



HUMBERSON ROCHA SILVA

**SISTEMA DE ALERTA E RELAÇÃO DE
VARIÁVEIS AMBIENTAIS COM O
PROGRESSO DA MANCHA DE PHOMA DO
CAFEEIRO**

**LAVRAS – MG
2018**

HUMBERSON ROCHA SILVA

**SISTEMA DE ALERTA E RELAÇÃO DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS
COM O PROGRESSO DA MANCHA DE PHOMA DO CAFEIEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitopatologia, área de concentração em Fitopatologia, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Edson Ampélio Pozza
Orientador

**LAVRAS - MG
2018**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Silva, Humberson Rocha.

Sistema de alerta e relação de variáveis ambientais com o progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro / Humberson Rocha Silva. – 2018.

161 p.: il.

Orientador: Edson Ampélio Pozza.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Sistemas de alerta. 2. Séries temporais. 3. Modelos de regressão. 4. Nutrição mineral de plantas. 5. Geoestatística. I. Pozza, Edson Ampélio. II. Título.

HUMBERSON ROCHA SILVA

**SISTEMA DE ALERTA E RELAÇÃO DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS
COM O PROGRESSO DA MANCHA DE PHOMA DO CAFEIEIRO**

**ALERT SYSTEM AND RELATIONSHIP OF ENVIRONMENTAL
VARIABLES WITH THE PROGRESS OF PHOMA LEAF SPOT IN
COFFEE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitopatologia, área de concentração em Fitopatologia, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 07 de março de 2018.

Dr. Hudson Teixeira	EPAMIG
Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves	UFLA
Prof. Dr. Marcelo Ângelo Cirillo	UFLA
Prof. Dr. Paulo Estevão de Souza	UFLA

Prof. Dr. Edson Ampélio Pozza
Orientador

**LAVRAS – MG
2018**

À minha mãe, Adilene Barbosa Silva,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo dom da vida, talentos e oportunidades concedidas.

À Universidade Estadual de Montes Claros pela formação em Agronomia.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Fitopatologia e ao Programa de Pós-Graduação em Fitopatologia, pela oportunidade de realização do mestrado e do doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelas concessões de bolsas de estudos na pós-graduação.

Ao professor Edson Ampélio Pozza, pela orientação no mestrado e no doutorado.

Aos irmãos em Cristo, Aurivan Soares e Marcelo Loran, pela amizade e apoio no desenvolvimento deste projeto em todas as etapas.

Ao colega Leônidas Belan, pela iniciativa de executar os trabalhos de campo, e aos amigos Silvio Calazans, Mauro Peraro e Cristian Piazza, pela assistência durante a condução dos experimentos.

A todos os professores do Departamento de Fitopatologia da UFLA.

Aos professores do Departamento de Estatística da UFLA, em especial, aos professores Marcelo Oliveira, Marcelo Cirillo, Thelma Sáfydi e Mario Vivanco, pelos conhecimentos compartilhados.

A todos os alunos do DFP, em especial, aos colegas da Epidemiologia e do controle químico.

A todos os funcionários da UFLA pelos serviços prestados.

Aos membros da banca, Hudson Teixeira, Marcelo Alves, Marcelo Cirillo, Paulo Estevão, e aos suplentes, Ramiro Rezende e Mirian Oliveira, pelo aceite do convite, correções e sugestões.

Aos membros da banca de qualificação, Marcelo Oliveira, Gilberto Coelho e Deila Magna, pelas sugestões.

À Universidade Vale do Rio Verde (UninCor) pela oportunidade de trabalho.

Aos colegas professores (a) da Unincor, pelo companheirismo.

Aos meus pais Selveriano e Adilene, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus irmãos Jeorge, Rodoglo e demais, pela amizade e auxílio nos momentos necessários.

Aos amigos Isac Pereira e Paulo Henriques, pelos ricos momentos de convivência.

Aos pastores Francelino, Luiz Ricardo e Vitor, pela amizade e ensinamentos. Aos irmãos da igreja, pela amizade e momentos de alegria compartilhados juntos.

