiro, a partir de dados meteorológicos da plataforma NASA-POWER. Os dados diários da plataforma NASA-POWER foram derivados em dados horários e utilizados para realizar a estimativa da DPM por meio dos modelos Random Forest (RF), Multilayer Perceptron (MLP) e Support Vector Machine (SVM). Posteriormente e, utilizando as mesmas máquinas de aprendizado, foram utilizados os dados estimados da DPM, dados meteorológicos da NASA-POWER e dados da incidência da ferrugem-do-cafeeiro em Minas Gerais obtidos através da Fundação Procafé para realizar a previsão da doença. Os resultados indicaram que, para a estimativa da DPM, os modelos são sensíveis aos locais de estudo, sendo os modelos realizados para os locais situados no Sul do estado de Minas Gerais com melhor desempenho do que os situados na região do Triângulo Mineiro e que, de todos os métodos testados, o modelo MLP apresentou melhor desempenho, com alta precisão (R^2 médio = 0,98) e baixos erros (RMSE médio = 27,6 minutos e MAE médio = 19,8 minutos). Para a previsão da ferrugem-do-cafeeiro, considerando as lavouras de alta carga de frutos, o modelo SVM apresentou o melhor desempenho para a região do Triângulo Mineiro ($R^2 = 0,59$ e RMSE = 20,15%) e o modelo MLP o melhor desempenho para os locais da região Sul do estado de Minas Gerais ($R^2 = 0,57$ e RMSE = 21,58%). Já para as lavouras de baixa carga de frutos, o desempenho foi satisfatório para locais específicos como Patrocínio-MG, com precisão de 0,72 e acurácia de 14,28%, mostrando que os modelos de aprendizado de máquina não foram generalistas.

Palavras-Chave: Agrometeorologia, Cafeicultura, Inteligência Artificial, Modelagem Agrícola, Patossistema.

DISEASE PREDICTION IN COFFEE USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE BASED ON METEOROLOGICAL DATA FROM THE NASA-POWER SYSTEM

ABSTRACT – Coffee is one of the most valuable commodities in the global market and the most consumed beverage in the world. One of the main factors affecting crop productivity is related to the incidence of diseases, which can be responsible for up to 50% losses in production. Although many fungal diseases are strongly controlled by climatic conditions, predicting or estimating the level of disease incidence in relation to climate variability and climate change in commercial plantations is problematic due to the lack of local climate data, especially hourly climate data. The objective of this work is to calibrate and evaluate three machine learning models for estimating the Leaf Wetness Duration (LWD) and for predicting Coffee Leaf Rust (CLR), using meteorological data from the NASA-POWER platform. Daily data from the NASA-POWER platform were derived into hourly data and used to estimate the LWD using the Random Forest (RF), Multilayer Perceptron (MLP), and Support Vector Machine (SVM) models. Subsequently, and using the same machine learning, the estimated LWD data, NASA-POWER meteorological data, and coffee rust incidence data in Minas Gerais obtained through the Procafé Foundation were used to predict the disease. The results indicated that for the LWD estimation, the models are sensitive to the study locations, with models for locations in the southern state of Minas Gerais performing better than those in the Triângulo Mineiro region. Of all the methods tested, the MLP model showed the best performance, with high accuracy (average $R^2 = 0.98$) and low errors (average RMSE = 27.6 minutes and average MAE = 19.8 minutes). For CLR prediction, considering high fruit load crops, the SVM model showed the best performance for the Triângulo Mineiro region ($R^2 = 0.59$ and RMSE = 20.15%) and the MLP model the best performance for locations in the southern state of Minas Gerais ($R^2 = 0.57$ and RMSE = 21.58%). For low fruit load crops, the performance was satisfactory for specific locations such as Patrocínio-MG, with an accuracy of 0.72 and precision of 14.28%, showing that the machine learning models were not generalists.

Keywords: Agrometeorology, Coffee Growing, Artificial Intelligence, Agricultural Modeling, Pathosystem.

