

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – UFES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA

BRENO BENVINDO DOS ANJOS

**CARACTERIZAÇÃO EPIDEMIOLÓGICA DA FERRUGEM DO CAFEEIRO
CONILON**

ALEGRE – ES

2023

BRENO BENVINDO DOS ANJOS

**CARACTERIZAÇÃO EPIDEMIOLÓGICA DA FERRUGEM DO CAFEEIRO
CONILON**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia, na área de concentração de Proteção Sustentável de Plantas (Fitopatologia).

Orientador: Prof. Dr. Willian Bucker Moraes

ALEGRE – ES

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

Ac Anjos, Breno Benvindo dos, 1992-
Caracterização epidemiológica da ferrugem do cafeeiro conilon
/ Breno Benvindo dos Anjos. - 2023.
64 f. : il.

Orientador: Willian Bucker Moraes.
Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Ambiente. 2. Coffea canephora. 3. Hemileia vastatrix. 4.
Modelagem. 5. Previsão. I. Moraes, Willian Bucker. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias. III. Título.

CDU: 63

BRENO BENVINDO DOS ANJOS

**CARACTERIZAÇÃO EPIDEMIOLÓGICA DA FERRUGEM DO CAFEEIRO
CONILON**

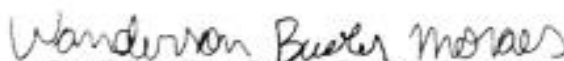
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia, na área de concentração de Proteção Sustentável de Plantas (Fitopatologia).

Aprovada em 22 de fevereiro de 2023

Comissão Examinadora:



Prof^o Dr. Waldir Cintra de Jesus Junior
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar
Membro Externo - PPGA



Prof^o Dr. Wanderson Bucker Moraes
The Ohio State University
Membro Externo - PPGA



Dr. Guilherme de Resende Camara
Centro de Tecnologia Mineral - CETEM – NRES
Membro Externo - PPGA



Prof^o Dr. Fábio Ramos Alves
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Membro Interno – PPGA



Prof^o Dr. Willian Bucker Moraes
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Orientador

BIOGRAFIA

BRENO BENVINDO DOS ANJOS, filho de Rosilda Alves da Conceição Benvindo e Claumir Alves dos Anjos, nasceu em Santa Leopoldina – ES, em 18 de novembro de 1992.

Cresceu e passou a infância na comunidade Quilombola de Retiro com os outros membros de sua família, no município de Santa Leopoldina – ES, no ano de 2006 concluiu o ensino fundamental na Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Alice Holzmeister.

Em fevereiro de 2007, ingressou na Escola Agrotécnica Federal de Santa Teresa – ES (EAFST), onde concluiu o ensino médio e obteve o título de Técnico em Agropecuária com Habilitação em Agropecuária, em dezembro de 2009.

Em março de 2010 ingressou no curso de Engenharia Agrônoma do Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Santa Teresa (antiga Escola Agrotécnica Federal de Santa Teresa – EAFST), graduando-se como Bacharel em Agronomia em dezembro de 2015.

Em agosto de 2016 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre – ES, concentrando seus estudos na área de Fitossanidade/Fitopatologia, submetendo-se à defesa de dissertação e obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal em 16 de julho de 2018.

Em agosto de 2018 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre – ES, concentrando seus estudos na área de Proteção Sustentável de Plantas (Fitopatologia), submetendo-se à defesa da tese e obtenção do título de Doutor em Agronomia em 22 de fevereiro de 2023.

Dedico

A Deus, por ter iluminado e guiado o meu caminho até aqui;

Aos meus pais, Rosilda Alves da Conceição Benvindo e Claumir Alves do Anjos,
por toda dedicação, amor, carinho e incentivo;

Ao meu irmão e amigo Bruno Benvindo do Anjos, sua mulher Francielen Souza e sua
amada filha, minha sobrinha e afilhada Helena Beatriz, por todo amor e carinho;

Ao Professor Willian Bucker Moraes, por todas as oportunidades e ensinamentos
profissionais e pessoais, por toda sua tenção e amizade durante essa jornada, foi uma
honra estar ao seu lado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter iluminado e guiado o meu caminho até aqui;

Aos meus pais, Rosilda Alves da Conceição Benvindo e Claumir Alves do Anjos, por toda dedicação, amor, carinho e incentivo;

Ao meu irmão e amigo Bruno Benvindo do Anjos, sua mulher Franciyelen Souza e sua amada filha, minha sobrinha e afilhada Helena Beatriz, por todo amor e carinho;

A Tamyris de Mello, companheira e amiga, que sempre esteve ao meu lado, obrigado por todo carinho e atenção, por estar presente sempre que precisei, a sua presença na minha vida foi muito importante;

A Universidade Federal do Espírito Santo, ao Centro de Ciências Agrárias e Engenharias e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela oportunidade em cursar o doutorado em Agronomia;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;

A Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), pela concessão de financiamento para realização deste trabalho;

Ao Professor Willian Bucker Moraes, pela orientação, confiança e oportunidades pessoais e profissionais proporcionadas durante todo o decorrer do mestrado e doutorado, as quais levarei para toda a vida;

Aos professores Dr. André da Silva Xavier, Dr. Fábio Ramos Alves e Dr. Cíntia dos Santos Bento pelos ensinamentos durante o doutorado e execução deste trabalho;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela significativa contribuição em minha vida profissional;

A Jean Cesar Premoli Bernabé, amigo que esteve ao meu lado em todos os momentos;

Aos amigos Guilherme de Resende Camara, Alex dos Santos Silva, Sânela Cansi, Carlos Alberto Gonçalves Gomes, Isadora Rodrigues Garcia, Aline Barroso da Silva, Hiago Zambão Falqueto, igualmente responsáveis pela execução e mérito deste trabalho;

Aos produtores rurais Mário César, Luíza, Sebastião, Roque e Romário, proprietários das áreas em que esta pesquisa foi realizada;

Aos demais profissionais, amigos e colegas da equipe do Laboratório de Epidemiologia e Manejo de Doenças de Plantas Agrícolas e Florestais - LEMP, por todo carinho e amizade em todas as horas, em especial a Mila Letice Sangali Mattos Ferreira, Leonardo Leoni Belan, Isadora Rodrigues Garcia, Matheus Ricardo da Rocha, Weliton Geraldo Sartori e Cayo Yoshihiro Gondo;

Ao amigo e técnico do Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Manejo Fitossanitário de Pragas e Doenças (NUDEMAFI), Leonardo Mardgan por todo suporte quando necessário;

Aos amigos Wesley Johnny da Silva e Santos, Ronie Brunhara, Rodrigo Brunhara;

A comissão examinadora, pela disponibilidade e contribuição na melhoria deste trabalho;

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até esse momento e realizasse meu sonho, eterna gratidão.

Obrigado!

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

*O presente projeto foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES - EDITAL FAPES/SEAG Nº 06/2015 - PPE
AGROPECUÁRIA - Nº FAPES:736/2016*

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	11
INTRODUÇÃO GERAL	12
REFERÊNCIAS	13
HIPÓTESE	15
OBJETIVO GERAL.....	15
CAPÍTULO 1	16
Análise do progresso temporal da ferrugem do cafeeiro conilon	16
Resumo	16
Introdução	16
Material e Métodos	17
<i>Caracterização das áreas de estudo</i>	17
<i>Avaliações da incidência da doença</i>	18
<i>Ajustes e seleção dos modelos</i>	19
<i>Análises estatísticas</i>	19
Resultados	19
Discussão	23
Conclusão	24
Referências	25
CAPÍTULO 2	28
Relação da intensidade da ferrugem em lavouras de cafeeiro conilon com as variáveis meteorológicas.....	28
Resumo	28
Introdução	28
Material e métodos	29
<i>Caracterização das áreas de estudo</i>	29
<i>Avaliação da intensidade da doença</i>	30
<i>Coleta de dados meteorológicos</i>	31
<i>Análises estatísticas</i>	31
Resultados	32
Discussão	36
Conclusão	39
Referências	39

CAPÍTULO 3	43
Modelos logísticos baseados em dados meteorológicos para estimar probabilidade de risco de ocorrência de epidemias da ferrugem em cafeeiro conilon.....	43
Resumo	43
Introdução	43
Material e métodos	45
<i>Banco de dados</i>	45
<i>Variáveis meteorológicas explicativas</i>	46
<i>Correlação entre a incidência da ferrugem e as variáveis meteorológicas</i>	47
<i>Ajuste e validação do modelo de Regressão</i>	47
Resultados	49
Discussão	53
Conclusão	55
Referências	55

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1-** Curvas de progresso da ferrugem do cafeeiro conilon em diferentes altitudes: A) <100 m; B) >100m e <300m; C) >300m e <500 m; D) >500m. As linhas tracejadas em vermelho indicam o nível de 5% de incidência da ferrugem.....20
- Figura 2-** Gráficos dos resíduos do ajuste do modelo de Gompertz para as epidemias em A1 (A) e A4 (B) em diferentes altitudes: A) <100 m; B) >500m.....21
- Figura 3-** Gráficos dos resíduos dos ajustes dos modelos Logístico (A e C) e de Gompertz p (B e D) para as áreas A2 (A e B) e A3 (C e D) em diferentes altitudes: A e B) >100m e <300m; C e D) >300m e <500 m.....22
- Figura 4-** Gráficos dos ajustes do modelo de Gompertz para as áreas A1 (A) e A4 (B): Pontos representam os dados reais, as linhas representam os valores estimados pelo modelo de Gompertz.....22
- Figura 5 -** Gráficos dos ajustes do modelo Logístico (A e C) e Gompertz (B e D) para as áreas A2 (A e B) e A3 (C e D): Pontos representam os dados reais, as linhas representam os valores estimados pelo modelo de Gompertz.....23

CAPITULO 2

- Figura 1 -** Médias das temperaturas máximas, mínimas e médias das áreas avaliadas e incidência nas áreas avaliadas: A) <100 m; B) >100m e <300m; C) >300m e <500 m; D) >500m.....32
- Figura 2 -** Temperatura média durante o molhamento foliar (TMMF) com umidade relativa UR>90% e UR>80% e incidência nas áreas avaliadas: A) <100 m; B) >100m e <300m; C) >300m e <500 m; D) >500m.....33
- Figura 3 -** Número de horas com temperaturas entre $\geq 15^{\circ}\text{C}$ e $\leq 26^{\circ}\text{C}$: A) <100 m; B) >100m e <300m; C) >300m e <500 m; D) >500m.....34

CAPÍTULO 3

- Figura 1 – Curva ROC associado ao modelo ajustado.....51
- Figura 2 – Curva de progresso da ferrugem versus curva de probabilidade do modelo.....52

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Caracterização das áreas de estudo localizadas na região sul do estado do Espírito Santo, em diferentes altitudes.....	18
Tabela 2 - Resumo das equações diferenciais e integradas para os modelos utilizados em epidemiologia de doenças de plantas.....	19
Tabela 3 - Parâmetros de ajustes dos modelos das epidemias de ferrugem do cafeeiro conilon em diferentes altitudes no Estado do Espírito Santo.....	21

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Caracterização das áreas de estudo localizadas na região sul do estado do Espírito Santo, em diferentes altitudes.....	30
Tabela 2 - Variáveis meteorológicas coletadas e geradas com estação semiautomática modelo E5000 irriplus®, localizadas nas áreas de avaliação.....	31
Tabela 3 - Coeficiente de correlação de pearson ($p < 0,05$) entre a intensidade da ferrugem do cafeeiro conilon e as variáveis meteorológicas 30 dias antes da avaliação.....	34
Tabela 4 - Coeficiente de correlação de pearson ($p < 0,05$) entre a intensidade da ferrugem do cafeeiro conilon e as variáveis meteorológicas 60 dias antes da avaliação.....	35
Tabela 5 - Coeficiente de correlação de pearson ($p < 0,05$) entre a intensidade da ferrugem do cafeeiro conilon e as variáveis meteorológicas aos 30 e 60 dias antes da avaliação.....	36

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Variáveis utilizadas para obtenção do modelo logístico para estimação da probabilidade de ocorrência de epidemias em ferrugem do cafeeiro conilon.....	46
Tabela 2 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a incidência e as variáveis meteorológicas.....	49
Tabela 3 - Modelos logísticos ajustados.....	49
Tabela 4 - Estimativas de máxima verossimilhança do modelo de regressão logística para previsão da ferrugem em cafeeiro conilon.....	50
Tabela 5 – Matriz de confusão.....	51
Tabela 6 - Valores de Pseudo R^2 do modelo selecionado.....	51

RESUMO

O Brasil se destaca no cenário mundial como um dos principais produtores e exportadores de café. No entanto a ocorrência de doenças é um dos principais fatores limitantes no aumento da produção e produtividade da cultura, com destaque para ferrugem considerada a principal doença do cafeeiro. O conhecimento das condições ambientais e como elas se relacionam com a intensidade da doença permite o planejamento e avaliação das estratégias, auxiliando na tomada de decisão e na elaboração racional de um manejo fitossanitário para esta doença, mitigando os danos e as perdas ocasionados. Portanto, objetivou-se analisar temporalmente o comportamento da ferrugem em diferentes altitudes, verificando as variáveis correlacionadas com a intensidade doença e a partir disso, gerar um modelo de previsão de risco da epidemia da ferrugem do cafeeiro conilon. Deste modo, a tese foi organizada em três capítulos: 1) Análise do progresso temporal da ferrugem do cafeeiro conilon; 2) Relação da intensidade da ferrugem em lavouras de cafeeiro conilon com as variáveis meteorológicas; 3) Modelos logísticos baseados em dados meteorológicos para estimar probabilidade de risco de ocorrência de epidemias da ferrugem em cafeeiro conilon. Para isso foram selecionadas quatro áreas de cultivo de café conilon em diferentes altitudes (<100 m; >100m e <300m; >300m e <500 m; >500m) propagadas por sementes. Em cada área foram avaliados 80 pontos, durante setembro de 2017 a dezembro de 2019, a cada avaliação foi quantificada a intensidade da ferrugem e dados meteorológicos foram obtidos a partir de estações instaladas em cada uma das áreas avaliadas. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que os modelos Logístico e de Gompertz foram os que melhores se ajustaram aos dados de incidência da ferrugem do cafeeiro conilon descrevendo com precisão as epidemias, com as maiores intensidade observadas >100 m e 500 m. Com relação as variáveis meteorológicas, verificou-se que variáveis correlacionadas com intensidade da doenças foram $T_{Máx}$, $T_{Mín}$, $T_{Méd}$, $TMMF_{(18h - 9h; UR \geq 90\%)}$, $TMMF_{(18h - 9h; UR \geq 80\%)}$, $TMMF_{(18h - 6h; UR \geq 90\%)}$ e $TMMF_{(18h - 6h; UR \geq 80\%)}$ e $NHT_{(\geq 15^{\circ}C \text{ e } < 26^{\circ}C)}$. Por fim foi possível desenvolver um modelo de previsão para estimar a probabilidade de ocorrência da ferrugem do cafeeiro conilon por meio da abordagem de modelagem de regressão logística.

Palavras-chave: Ambiente, *Coffea canephora*, *Hemileia vastatrix*, modelagem, previsão

ABSTRACT

Brazil stands out on the world stage as one of the main producers and exporters of coffee. However, the occurrence of diseases, with emphasis on coffee rust, considered the main disease, is one of the main limiting factors in increasing the production and productivity of the crop. Knowledge of the environmental conditions and how they are related to the intensity of the disease allows the planning and evaluation of strategies, helping in decision-making and in the rational elaboration of phytosanitary management for this disease, mitigating the damage and losses caused. Therefore, the objective was to analyze the behavior of rust at different altitudes over time, verifying the variables correlated with the disease intensity and, based on this, to generate a risk prediction model for the conilon coffee leaf rust epidemic. Thus, the thesis was organized into three chapters: 1) Analysis of the temporal progress of conilon coffee leaf rust; 2) Relation of coffee leaf rust intensity in conilon plantations with meteorological variables; 3) Logistic models based on meteorological data to estimate the probability of the occurrence of coffee leaf rust epidemics in conilon trees. For this, four areas of conilon coffee cultivation at different altitudes (<100 m; >100m and <300m; >300m and <500 m; >500m) propagated by seeds were selected. In each area, 80 points were evaluated, from September 2017 to December 2019, at each evaluation the intensity of coffee leaf rust was quantified and meteorological data were obtained from stations installed in each of the evaluated areas. Therefore, it was possible to conclude that the Logistic and Gompertz models were the ones that best fit the conilon coffee leaf rust incidence data, accurately describing the epidemics, with the highest intensity observed >100 m and 500 m. Regarding the meteorological variables, it was found that variables correlated with disease intensity were T_{Max} , T_{Min} , T_{Avg} , $T_{AvgLW}(6\text{ pm} - 9\text{ am}, RH \geq 90\%)$, $T_{AvgLW}(6\text{ pm} - 9\text{ am}, RH \geq 80\%)$, $T_{AvgLW}(6\text{ pm} - 6\text{ am}, RH \geq 90\%)$, $T_{AvgLW}(6\text{ pm} - 6\text{ am}, RH \geq 80\%)$, $NDHT(\geq 15^{\circ}\text{C e } < 26^{\circ}\text{C})$. Finally, it was possible to develop a prediction model to estimate the probability of the occurrence of conilon coffee leaf rust using the logistic regression modeling approach.

Keywords: Environment, *Coffea canephora*, *Hemileia vastatrix*, modeling, prediction

INTRODUÇÃO GERAL

O café pertencente ao gênero *Coffea* na família Rubiaceae, é nativo do centro-norte da África, mas atualmente se encontra disseminado por todo o mundo, sendo cultivado em 76 países, produzindo uma das três bebidas mais consumidas no mundo (Guimarães et al., 2019). O café é uma das commodities de maior importância ao redor do mundo, em termos de comercialização é a segunda mais comercializada, depois do petróleo bruto (OIC, 2023).

A cafeicultura é uma das principais atividades agrícolas do Brasil, as duas espécies de maior relevância cultivadas comercialmente são o café arábica (*Coffea arabica* L.) e o conilon (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner). O país se destaca no cenário mundial como o maior produtor e exportador do grão (OIC, 2023; Davis, 2011) o que representa cerca de 34% do café produzido no mundo (USDA, 2022).

O estado do Espírito Santo se destaca no cenário nacional como o principal produtor de café conilon, a cafeicultura é a principal atividade agrícola do estado, com a maior área destinada ao cultivo da espécie, produzindo mais de 60% do volume total do país (CONAB 2023). A atividade gera em torno de 400 mil empregos diretos e indiretos, estando presente em 67% das propriedades agrícolas do estado (INCAPER 2022).

Em todo mundo, a produção de café é limitada por diversos fatores, dentre os principais problemas fitossanitários que ocorrem na cultura, podemos destacar a incidência de doenças. A ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) é considerada a principal doença desta cultura. No Brasil, pode causar perdas de até 50% na produção de café, dependendo do nível de resistência da cultivar, condições climáticas favoráveis à doença e medidas de manejo (Zambolim & Caixeta, 2021).

O manejo desta doença é realizado com uso de variedades resistentes, fungicidas protetores e sistêmicos, com base no monitoramento e tomada de decisão (Belan et al., 2015; Belan et al., 2020), ou aplicações com base em calendário fixos, com datas preestabelecidas (Capucho et al., 2013, Zambolim, 2016). A seleção de populações de *H. vastatrix* resistentes a aplicação de fungicidas bem como a dificuldade de selecionar variedades resistentes ao patógeno (Zambolim, 2016; Zambolim & Caixeta, 2021) torna necessário o monitoramento da ferrugem, assim como das variáveis meteorológicas (Hinnah et al., 2018; Hinnah et al., 2020), a fim de orientar o produtor na tomada de decisão, e na adoção e implementação de sistemas de previsão e alerta, para o manejo sustentável da doença.