A todos não mencionados e que contribuíram para a concretização deste sonho, meu muito obrigado!

*“Todos temos de fazer escolhas. O
difícil é conviver com elas.”*

Autor desconhecido

RESUMO GERAL

A descrição da curva de progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro com modelos estatísticos pode auxiliar a definir estratégias de controle, otimizando o uso de fungicidas e, conseqüentemente, reduzindo custos e impactos ambientais. Além disso, a compreensão da distribuição espacial dessa doença e das variáveis ambientais e do hospedeiro, também, podem ser integradas ao seu manejo. Assim, objetivou-se estudar a distribuição espaço temporal da Mancha de Phoma (*Phoma* spp.) do cafeeiro e sua relação com a altitude, variáveis meteorológicas, textura do solo e nutrientes minerais no solo e nas folhas, enfolhamento e produção das plantas. O ensaio foi conduzido por dois anos, de setembro de 2013 a agosto de 2015, com avaliações mensais numa lavoura de *Coffea arabica* L. Demarcou-se, na lavoura, uma malha de 7,65 ha com 85 pontos georreferenciados. As curvas de progresso da doença foram modeladas com técnicas de séries temporais, modelos de regressão não linear (MRNL) e regressão linear múltipla (MRLM), considerando a média geral dos 85 pontos em cada mês. Ainda foram construídas curvas de progresso para as altitudes médias de 1130,54, 1140,65, 1143,18 e 1143,40 m. Modelou-se a distribuição espacial da doença e variáveis ambientais e do hospedeiro correlacionadas a ela usando a geoestatística. As curvas de progresso da doença apresentaram comportamento variável dentro de cada ano e, também, entre os anos avaliados. Maiores altitudes proporcionaram maiores valores de intensidade da doença. Houve autocorrelação temporal apenas para as curvas de progresso da incidência e da severidade na altitude de 1143,18 m, com ajuste de modelos autorregressivos. Ajustou-se o MRNL de Gompertz, para as curvas de progresso da incidência e da severidade da doença, no período de fevereiro a junho de 2014. Foram ajustados 126 MRLM à curva de progresso da incidência, considerando a média geral dos 85 pontos, com auxílio das variáveis meteorológicas. Quatro desses pontos apresentaram alta precisão e acurácia, sendo possível estimar a doença com dois deles, com duas semanas de antecedência. Para as análises geoestatísticas, os dados mensais da incidência e severidade da doença foram convertidos em área abaixo da curva de progresso da incidência (AACPID) e da severidade (AACPSD). Houve maior AACPID e AACPSD nos últimos 12 meses da pesquisa. A altitude, o Ca e o P-rem, presentes no solo e o P e o N, presentes nas folhas, tiveram correlação positiva significativa com a AACPID. Já o K, o Cu e o Mn, presentes nas folhas, o enfolhamento e a produção correlacionaram-se negativamente com a AACPID. O modelo de semivariograma exponencial foi o mais apropriado, para modelar a autocorrelação espacial das variáveis analisadas, com exceção da altitude.

Palavras-chave: Sistemas de alerta. Séries temporais. Modelos de regressão. Nutrição mineral de plantas. Geoestatística.