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

INTRODUÇÃO

Para que seja feita a antecipação de surtos de doenças em plantas, é primordial que se tenha conhecimento dos fatores que os desencadeiam. Este conhecimento pode então ser usado para desenvolver ferramentas de apoio à decisão para ajudar os agricultores e assim reduzir os impactos negativos que doenças causam à produtividade dos cultivos (Krause e Massie, 1975). A previsão do risco de uma epidemia é ainda mais importante se esta epidemia conduzir a crises econômicas e também sociais devido a repercussões plurianuais, como no caso das culturas perenes (Cerdeira et al., 2017).

Um exemplo deste contexto ocorre com a cultura do café, a qual já passou por uma grave epidemia de Ferrugem-do-café causando a perda de cerca de 20% da produção de café Arábica na América Central e resultou na declaração do estado de emergência em três países da região (Avelino et al., 2015). Apesar da influência de fatores econômicos e sociais nos surtos de doenças de plantas de forma geral (Almeida, 2018), as condições climáticas, o nível de sombra, a carga de frutos e a gestão das culturas são quatro dos principais impulsionadores para o desenvolvimento da Ferrugem-do-cafeeiro (Rayner, 1961, Avelino et al., 2006).

Por exemplo, para a germinação do fungo *Hemileia vastatrix*, causador da Ferrugem-do-cafeeiro, é necessária a presença de uma camada de água na parte inferior das folhas para germinar, o que é conhecido com molhamento foliar (Nutman et al., 1963, Waller et al., 2007). A duração do período de molhamento foliar (DPM) é um dos principais fatores que influenciam no aparecimento de doenças de plantas (Kim et al., 2002); e, em geral, a ocorrência e a gravidade das doenças estão mais correlacionadas com a DPM do que com a própria precipitação (Reis, 2004)

No entanto, prever o desenvolvimento de doenças continua a ser um desafio, mesmo quando se concentra em variáveis meteorológicas (Cunniffe et al., 2015), e diferentes abordagens de modelagem podem ser usadas para desenvolver modelos preditivos de doenças de plantas (Wheeler et al., 2019; Corrales et al., 2018; Lasso et al., 2017; Lu et al., 2017). Diante disto, o objetivo do presente estudo foi melhorar a

modelagem de previsão da ferrugem-do-cafeeiro, incluindo dados de estimativa da duração do período de molhamento foliar. Para tanto, foram utilizados três modelos de aprendizado de máquina para estimativa da duração do período de molhamento foliar e, posteriormente, os mesmos modelos foram utilizados para previsão da ferrugem-do-cafeeiro, uma vez que, as técnicas de aprendizado de máquina permitem produzir um modelo para a previsão da doença que seja mais sensível às variáveis meteorológicas.

CONCLUSÃO

Este estudo calibrou três diferentes técnicas de aprendizado de máquina para realizar a previsão da Ferrugem-do-cafeeiro, uma doença chave para a cultura do café. Os modelos treinados e testados, Multilayer Perceptron, Random Forest e Support Vector Machine, foram capazes de prever a doença 31 dias antes do surgimento do primeiro sintoma.

Os modelos preditivos da doença desenvolvidos neste trabalho fornecem melhores subsídios para a previsão da doença em lavouras com alta carga de frutos. Para esta condição, o modelo SVM apresentou os melhores resultados para a região do Triângulo Mineiro ($R^2 = 0,59$ e $RMSE = 20,15\%$), enquanto que para a região Sul de Minas Gerais a rede neural artificial contribuiu mais para uma previsão precisa da doença ($R^2 = 0,57$ e $RMSE = 21,58\%$).

Se tratando de lavouras com baixa carga de frutos o desempenho foi satisfatório para locais específicos como Patrocínio, com precisão de 0,72 e acurácia de 14,28%, com o modelo SVM. Isto indica que os modelos, apesar de capturar uma vasta quantidade de informações, não conseguiram ser generalistas. Para melhorar a generalização do modelo, é necessária a aplicação da mesma abordagem em outras regiões e, possivelmente, considerando mais aspectos da interação entre a cultura e a doença. No entanto, os resultados do nosso estudo são um avanço promissor para a modelagem de da Ferrugem-do-cafeeiro.