Os modelos de previsão para o manejo de doenças de plantas, em sua maioria são desenvolvidos com base em eventos climáticos, devido a importância das condições climáticas durante o ciclo da cultura, afetando o potencial da doença e do rendimento da cultura (Murungu & Madanzi, 2010). A intensidade da doença está diretamente correlacionada com a condição ambiental, em muitos casos, as variáveis meteorológicas são os únicos componentes do sistema de previsão (Van Mannen & Xu, 2003).

Entretanto, prever a ocorrência de doenças continua sendo um desafio, mesmo quando se concentra em variáveis meteorológicas (Cunniffe et al., 2015; Bevacqua et al., 2023). Diferentes abordagens podem ser utilizadas para o desenvolvimento de modelos preditivos, essas abordagens são agrupadas em modelos estatísticos, mecanicistas e aprendizado de máquina (Siettos & Russo, 2013). Neste sentido, a escolha da melhor abordagem depende do objetivo do modelo, das informações disponíveis e das dificuldades de detecção da doença.

REFERÊNCIAS

- Belan, L.L., Jesus Junior, W.C., de Souza, A.F., Zambolim, L., Filho, J.C., Barbosa, D.H.S.G., Moraes, W.B. (2020). Management of coffee leaf rust in *Coffea canephora* based on disease monitoring reduces fungicide use and management cost. **European Journal of Plant Pathology**, 156:683–694. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01917-6>
- Belan, L.L., de Jesus Junior, W.C., de Souza, A.F., Zambolim, L., Tomaz, M.A., Alves, F.R., Ferrão, M.A.G., Amaral, J.F.T. (2015) Monitoring of leaf rust in conilon coffee clones to improve fungicide use. **Australasian Plant Pathology**, 44:5–12. <https://doi.org/10.1007/s13313-014-0310-y>
- Bevacqua, D., Vanalli, C., Casagrandi, R., Gatto, M. (2023) A climate-driven compartmental model for fungal disease in fruit orchards: The impacts of climate change on a brown rot-prevalent system. **Agricultural and Forest Meteorology**, 332:109293. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109293>
- Capucho, A.S., Zambolim, L., Cabral, P.G.C., Maciel-Zambolim, E., Caixeta, E.T. (2013) Climate favorability to leaf rust in Conilon coffee. **Australasian Plant Pathology**, 24:511–514. <https://doi.org/10.1007/s13313-012-0187-6>
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília, 2023. v.10: safra 2023, primeiro levantamento, janeiro 2023. <Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 15 de janeiro 2023.

- Cunniffe, N.J., Koskella, B., Metcalf, E., Jessica, C., Parnell, S., Gottwald, T.R., Gilligan, C.A. (2015). Thirteen challenges in modelling plant diseases. **Epidemics**, 10:6–10. <https://doi.org/10.1016/j.epidem.2014.06.002>
- Davis, A.P.; Tosh, J.; Ruch, N.; Fay, M.F. (2011). Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data, implications of size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, 167:1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2011.01177.x>
- Guimaraes, R.J., Borem, F.M., Shuler, J., Farah, A., Romero, J.C.P. (2019). Coffee growing and post-harvest processing. In **Coffee Production, Quality and Chemistry**; Farah, A., Ed.; The Royal Society of Chemistry: London, UK, pp. 150–178.
- Hinnah, F.D., Sentelhas, P.C., Meira, C.A.A., Paiva, R.N. (2018) Weather-based coffee leaf rust apparent infection rate modeling. **International Journal of Biometeorology**, 62:1847–1860. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105225>
- Hinnah, F.D., Sentelhas, P.C., Patrício, F.R.A., Paiva, R.N., Parenti, M.V. (2020). Performance of a weather-based forecast system for chemical control of coffee leaf rust. **Crop Protection**, 137:105225. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105225>
- Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural – INCAPER. Cafeicultura. Disponível em: < <https://incaper.es.gov.br/cafeicultura>>. Acesso em: 15 janeiro 2023.
- Murungu, F.S., Madanzi, T. (2010). Seed priming, genotype and sowing date effects on emergence, growth and yield in a tropical low altitude area of Zimbabwe. **African Journal of Agricultural Research**, 5(17):2341–2349. <https://doi.org/10.5897/AJAR.9000622>
- Organização Internacional do Café - OIC. Relatório sobre o mercado do café (2021/2022) – setembro de 2022. Disponível em: < <https://www.ico.org/documents/cy2021-22/cmr-0922-p.pdf>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2023.
- Siettos, C.I., Russo, L. (2013). Mathematical modeling of infectious disease dynamics. **Virulence**, 4:295–306. <https://doi.org/10.4161/viru.24041>.
- United States Department of Agriculture. **Coffee: World Markets and Trade**; USDA Foreign Agricultural Service: Washington, DC, USA, 2022
- Van Maanen, A., Xu, X.M. (2003). Modelling plant disease epidemics. **European Journal of Plant Pathology**, 109:669–682. <https://doi.org/10.1023/A:1026018005613>
- Zambolim, L., Caixeta, E.T. (2021). An overview of physiological specialization of coffee leaf rust–New designation of pathotypes. **International Journal of Current Research**, 13:15479–15490. <https://doi.org/10.24941/ijcr.40600.01.2021>
- Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. **Tropical plant pathology**. 41:1–8 <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>

HIPÓTESE

Variáveis meteorológicas modulam diferencialmente as epidemias da ferrugem do cafeeiro conilon potencializando sua intensidade.

OBJETIVO GERAL

Analisar temporalmente o comportamento da ferrugem em diferentes altitudes, verificando as variáveis correlacionadas com a intensidade da doença e a partir disso, gerar um modelo de previsão de risco da epidemia da ferrugem do cafeeiro conilon.

CAPÍTULO 1

Análise do progresso temporal da ferrugem do cafeeiro conilon

Resumo

A ferrugem é a principal doença do cafeeiro conilon, considerada uma doença policíclica, causa epidemias afetando a produtividade ao longo dos anos. No entanto, o progresso temporal da ferrugem do cafeeiro conilon é afetado por diversos fatores. Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar o progresso temporal da ferrugem do cafeeiro conilon em diferentes altitudes através das curvas de progresso da doença. Para isso foram selecionadas quatro áreas de cultivo de café conilon em diferentes altitudes (<100 m; >100m e <300m; >300m e <500 m; >500m) propagadas por sementes. Em cada área foram avaliados 80 pontos, cada ponto composto por uma única planta, sendo realizada 26 avaliações durante setembro de 2017 a dezembro de 2019. A cada avaliação foi quantificada a incidência da ferrugem. A partir dos resultados obtidos foram plotadas as curvas de progresso e realizado os ajustes dos modelos epidemiológicos utilizando regressão não linear. Os modelos foram selecionados com base no coeficiente de determinação, erro padrão residual, coeficiente de concordância de Lin. De acordo com resultados obtidos ocorrem epidemias em todas as áreas avaliadas, sendo que nas áreas A2 e A3 ocorreram duas epidemias. Os modelos selecionados para descrever as epidemias nas áreas avaliadas foram o Gompertz e o Logístico. As maiores intensidade foram observadas nas faixas de altitude entre >100m e 500m. Os picos da incidência nas áreas avaliadas foram entre os meses de julho-setembro nas diferentes áreas avaliadas.

Palavras-chaves: *Hemileia vastatrix*, altitude, epidemiologia

Introdução

O café é uma das culturas com grande expressão mundial e, dentre as principais doenças, a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.), é considerada a mais importante (Afonsi et al., 2019). No Brasil, a ferrugem pode causar perdas de até 50% na

produção de café, dependendo do nível de resistência da cultivar, condições ambientais favoráveis a ocorrência da doença e medidas de manejo (Zambolim & Caixeta, 2021).

Entre os danos causadas pela ocorrência da ferrugem, a desfolha é responsável pela redução da área fotossintética, conseqüentemente a morte dos ramos plagiotrópicos, com reflexos na produção da cultura (Gree, 1993; Pozza et al., 2010; Fernandes et al., 2013). A doença está disseminada em todas as regiões de cultivo do país, causando danos em lavouras tanto da espécie *Coffea arabica* L. quanto da *C. canephora* Pierre ex Froehner (Cerda et al., 2017; Zambolim, 2016).

O impacto da epidemia de ferrugem está associado ao tipo de cultivar do café utilizada, condições ambientais locais e carga (Toniutti et al., 2017). A análise das curvas de progresso da doença fornece informações uteis para compreensão dos processos epidêmicos subjacentes. As formas das curvas podem variar e as características das epidemias poder ser diferenciadas por sua descrição e análise (Van der Plank, 1963; Kranz, 2003).

Os modelos matemáticos em epidemiologia têm por finalidade expressar de forma simplificada a relação existente entre doença e tempo, facilitando a análise do progresso da doença, alterações da susceptibilidade dos hospedeiros e eficácia das medidas de controle, contribuindo para a compreensão da epidemia (Campbel & Madden, 1990; Van Maanen & Xu, 2003; Bergamim Filho, 2011).

O uso de modelos capazes de quantificar o impacto das doenças são fundamentais no auxílio à tomada de decisões e em alguns casos sendo responsável por alterar ou determinar as práticas de controle (Van Maanen & Xu, 2003; Contreras-Medina et al., 2009; Pavan & Fernandes, 2009).

O progresso temporal da epidemia da ferrugem do café em variedades de conilon é afetado pela origem da planta (clonal ou semínifera), densidade de plantio, nutrição e condições climáticas (Zambolim et al., 2015). Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar o progresso temporal da ferrugem do cafeeiro conilon em diferentes altitudes através das curvas de progresso da doença.

Material e Métodos

Caracterização das áreas de estudo

O estudo foi realizado em quatro áreas de cultivo comercial de cafeeiro conilon, variedade “Robusta Tropical” (EMCAPER 8151) propagadas por sementes localizadas

no estado do Espírito Santo em diferentes altitudes. As áreas foram selecionadas e caracterizadas, para fins de comparação, com base na similaridade entre a idade da lavoura (15 anos), espaçamento (3 m x 2m) e tratos culturais (Tabela 1).

Tabela 1 - Caracterização das áreas de estudo localizadas na região sul do estado do Espírito Santo, em diferentes altitudes.

	Código	Município	Localidade	Coordenadas Geográficas		Área (ha)	Altitude (m)
				Latitude	Longitude		
Área 1	A1	Cachoeiro de Itapemirim	Pacotuba	20°44'03.2" S	41°15'22.0" W	0,81	< 100
Área 2	A2	Jerônimo Monteiro	Santa Maria	20°50'01.1" S	41°25'03.5" W	0,6	>100 e <300
Área 3	A3	Jerônimo Monteiro	Gironda	20°53'24.75"S	41°25'57.7"W	0,97	>300 e <500
Área 4	A4	Cachoeiro de Itapemirim	Boa Vista	20°37'37.0" S	41°05'13.9" W	1,5	>500

Avaliações da incidência da doença

Em cada uma das áreas avaliadas foi definido um grid amostral de 80 pontos, demarcado em malha regular, distribuídos no espaço a cada 20 m de forma a ocupar toda a área da lavoura, sendo cada ponto amostral composto por uma única planta.

As avaliações da incidência da ferrugem do cafeeiro foram realizadas a cada 30 dias, durante 26 meses para as áreas A1, A2 e A4, de outubro de 2017 a dezembro de 2019 e durante 26 meses para a área A3, de setembro de 2017 a outubro de 2019. A incidência da doença foi determinada pela porcentagem de folhas com sintomas da doença em relação ao total amostrado (Campbell & Madden, 1990).

$$I (\%) = \frac{NFD}{NFT} \times 100$$

Em que, $I (\%)$ representa a incidência, NFD o número de folhas doentes e NFT o número total de folhas avaliadas. Os dados de incidência foram integralizados em área abaixo da curva de progresso da incidência (AACPI), seguindo metodologia proposta por Shaner e Finney (1977):

$$AACPI = \sum_i^{n-1} \left(\frac{y_i + y_{i+1}}{2} \right) (t_{i+1} - t_i)$$

Em que, n é o número de avaliações; y é a incidência da ferrugem e $(t_{i+1} - t_i)$ é o intervalo de tempo, em dias, entre duas avaliações consecutivas.

Ajustes e seleção dos modelos

Para descrever o progresso temporal da doença, foram plotadas curvas de progresso da ferrugem do cafeeiro ao longo do tempo, os dados de incidência foram ajustados aos modelos (Tabela 2) de regressão não linear para epidemias $\geq 5\%$. De acordo com a equação do modelo, y representa a incidência em proporção, no tempo t , y_0 o inóculo inicial e r a taxa de progresso da doença.

Tabela 2 - Resumo das equações diferenciais e integradas para os modelos utilizados em epidemiologia de doenças de plantas.

Modelo	Taxa, r	Equação do modelo, y
Exponencial	$\frac{dy}{dt} = r_E y$	$y = y_0 \exp(r_E t)$
Monomolecular	$\frac{dy}{dt} = r_M (1 - y)$	$y = 1 - (1 - y_0) \exp(-r_M t)$
Logístico	$\frac{dy}{dt} = r_L y (1 - y)$	$y = \frac{1}{1 + \exp\left(-\ln\left[\frac{y_0}{1 - y_0}\right] - r_L t\right)}$
Gompertz	$\frac{dy}{dt} = r_G y [\ln(1) - \ln(y)]$	$y = \exp[\ln(y_0) \times \exp(-r_G t)]$

A seleção e escolha do modelo foi com base no maior coeficiente de determinação da regressão (R^2), menor erro padrão, gráficos de dispersão dos resíduos, similaridade entre as curvas dos dados reais e estimados, coeficiente de correlação (CAMPBELL; MADDEN, 1990; JESUS JUNIOR et al., 2004) e coeficiente de concordância de Lin.

Análises estatísticas

As análises foram realizadas com auxílio do software R® versão 4.2 (R CORE TEAM, 2022) e os pacotes “*epifiter*” (ALVES; DEL PONTE, 2021) para ajustes dos modelos e o pacote “*ggplo2*” (WICKMAN, 2016) para elaboração dos gráficos das curvas de progresso. Todos os dados foram comparados pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Resultados

Em todas as áreas a incidência da ferrugem progrediu de forma intermitente ao longo das avaliações realizadas, começando em novembro-dezembro, aumentando no verão (dezembro – março) e diminuindo ao fim do inverno (junho-setembro), que corresponde a estação mais seca do ano e final da colheita. Ao fim das avaliações, verificou-se a ocorrência de uma única epidemia para as áreas A1 (<100m) e A4 (>500m) com valores de intensidade máxima ($y_{máx}$) de 20% e 21%, respectivamente nos meses de agosto e julho de 2018. Nas áreas A2 e A3 foram identificadas duas epidemias, com

incidências $\geq 5\%$, sendo a $y_{m\acute{a}x}$ em A2 de 18% em setembro de 2018 e 13% em julho de 2019, em A3 de 18% em julho 2018 e 22% em julho de 2019 (Figura 1).

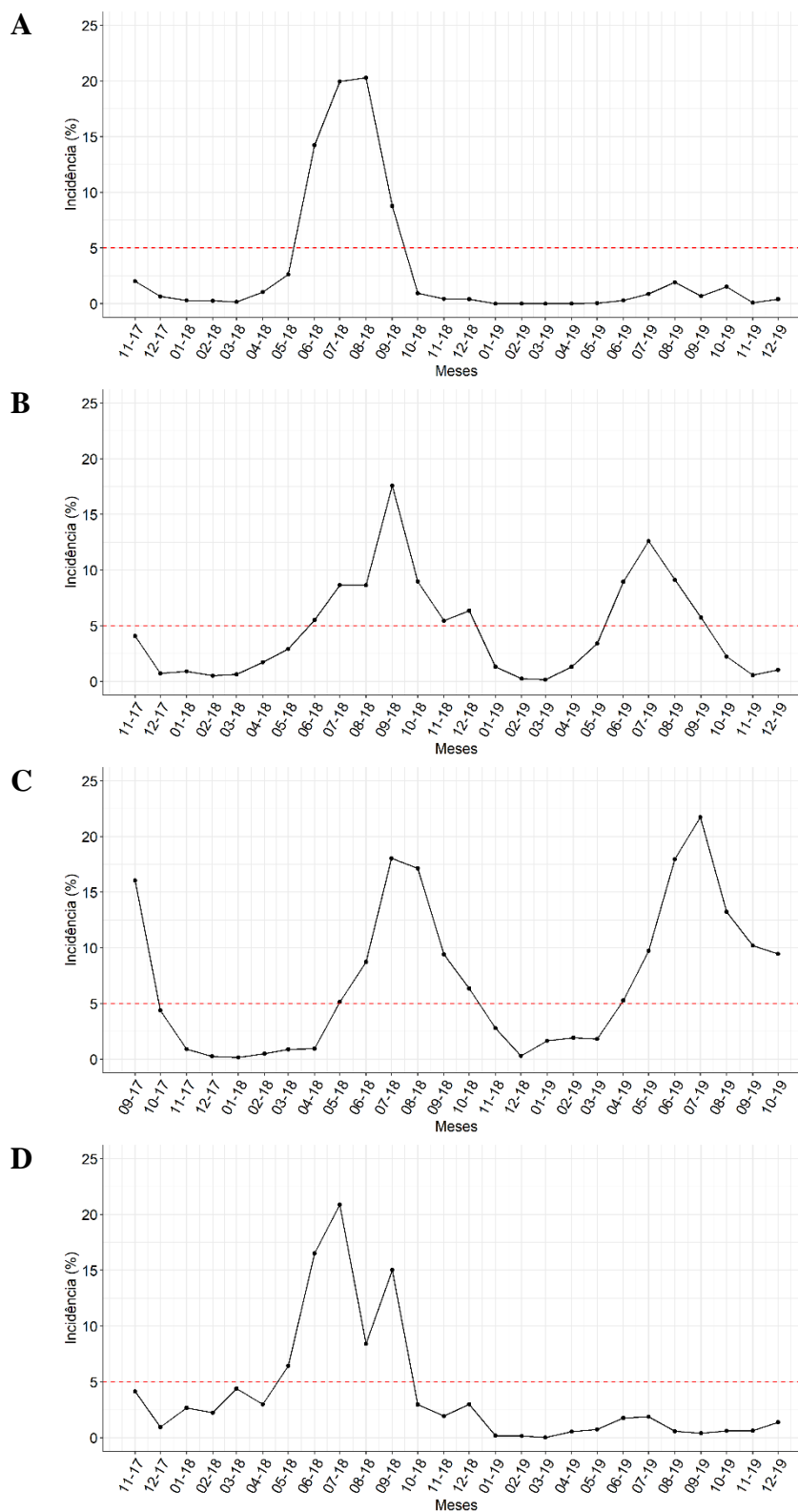


Figura 1- Curvas de progresso da ferrugem do cafeeiro conilon em diferentes altitudes: A) <100 m; B) >100 m e <300 m; C) >300 m e <500 m; D) >500 m. As linhas tracejadas em vermelho indicam o nível de 5% de incidência da ferrugem.

Considerando o coeficiente de determinação ajustado na análise (R^2), erro padrão residual (SER) e coeficiente de correlação de concordância de Lin (CCC) (Tabela 3) e a análise do gráfico dos resíduos (Figura 2 e 3), os modelos Logístico e de Gompertz foram os que melhor se ajustaram aos dados de incidência da ferrugem cafeeiro conilon durante o período de estudo. As maiores taxas de progresso da doença (r) estimadas pela equação de regressão foram 0,0152 e 0.0269 para as áreas A2 e A3, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3- Parâmetros de ajustes dos modelos das epidemias de ferrugem do cafeeiro conilon em diferentes altitudes no Estado do Espírito Santo.