GENERAL ABSTRACT

The study of the progress curve of the Phoma leaf spot of coffee using statistical models can help to define control strategies to reduce fungicide applications and, consequently, minimize costs and environmental impacts. In addition, the understanding of the spatial distribution of this disease and of the environmental and host variables too can be integrated into its management. So, the objective of this study was to evaluate the temporal and spatial distribution of Phoma leaf spot of coffee (*Phoma* spp.), its relationship with different elevations, meteorological variables, soil texture and mineral nutrients in soil and leaves, plant foliage and production. The experiment was conducted for two years, from September 2013 to August 2015, with monthly evaluations in a plantation of *Coffea arabica* L. A mesh of 7.65 ha with 85 georeferenced points was used. The disease progress curves were modeled using time series techniques, nonlinear regression models (NLRM) and multiple linear regression models (MLRM), considering the overall average of 85 points in each month. In addition, progress curves were constructed for the mean elevations of 1130.54, 1140.65, 1143.18 and 1143.40 m. The spatial distribution of the disease and environmental and host variables correlated with this was modeled with geostatistics techniques. The progress curves of the disease presented a variable behavior within each year, as well as between the evaluated years. Higher elevations provided higher values of disease intensity. Only the incidence and severity progress curves at elevation of 1143.18 m showed autocorrelation over time, with adjustment of autoregressive models. The Gompertz NLRM was adjusted for progress curves of disease incidence and severity from February to June 2014. Were adjusted 126 MLRM to the incidence progress curve, considering the overall average of the 85 points, using the meteorological variables. Four of these presented high precision and accuracy, being possible to estimate the disease with two of them, two weeks in advance. For geostatistical analyzes, monthly data of disease incidence and severity were converted into area under disease progress curve (AUDPC). There was higher AUDPC to incidence and severity in the last 12 months of the study. The elevation, P-rem and Ca present in the soil, and the P and N present in the leaves had a significant positive correlation with incidence in the form of AUDPC. However, K, Cu and Mn present in the leaves, plant foliage and production, correlated negatively with incidence in the form of AUDPC. The exponential model of semivariogram was the most appropriate to model the spatial autocorrelation of the analyzed variables, except for the elevation.

Keywords: Warning systems. Time series. Regression models. Mineral nutrition of plants. Geostatistics.

LISTA DE FIGURAS

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1

- Fig. 1.** Imagem de satélite da área experimental. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG, 2014 (Google Earth, 2014), e malha de pontos georreferenciados. S1 e S4 (em azul) indicam, respectivamente, as posições das estações automáticas modelo Datalogger CR1000 e CR10X, marca Campbell Scientific Inc.®, instaladas na área.....54
- Fig. 2.** Curvas de progresso da (A) incidência e da (B) severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro (média dos 85 pontos georreferenciados) registradas na área experimental de setembro de 2013 a agosto de 2015. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG. Os meses em destaque (fevereiro a junho de 214) correspondem ao período de progresso regular da doença.....63
- Fig. 3.** Curvas de progresso da (A) incidência e da (B) severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro nas diferentes altitudes (1143,40, 1143,18, 1140,65 e 1130,54 m), registradas na área experimental de setembro de 2013 a agosto de 2015. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG.....64
- Fig. 4.** Curvas de progresso da incidência da Mancha de Phoma nas altitudes de 1143,40 e 1130,54 m, e valores das médias semanais, defasadas em duas semanas, para a temperatura média do ar, velocidade e direção dos ventos, registrados com as estações CR1000 e CR10X.....68

Fig. 5. Correlogramas das funções de autocorrelação (FAC) das curvas de progresso da incidência (A) e da severidade (B) da Mancha de Phoma do cafeeiro à 1143,18 m de altitude.....	70
Fig. 6. Curvas de progresso da incidência (A) e da severidade (B) da Mancha de Phoma do cafeeiro à 1143,18 m de altitude e previsões obtidas com o uso dos modelos auto-regressivos ajustados às séries temporais.	74
Fig. 7. Representação do ajuste do modelo de Gompertz aos dados das curvas de progresso da incidência (A) e da severidade (B) da Mancha de Phoma do cafeeiro para o período de fevereiro (mês 2) à junho (mês 6) de 2014.	77
Fig. 8. Representação do ajuste do modelo de regressão linear simples aos dados originais das curvas de progresso da incidência (A) e da severidade (B) da Mancha de Phoma do cafeeiro para o período de fevereiro (mês 2) à junho (mês 6) de 2014.....	79

ARTIGO 2

Fig. 1. Imagem de satélite da área experimental e malha de pontos georreferenciados. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG, 2014 (Google Earth, 2014). S1 (em azul) indica o local de instalação da estação automática modelo Datalogger CR1000, marca Campbell Scientific Inc.®	94
Fig. 2. Curva de progresso da incidência da Mancha de Phoma do cafeeiro para a média geral dos 85 pontos georreferenciados no período de setembro de 2013 a agosto de 2015, em área de 7,65 ha.	100