REFERÊNCIAS

Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G, Läderach P, Anzueto F, Hruska AJ, Morales C (2015) The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food security*, 7, 303-321.

Avelino J, Vilchez S, Segura-Escobar MB, Brenes-Loaiza MA, Virginio Filho EDM, Casanoves F (2020) Shade tree *Chloroleucon eurycyclum* promotes coffee leaf rust by reducing uredospore wash-off by rain. *Crop Protection*, 129, 105038.

Becker, S., Mulinge, S. K., & Kranz, J. (1975). Evidence that uredospores of *Hemileia vastatrix* Berk. and Br. are wind-borne. *Phytopathologische Zeitschrift*, 82(4), 359-360.

Bock KR (1962) Dispersal of uredospores of *Hemileia vastatrix* under field conditions. *Transactions of the British Mycological Society*, 45(1), 63-74.

Burman, P (1989) A comparative study of ordinary cross-validation, v-fold cross-validation and the repeated learning-testing methods. *Biometrika*, 76(3):503-514.

Campbell CL, Madden LV (1990) Introduction to plant disease epidemiology. John Wiley & Sons, New York

Cerda R, Avelino J, Gary C, Tixier P, Lechevallier E, Allinne C (2017) Primary and secondary yield losses caused by pests and diseases: Assessment and modeling in coffee. *PloS one*, 12(1), e0169133.

Chalfoun SM (1997) Doenças do cafeeiro: importância, identificação e métodos de controle. Lavras: UFLA/FAEPE.

Chemura A., Mutanga O, Sibanda M, Chidoko P. (2018) Machine learning prediction of coffee rust severity on leaves using spectroradiometer data. *Trop. plant pathol.* 43, 117–127.

Cunniffe NJ, Koskella B, Metcalf CJE, Parnell S, Gottwald TR, Gilligan CA (2015) Thirteen challenges in modelling plant diseases. *Epidemics*, 10, 6-10.

Dawson C, Abrahart R, See L (2007) HydroTest: a web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling and Software*. 22(7):1034-1052.

Faceli K, Lorena AC, Gama J, Carvalho ACPLF (2011) *Inteligência Artificial: Uma abordagem de aprendizado de máquina*. Rio de Janeiro: LTC, 2, 192.

Fraser J, Fisher E, Arce A (2014) Reframing 'crisis' in fair trade coffee production: trajectories of agrarian change in Nicaragua. *J Agrar Chang* 14(1):52–73

Friedrichs F, Igel C (2005) Evolutionary tuning of multiple SVM parameters. *Neurocomputing*, 64:107-117.

Hinnah FD, Sentelhas PC, Meira CAA, Paiva RN (2018) Weather-based coffee leaf rust apparent infection rate modeling. *International journal of biometeorology*, 62, 1847-1860.

Honorato J, Zambolim L, do Nascimento Lopes U, Lopes UP, da Silva Silveira Duarte, H. (2015) DMI and QoI fungicides for the control of coffee leaf rust. *Australasian Plant Pathology*, 44, 575-581.

International Coffee Organization – ICO (2023). Coffee trade statistics. Retrieved from: <<http://www.ico.org>>

Koch P, Golovidov O, Gardner S, Wujek B, Griffin J, Y X (2018) Autotune: A Derivative-free Optimization Framework for Hyperparameter Tuning. *ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*.

Krause P, Boyle DP, Base F (2005) Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In: Krause P, Bongartz K, Flugel W. (2004), Proceedings of the 8th Workshop for Large Scale Hydrological Modelling-Oppurg. Advances in Geosciences. 5:89-97.

Krause RA, Massie LB (1975) Predictive systems: modern approaches to disease control. Annual Review of Phytopathology, 13(1), 31-47.