Áreas	Epidemia	Modelo	y_0	r	R^2	RSE	CCC	AACPD
A1	01	Gompertz	0.00997	0.0075	0.9073	0.0330	0.9475	14.16
A2	01	Logístico	0.01138	0.0152	0.9643	0.0121	0.9817	11.54
	02	Gompertz	0.00263	0.0083	0.9938	0.0049	0.9967	5.68
A3	01	Logístico	0.00870	0.0269	0.9909	0.0079	0.9953	7.28
	02	Gompertz	0.02701	0.0075	0.9758	0.0153	0.9872	13.43
A4	01	Gompertz	0.01667	0.0078	0.9424	0.0225	0.9703	11.93

y_0 = inóculo inicial; r = taxa de progresso; R^2 = Coeficiente de determinação; RSE = Erro padrão residual; CCC = Coeficiente de correlação de concordância de Lin; AACPD = Área abaixo da curva de progresso da doença.

A partir da análise dos gráficos dos resíduos, verificou-se que os modelos ajustados para as áreas A1 e A4 (figura 2) e A2 e A3 (figura 3) para os dados de incidência foram os mais representativos, com os menores valores da diferença entre y real e y previsto pelos modelos.

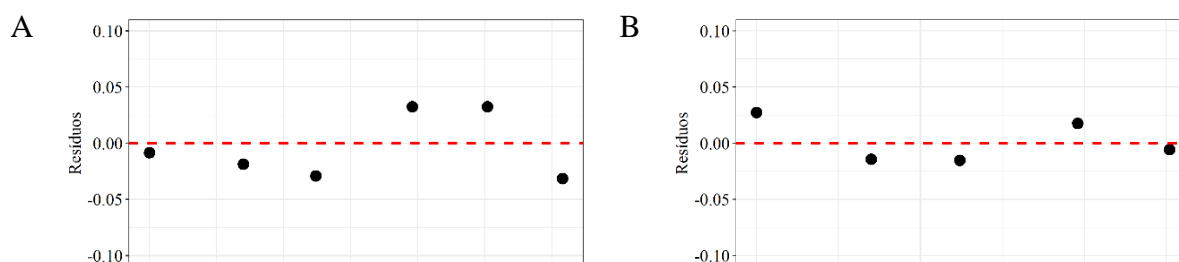


Figura 2- Gráficos dos resíduos do ajuste do modelo de Gompertz para as epidemias em A1 (A) e A4 (B) em diferentes altitudes: A) <100 m; B) >500m.

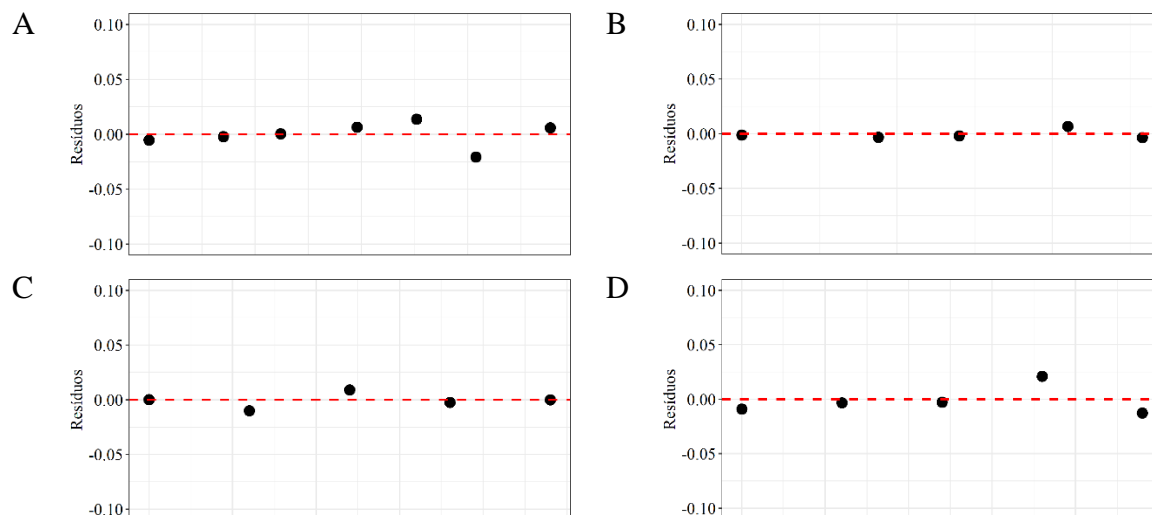


Figura 3- Gráficos dos resíduos dos ajustes dos modelos Logístico (A e C) e de Gompertz (B e D) para as áreas A2 (A e B) e A3 (C e D) em diferentes altitudes: A e B) >100m e <300m; C e D) >300m e <500 m

O modelo de Gompertz foi selecionado com base nos parâmetros avaliados para descrever a epidemia nas áreas A1 (<100m) e A4 (>500m) (Figura 4).

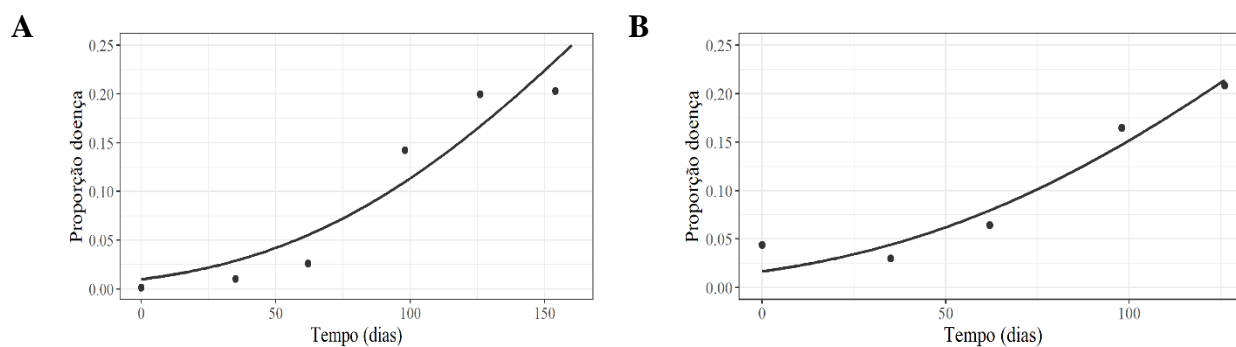
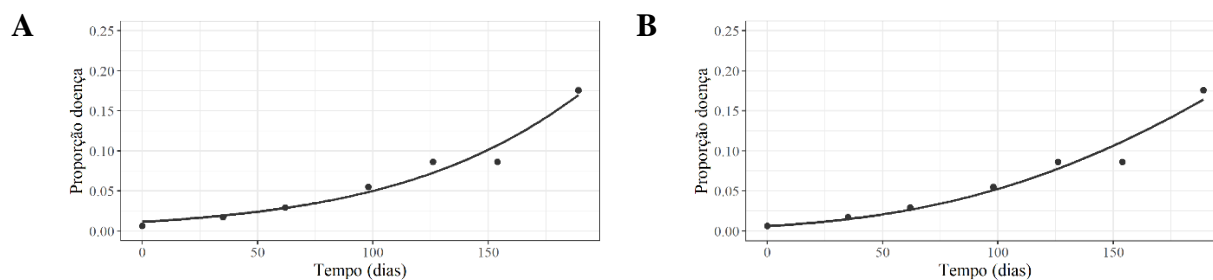


Figura 4- Gráficos dos ajustes do modelo de Gompertz para as áreas A1 (A) e A4 (B): Pontos representam os dados reais, as linhas representam os valores estimados pelo modelo de Gompertz

Paras as áreas A2 e A4, os modelos selecionados foram o Logístico e de Gompertz para primeira e segunda epidemia, respectivamente (Figura 5).



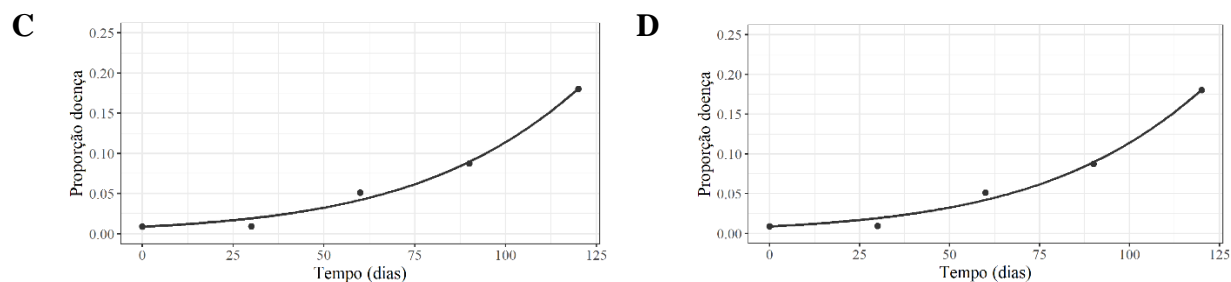


Figura 5 - Gráficos dos ajustes do modelo Logístico (A e C) e Gompertz (B e D) para as áreas A2 (A e B) e A3 (C e D): Pontos representam os dados reais, as linhas representam os valores estimados pelo modelo de Gompertz.

Discussão

De acordo com Zambolim (2016) nas regiões cafeeiras do Brasil, em anos com alta produtividade, a doença tem início em dezembro-janeiro com aumento exponencial durante o período de março-maio, atingindo o pico em junho-julho de acordo com a altitude das áreas. Durante o período de estudo, em todas as áreas avaliadas as epidemias apresentaram crescimento a partir de março, com pico de intensidade da ferrugem em julho, exceto para área A1 com pico de intensidade em agosto e para primeira epidemia em A2, com pico em setembro.

Estudos demonstram que em anos de baixa produção, subsequente a um ano epidêmico, a incidência da ferrugem nas áreas de cultivo mesmo em condições favoráveis pode não chegar a 25% (Zambolim, 2016). Ao analisar curvas de progresso da ferrugem nas diferentes altitudes observa-se que em nenhuma das áreas de estudo atingiu o nível de 25%, apenas na área A3 o pico da segunda epidemia (22%) ultrapassou a incidência no ano anterior (18%). Outro ponto importante a ser destacado no trabalho realizado é a importância do monitoramento da intensidade doença ao longo do tempo, visto que as informações obtidas contribuem para mitigar os impactos causados pela epidemia da ferrugem, identificando o momento adequado para aplicação das medidas de controle.

Ao analisar e comparar as epidemias nas áreas avaliadas, nota-se que a primeira epidemia ocorrida nas áreas A1 (<100m) e A2 (>100m e <300m) tiveram picos de incidência em agosto e setembro, com um e dois meses de diferença quando comparadas as demais epidemias, que tiveram seus picos de incidência em julho.

As diferenças encontradas nessas áreas podem ter ocorrido em função das condições ambientais existentes em cada um dos locais (Capucho et al., 2013), outro fator que pode influenciar na epidemia da doença são as raças predominantes de *H. vastatrix*

entre as áreas de cultivo (Zambolim et al., 2005; Capucho, 2011). Belan et al. (2015) verificaram comportamento dinâmico do patossistema ferrugem-cafeeiro conilon, influenciado diretamente pelas condições locais de cultivo, neste sentindo interações complexas que envolvem patógeno, hospedeiro e o ambiente, determinam a progressão e a intensidade da epidemia na área.

Segundo Berger (1981) os modelos de crescimento que se espera os melhores ajustes à epidemia da ferrugem do cafeeiro são os modelos Logístico e Gompertz, devido as características policíclicas do patógeno *H. vastatrix*. De acordo com Teleken et al. (2017) os modelos de Logístico e de Gompertz apresentam crescimento sigmoidal “S” com pontos de inflexão em torno de 50% e 37%, respectivamente, sendo essa característica a diferença entre estes modelos de crescimento. A maior intensidade da ferrugem em espaçamentos estreitos está relacionada à maior superfície foliar, aumentando área de deposição de esporos fazendo com que a doença evolua rapidamente, ajustando se melhor o progresso da ferrugem ao modelo de Gompertz (Hinah et al., 2018).

O modelo Logístico e de Gompertz foram selecionados para descrever a evolução da ferrugem com base no maior coeficiente de determinação (R^2) e nos menores erros (Tabela 3, Figuras 2 e 3), que são os principais parâmetros para seleção dos modelos para descrever as doenças (Campbell & Madden, 1990; Nutter, 1997, Bergamin Filho, 2011). O destaque do modelo de Gompertz para descrever o comportamento da ferrugem do cafeeiro pode estar relacionado a suscetibilidade do tecido foliar em folhas jovens no início do progresso da doença (Kushalappa & Eskes, 1989).

Os modelos epidemiológicos podem ser usados para diversos fins no estudo de epidemia de plantas, em particular para a previsão de níveis futuros de doença. A conhecimento gerado a partir dos ajustes destes modelos auxiliam diretamente na tomada de decisão com antecedência, afim de evitar que a epidemia em campo alcance o patamar de danos econômicos a cultura (Zambolim et al., 2004). Os resultados obtidos neste estudo mostram que o progresso temporal da ferrugem em cafeeiro conilon é dinâmica e influenciada pelo ambiente, em especial pela altitude das áreas avaliadas.

Conclusão

Os modelos Logístico e de Gompertz foram os que melhores se ajustaram aos dados de incidência da ferrugem do cafeeiro conilon descrevendo com precisão as epidemias.

As maiores intensidades da ferrugem foram observadas nas faixas de altitude entre >100m e 500m.

Os picos da incidência nas áreas avaliadas foram entre os meses de julho-setembro nas diferentes áreas avaliadas.

Referências

- Alfonsi, W.M.V., Coltri, P.P., Zullo Júnior, J., Patrício, F.R.A., Alfonsi, E.L. (2019) Período de incubação da ferrugem do cafeeiro. **Summa Phytopathologica**, 45(2):134-140. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/187216>
- Alves, K.S.; Del Ponte, E.M. (2021) Analysis and simulation of plant disease progress curves in R: introducing the epifitter package. **Phytopathology Research**, 3(22). <https://doi.org/10.1186/s42483-021-00098-7>
- Belan, L.L., Jesus Junior, W.C., Souza, A.F. et al. (2015) Monitoring of leaf rust in conilon coffee clones to improve fungicide use. **Australasian Plant Pathology**, 44:5–12. <https://doi.org/10.1007/s13313-014-0310-y>
- Bergamin Filho, A. (2011) Curvas de progresso das doenças. In: Amorim L, Rezende J.A.M., Bergamin Filho A (eds) **Manual de Fitopatologia – Princípios e Conceitos**, 4th edn. São Paulo, pp 647–666.
- Bergamin Filho, A. Curvas de progresso da doença. In: Amorim, L., Rezende, J.A.M., Bergamin Filho, A. **Manual de Fitopatologia – Princípios e Conceitos**. v.1, 4 ed, São Paulo: Ceres, 2011, cap. 37, p. 658-659.
- Campbell, C.L., Madden, L.V. (1990) **Introduction to plant disease epidemiology**. John Wiley & Sons, New York.
- Capucho, A.S. (2011) **Epidemiologia e resistência do cafeeiro Conilon à ferrugem**. Federal University of Viçosa, Viçosa, p 97.
- Capucho, A.S., Zambolim, L., Lopes, U.M., Milagres, N.S. (2013) Chemical control of coffee leaf rust in *Coffea canephora* cv. conilon. **Australasian Plant Pathology**, 42:667–673. <https://doi.org/10.1007/s13313-013-0242-y>
- 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):1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169133>
- Contreras-Medina, L.M., Torres-Pacheco, I., Guevara-González, R.G., Romero-Troncoso, R.J., Terol-Villalobos, I.R., Osornorios, R.A. (2009) Mathematical modeling tendencies in plant pathology. **African Journal of Biotechnology**, 25:7399-7408.
- Fernandes, L.H, Resende, M.L., Pereira, R.B., Costa, B.H., Monteiro, A.C., Ribeiro Júnior, P.M. (2013) Acibenzolar-S-metil no controle da ferrugem e cercosporiose do cafeeiro em condições de campo. **Café Ciência**. 8:24–32.

- Gree, G. (1992) **Epidemiologia da ferrugem da folha do café nas terras altas orientais**. Newsl. Café Res. Inst. 2, 16–20.
- Hinnah, F.D., Sentelhas, P.C., Meira, C.A.A., Paiva, R.N. (2018) Weather-based coffee leaf rust apparent infection rate modeling. **International Journal Biometeorology**, 62:1847–1860. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1587-2>
- Jesus Junior, W.C., Pozza, E.A., Vale, F.X.R., Mora-Aguilera, G. Análise temporal de epidemias. In: Vale, F.X.R.; Jesus Junior, W.C., Zambolim, L. (Ed.). **Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas**. Belo Horizonte: Editora Perffil, p.127-191, 2004.
- Kranz J. **Comparative epidemiology of plant diseases**. Berlin: Springer; 2003.
- Kushalappa, A.C., Eskes, A.B. (1989) **Coffee rust: epidemiology, resistance and management**, 1st edn. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Nutter, F.W.J. (1997) Quantifying the temporal dynamics of plant virus epidemics: a review. **Crop Protection**, 16:603–618. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(97\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(97)00055-0)
- Pavan, W., Fernandes, J.M.C (2009) Uso de orientação a objetos no desenvolvimento de modelos de simulação de doenças de plantas genéricos. **Revista Brasileira de Agroinformática**, Campinas, 9(1):12-27.
- Pinto, A.C.S., Pozza, E.A., Souza, P.E., Pozza, A.A.A., Talamini, V., Boldini, J.M., Santos, F.S. (2002). Description of epidemics of coffee rust with neural networks. **Fitopatologia Brasileira**, 27(5):517–524. <https://doi.org/10.1590/S0100-41582002000500013>
- Pozza, E.A., Carvalho, V.L., Chalfoun, S.M. (2010) Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In **Semiologia do Cafeeiro: Sintomas de Desordens Nutricionais, Fitossanitárias e Fisiológicas**; Guimarães, R.J., Mendes, A.N.G., Baliza, D.P., Eds.; Editora UFLA: Lavras, Brazil, pp. 69–101.
- Pozza, E.A., Santos, É.R., Gaspar, N.A., Vilela, X.M.S., Alves, M.C., Colares, M.R.N. (2021). Coffee Rust Forecast Systems: Development of a Warning Platform in a Minas Gerais State, Brazil. **Agronomy**, 11:2284. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112284>
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Shaner, G.; Finney, R. E. (1977) The effects of nitrogen fertilization on the expression of slow- mildwing in knox wheat. **Phytopathology**, 67:1051-1055.
- Teleken, J.T., Galvão, A.C., Robazza, W.S. (2017) Comparing non-linear mathematical models to describe growth of diferente animals. **Acta Scientiarum, Animal Sciences**, 29 (1):73-81. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v39i1.31366>
- Toniutti, L., Breitler, J-C., Etienne, H., Campa, C., Doulebeau, S., Urban, L., Lambot, C., Pinilla, J.H., Bertrand, B. (2017) Influence of environmental conditions and genetic background of arabica coffee (*Coffea arabica*) on leaf rust (*Hemileia vastatrix*) pathogenesis. **Frontiers Plant Science**, 8:2025. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02025>

- Van der Plank, J.E. **Plant diseases: epidemics and control**. New York: Academic Press; 1963.
- Van Maanen, A., Xu, X.M. (2003) Modelling plant disease epidemics. **European Journal of Plant Pathology**, 109:669-682. <https://doi.org/10.1023/A:1026018005613>
- Wickham, H. (2016). **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York.
- Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 41(1):1–8. <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>
- Zambolim, L., Caixeta, E.T. (2021) An overview of physiological specialization of coffee leaf rust–New designation of pathotypes. **International Journal of Current Research**, 13: 15479–15490. <https://doi.org/10.24941/ijcr.40600.01.2021>
- Zambolim, L., Maciel-Zambolim, E., Vale, F.X.R., Pereira, A.A., Sakiyama, N.S., Caixeta, E.T. (2005) Physiological races of *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. in Brazil: Physiological variability, current situation and future prospects. In: Zambolim, L., Zambolim, E.M., Várzea, V.M.P. (eds) **Durable resistance to coffee leaf rust**, 1st edn. Federal University of Viçosa, Viçosa, pp 75–98.
- Zambolim, L, Capucho, A.S., Silva, M.B. (2015) Ferrugem do cafeeiro Conilon (*Coffea canephora*). In: Partelli, F.L., Giles, J.A.D., Silva, M.B. (eds) **Café Conilon: manejo de pragas e sustentabilidade**. CAUFES, Alegre, pp 167–186

CAPÍTULO 2

Relação da intensidade da ferrugem em lavouras de cafeeiro conilon com as variáveis meteorológicas

Resumo

A ferrugem do cafeeiro é a doença de maior importância da cultura, e sua ocorrência tem sido uma ameaça para a sustentabilidade das áreas de cultivo de café do mundo. Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho realizar estudos sobre a epidemiologia da ferrugem em cafeeiro conilon e quantificar sua relação com as variáveis meteorológicas. Para isso foram selecionadas quatro áreas de cultivo de café conilon em diferentes altitudes (<100 m; >100m e <300m; >300m e <500 m; >500m) propagadas por sementes. Em cada área foram avaliados 80 pontos, cada ponto composto por uma única planta, sendo realizada 26 avaliações durante setembro de 2017 a dezembro de 2019. Em cada área foi instalada uma estação meteorológica para quantificar as condições ambientais, sendo analisadas 18 variáveis meteorológicas. A relação entre as variáveis meteorológicas e a intensidade da doença foram quantificadas a partir da correlação de Pearson ($p < 0,05$) aos 30 e 60 dias antes da avaliação, considerando os valores de incidência variável dependente e as médias das variáveis meteorológicas como independentes. Houve correlação significativa ($p < 0,05$) da incidência com ao menos uma das variáveis meteorológicas em estudo em todas as áreas avaliadas, aos 30 e 60 dias antes da avaliação. De acordo com análise de correlação as variáveis significativas, com valor acima de 40% foram $T_{Máx}$, $T_{Mín}$, $T_{Méd}$, $TMMF_{(18h-9h; UR \geq 90\%)}$, $TMMF_{(18h-9h; UR \geq 80\%)}$, $TMMF_{(18h-6h; UR \geq 90\%)}$ e $TMMF_{(18h-6h; UR \geq 80\%)}$ e $NHT_{(\geq 15^{\circ}C \text{ e } < 26^{\circ}C)}$. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que os conhecimentos sobre as condições ótimas para o desenvolvimento da doença em campo, pode ser útil para o desenvolvimento de sistemas de previsão e alerta, com intuito de prever a ocorrência da ferrugem em *C. canephora* no Brasil auxiliando os produtores na tomada de decisão.

Introdução

O café é umas das culturas mais importantes no mundo e está entre as bebidas mais consumidas, gerando renda para mais de 125 milhões de pessoas. Em termos de comércio, é a segunda commodity mais comercializada, ficando atrás do petróleo (USDA, 2019; Gichuru et al., 2022). A cafeicultura é uma das principais atividades agrícolas do Brasil,

as duas espécies de maior relevância cultivadas comercialmente são o café arábica (*Coffea arabica* L.) e o conilon (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner). O país se destaca no cenário mundial como o maior produtor e exportador do grão (OIC, 2023; Davis, 2011), a produção brasileira representa cerca de 34% do café produzido no mundo (USDA, 2022). Em 2022 o volume total de café produzido foi de 50.920 mil de sacas, ocupando uma área total de 1.9 milhões de hectares (CONAB, 2023).

O estado do Espírito Santo se destaca no cenário nacional como o principal produtor de café conilon, a cafeicultura é a principal atividade e o estado possui a maior área destinada ao cultivo da espécie, produzindo mais de 60% do volume total do país (CONAB 2023). A atividade gera em torno de 400 mil empregos diretos e indiretos, estando presente em 67% das propriedades agrícolas do estado (INCAPER 2022).

A produção global de café enfrenta vários desafios limitantes, sendo os problemas fitossanitários uma das principais causas de perda de produtividade. Entre as doenças que afetam a cultura, a ferrugem do café (*Hemileia vastatrix* Berk & Br.) é considerada a mais preocupante. No Brasil, essa doença pode reduzir a produção de café em até 50%, dependendo da resistência da variedade, condições climáticas e práticas de manejo adotadas (Zambolim & Caixeta, 2021).

O controle da ferrugem do café é realizado por meio de diferentes estratégias, como o uso de variedades resistentes, aplicação de fungicidas protetores e sistêmicos, com base no monitoramento e tomada de decisão (Belan et al., 2015; Belan et al., 2020), ou em aplicações realizadas em datas preestabelecidas (Capucho et al., 2013, Zambolim, 2016). Devido à seleção de populações de *H. vastatrix* resistentes aos fungicidas, bem como à dificuldade de selecionar variedades resistentes ao patógeno (Zambolim, 2016; Zambolim & Caixeta, 2021), é necessário monitorar a presença da doença, assim como as variáveis meteorológicas (Hinnah et al., 2018; Hinnah et al., 2020). Essa ação ajuda a orientar o produtor na tomada de decisão e na adoção e implementação de sistemas de previsão e alerta, para garantir um manejo sustentável da doença.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho realizar estudos sobre a epidemiologia da ferrugem em cafeeiro conilon e quantificar sua relação com as variáveis meteorológicas.

Material e métodos

Caracterização das áreas de estudo

O estudo foi conduzido em quatro áreas de cultivo comercial de cafeeiro conilon da variedade "Robusta Tropical" (EMCAPER 8151), propagadas por sementes e localizadas em diferentes altitudes no estado do Espírito Santo. Para fins de comparação, as áreas selecionadas foram caracterizadas com base em sua similaridade quanto à idade da lavoura (15 anos), espaçamento (3m x 2m) e tratos culturais (conforme a Tabela 1).

Tabela 1 - Caracterização das áreas de estudo localizadas na região sul do estado do Espírito Santo, em diferentes altitudes.

	Código	Município	Localidade	Coordenadas Geográficas		Área (ha)	Altitude (m)
				Latitude	Longitude		
Área 1	A1	Cachoeiro de Itapemirim	Pacotuba	20°44'03.2" S	41°15'22.0" W	0,81	< 100
Área 2	A2	Jerônimo Monteiro	Santa Maria	20°50'01.1" S	41°25'03.5" W	0,6	>100 e <300
Área 3	A3	Jerônimo Monteiro	Gironda	20°53'24.75"S	41°25'57.7"W	0,97	>300 e <500
Área 4	A4	Cachoeiro de Itapemirim	Boa Vista	20°37'37.0" S	41°05'13.9" W	1,5	>500

Avaliação da intensidade da doença

Foi estabelecido um grid amostral de 80 pontos em cada uma das áreas avaliadas, demarcado em malha regular e distribuído no espaço a cada 20 metro, com intuito de cobrir toda a área da lavoura, cada ponto amostral consistiu em uma única planta. As avaliações da incidência da ferrugem do cafeeiro foram realizadas a cada 30 dias durante 26 meses para as áreas A1, A2 e A4, entre outubro de 2017 e dezembro de 2019, e durante 26 meses para a área A3, de setembro de 2017 a outubro de 2019.

Para avaliar a intensidade da doença foram selecionados aleatoriamente quatro (4) ramos plagiotrópicos no terço superior das plantas, de forma não destrutiva, conforme proposto por Belan et al. (2021). A incidência da doença foi determinada pela porcentagem de folhas com sintomas da doença em relação ao total amostrado (Campbell & Madden, 1990).

$$I (\%) = \frac{NFD}{NFT} \times 100$$

Em que, $I (\%)$ representa a incidência, NFD o número de folhas doentes e NFT o número total de folhas avaliadas.

Coleta de dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram registrados por estações semiautomáticas modelo E5000 da Iriplus® localizadas no centro de cada área de avaliação. Os dados foram quantificados diretamente por sensores específicos de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação pluviométrica e radiação solar. O período de molhamento foliar foi quantificado partir da umidade relativa do ar $\geq 80\%$ e $\geq 90\%$ (Sentelhas et al. 2008; Rowlandson et al. 2015) e a partir dessas variáveis foram geradas as demais variáveis meteorológicas (Tabela 2).

Tabela 2- Variáveis meteorológicas coletadas e geradas com estação semiautomática modelo E5000 iriplus®, localizadas nas áreas de avaliação

Variáveis	Descrição
$T_{M\acute{a}x}^1$	Temperatura máxima média
$T_{M\acute{i}n}^1$	Temperatura mínima média
$T_{M\acute{e}d}^1$	Temperatura média
$UR_{M\acute{a}x}^1$	Umidade relativa máxima média
$UR_{M\acute{i}n}^1$	Umidade relativa mínima média
$UR_{M\acute{e}d}^1$	Umidade relativa média
$Precip_{ac}^1$	Precipitação acumulada
$NDP_{(\geq 1mm)}^2$	Número de dias com precipitação $\geq 1mm$
$NHMF_{(UR\geq 90\%)}^2$	Nº de horas com molhamento foliar com $UR \geq 90\%$
$NHMF_{(UR\geq 80\%)}^2$	Nº de horas com molhamento foliar com $UR \geq 80\%$
$TMMF_{(18h-9h; UR\geq 90\%)}^2$	Temperatura média com o molhamento foliar ($UR \geq 90\%$) entre 18h e 9h
$TMMF_{(18h-9h; UR\geq 80\%)}^2$	Temperatura média com o molhamento foliar ($UR \geq 80\%$) entre 18h e 9h
$TMMF_{(18h-6h; UR\geq 90\%)}^2$	Temperatura média com o molhamento foliar ($UR \geq 90\%$) entre 18h e 6h
$TMMF_{(18h-6h; UR\geq 80\%)}^2$	Temperatura média com o molhamento foliar ($UR \geq 80\%$) entre 18h e 6h
$NHT_{(\geq 18^{\circ}C \text{ e } < 26^{\circ}C)}^2$	Número de horas com temperatura entre $\geq 18^{\circ}C$ e $< 26^{\circ}C$
$NHT_{(\geq 15^{\circ}C \text{ e } < 26^{\circ}C)}^2$	Número de horas com temperatura entre $\geq 15^{\circ}C$ e $< 26^{\circ}C$
$NHP_{(18h-9h; > 1mm)}^2$	Número de horas com precipitação ($> 1mm$) entre 18h e 9h
$NHP_{(18h-9h; > 3mm)}^2$	Número de horas com precipitação ($> 3mm$) entre 18h e 9h

¹ Variável coletadas pela estação meteorológica. ² Variável gerada a partir dos dados coletados

Análises estatísticas

A relação entre as variáveis meteorológicas e a intensidade da doença (incidência) foram quantificadas a partir da correlação de Pearson ($p < 0,05$) aos 30 e 60 dias antes da

avaliação, considerando os valores de incidência como variável dependente e as médias das variáveis meteorológicas como independentes. Todas as análises foram realizadas com auxílio do software R® versão 4.2 (R CORE TEAM, 2022) e o pacote “ggplo2” (WICKMAN, 2016) para elaboração dos gráficos.

Resultados

Houve correlação significativa ($p < 0,05$) da incidência com ao menos uma das variáveis meteorológicas em estudo em todas as áreas avaliadas, aos 30 e 60 dias antes da avaliação (Tabela 2, 3 e 4). Foram consideradas como significativas as correlações acima de 40%. De acordo com análise de correlação as variáveis significativas foram $T_{Máx}$, $T_{Mín}$, $T_{Méd}$, $TMMF_{(18h-9h; UR \geq 90\%)}$, $TMMF_{(18h-9h; UR \geq 80\%)}$, $TMMF_{(18h-6h; UR \geq 90\%)}$, $TMMF_{(18h-6h; UR \geq 80\%)}$ e $NHT_{(\geq 15^{\circ}C \text{ e } < 26^{\circ}C)}$.

As médias das temperaturas máximas, mínimas e médias variaram em cada uma das áreas avaliadas. As máximas ficaram entre $30^{\circ}C$ e $32^{\circ}C$, as mínimas entre $18^{\circ}C$ e $20^{\circ}C$ e as médias entre $23^{\circ}C$ e $25^{\circ}C$ (Figura 1).

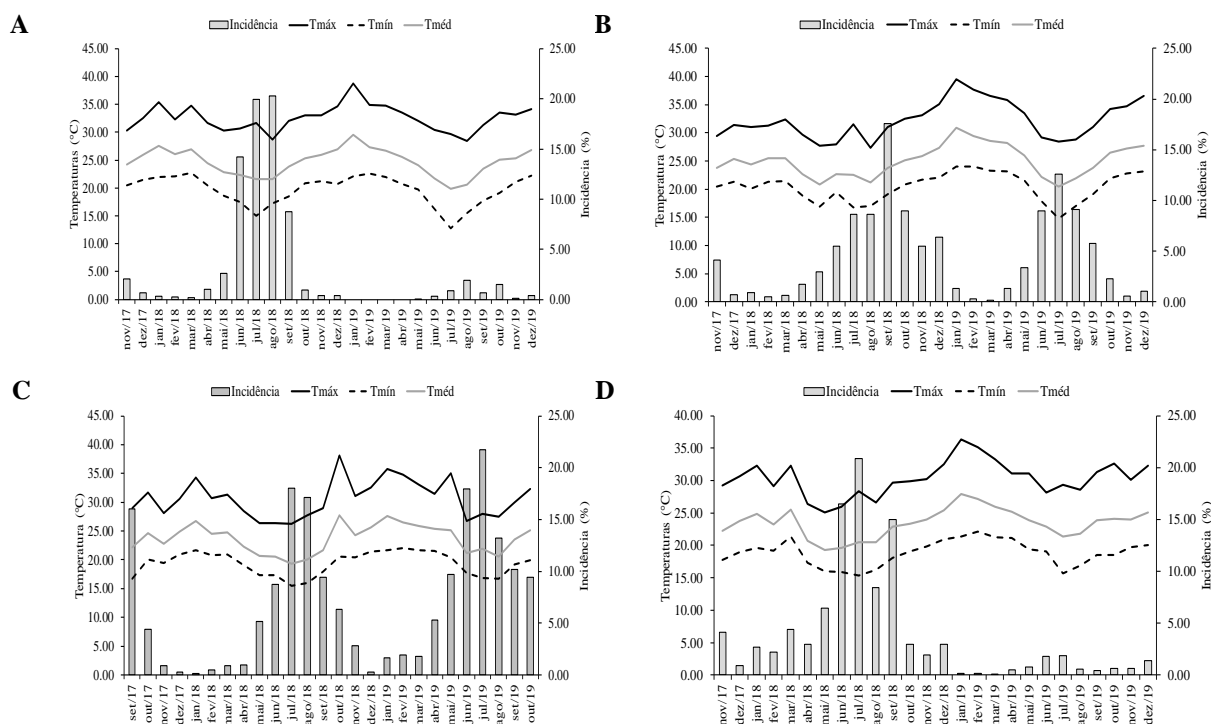


Figura 1 - Médias das temperaturas máximas, mínimas e médias das áreas avaliadas e incidência nas áreas avaliadas: A) $< 100\text{ m}$; B) $> 100\text{ m}$ e $< 300\text{ m}$; C) $> 300\text{ m}$ e $< 500\text{ m}$; D) $> 500\text{ m}$

A temperatura média durante o período de molhamento foliar com $UR \geq 90\%$ e $UR \geq 80\%$ foi entorno de $21^{\circ}C$ nas áreas A1 e A2 e $20^{\circ}C$ em A3 e A4 (Figura 2).

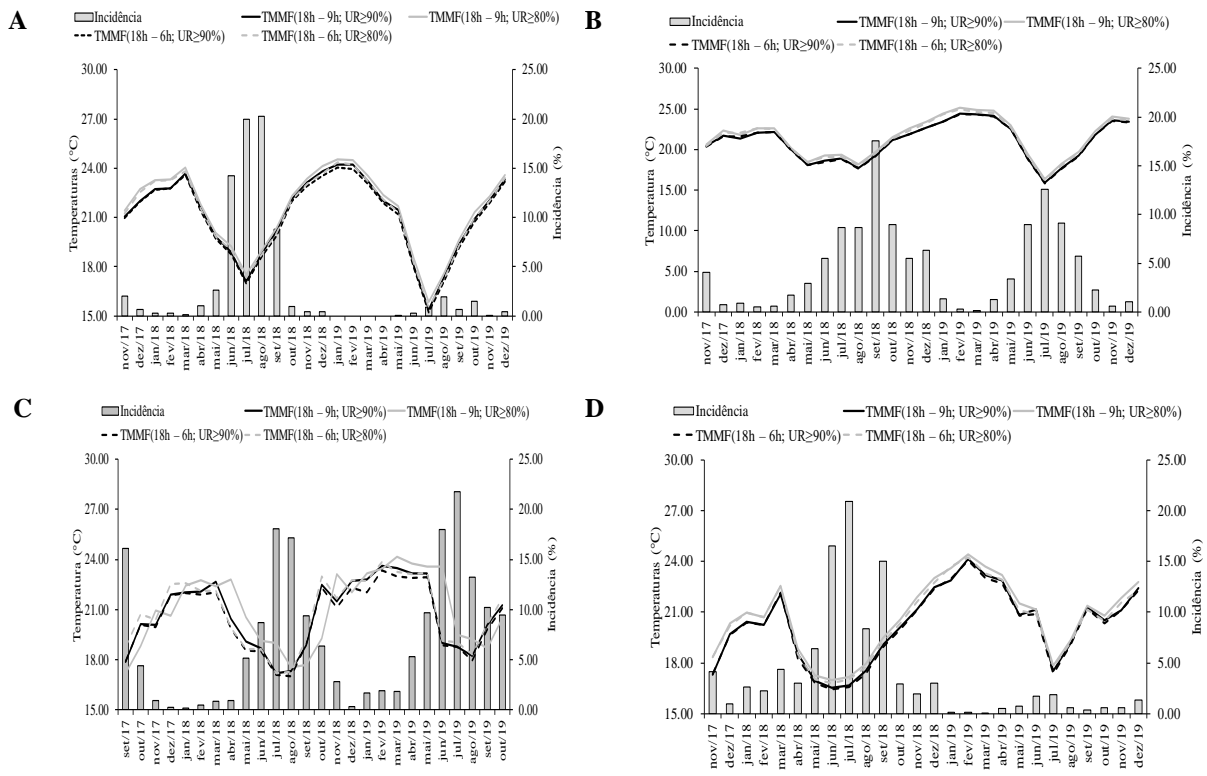
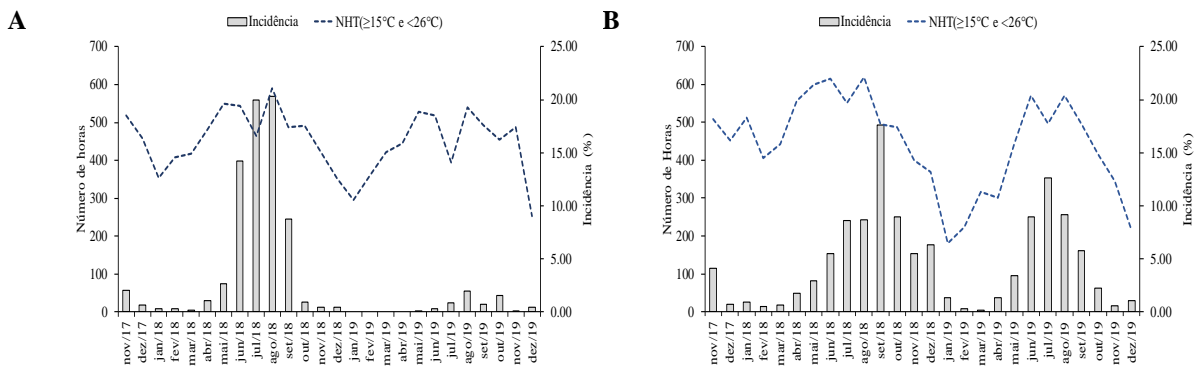


Figura 2- Temperatura média durante o molhamento foliar (TMMF) com umidade relativa UR>90% e UR>80% e incidência nas áreas avaliadas: A) <100 m; B) >100m e <300m; C) >300m e <500 m; D) >500m

Em relação ao número de hora com temperatura $\geq 15^{\circ}\text{C}$ e $\leq 26^{\circ}\text{C}$ foi diferente para cada área de estudo. O número de horas foi de 451, 445, 527 e 512 para as áreas A1, A2, A3 e A4, respectivamente (Figura 3).