Kushalappa AC (2019) Rust management: an epidemiological approach and chemical control. In Coffee Rust: Epidemiology, Resistance and Management (pp. 81-140). CRC Press.

Lasso E, Corrales DC, Avelino J, de Melo Virginio Filho E, Corrales JC. (2020) Discovering weather periods and crop properties favorable for coffee rust incidence from feature selection approaches. Computers and Electronics in Agriculture, 176, 105640.

Leguizamon CJ (1985) Contribution à la connaissance de la résistance incomplète du caféier *Arabica* (*Coffea arabica* L.) à la rouille orangée (*Hemileia vastatrix* Berk. et Br.). Montpellier: CIRAD-IRCC, 123 p. (Bulletin : IRCC, 17)

Meira CAA, Rodrigues LHA, Moraes SAD (2009) Warning models for coffee rust control in growing areas with large fruit load. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 44, 233-242.

Merle I, Tixier P, de Melo Virginio Filho E, Cilas C, Avelino J (2020) Forecast models of coffee leaf rust symptoms and signs based on identified microclimatic combinations in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. Crop Protection, 130, 105046.

Motisi N, Bommel P, Leclerc G, Robin MH, Aubertot JN, Butron AA, Merle I, Treminio E, Avelino J (2022) Improved forecasting of coffee leaf rust by qualitative modeling:

Design and expert validation of the ExpeRoya model. *Agricultural Systems*, 197, 103352.

Narzisi, G (2008) An Experimental Multi-Objective Study of the SVM Model Selection problem. n. C, p. 1–11.

Nutman, F. J., Roberts, F. M., & Clarke, R. T. (1963). Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(1), 27-44.

Ortolani AA, Viana ACC, Abreu RG (1971) *Hemileia vastatrix* Berk et br. estudos e observações em regiões da África e sugestões a cafeicultura do Brasil. Rio de Janeiro: IBC-GERCA. Relatório de missão realizada em Angola, África do Sul, Quênia, Tanzânia, Uganda e instituições de pesquisa em relação à ferrugem do cafeeiro. 193p

Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V, Vanderplas J, Passos A, Cournapeau D, Brucher M, Perrot M, Duchesnay É (2011) Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825-2830.

Rayner RW (1961) Germination and penetration studies on coffee rust (*Hemileia vastatrix* B. & Br.). *Annals of Applied Biology*, 49:497-505.

Ribeiro IJA, Monaco LC, Tisseli Filho O, Sugimori MH (1978) Efeito de alta temperatura no desenvolvimento de *Hemileia vastatrix* em cafeeiro suscetível. *Bragantia*, 37, 11-16.

Rudin C (2019) Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature machine intelligence*, 1(5), 206-215.

Salgado BG, Macedo RLG, Carvalho VL, Salgado M, Venturin N (2007) Progress of rust and coffee plant cercosporiose mixed with grevílea, with ingazeiro and in the full sunshine in Lavras - MG. *Ciênc Agrotec* 31(4):1067–1074

Schieber E, Zentmyer GA (1984) Coffee rust in the Western Hemisphere. *Plant disease*, 68(2), 89-93.

Sentelhas PC (2004) Duração do período de molhamento foliar: Aspectos operacionais da sua medida, variabilidade espacial em diferentes culturas e em sua estimativa a partir do modelo de Penman-Monteith. Piracicaba: ESALQ/USP. 182p. Tese Livre Docência

Siettos CI, Russo L (2013) Mathematical modeling of infectious disease dynamics. *Virulence*, 4(4), 295-306.

Waller, J. M., Bigger, M., & Hillocks, R. J. (Eds.). (2007). *Coffee pests, diseases and their management*. CABI.

Westberg D, Soja A, Stackhouse JRPW (2010) Linking satellite-derived fire counts to satellite-derived weather data in fire prediction models to forecast extreme fires in Siberia. *Geophys Res Abstr* 12:2010–5597.