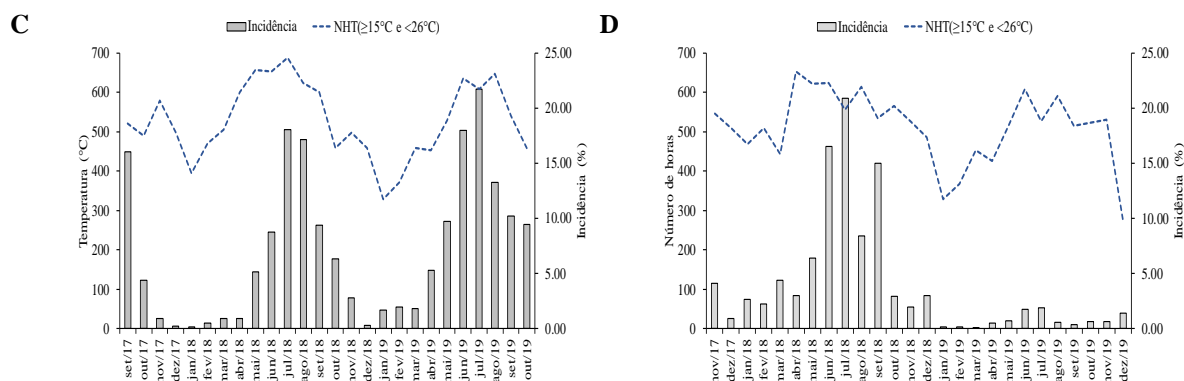


Figura 3 - Número de horas com temperaturas entre $\geq 15^{\circ}\text{C}$ e $\leq 26^{\circ}\text{C}$: A) $< 100\text{ m}$; B) $> 100\text{m}$ e $< 300\text{m}$; C) $> 300\text{m}$ e $< 500\text{ m}$; D) $> 500\text{m}$

Aos 30 dias a correlação entre a incidência e as variáveis meteorológicas variou de 0,43 a 0,82 em que as variáveis $T_{\text{Máx}}$, $T_{\text{Mín}}$, $T_{\text{Méd}}$, $\text{TMMF}_{(18\text{h} - 9\text{h}; \text{UR} \geq 90\%)}$, $\text{TMMF}_{(18\text{h} - 9\text{h}; \text{UR} \geq 80\%)}$, $\text{TMMF}_{(18\text{h} - 6\text{h}; \text{UR} \geq 90\%)}$ e $\text{TMMF}_{(18\text{h} - 6\text{h}; \text{UR} \geq 80\%)}$ apresentam correlação negativa, sendo $\text{NHT}_{(\geq 15^{\circ}\text{C} \text{ e } < 26^{\circ}\text{C})}$ a única variável com correlação positiva, exceto para a área A4 em que a variável não foi significativa aos 30 dias antes da avaliação. As variáveis derivadas da precipitação, sendo elas $\text{Precip}_{\text{ac}}$, $\text{NDP}_{(\geq 1\text{mm})}$, $\text{NHP}_{(18\text{h} - 9\text{h}; > 1\text{mm})}$, $\text{NHP}_{(18\text{h} - 9\text{h}; > 3\text{mm})}$ obtiveram correlação negativa nas áreas A2 e A3 (Tabela 2).

Tabela 3- Coeficiente de correlação de Pearson ($p < 0,05$) entre a intensidade da ferrugem do café conilon e as variáveis meteorológicas 30 dias antes da avaliação

Variáveis	Áreas			
	A1	A2	A3	A4
$T_{\text{Máx}}$	-0,43*	-0,48*	-0,50*	-0,50*
$T_{\text{Mín}}$	-0,49*	-0,66*	-0,82*	-0,59*
$T_{\text{Méd}}$	-0,50*	-0,58*	-0,66*	-0,58*
$\text{UR}_{\text{Máx}}$	0,12 ^{NS}	-0,36 ^{NS}	-0,25 ^{NS}	-0,20 ^{NS}
$\text{UR}_{\text{Mín}}$	-0,09 ^{NS}	-0,53*	-0,10 ^{NS}	-0,12 ^{NS}
$\text{UR}_{\text{Méd}}$	0,13 ^{NS}	-0,42*	-0,12 ^{NS}	-0,14 ^{NS}
$\text{Precip}_{\text{ac}}$	-0,38 ^{NS}	-0,45*	-0,74*	-0,28 ^{NS}
$\text{NDP}_{(\geq 1\text{mm})}$	-0,29 ^{NS}	-0,56*	-0,62*	-0,32 ^{NS}
$\text{NHMF}_{(\text{UR} \geq 90\%)}$	0,21 ^{NS}	-0,33 ^{NS}	-0,08 ^{NS}	-0,09 ^{NS}
$\text{NHMF}_{(\text{UR} \geq 80\%)}$	0,19 ^{NS}	-0,22 ^{NS}	-0,01 ^{NS}	-0,15 ^{NS}
$\text{TMMF}_{(18\text{h} - 9\text{h}; \text{UR} \geq 90\%)}$	-0,51*	-0,70*	-0,74*	-0,65*
$\text{TMMF}_{(18\text{h} - 9\text{h}; \text{UR} \geq 80\%)}$	-0,51*	-0,69*	-0,72*	-0,64*
$\text{TMMF}_{(18\text{h} - 6\text{h}; \text{UR} \geq 90\%)}$	-0,51*	-0,71*	-0,72*	-0,64*
$\text{TMMF}_{(18\text{h} - 6\text{h}; \text{UR} \geq 80\%)}$	-0,51*	-0,71*	-0,71*	-0,64*
$\text{NHT}_{(\geq 18^{\circ}\text{C} \text{ e } < 26^{\circ}\text{C})}$	-0,04 ^{NS}	0,26 ^{NS}	-0,24 ^{NS}	-0,42*
$\text{NHT}_{(\geq 15^{\circ}\text{C} \text{ e } < 26^{\circ}\text{C})}$	0,43*	0,50*	0,61*	0,38 ^{NS}
$\text{NHP}_{(18\text{h} - 9\text{h}; > 1\text{mm})}$	-0,35 ^{NS}	-0,41*	-0,69*	-0,31 ^{NS}
$\text{NHP}_{(18\text{h} - 9\text{h}; > 3\text{mm})}$	-0,29 ^{NS}	-0,39 ^{NS}	-0,70*	-0,28 ^{NS}

Aos 60 dias a correlação variou ente 0,42 e 0,69 sendo que foi observado o mesmo comportamento ocorrido aos 30 dias das variáveis meteorológicas em relação a incidência da ferrugem nas áreas avaliadas, exceto na A1 em que a $T_{Máx}$ não foi significativa ($r = -0,38$).

Tabela 4- Coeficiente de correlação de Pearson ($p < 0,05$) entre a intensidade da ferrugem do cafeeiro conilon e as variáveis meteorológicas 60 dias antes da avaliação

Variáveis	Áreas			
	A1	A2	A3	A4
$T_{Máx}$	-0,38 ^{NS}	-0,57*	-0,51*	-0,72*
$T_{Mín}$	-0,47*	-0,66*	-0,64*	-0,62*
$T_{Méd}$	-0,49*	-0,63*	-0,63*	-0,72*
$UR_{Máx}$	0,18 ^{NS}	-0,03 ^{NS}	0,09 ^{NS}	-0,08 ^{NS}
$UR_{Mín}$	-0,04 ^{NS}	-0,23 ^{NS}	0,28 ^{NS}	0,23 ^{NS}
$UR_{Méd}$	0,19 ^{NS}	-0,02 ^{NS}	0,26 ^{NS}	0,18 ^{NS}
Precip _{ac}	-0,38 ^{NS}	-0,53*	-0,60*	-0,42*
NDP ($\geq 1\text{mm}$)	-0,36 ^{NS}	-0,48*	-0,22 ^{NS}	-0,40*
NHMF _(UR$\geq 90\%$)	0,20 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,28 ^{NS}	0,16 ^{NS}
NHMF _(UR$\geq 80\%$)	0,21 ^{NS}	0,05 ^{NS}	0,37 ^{NS}	0,11 ^{NS}
TMMF _(18h - 9h; UR$\geq 90\%$)	-0,49*	-0,65*	-0,52*	-0,65*
TMMF _(18h - 9h; UR$\geq 80\%$)	-0,49*	-0,64*	-0,54*	-0,66*
TMMF _(18h - 6h; UR$\geq 90\%$)	-0,48*	-0,66*	-0,52*	-0,65*
TMMF _(18h - 6h; UR$\geq 80\%$)	-0,48*	-0,66*	-0,56*	-0,67*
NHT ($\geq 18^\circ\text{C}$ e $< 26^\circ\text{C}$)	-0,12 ^{NS}	0,34 ^{NS}	-0,04 ^{NS}	-0,41 ^{NS}
NHT ($\geq 15^\circ\text{C}$ e $< 26^\circ\text{C}$)	0,42*	0,61*	0,65*	0,58*
NHP _(18h - 9h; > 1mm)	-0,33 ^{NS}	-0,44*	-0,53*	-0,30 ^{NS}
NHP _(18h - 9h; > 3mm)	-0,31 ^{NS}	-0,45*	-0,69*	-0,35 ^{NS}

Ao analisar de forma conjunta os dados das quatro (4) áreas de estudo, foi possível verificar que tanto para 30 quanto para 60 dias antes da avaliação as variáveis meteorológicas $T_{Máx}$, $T_{Mín}$, $T_{Méd}$, Precip_{ac}, TMMF_(18h - 9h; UR $\geq 90\%$), TMMF_(18h - 9h; UR $\geq 80\%$), TMMF_(18h - 6h; UR $\geq 90\%$) e TMMF_(18h - 6h; UR $\geq 80\%$) e NHT ($\geq 15^\circ\text{C}$ e $< 26^\circ\text{C}$) foram significativas. A correlação variou de 0,44 a 0,61 e 0,45 a 0,59 para 30 e 60 dias, respectivamente. Dentre as variáveis significativas a NHT ($\geq 15^\circ\text{C}$ e $< 26^\circ\text{C}$) foi a única que apresentou correlação positiva significativa (Tabela 4).

Tabela 5- Coeficiente de correlação de Pearson ($p < 0,05$) entre a intensidade da ferrugem do cafeeiro conilon e as variáveis meteorológicas aos 30 e 60 dias antes da avaliação.

Variáveis	Dias	
	0-30d	0-60d
T _{Máx}	-0,47*	-0,53*
T _{Mín}	-0,58*	-0,54*
T _{Méd}	-0,56*	-0,59*
UR _{Máx}	-0,19 ^{NS}	0,02 ^{NS}
UR _{Mín}	0,00 ^{NS}	0,22 ^{NS}
UR _{Méd}	-0,08 ^{NS}	0,20 ^{NS}
Precip _{ac}	-0,44*	-0,45*
NDP _(≥1mm)	-0,38 ^{NS}	-0,30 ^{NS}
NHMF _(UR≥90%)	-0,04 ^{NS}	0,18 ^{NS}
NHMF _(UR≥80%)	0,00 ^{NS}	0,22 ^{NS}
TMMF _(18h - 9h; UR≥90%)	-0,61*	-0,54*
TMMF _(18h - 9h; UR≥80%)	-0,60*	-0,55*
TMMF _(18h - 6h; UR≥90%)	-0,61*	-0,55*
TMMF _(18h - 6h; UR≥80%)	-0,60*	-0,56*
NHT _(≥18°C e <26°C)	-0,04 ^{NS}	-0,01 ^{NS}
NHT _(≥15°C e <26°C)	0,49*	0,56*
NHP _(18h - 9h; > 1mm)	-0,39 ^{NS}	-0,35 ^{NS}
NHP _(18h - 9h; > 3mm)	-0,36 ^{NS}	-0,38 ^{NS}

Discussão

A ocorrência das doenças em campo é influenciada por alguns fatores tais como o patógeno, hospedeiro e o ambiente, os quais que exercem papel fundamental no desenvolvimento das epidemias, e que, desta forma, devem ser estudados de forma individual. A caracterização das condições meteorológicas é de grande importância para o entendimento dos processos de interação que resultam na ocorrência da doença. Segundo Vale et al. (2004), o ambiente exerce papel preponderante sobre os demais, visto que também os influencia.

Neste sentido, visto que o ambiente influencia o desenvolvimento das doenças, o conhecimento da interação entre o ambiente e patógeno é essencial para compreender o estabelecimento das epidemias em campo, o ambiente influencia no ciclo do patógeno, principalmente nos processos de disseminação e infecção, sendo assim, as informações obtidas a cerca dessa interação, podem contribuir de forma significativa para o manejo do patossistema *Coffea canephora* x *Hemileia vastatrix*. De acordo com Motisi et al. (2019) o conhecimento das variáveis meteorológicas sobre a ocorrência de epidemias do cafeeiro ainda é escasso.

Neste trabalho foram selecionadas áreas de produção comercial de café conilon propagadas por sementes, essa escolha teve por finalidade limitar a influência do hospedeiro sobre o desenvolvimento do patógeno, visto que, a propagação seminal promove uma maior diversidade genética, acarretando na formação de lavouras com plantas heterogêneas, desuniformes e com diferenças morfológicas, fisiológicas e bioquímicas. Esses aspectos estão diretamente relacionados com a capacidade hospedeiro ser menos ou mais resistente a ferrugem do cafeeiro.

Além das variáveis meteorológicas, outro fator ambiental a se destacar neste experimento é a altitude, dado que, os experimentos foram instalados em diferentes altitudes. Locais que apresentam altitudes diferentes, com variação em metros podem influenciar nas mudanças do ambiente, adaptação da biota e sucesso dos cultivos agrícolas (Fritzsos et al., 2015). Existe uma relação entre temperatura e altitude em que há um acréscimo vertical médio aproximado de $0,65^{\circ}\text{C}$ e $0,98^{\circ}\text{C}$, respectivamente a cada 100 metros de elevação em ambientes diversos (Fritzsos et al., 2016).

As correlações entre a temperatura ($T_{\text{Máx}}$, $T_{\text{Mín}}$, $T_{\text{Méd}}$) e a incidência da doença foram negativas e significativas para este estudo. Porém, as médias de temperatura para as áreas de estudo variaram entre 23°C e 25°C . De acordo com resultados obtidos em germinação *in vitro* de *H. vastatrix* em café arábica e café conilon as temperaturas ideais para esse fungo estão entre 21°C e 25°C , na ausência de luz (Montoya & Chaves, 1974; Zambolim et al., 2005; Capucho et al., 2013, Zambolim, 2016) sendo maximizada a infecção quando a temperatura está entre $21,6^{\circ}\text{C}$ e $23,6^{\circ}\text{C}$ (Capucho et al., 2013). A temperatura média das máximas e mínimas nas áreas de estudo foi de aproximadamente 18°C e 32°C , respectivamente. Estudos demonstram que temperaturas máximas $\geq 32,5^{\circ}\text{C}$ e mínimas $\leq 12,5^{\circ}\text{C}$ impedem a germinação do fungo em condições de campo (Kushalappa, 1978; Kushalappa & Chaves, 1980; Kushalappa et al. 1984).

A relação entre a precipitação acumulada ($\text{Precip}_{\text{ac}}$) e a incidência da ferrugem foi negativa para áreas avaliadas. A distribuição da precipitação influencia diretamente no progresso da doença, a precipitação fraca e intermitente é mais favorável do que a chuva contínua (Liebig, 2017; Nutman et al., 1963; Crowe, 1963). Precipitação não sazonais resultam em períodos mais longos de progresso da doença o que acarreta maior intensidade mais tarde e os picos doenças podem ser atribuídos a períodos de precipitação individuais (Gichuru, 2013).

Estudos realizados por Merle et al. (2019) verificaram efeito unimodal da precipitação média entre 33 e 24 dias antes do surgimento da lesão, que corresponderia a

fase de disseminação dos esporos. A hipótese é que a liberação e deposição dos uredósporos ocorrem com precipitações abaixo de 10 mm de acordo com trabalhos anteriores (Nutman et al., 1960; Bock, 1962). Em casos em que ocorrem precipitações acima de 10 mm, provavelmente ocorra a lavagem dos uredósporos pela chuva, reduzindo o número de lesões.

O efeito da precipitação na lavagem dos uredósporos foi reconhecida como fator limitante na propagação da *H. vastatrix* (Savary et al., 2004; Avelino et al., 2019) e em outros patossistemas (Sache, 2000). Outra hipótese negativa do efeito da precipitação sobre o desenvolvimento da ferrugem, pode estar associado ao fato de dias com chuvas intensas geralmente estão relacionadas a temperaturas máximas mais baixas, sendo assim menos favoráveis a esporulação do patógeno (Merle et al., 2019).

Ao analisar as variáveis, o número de horas com temperatura $\geq 15^{\circ}\text{C}$ e $< 26^{\circ}\text{C}$ (NHT ($\geq 15^{\circ}\text{C}$ e $< 26^{\circ}\text{C}$)) foi a única variável dentre as avaliadas que apresentou correlação positiva 0,49 e 0,56 aos 30 e 60 dias antes da avaliação, respectivamente. As temperaturas indicadas na maioria dos trabalhos com ideal para maior germinação dos esporos é entre 22°C e 24°C , sendo sua máxima germinação aos 22°C (Rayner, 1972; Saccas & Charpentier, 1971). Trabalhos realizados por Akutsu (1981) indicam máxima germinação a 25°C e inibição completam a 32.5°C e 12°C , Montoya & Chaves (1974) verificaram como temperatura ótima de germinação 24°C . Todas essas variações observadas podem ser consequência da metodologia empregada e/ou a variabilidade das raças de *H. vastatrix* (Salustiano et al., 2008).

Segundo Dejong et al. (1987) após 24h de incubação a faixa de temperatura ótima foi observado de 16°C a 28°C para máxima germinação e formação total dos apressórios. Em todos dos casos apresentados, as temperaturas são apresentadas para o patossistema *Coffea arabica* x *Hemileia vastatrix*, no entanto há pouca informação a respeito desta variável sobre *C. canephora*. Em estudos mais recentes Capucho et al. (2013) verificou que a faixa ótima está entre $21,6^{\circ}\text{C}$ e $23,6^{\circ}\text{C}$. O molhamento foliar também foi estudado, e observou-se que quanto maior o molhamento, maior a germinação e a infectividade de *H. vastatrix* em café conilon.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que os conhecimentos sobre as condições ótimas para o desenvolvimento da doença em campo, pode ser útil para o desenvolvimento de sistemas de previsão e alerta, com intuito de prever a ocorrência da ferrugem em *C. canephora* no Brasil auxiliando os produtores na tomada de decisão.

Conclusão

- As variáveis correlacionadas com intensidade da doenças são $T_{Máx}$, $T_{Mín}$, $T_{Méd}$, $TMMF_{(18h-9h; UR \geq 90\%)}$, $TMMF_{(18h-9h; UR \geq 80\%)}$, $TMMF_{(18h-6h; UR \geq 90\%)}$ e $TMMF_{(18h-6h; UR \geq 80\%)}$ e $NHT_{(\geq 15^{\circ}C \text{ e } < 26^{\circ}C)}$;
- A temperatura e UR influenciam no progresso da doença ao longo do tempo;
- $NHT_{(\geq 15^{\circ}C \text{ e } < 26^{\circ}C)}$ foi a única variável correlacionada positivamente com a intensidade do doença no campo

Referências

Avelino, J., Badaroux, J., Boudrot, A., Brenes Loaiza, M.A., Granados, E., Henrion, M., Lopez, D., Merle, I., Pico Rosado, J.T., Segura, B., Vilchez Mendoza, S.J., Smith, M., Melo, E. **Shade effects on coffee rust (*Hemileia vastatrix*)** G.M. Dupraz Christian, Lawson Gerry (Eds.), Proceedings of the 4th World Congress on Agroforestry. Book of Abstracts, Montpellier, France (2019).

Akutsu, M. (1981). Relações de funções climáticas e bióticas com a taxa de infecção da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk et Br.). 1981. 67 f. **Dissertação** (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Belan, L.L., Jesus Junior, W.C., de Souza, A.F., Zambolim, L., Filho, J.C., Barbosa, D.H.S.G., Moraes, W.B. (2020). Management of coffee leaf rust in *Coffea canephora* based on disease monitoring reduces fungicide use and management cost. **European Journal of Plant Pathology**, 156:683–694. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01917-6>

Belan, L.L., Belan, L.L., Satiro, L.S., Moraes, W.B., Jesus Junior, W.C., Moraes, W.M (2021) A comparison of sampling methods to accurately estimate the incidence of leaf rust on conilon coffee. **Australasian Plant Pathology**, 50:729–737. <https://doi.org/10.1007/s13313-021-00823-y>

Belan, L.L., de Jesus Junior, W.C., de Souza, A.F., Zambolim, L., Tomaz, M.A., Alves, F.R., Ferrão, M.A.G., Amaral, J.F.T. (2015) Monitoring of leaf rust in conilon coffee clones to improve fungicide use. **Australasian Plant Pathology**, 44:5–12. <https://doi.org/10.1007/s13313-014-0310-y>

Bock, K.R. (1962). Dispersal of uredospores of *Hemileia vastatrix* under field conditions **Transactions of the British Mycological Society**, 45(1):63-74. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(62\)80035-7](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(62)80035-7)

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília, 2023. v.10: safra 2023, primeiro levantamento, janeiro 2023. <Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe> >. Acesso em: 15 de janeiro 2023.

- Capucho, A.S., Zambolim, L., Cabral, P.G.C., Maciel-Zambolim, E., Caixeta, E.T. (2013) Climate favorability to leaf rust in Conilon coffee. **Australasian Plant Pathology**, 24:511–514. <https://doi.org/10.1007/s13313-012-0187-6>
- Crowe, T.J. (1963). Possible insect vectors of *Hemileia vastatrix* in Kenya. Transactions of the British Mycological Society, 46:24–26.
- Davis, A.P.; Tosh, J.; Ruch, N.; Fay, M.F. (2011). Growing coffee: Psilanthus (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data, implications of size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, 167:1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2011.01177.x>
- Dejong, E.J., Eskes, A.B., Hoogstraten, I.G.J., Zadoks, J.C. (1987). Temperature requirements for germination, germ tube growth and appressorium formation of urediniospores of *Hemileia vastatrix*. **Netherlands Journal of Plant Pathology**, 93(2):61-71. <https://doi.org/10.1007/BF01998091>
- Gichuru, E., Alwora, G., Gimase, J., Kathurima, C. (2021). Coffee Leaf Rust (*Hemileia vastatrix*) in Kenya—A Review. **Agronomy**, 11:2590
- Gichuru, E.K. (2013). Management of Main Coffee Diseases in Kenya. In Proceedings of the International Coffee Symposium, Belo Horizonte, Brazil, 11 June 2013.
- Hinnah, F.D., Sentelhas, P.C., Meira, C.A.A., Paiva, R.N. (2018) Weather-based coffee leaf rust apparent infection rate modeling. **International Journal of Biometeorology**, 62:1847–1860. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105225>
- Hinnah, F.D., Sentelhas, P.C., Patrício, F.R.A., Paiva, R.N., Parenti, M.V. (2020). Performance of a weather-based forecast system for chemical control of coffee leaf rust. **Crop Protection**, 137:105225. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105225>
- Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural – INCAPER. Cafeicultura. Disponível em: < <https://incaper.es.gov.br/cafeicultura>>. Acesso em: 15 janeiro 2023.
- Kushalappa, A.C. (1978) Análise quantitativa e qualitativa da intensidade de ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.), durante a estação chuvosa, em Viçosa, MG. **Fitopatologia Brasileira**, 3:118.
- Kushalappa, A.C., Chaves, G.M. (1980) An analysis of the development of coffee rust in the field. **Fitopatologia Brasileira**, 5:95–183.
- Kushalappa, A.C., Akutsu, M., Oseguera, S.H., Chaves, G.M., Melles, C.A., Miranda, J.M. (1984) Equations for predicting the rate of coffee rust development based on net survival ratio for macrocyclic process of *Hemileia vastatrix*. **Fitopatologia Brasileira**, 9:255–271
- Liebig, T.I. Abundance of Pests and Diseases in Arabica Coffee Production Systems in Uganda-Ecological Mechanisms and Spatial Analysis in the Face of Climate Change. Ph.D. **Thesis**, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Germany, 2017.
- Merle, I., Tixier, P., Filho, E.M.V., Cilas, C., Avelino, J. (2019). 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. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105046>

Montoya, R. H.; Chaves, G. M. (1974). Influência da temperatura e da luz na germinação, infectividade e período de geração de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Experientiae*. **Ceres**, 18(11):239-266.

Motisi, N., Ribeyre F., Poggi, S. (2019). Coffee tree architecture and its interactions with microclimates drive the dynamics of coffee berry disease in coffee trees. **Nature - Scientific Reports**, 9(2544):1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38775-5>

Nutman, F.J., Roberts, F.M., Bock, K.R. (1960) Method of uredospore dispersal of the coffee leaf-rust fungus, *Hemileia vastatrix*. **Transactions of the British Mycological Society**, 43(3):509-515. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80005-4](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80005-4)

Nutman, F.; Roberts, F.; Clarke, R. (1963). Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. **Transactions of the British Mycological Society**, 46:27-44. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80005-4](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80005-4)

Organização Internacional do Café - OIC. Relatório sobre o mercado do café (2021/2022) – setembro de 2022. Disponível em: < <https://www.ico.org/documents/cy2021-22/cmr-0922-p.pdf>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2023.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rayner, R.W. (1972). *Micologia y biologia de la roya del cafeto*. Turrialba: Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas de la O E A, 175 p.

Rowlandson, T., Gleason, M., Sentelhas, P., Gillespie, T., Thomas, C., Hornbuckle, B. (2015). Reconsidering leaf wetness duration determination for plant disease management. **Plant Disease**, 99(3):310-319. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0529-FE>

Saccas, A.M., Charpentier, J. (1971). La rouille des caféiers due a *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. Paris: Institut Français du Café, du Cacao et autres Plantes Stimulantes, 123 p. (Bulletin, 10).

Sache, I. (2000). Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain **Agronomie**, 20:757-767

Salustiano, M.E., Pozza, E.A., Filho, A.C.F., Botelho, A.O., Alves, E. (2008). Variability in ten populations of *Hemileia vastatrix* for germination and germinative tube length under four temperatures. **Ciência e Agrotecnologia**, 32(5):1651-1656. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500045>

Savary, S., Janeau, J.L., Alloreant, D., Escalante, M., Avelino, J., Willocquet, L. (2004) Effects of simulated rainfall events on spore dispersal and spore stocks in three tropical pathosystems, **Phytopathology**, 94:S92

Sentelhas, P.C., Marta, A.D., Orlandini, S., Santos, E.A., Gillespie, T.J., Gleason, M.L.(2008). Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148:392-400. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.011>

United States Department of Agriculture. **Coffee:** World Markets and Trade; USDA Foreign Agricultural Service: Washington, DC, USA, 2022

Vale, F. X. R.; Zambolim, L.; Costa, L. C.; Liberato, J. R.; Dias, A. P. S (2004). Influência do clima no desenvolvimento de doenças. In: Vale, F.X.R.; Jesus Junior, W.C.J.; Zambolim, L. (Ed.). Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas. Belo Horizonte: Editora Perffil, p.49-87.

Wickham, H. (2016). **ggplot2:** Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.

Zambolim, L., Maciel-Zambolim, E., Vale, F.X.R., Pereira, A.A., Sakiyama, N.S., Caixeta, E.T. (2005) Physiological races of *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. in Brazil: Physiological variability, current situation and future prospects. In: Zambolim, L., Zambolim, E.M., Várzea, V.M.P. (eds) Durable resistance to coffee leaf rust, 1st edn. Federal University of Viçosa, Viçosa, pp 75–98.

Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. **Tropical plant pathology**. 41:1–8 <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>

Zambolim, L., Caixeta, E.T. (2021). An overview of physiological specialization of coffee leaf rust–New designation of pathotypes. *International Journal of Current Research*, 13:15479–15490. <https://doi.org/10.24941/ijcr.40600.01.2021>

CAPÍTULO 3

Modelos logísticos baseados em dados meteorológicos para estimar probabilidade de risco de ocorrência de epidemias da ferrugem em cafeeiro conilon

Resumo

A ferrugem (*Hemileia vastatrix*) é a doença mais importante do cafeeiro conilon. Apesar disso, nenhum modelo de previsão para avaliar o risco epidemias (>5% de incidência) da ferrugem está disponível para cafeeiro conilon. No presente estudo, um modelo de regressão logística que avalia a probabilidade de ocorrência da epidemia foi desenvolvido usando dados meteorológicos e de incidência da doença coletadas em observações realizadas durante 26 meses em três áreas diferentes, totalizando 78 observações (11/2017 a 12/2019). O modelo selecionado incorporou as seguintes variáveis temperatura máxima média; temperatura mínima média; temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 80%) entre 18h e 6h; número de horas com temperatura entre ≥ 15 °C e < 26 °C; número de horas com precipitação (> 1mm) entre 18h e 9h; precipitação acumulada e número de dias com precipitação ≥ 1 mm. O modelo obteve uma acurácia de 91% com sensibilidade de 80% e especificidade de 98,8%, sendo que o modelo consegue acertos de 84,2% na predição de valores positivos ou dos “eventos” (16/19) e 93,2% na predição de valores negativos ou os “não eventos” (55/59) o que o classifica com excelente capacidade de predição. A validação do modelo demonstrou boa capacidade de predição quando confrontado com banco de dados de treinamento. Com isso o modelo desenvolvido neste estudo pode ser usado para o manejo eficiente da ferrugem do cafeeiro conilon.

Introdução

O café é uma das commodities mais relevantes globalmente, sendo a segunda mais comercializada em termos de volume, ficando somente atrás do petróleo bruto (OIC, 2022). Em 2021/2022 a produção mundial foi de aproximadamente 167,5 milhões de sacas (60 kg), desse total 77,9 milhões foram de *Coffea canephora* (robusta + conilon), com previsão de aumento de 11% para a safra 2022/2023 (CONAB, 2021; USDA, 2022; Kittichotsawat et al., 2022).

Entretanto, para atender a demanda do mercado mundial é necessário buscar o aumento da produção o que tem sido um desafio para os cafeicultores. A produtividade da cultura é influenciada por diversos fatores, tais como mudanças climática, genética, nutrição, disponibilidade e eficiência da água e ocorrência de pragas e doenças (Vitória et al., 2023). A ferrugem (*Hemileia vastatrix*) é a principal doença do cafeeiro (Lu et al., 2022; Reichel et al., 2022; Le et al., 2022), causando perdas na produção de até 50% (Zambolim et al., 2021), porém estudos de modelagem matemática estimam perdas de rendimento que variam entre 59,8% e 99,8% (Colares, 2018). Os principais efeitos da incidência da ferrugem nas áreas de produção são a desfolha, causando a redução da área fotossintética, e conseqüentemente a morte dos ramos plagiotrópicos, refletindo diretamente na produtividade da cultura (Gree, 1993; Pozza et al., 2010; Fernandes et al., 2013).

A principal forma de manejo da ferrugem é através da utilização de fungicidas (Pozza et al., 2010; Souza et al., 2011). As pulverizações dos fungicidas são programadas (calendários fixos), utilizando fungicidas protetores e/ou sistêmico nos meses de maior taxa de progresso da doença desde o início do verão chuvoso no Brasil (Pozza et al., 2021). No entanto, tem se buscado o uso racional de fungicidas, reduzindo e otimizando as pulverizações (Pérez et al., 2020). Deste modo, afim de evitar o uso de calendários fixos de aplicação e aplicação em momentos desfavoráveis a ferrugem, sistemas de alerta ou previsão de risco tem sido utilizado.

Os modelos de previsão para o manejo de doenças de plantas, em sua maioria são desenvolvidos com base em eventos climáticos, devido a importância das condições climáticas durante o ciclo da cultura, afetando o potencial da doença e do rendimento da cultura (Murungu & Madanzi, 2010). A intensidade da doença está diretamente correlacionada com a condição ambiental, em muitos casos, as variáveis meteorológicas são os únicos componentes do sistema de previsão (Van Mannen & Xu, 2003).

Entretanto, prever a ocorrência de doenças continua sendo um desafio, mesmo quando se concentra em variáveis meteorológicas (Cunniffe et al., 2015). Existem diversas abordagens para o desenvolvimento de modelos preditivos, que podem ser agrupadas em modelos estatísticos, mecanicistas e de aprendizado de máquina (Siettos & Russo, 2013). A escolha da abordagem mais adequada depende do objetivo do modelo, das informações disponíveis e das dificuldades envolvidas na detecção da doença.

Vários modelos de base meteorológicas foram desenvolvidos ao longo dos anos com objetivo de prever doenças em plantas, como míldio da roseira (Aegerter et al.,

2003), giberela do trigo por *Fusarium* (Wolf et al., 2003), ferrugem asiática da soja (Del Ponte et al., 2006), oídio e ferrugem amarela do trigo (Te Beest et al., 2008) e ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (Chaulagain et al., 2020). Para a ferrugem do cafeeiro foram propostos modelos de previsão de base meteorológicas utilizando regressões lineares múltiplas utilizando temperaturas máximas e mínimas (Kushalappa & Martins, 1980). Posteriormente, os novos modelos foram construídos incorporando uma ampla gama de variáveis (Kushalappa, 1981, Pinto et al., 2002).

Desde então os modelos gerados se concentraram a prever a incidência ou o risco de infecção, a partir disto surgiram modelos baseados em árvore de decisão (Avelino et al., 2006, Meira et al., 2008), aprendizado de máquina (Luaces et al., 2010), redes neurais (Pinto et al., 2002), árvores de decisão fuzzy (Cintra et al., 2011), rede bayesianas (Perez-Ariza et al., 2012), linearização da incidência (Hinnah et al., 2018), modelos lineares generalizados (Merle et al., 2020) e regressão linear múltipla (Pozza et al., 2021). No entanto, todos os modelos citados foram desenvolvidos para o patossistema *Coffea arabica* x *H. vastatrix*.

Até o presente momento, não existe um modelo de previsão baseado em variáveis meteorológicas para estimar a probabilidade de ocorrência de epidemias de ferrugem em cafeeiro conilon. Portanto, o objetivo deste estudo é desenvolver um modelo de previsão que utilize a abordagem de modelagem de regressão logística para estimar a probabilidade de ocorrência da ferrugem do cafeeiro conilon.

Material e métodos

Banco de dados

A incidência da ferrugem do cafeeiro conilon foi quantificada em ensaios realizados durante o período de 2017 a 2019, durante o período foram realizadas 106 observações. O estudo foi realizado em quatro áreas de cultivo comercial de cafeeiro conilon, variedade “Robusta Tropical” (EMCAPER 8151) propagadas por sementes localizadas no estado do Espírito Santo em diferentes altitudes.

Foi estabelecido um esquema amostral para avaliação de cada uma das áreas, com um total de 80 pontos distribuídos em malha regular a cada 20 metros, abrangendo toda a área da lavoura. Cada ponto amostral foi representado por uma única planta e quatro ramos plagiotrópicos foram selecionados aleatoriamente no terço superior das plantas, de

forma não destrutiva, seguindo a proposta de Belan et al. (2021) para avaliar a intensidade da doença. A incidência da doença foi determinada pela porcentagem de folhas afetadas em relação ao número total de folhas amostradas, conforme a metodologia descrita por Campbell e Madden (1990) avaliadas a cada 30 dias. Cada data de avaliação da ferrugem foi classificada como epidêmica ($\geq 5\%$ de incidência da doença) ou não epidêmica ($< 5\%$ de incidência da doença) (Belan et al., 2015; Zambolim, 2016; Pozza et al., 2021). Um código binário de resposta à doença de “1” foi atribuído para um status epidêmico da doença e um “0” para um status não epidêmico, e essa classificação binária foi usada no processo de modelagem.

Variáveis meteorológicas explicativas

Os dados meteorológicos foram registrados por estações semiautomáticas modelo E5000 da Iriplus® localizadas no centro de cada área de avaliação. Os dados foram quantificados diretamente por sensores específicos de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação pluviométrica e radiação solar. O período de molhamento foliar foi quantificado partir da umidade relativa do ar $\geq 80\%$ e $\geq 90\%$ (Sentelhas et al. 2008; Rowlandson et al. 2015). Com base nos dados meteorológicos diários, uma série de variáveis meteorológicas secundárias foram calculadas (Tabela 1).

Tabela 1 - Variáveis utilizadas para obtenção do modelo logístico para estimação da probabilidade de ocorrência de epidemias em ferrugem do cafeeiro conilon

Variável	Identificação	Descrição
X1	$T_{M\acute{a}x}^1$	Temperatura máxima média
X2	$T_{M\acute{i}n}^1$	Temperatura mínima média
X3	$T_{M\acute{e}d}^1$	Temperatura média
X4	$UR_{M\acute{a}x}^1$	Umidade relativa máxima média
X5	$UR_{M\acute{i}n}^1$	Umidade relativa mínima média
X6	$UR_{M\acute{e}d}^1$	Umidade relativa média
X7	$TMMF_{(18h-9h; UR \geq 90\%)}^2$	Temperatura média como molhamento foliar ($UR \geq 90\%$) entre 18h e 9h
X8	$TMMF_{(18h-6h; UR \geq 90\%)}^2$	Temperatura média como molhamento foliar ($UR \geq 90\%$) entre 18h e 6h
X9	$TMMF_{(18h-9h; UR \geq 80\%)}^2$	Temperatura média como molhamento foliar ($UR \geq 80\%$) entre 18h e 9h
X10	$TMMF_{(18h-6h; UR \geq 80\%)}^2$	Temperatura média como molhamento foliar ($UR \geq 80\%$) entre 18h e 6h
X11	$NHMF_{(UR \geq 90\%)}^2$	Nº de horas com molhamento foliar com $UR \geq 90\%$
X12	$NHMF_{(UR \geq 80\%)}^2$	Nº de horas com molhamento foliar com $UR \geq 80\%$
X13	$NHT_{(\geq 18^\circ C \text{ e } < 26^\circ C)}^2$	Número de horas com temperatura entre $\geq 18^\circ C$ e $< 26^\circ C$

X14	$NHT_{(\geq 15^{\circ}C \text{ e } < 26^{\circ}C)}^2$	Número de horas com temperatura entre $\geq 15^{\circ}C$ e $< 26^{\circ}C$
X15	$NHP_{(18h - 9h; > 1mm)}^2$	Número de horas com precipitação ($> 1mm$) entre 18h e 9h
X16	$NHP_{(18h - 9h; > 3mm)}^2$	Número de horas com precipitação ($> 3mm$) entre 18h e 9h
X17	Precip _{ac} ¹	Precipitação acumulada
X18	$NDP_{(\geq 1mm)}^2$	Número de dias com precipitação $\geq 1mm$

Correlação entre a incidência da ferrugem e as variáveis meteorológicas

O primeiro passo adotado para o desenvolvimento do modelo foi avaliar a correlação entre as variáveis meteorológicas (Tabela 1) e a incidência da ferrugem, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson. Em seguida, foi verificada a significância estatística e o grau de relação entre as variáveis e a doença.

Ajuste e validação do modelo de Regressão

Setenta e oito (78) observações da incidência da doença avaliadas durante o período de dois anos e dois meses de avaliação da doença foram utilizadas na modelagem. As observações foram primeiro convertidas em resposta binária da doença (epidêmica = “1”, não-epidêmica = “0”) com base no limiar considerado para separar o status epidêmico e não-epidêmico da doença, que é considerado 5% de incidência.

A relação entre os preditores baseados nos dados meteorológicos e a classificação binária da ferrugem (epidêmica = “1”, não-epidêmica = “0”) foi modelada por meio de regressão logística (Stokes et al., 2000). A regressão logística, que estima as probabilidades logarítmicas de um evento, pode ser descrita como:

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \text{logit}(p) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

Em que $\ln(P/[1-P])$ é o logit da probabilidade da epidemia da doença em função linear das variáveis explicativas, β_0 a β_k são parâmetros e X_1 a X_k são variáveis preditoras. Utilizando o antilogaritmo para fins de isolar o p, obtendo assim, o modelo de regressão logística múltipla para a probabilidade estimada \hat{p} :

$$\hat{p} = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k}} = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)}}$$

O ajuste dos modelos de regressão logística foi realizado utilizando a técnica “*Stepwise*” que consiste no processo de inclusão ou exclusão das variáveis do modelo, utilizando o método “*both*” que incorpora ao modelo todas as variáveis e deve ser

utilizado principalmente quando se tem certeza de que todas as variáveis são necessárias para se estimar os parâmetros do modelo.

A seleção dos modelos foi feita com base em critérios de qualidade de ajuste, tais como, Critério de Informação de Akaike (AIC – Akaique Information Criterion), quanto menor o AIC, melhor o ajuste do modelo, o AIC é calculado da seguinte forma:

$$AIC = -2 \log(L_p) + 2[(p + 1) + 1]$$

Onde L_p é a função de máxima verossimilhança e p é o número de variáveis explicativas do modelo. O valor do pseudo R^2 para verificar o ajuste geral do modelo, para o cálculo do modelo utilizou a seguinte equação:

$$R^2_{LOGIT} = \frac{-2LL_{nulo} - (-2LL_{modelo})}{-2LL_{nulo}}$$

Em que $-2LL$ representa -2 vezes o logaritmo do valor de verossimilhança, onde a verossimilhança do modelo nulo é comparado com o modelo completo.

A significância biológica das variáveis preditoras foi testada por meio da curva característica de operação do receptor (Receiver Operator Characteristic - ROC) e da área sob a curva de característica de operação do receptor (AUC), indicando a sensibilidade e especificidade do modelo (Fawcett, 2006; Hosmer & Lemeshow, 2000) e foram calculadas as razões de chances das variáveis preditoras, teste de Hosmer-Lemeshow e a matriz de confusão. O modelo foi validado utilizando a banco de treinamento diferente do usado para geração dos modelos de previsão. Estes dados de treinamento correspondem a 30% do total de dados obtidas. As probabilidades obtidas foram comparadas afim de determinar a precisão e capacidade de predição do modelo.

Análise estatística

O ajuste dos modelos de regressão logística e as análises foram realizadas na linguagem de programação R versão 4.1.3 (R Core Team, 2022). O ajuste dos modelos foi realizado utilizando a função “*glm*” e a função “*step*” para aplicação da técnica “*Stepwise*” ambas do pacote “*stats*”. A matriz de confusão utilizando a função “*confusionMatrix*” do pacote “*caret*”. O teste de Hosmer e Lemeshow foi aplicado utilizando a função “*hoslem.teste*” do pacote “*ResourceSelection*”. A curva ROC foi plotada utilizando a função “*plot.roc*” do pacote “*pROC*”. Para os cálculos do Pseudo R^2 utilizou-se a função “*RsqGLM*” do pacote “*modEvA*”.

Resultados

Das 78 observações realizadas durante o período de avaliação, 58 (74%) observações foram classificadas como não-epidêmicas e 20 (26%) como epidêmicas. A análise de correlação de Pearson identificou 12/18 variáveis significativas, com coeficiente de correlação variando de -0.59 a 0.40 (Tabela 2).

Tabela 2- Coeficientes de correlação de Pearson entre a incidência e as variáveis meteorológicas

Variável	Coeficiente correlação	Intervalo confiança	p-value
X1	-0.43	-0.59 a -0.23	<0.001
X2	-0.53	-0.67 a -0.35	<0.001
X3	-0.51	-0.66 a -0.33	<0.001
X7	-0.60	-0.77 a -0.43	<0.001
X8	-0.59	-0.72 a -0.43	<0.001
X9	-0.59	-0.72 a -0.42	<0.001
X10	-0.59	-0.72 a -0.42	<0.001
X14	0.40	0.20 a 0.57	<0.001
X15	-0.34	-0.52 a -0.13	0.002
X16	-0.30	-0.49 a -0.09	0.007
X17	-0.36	-0.54 a -0.15	0.001
X18	-0.36	-0.54 a -0.15	0.001

X1: Temperatura máxima média; X2: Temperatura mínima média; X3: Temperatura média; X7: Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 90%) entre 18h e 9h; X8: Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 90%) entre 18h e 6h; X9: Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 80%) entre 18h e 9h; X10: Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 80%) entre 18h e 6h; X14: Número de horas com temperatura entre ≥ 15 °C e < 26 °C; X15: Número de horas com precipitação ($>$ 1mm) entre 18h e 9h; X16: Número de horas com precipitação ($>$ 3mm) entre 18h e 9h; X17: Precipitação acumulada; X18: Número de dias com precipitação \geq 1mm

As variáveis significativas na análise de correlação de Pearson foram inseridas no ajuste do modelo. A aplicação da técnica “Stepwise” gerou quatro (4) modelos de regressão logística, em que o modelo M1 é modelo completo com as variáveis significativas e os modelos M2, M3 e M4 são os modelos derivados a partir do uso da técnica, quanto o modelo M5 corresponde ao modelo selecionado com base na significância dos parâmetros (Tabela 3).

Tabela 3 - Modelos logísticos ajustados

Parâmetros	p-value				
	M1	M2	M3	M4	M5
Intercepto	0.556	0.584	0.443	0.252	0.403
X1	0.226	< 0.05	<0.05	< 0.05	< 0.05
X2	0.082	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
X3	0.826				
X7	0.231	0.237	0.099	0.086	
X8	0.457	0.476			

X9	0.067	0.07	0.098	0.143	
X10	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.054	< 0.05
X14	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
X15	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
X16	0.333	0.336			
X17	0.026	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
X18	0.030	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
AIC	59.951	57.999	56.508	55.358	54.819

X1: Temperatura máxima média; X2: Temperatura mínima média; X3: Temperatura média; X7: Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 90%) entre 18h e 9h; X8: Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 90%) entre 18h e 6h; X9: Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 80%) entre 18h e 9h; X10: Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 80%) entre 18h e 6h; X14: Número de horas com temperatura entre ≥ 15 °C e < 26 °C; X15: Número de horas com precipitação ($>$ 1mm) entre 18h e 9h; X16: Número de horas com precipitação ($>$ 3mm) entre 18h e 9h; X17: Precipitação acumulada; X18: Número de dias com precipitação \geq 1mm

O modelo M5 foi o modelo de melhor ajuste de acordo com critérios de seleção, em todas as variáveis testadas apresentaram relação significativa com a incidência da doença, sendo esse modelo reduzido escolhido para as demais análises. O modelo selecionado inclui temperatura máxima média, temperatura mínima média; Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 80%) entre 18h e 6h; Número de horas com temperatura entre ≥ 15 °C e < 26 °C; Número de horas com precipitação ($>$ 1mm) entre 18h e 9h; Precipitação acumulada; Número de dias com precipitação \geq 1mm. As estimativas da razão de chances indicam que a variação da temperatura mínima média é principal fator na alta da incidência da ferrugem (51.06). O teste de Hosmer e Lemeshow não indica evidência de falta de ajuste no modelo ($Pr > X^2 = 0.42$) (Tabela 4).

Tabela 4 - Estimativas de máxima verossimilhança do modelo de regressão logística para previsão da ferrugem em cafeeiro conilon

Parâmetros	Estimativa	Erro-padrão	Teste Wald		Razão de chance	Hosmer e Lemeshow	
			X ²	Pr > X ²		X ²	Pr > X ²
Intercepto	-14.85	17.77				3.92	0.42
X1	1.76	0.69	6.46	< 0.05	5.82		
X2	3.93	1.30	9.19	< 0.05	51.06		
X10	-6.74	2.05	10.84	< 0.05	0.0012		
X14	0.04	0.02	4.78	< 0.05	1.04		
X15	-0.47	0.16	8.38	< 0.05	0.62		
X17	0.04	0.02	6.21	< 0.05	1.04		
X18	0.73	0.33	4.78	< 0.05	2.07		

X1: Temperatura máxima média; X2: Temperatura mínima média; X10: Temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 80%) entre 18h e 6h; X14: Número de horas com temperatura entre ≥ 15 °C e < 26 °C; X15: Número de horas com precipitação ($>$ 1mm) entre 18h e 9h; X17: Precipitação acumulada; X18: Número de dias com precipitação \geq 1mm

A matriz de confusão retoma uma excelente acurácia total do modelo em 91% (82.4 – 96.3) com sensibilidade de 80% e especificidade de 98.8%, sendo que o modelo

consegue acertos de 84,2% na predição de valores positivos ou dos “eventos” (16/19) e 93,2% na predição de valores negativos ou os “não eventos” (55/59) (Tabela 5).

Tabela 5- Matriz de confusão do modelo ajustado

		Valor Observado	
		0	1
Valor Estimado	0	55	4
	1	3	16

A área sobre a curva ROC (AUC – Area Under the ROC Curve) do modelo foi de 0.944, isto significa que a capacidade do modelo por ser considerada excelente pois é um valor acima de 0,7 (Figura 1).

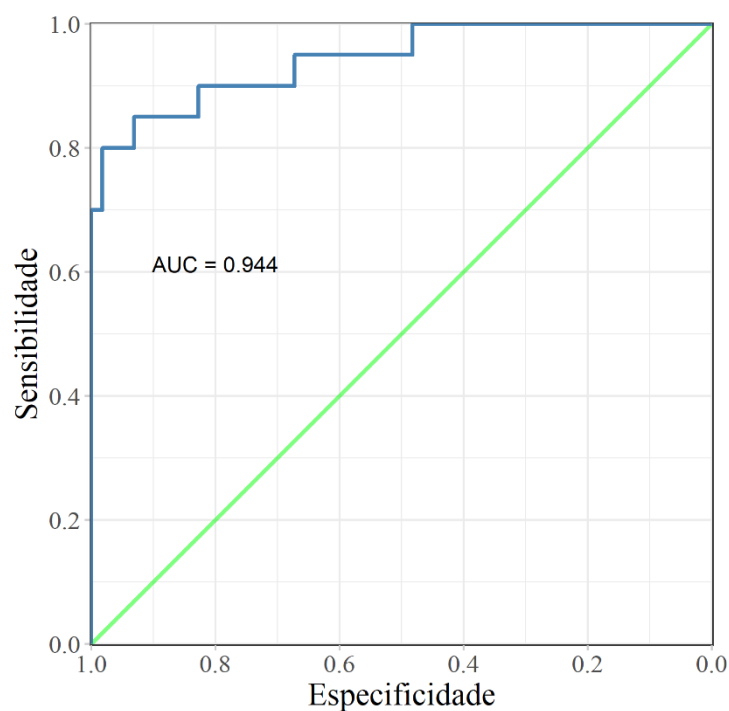


Figura 6- Curva ROC associado ao modelo ajustado

Os valores de Pseudo R^2 do modelo ajustado variaram de 0.47 a 0.69 (Tabela 6)

Tabela 6- Valores de Pseudo R^2 do modelo selecionado

Nagelkerke	McFadden	Tjur
0.70	0.56	0.61

Portanto, considerando os resultados obtidos, quer nos testes para a significância dos coeficientes, quer nos testes sobre a qualidade de ajuste do modelo ou ainda a área AUC, deve-se considerar que este modelo é estatisticamente válido para modelar a relação entre as variáveis e também para procedimentos associados à inferência estatística. O modelo proposto foi:

$$\hat{p} = \frac{1}{1 + e^{-(-14.85 + 1.76X1 + 3.93X2 - 6.74X10 + 0.04X14 - 0.47X15 + 0.04X17 + 0.73X18)}}$$

Em que: X1: Temperatura máxima média; X2: Temperatura mínima média; X10: Temperatura média como molhamento foliar ($UR \geq 80\%$) entre 18h e 6h; X14: Número de horas com temperatura entre $\geq 15^\circ\text{C}$ e $< 26^\circ\text{C}$; X15: Número de horas com precipitação ($> 1\text{mm}$) entre 18h e 9h; X17: Precipitação acumulada; X18: Número de dias com precipitação $\geq 1\text{mm}$

O modelo foi validado utilizando 26 observações diferentes no período de setembro de 2017 a outubro de 2019 para determinar a probabilidade de ocorrência de epidemia. Ao analisar o gráfico da curva de progresso *versus* o modelo proposto é possível verificar que o modelo obteve boa capacidade de predição da epidemia da ferrugem em intervalos de 30 dias. Consideramos como tomada de decisão para o controle da doença a partir do modelo gerado probabilidades $\geq 50\%$ de ocorrência da doença. Analisando o gráfico o modelo previu a ocorrência da doença em 4 meses, entre os meses de maio e agosto de 2018 (Figura 2)

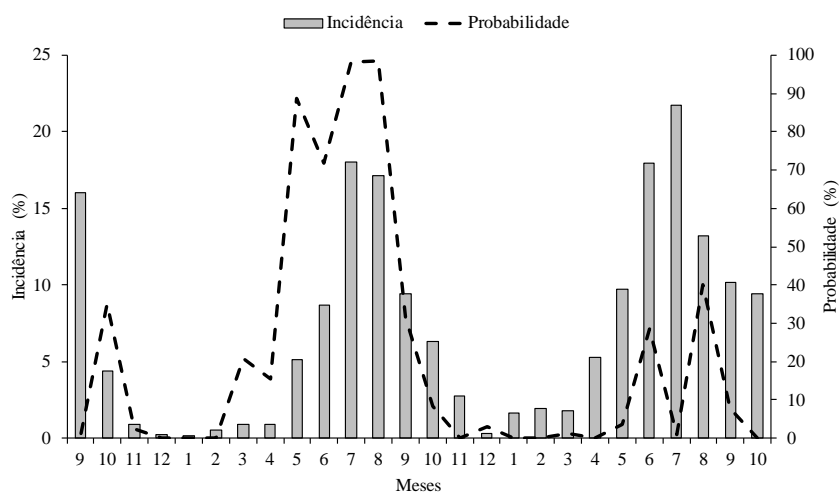


Figura 2 - curva de progresso da ferrugem versus curva de probabilidade do modelo

Durante o período de maio de 2019 a outubro de 2019 a epidemia na área avaliada ficou acima de 5%, no entanto neste período o modelo previu probabilidades de ocorrência da epidemia abaixo de 30% sendo classificado como não-epidêmico de acordo com o proposto.

Discussão

A regressão logística tem sido amplamente utilizada nos estudos em fitopatologia para previsão de doenças. Esta técnica foi utilizada verificar o efeito de diferentes variáveis em epidemias de ferrugem do milho (Fininsa & Yuen, 2001), modelar epidemias de giberela em trigo (Wolf et al., 2003), ferrugem em cevada (Woldeab et al., 2007), previsão da contaminação fumonisinas (FB) em milho (Battilani et al., 2008), pesquisas com *Botrytis fabae* em fava (Sahile et al., 2008), distribuição e intensidade do carvão da cana-de-açúcar (Tegene et al., 2021), bem como o uso da técnica com associadas a dados meteorológicos, como associação de *Sclerotium cepivorum* em alho com fatores ambientais (Zewde et al., 2007), probabilidade de ocorrência de FB1 e FB2 em grãos de milho (Martínez et al., 2010), e a contaminação por FB em amostras de grãos de milho em termais de exportação (Sancho et al., 2018).

Da mesma forma, neste estudo usamos técnicas de regressão logística para quantificar a probabilidade de ocorrência da epidemia da ferrugem com base nas variáveis meteorológicas. Os ciclos de vida dos patógenos fúngicos são fortemente determinados pelo clima, particularmente pela temperatura e disponibilidade de água (Bebber et al., 2016). No caso da ferrugem as principais variáveis meteorológicas que influenciam na epidemia são a temperatura e a umidade foliar (Magarey et al., 2005), ocorrendo a germinação dos urediniósporos com molhamento foliar entre 6 e 24 h (Kushalappa et al., 1983).

A germinação é favorecida em condições de ausência de luz com temperaturas entre 21-25°C (Rayner, 1961; Montoya et al., 1974; Capucho et al., 2013). A temperatura exerce papel fundamental sobre o período de latência, comumente para ferrugem o período varia de 20 a 55 dias (o mais comum é 25-35 dias), porém em condições de temperatura superiores a 28°C ou inferiores a 18°C ocorre o prolongamento deste período (2,35). Em condições extremas de temperatura $\geq 32,5^\circ\text{C}$ e mínimas $\leq 12,5^\circ\text{C}$ impedem a germinação do fungo em condições de campo (Kushalappa, 1978; Kushalappa & Chaves, 1980; Kushalappa et al. 1984).

O molhamento foliar desempenha papel fundamental no processo de germinação do fungo, em que a *H. vastatrix* está adaptada para maximizar os efeitos da duração do período de molhamento foliar, germinando no início da noite e infectando durante a noite na ausência de luz a medida que as temperaturas esfriam, evitando os períodos de seca durante o dia (Jong et al., 1987).

A distribuição da precipitação influencia diretamente no progresso da doença, a precipitação fraca e intermitente é mais favorável do que a chuva contínua (Liebig, 2017; Nutman et al., 1963; Crowe, 1963). Precipitação não sazonais resultam em períodos mais longos de progresso da doença o que acarreta maior intensidade mais tarde e os picos doenças podem ser atribuídos a períodos de precipitação individuais (Gichuru, 2013).

Estudos realizados por Merle et al. (2019) verificaram efeito unimodal da precipitação média entre 33 e 24 dias antes do surgimento da lesão, que corresponderia a fase de disseminação dos esporos, a hipótese é que a liberação e deposição dos uredósporos ocorrem com precipitações abaixo de 10 mm de acordo com trabalhos anteriores (Nutman et al., 1960; Bock, 1962). Em casos em que ocorrem precipitações acima de 10 mm, provavelmente ocorra a lavagem dos uredósporos pela chuva, reduzindo o número de lesões. O efeito da precipitação na lavagem dos uredósporos foi reconhecida como fator limitante na propagação da *H. vastatrix* (Savary et al., 2004; Avelino et al., 2019) e em outros patossistemas (Sache, 2000). Outra hipótese negativa do efeito da precipitação sobre o desenvolvimento da ferrugem, pode estar associado ao fato de dias com chuvas intensas geralmente estão relacionadas a temperaturas máximas mais baixas, sendo assim menos favoráveis a esporulação do patógeno (Merle et al., 2019).

As análises de regressão logística neste estudo indicaram que temperatura máxima média, temperatura mínima média; temperatura média como molhamento foliar (UR \geq 80%) entre 18h e 6h; número de horas com temperatura entre ≥ 15 °C e < 26 °C; número de horas com precipitação (> 1 mm) entre 18h e 9h; precipitação acumulada; número de dias com precipitação ≥ 1 mm estiveram associadas a incidência da ferrugem do cafeeiro.

O valor obtido de AUC obtido a partir do modelo selecionado foi de 0,944, esse valor obtido indica alta precisão, de acordo com Hosmer et al. (2013) modelos com valores de AUC entre 0,8 e 0,9 são considerados como tendo excelente capacidade de predição. Os valores de Pseudo R² de Nagelkerke, McFadden, Tjur foram de 0.70, 0.56 e 0.61 respectivamente. Tjur (2009) refere-se a poder explicativo e capacidade de

previsão do modelo, McFadden (1974) a variância explicada e Nagelkerke (1991) para a proporção de variação explicada.

O modelo também quantificou a importância relativa das variáveis independentes e indicou que a epidemia da ferrugem desenvolve em função dessas variáveis. Ou seja, algumas das variáveis analisadas foram mais importantes para diminuir ou aumentar o desenvolvimento da doença do que outras variáveis, implicando a necessidade de dar a devida consideração a essas variáveis para projetar e desenvolver estratégias sustentáveis de manejo integrado da doença, aumentando a produção e produtividade do café conilon.

O modelo logístico desenvolvido nesse trabalho pode ajudar pesquisadores e produtores a prever quais condições climáticas desencadearam a epidemia. Esse conhecimento auxilia na tomada de decisão, com a possibilidade para recomendação de aplicação de fungicidas. O modelo desenvolvido neste trabalho requer validação com um conjunto de dados independentes (Rossi et al., 2010), então, a partir daí, os modelos poderiam ser incorporados a um sistema de previsão e alerta para ferrugem do cafeeiro conilon. Como o modelo gerado depende dos valores mensais das variáveis meteorológicas, a previsão da probabilidade de risco da epidemia da ferrugem pode ser feita com pelo menos um mês de antecedência adotando medidas preventivas de controle. Apesar dos resultados obtidos neste trabalho evidenciarem a alta precisão do modelo proposto pesquisas adicionais com relação a validação do modelo em diferentes regiões produtoras do estado do Espírito Santo devem ser conduzidas para a melhoria da acurácia e predição do modelo proposto.

Conclusão

Com base nos resultados obtidos foi possível propor um modelo de previsão para estimar a probabilidade de ocorrência da ferrugem do cafeeiro conilon por meio da abordagem de modelagem de regressão logística.

Referências

Aegerter, B.J., Nunez, J.J., Davis, R.M. (2003). Environmental factors affecting rose downy mildew and development of a forecasting model for a nursery production system. **Plant Disease**, 87(6):732–738.

Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordonez, ~ M., Savary, S., 2006. The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. **Ecological Modelling**, 197(3):431–447. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.03.013>

- Battilani, P., Pietri, A., Barbano, C., Scandolara, A., Bertuzzi, T., Marocco, A. (2008) Logistic regression modeling of cropping systems to predict fumonisin contamination in maize. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 56(21):10433–10438. <https://doi.org/10.1021/jf801809d>
- Bebber, D.P., Castillo, Á.D., Gurr, S.J. (2016). Modelling coffee leaf rust risk in Colombia with climate reanalysis data. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, 371:20150458. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0458>
- Belan, L.L., Belan, L.L., Satiro, L.S., Moraes, W.B., Jesus Junior, W.C., Moraes, W.M (2021) A comparison of sampling methods to accurately estimate the incidence of leaf rust on conilon coffee. **Australasian Plant Pathology**, 50:729–737. <https://doi.org/10.1007/s13313-021-00823-y>
- Belan, L.L., de Jesus Junior, W.C., de Souza, A.F., Zambolim, L., Tomaz, M.A., Alves, F.R., Ferrão, M.A.G., Amaral, J.F.T. (2015) Monitoring of leaf rust in conilon coffee clones to improve fungicide use. **Australasian Plant Pathology**, 44:5–12. <https://doi.org/10.1007/s13313-014-0310-y>
- Bock, K.R. (1962). Dispersal of uredospores of *Hemileia vastatrix* under field conditions **Transactions of the British Mycological Society**, 45(1):63-74. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(62\)80035-7](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(62)80035-7)
- Campbell, C.L., Madden, L.V. (1990) **Introduction to plant disease epidemiology**. John Wiley & Sons, New York.
- Capucho, A.S., Zambolim, L., Cabral, P.G.C., Maciel-Zambolim, E., Caixeta, E.T. (2013). Climate favourability to leaf rust in conilon coffee. *Australasian Plant Pathology*, 42:511–514. <https://doi.org/10.1007/s13313-012-0187-6>
- Chaulagain, B., Small, I.M., Shine, J.M., Fraisse, J.C.W., Raid, R.N., Rott, P., 2020. Weather-based predictive modeling of orange rust of Sugarcane in Florida. **Phytopathology**, 110(3):626–632. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-19-0211-R>
- Cintra, M.E., Meira, C.A.A., Monard, M.C., Camargo, H.A., Rodrigues, L.H.A. (2011). The use of fuzzy decision trees for coffee rust warning in Brazilian crops. In: 2011 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. IEEE, Cordoba, Spain, pp. 1347–1352. <https://doi.org/10.1109/ISDA.2011.6121847>
- Colares, M.R.N. (2018). Modeling of Coffee Productivity Losses Related to Rust. Master's. Dissertation, Federal University of Lavras, Lavras, MG, Brazil.
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café. Brasília, 2023. v.10: safra 2023, primeiro levantamento, janeiro 2023. <Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe> >. Acesso em: 15 de janeiro 2023.
- Cunniffe, N.J., Koskella, B., Metcalf, E., Jessica, C., Parnell, S., Gottwald, T.R., Gilligan, C.A. (2015). Thirteen challenges in modelling plant diseases. **Epidemics**, 10:6–10. <https://doi.org/10.1016/j.epidem.2014.06.002>

- Crowe, T.J. (1963). Possible insect vectors of *Hemileia vastatrix* in Kenya. Transactions of the British Mycological Society, 46:24–26.
- Del Ponte, E.M., Godoy, C.V., Li, X., Yang, X.B. (2006). Predicting severity of Asian soybean rust epidemics with empirical rainfall models. **Phytopathology**, 96(7):797–803. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0797>
- Fawcett, T. (2006) An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, 27(8):861-874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- Fernandes, L.H.; Resende, M.L.; Pereira, R.B.; Costa, B.H.; Monteiro, A.C.; Ribeiro Júnior, P.M. (2013). Acibenzolar-S-methyl in control of rust and coffee plant cercosporiose in field conditions. **Coffee Science**, 2013, 8(1):24–32.
- Fininsa, C., Yuen, J. (2001). Association of maize rust and leaf blight epidemics with cropping systems in Hararghe highlands, eastern Ethiopia. **Crop Protection**, 20(8): 669–678. [https://doi.org/10.1016/s0261-2194\(01\)00033-3](https://doi.org/10.1016/s0261-2194(01)00033-3)
- Gichuru, E.K. (2013). Management of Main Coffee Diseases in Kenya. In Proceedings of the International Coffee Symposium, Belo Horizonte, Brazil, 11 June 2013.
- Gree, G. (1993). Epidemiology of coffee leaf rust in the eastern highlands. **Coffee Research Institute Newsletter**, 2, 16–20
- Hair, J.F., William, C.B., Barry, J.B., Ronald, L.T. (2009). **Análise Multivariada de Dados**. 6a ed. São Paulo: Bookman.
- Hinnah, F.D., Sentelhas, P.C., Meira, C.A.A., Paiva, R.N. (2018). Weather-based coffee leaf rust apparent infection rate modeling. **International Journal of Biometeorology**, 62: 1847–1860. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1587-2>
- Hosmer, D.W., Lemeshow, S. (2000). Applied Logistic Regression. 2 ed. New York: Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471722146>
- Hosmer, D.W., Lemeshow, S.A., Sturdivant, R.X. (2013). Applied logistic regression. (third ed.), Wiley, Hoboken, NJ.
- Jong, E.J.D., Eskes, A.B., Hoogstraten, J.G.J., Zadoks, J.C. (1987). Temperature requirements for germination, germ tube growth and appressorium formation of urediospores of *Hemileia vastatrix*. **Netherlands Journal of Plant Pathology**, 93:61–71. <https://doi.org/10.1007/BF01998091>
- Kittichotsawat, Y., Tippayawong, N., Tippayawong, K.Y. (2022). Prediction of arabica coffee production using artificial neural network and multiple linear regression techniques. **Scientific Reports**, 12:14488. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18635-5>
- Kushalappa, A.C., Akutsu, M., Ludwig, A. (1983). Application of survival ratio for monocyclic process of *Hemileia vastatrix* in predicting coffee rust infection rates. **Phytopathology**, 73(1):96-103.
- Kushalappa, A.C. (1978) Análise quantitativa e qualitativa da intensidade de ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.), durante a estação chuvosa, em Viçosa, MG. **Fitopatologia Brasileira**, 3:118.

- Kushalappa, A.C., 1981. Linear models applied to variation in the rate of coffee rust development. *Journal of Phytopathology*, 101(1):22–30. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1981.tb03317.x>.
- Kushalappa, A.C., Chaves, G.M. (1980) An analysis of the development of coffee rust in the field. **Fitopatologia Brasileira**, 5:95–183.
- Kushalappa, A.C., Martins, C.P. (1980). Incubation and generation periods for *Hemileia vastatrix* on coffee in Viçosa, Minas Gerais. **Fitopatologia Brasileira**, 5:177–183
- Kushalappa, A.C., Akutsu, M., Oseguera, S.H., Chaves, G.M., Melles, C.A., Miranda, J.M. (1984) Equations for predicting the rate of coffee rust development based on net survival ratio for macrocyclic process of *Hemileia vastatrix*. **Fitopatologia Brasileira**, 9:255–271
- Le, C.T.M.; Okane, I.; Ono, Y.; Tsuda, Y.; Yamaoka, Y. (2022). Incidence of Coffee Leaf Rust in Vietnam, Possible Original Sources and Subsequent Pathways of Migration. **Frontiers in Plant Science**, 13:872877. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.872877>
- Liebig, T.I. Abundance of Pests and Diseases in Arabica Coffee Production Systems in Uganda-Ecological Mechanisms and Spatial Analysis in the Face of Climate Change. Ph.D. **Thesis**, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Germany, 2017.
- Lu, L.; Tibpromma, S.; Karunarathna, S.C. (2022). Comprehensive Review of Fungi on Coffee. **Pathogens**, 11:411. <https://doi.org/10.3390/pathogens11040411>
- Luaces, O., Rodrigues, L.H.A., Alves Meira, C.A., Quevedo, J.R., Bahamonde, A. (2010). Viability of an Alarm Predictor for Coffee Rust Disease Using Interval Regression. In: García-Pedrajas, N., Herrera, F., Fyfe, C., Benítez, J.M., Ali, M. (eds) **Trends in Applied Intelligent Systems**. IEA/AIE 2010. Lecture Notes in Computer Science, vol 6097. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13025-0_36
- Magarey, R.D., Sutton, T.B., Thayer, C.L. (2005). A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens. **Phytopathology**, 95:92–100. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-0092>
- Meira, C.A., Rodrigues, L.H., Moraes, S.A. (2008). Análise da epidemia da ferrugem do cafeeiro com árvore de decisão. **Tropical Plant Pathology**, 33(2):114–124. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762008000200005>
- Merle, I., Tixier, P., Filho, E.M.V., Cilas, C., Avelino, J. (2019). 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. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105046>
- McFadden, D. (1974). Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. Pages 105-142 in: **Frontiers in Econometrics**. P. Zarembka, ed. Academic Press, New York, NY, U.S.A.
- Martínez, M., Moschini, R., Barreto, D., Bodega, J., Forjan, H., Piatti, F., Presello, D., Valentinuz, O. (2010). Factores ambientales que afectan el contenido de fumonisina en

granos de maíz. **Tropical Plant Pathology**, 35(5):277–284. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762010000500002>

Montoya, R.H.; Chaves, G.M. (1974) Influência da temperatura e da luz na germinação, infectividade e período de geração de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Experientiae*. **Ceres**, 18(11):239–266.

Murungu, F.S., Madanzi, T. (2010). Seed priming, genotype and sowing date effects on emergence, growth and yield in a tropical low altitude area of Zimbabwe. **African Journal of Agricultural Research**, 5(17):2341–2349. <https://doi.org/10.5897/AJAR.9000622>

Nagelkerke, N.J. (1991). A note on a general definition of the coefficient of determination. **Biometrika**, 78(3):691-692. <https://doi.org/10.1093/biomet/78.3.691>

Nutman, F.J., Roberts, F.M., Bock, K.R. (1960) Method of uredospore dispersal of the coffee leaf-rust fungus, *Hemileia vastatrix*. **Transactions of the British Mycological Society**, 43(3):509-515. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80005-4](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80005-4)

Nutman, F.; Roberts, F.; Clarke, R. (1963). Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. **Transactions of the British Mycological Society**, 46:27–44. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80005-4](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80005-4)

Organização Internacional do Café - OIC. Relatório sobre o mercado do café (2021/2022) – setembro de 2022. Disponível em: < <https://www.ico.org/documents/cy2021-22/cmr-0922-p.pdf>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2023.

Pérez, C.D.P., Pozza, E.A., Pozza, A.A.A., Elmer, W.H., Pereira, A.B., Guimarães, D.S.G., Monteiro, A.C.A., Rezende, M.L.V. (2020). Boron, zinc and manganese suppress rust on coffee plants grown in a nutrient solution. *European Journal of Plant Pathology*, 156:727–738. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01922-9>

Perez-Ariza, C.B., Nicholson, A.E., Flores, M.J. (2012). Prediction of coffee rust disease using bayesian networks. In: **Sixth European Workshop on Probabilistic Graphical Models**. Granada (Spain), pp. 259–266

Pinto, A.C.S., Pozza, E.A., de Souza, P.E., Pozza, A.A.A., Talamini, V., Boldini, J.M., Santos, F.S. (2002). Description of epidemics of coffee rust with neural networks. **Fitopatologia Brasileira**, 27:517–524. <https://doi.org/10.1590/S0100-41582002000500013>.

Pozza, E.A., Carvalho, V.L., Chalfoun, S.M.(2010). Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In **Semiologia do Cafeeiro: Sintomas de Desordens Nutricionais, Fitossanitárias e Fisiológicas**; Guimarães, R.J., Mendes, A.N.G., Baliza, D.P., Eds.; Editora UFLA:Lavras, Brazil, pp. 69–101.

Pozza, E.A., Santos, É.R., Gaspar, N.A., Vilela, X.M.S., Alves, M.C., Colares, M.R.N. (2021). Coffee Rust Forecast Systems: Development of a Warning Platform in a Minas Gerais State, Brazil. **Agronomy**, 11:2284. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112284>

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rayner, R.W. Rust disease of coffee. 2. Spread of the disease. *World Crop*. 1960, 12: 222–224.

Rayner, R.W. (1961) Germination and penetration studies on coffee rust (*Hemileia vastatrix* B. & Br.). **Annals of Applied Biology**, 49:497–505. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1961.tb03641.x>

Reichel, T.; Resende, M.L.V.; Monteiro, A.C.A.; Freitas, N.C.; Santos Botelho, D.M. (2022). Constitutive Defense Strategy of Coffee Under Field Conditions: A Comparative Assessment of Resistant and Susceptible Cultivars to Rust. **Molecular Biotechnology**, 64:263–277. <https://doi.org/10.1007/s12033-021-00405-9>

Rossi, V., Giosuè, S., Caffi, T. (2010). Modelling Plant Diseases for Decision Making in Crop Protection. In: Oerke, EC., Gerhards, R., Menz, G., Sikora, R. (eds) **Precision Crop Protection** - the Challenge and Use of Heterogeneity. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9_15

Rowlandson, T., Gleason, M., Sentelhas, P., Gillespie, T., Thomas, C., Hornbuckle, B. (2015). Reconsidering leaf wetness duration determination for plant disease management. **Plant Disease**, 99(3):310–319. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-14-0529-FE>

Sache, I. (2000). Short-distance dispersal of wheat rust spores by wind and rain **Agronomie**, 20:757–767

Sahile, S., Ahmed, S., Fininsa, C., Abang, M.M., Sakhuja, P.K. (2008). Survey of chocolate spot (*Botrytis fabae*) disease of faba bean (*Vicia faba* L.) and assessment of factors influencing disease epidemics in northern Ethiopia. **Crop Protection**, 27(11):1457–1463. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.07.011>

Sancho, A.M., Moschini, R.C., Filippini, S., Rojas, D., Ricca, A. (2018). Weather-based logistic models to estimate total fumonisin levels in maize kernels at export terminals in Argentina. **Tropical Plant Pathology**, 43:99–108. <https://doi.org/10.1007/s40858-017-0199-4>

Savary, S., Janeau, J.L., Allorent, D., Escalante, M., Avelino, J., Willocquet, L. (2004) Effects of simulated rainfall events on spore dispersal and spore stocks in three tropical pathosystems, **Phytopathology**, 94:S92

Sentelhas, P.C., Marta, A.D., Orlandini, S., Santos, E.A., Gillespie, T.J., Gleason, M.L.(2008). Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration. **Agricultural and Forest Meteorology**, 148:392–400. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.09.011>

Siettos, C.I., Russo, L. (2013). Mathematical modeling of infectious disease dynamics. **Virulence**, 4:295–306. <https://doi.org/10.4161/viru.24041>.

Souza, A.F., Zambolim, L., Jesus Júnior, W.C., Cecon, P.R. (2011). Chemical approaches to manage coffee leaf rust in drip irrigated trees. **Australasian Plant Pathology**, 40:293–300. <https://doi.org/10.1007/s13313-011-0046-x>

Stokes, M.E., Davis, C.S., Koch, G.G. (2000). Categorical data analysis using the SAS system. SAS Institute, Cary, NC

- Te Beest, D.E., Paveley, N.D., Shaw, M.W., van den Bosch, F., 2008. Disease–weather relationships for powdery mildew and yellow rust on winter wheat. *Phytopathology*, 98(5):609–617. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-98-5-0609>
- Tegene, S., Terefe, H., Dejene, M., Tegegn, G., Tena, E., Ayalew, A. (2021). Survey of sugarcane smut (*Sporisorium scitamineum*) and association of factors influencing disease epidemics in sugarcane plantations of Ethiopia. **Tropical Plant Pathology**, 46:393–405. <https://doi.org/10.1007/s40858-021-00437-1>
- Tjur, T. (2009). Coefficients of determination in logistic regression models - A new proposal: The coefficient of discrimination. **The American Statistician**. 63(4):366-372. <https://doi.org/10.1198/tast.2009.08210>
- United States Department of Agriculture. **Coffee: World Markets and Trade**; USDA Foreign Agricultural Service: Washington, DC, USA, 2022
- Van Maanen, A., Xu, X.M. (2003). Modelling plant disease epidemics. *European Journal of Plant Pathology*, 109:669–682. <https://doi.org/10.1023/A:1026018005613>
- Vitória, E.L., Krohling, C.A., Borges, F.R.P., Ribeiro, L.F.O., Ribeiro, M.E.A., Chen, P., Lan, Y., Wang, S., Moraes, H.M.F, Furtado Júnior, M.R. (2023). Efficiency of Fungicide Application an Using an Unmanned Aerial Vehicle and Pneumatic Sprayer for Control of *Hemileia vastatrix* and *Cercospora coffeicola* in Mountain Coffee Crops. **Agronomy**, 13:340. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020340>
- Woldeab, G., Yuen, J., Fininsa, C., Singh, H. (2007). Barley leaf rust (*Puccinia hordei* Otth) in three production systems and practices in Ethiopia. **Crop Protection**, 26(8):1193–1202. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.10.016>
- Wolf, E.D., Madden, L.V., Lipps, P.E. (2003) Risk assessment models for wheat fusarium head blight epidemics based in within-season weather data. **Phytopathology**, 93:428–435. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2003.93.4.428>
- Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. **Tropical plant pathology**. 41:1–8. <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>
- Zambolim, L., Caixeta, E.T. (2021) Na overview of physiological specialization of the coffee leaf rust: New designation of pathotypes. **International Journal of Current Research**, 13:15479-15490.
- Zewde, T., Fininsa, C., Sakhuja, P. K., Ahmed, S. (2007). Association of white rot (*Sclerotium cepivorum*) of garlic with environmental factors and cultural practices in the north Shewa highlands of Ethiopia. **Crop Protection**, 26(10): 1566–1573.