Fig. 3. Curva de progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro na lavoura (média dos 85 pontos georreferenciados) e estimativas obtidas com os Modelos 3 e 4.....	112
Fig. 4. Curva de progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro no <i>subgride</i> (parcela composta por 121 plantas) e estimativas obtidas com os Modelos 3 e 4.	113

ARTIGO 3

Fig. 1. Imagem de satélite da área experimental. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG, 2014 (Google Earth, 2014), e malha de pontos georreferenciados. S1 (em azul) indica o local de instalação da estação automática modelo Datalogger CR1000, marca Campbell Scientific Inc.®	130
Fig. 2. Curvas de progresso da (a) incidência e da (a) severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro, e (c) médias da temperatura do ar (°C), da direção dos ventos (em graus), e precipitação acumulada (mm), 30 dias anteriores a cada avaliação mensal da doença.....	140
Fig. 3. Semivariogramas ajustados para as variáveis (a) Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença (AACPID) 2013/14; (b) AACPID 2014/15; (c) Altitude (m); (d) Ca (cmol.dm ⁻³) e (e) P-rem (mg.L ⁻¹) no solo 2014/15; (f) K na folha 2014/15 (dag.kg ⁻¹); (g) e (h) Cu e Mn na folha 2014/15 (mg.kg ⁻¹) e (i) Produção 2013/14 (kg.planta ⁻¹).	144
Fig. 4. (a) ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença’ (AACPID) 2013/14; (b) AACPID 2014/15; (c) Altitude (m); (d) e (e) Concentração de Ca (cmol.dm ⁻³) e P-rem (mg.L ⁻¹) no solo 2014/15.....	147

Fig. 5. (a) 'Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença' (AACPID) 2013/14; (b) AACPID 2014/15; (c) Teores de K na folha 2014/15 (dag.kg^{-1}); (d) e (e) Teores de Cu e Mn na folha 2014/15 (mg.kg^{-1}) e (f) Produção de frutos 2013/14 (kg.planta^{-1})..... 149

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1

- Tabela 1.** Altitude média dos pontos georreferenciados utilizados para construir cada curva de progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro, levando-se em conta o desnível da lavoura.56
- Tabela 2.** Médias semanais da temperatura média do ar, velocidade e direção dos ventos, defasadas duas semanas em relação às avaliações da doença, registradas na maior e menor altitude da lavoura com auxílio das estações automáticas CR1000 (altitude de 1145,04 m) e CR10X (altitude de 1130,89 m). 66
- Tabela 3.** Resultados da função de autocorrelação (FAC), autocorrelação parcial (FACP) e estatística $Q(k)$ para as defasagens significativas ($p \leq 0,05$) das curvas de progresso da incidência e da severidade à 1143,18 m de altitude. 69
- Tabela 4.** Ajuste dos modelos AR(1) e MA(1) aos dados da curva de progresso da incidência à 1143,18 m de altitude, e valores do indicador de qualidade de ajuste dos modelos (critério de Akaike - AIC). 71
- Tabela 5.** Ajuste dos modelos AR(1) e MA (1) aos dados da curva de progresso da severidade à 1143,18 m de altitude, e valores do indicador de qualidade de ajuste dos modelo (critério de Akaike). 71
- Tabela 6.** Valores mensais das porcentagens da incidência e da severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro na altitude de 1143,18 m, e valores das previsões obtidos por meio dos modelos auto-regressivos ajustados às séries temporais. 73

Tabela 7.	Modelos de regressão linear e não linear ajustados aos dados da incidência mensal (fevereiro a junho de 2014) da Mancha de Phoma do cafeeiro, e indicadores de qualidade do ajuste. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG.	76
Tabela 8.	Modelos de regressão linear e não linear ajustados aos dados da severidade mensal (fevereiro a junho de 2014) da Mancha de Phoma do cafeeiro, e indicadores de qualidade do ajuste. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG.	76
Tabela 9.	Ajuste de modelos de regressão linear simples aos dados originais e linearizados da incidência de Mancha de Phoma do cafeeiro para estimar as taxas de progresso da doença.....	78
Tabela 10.	Ajuste de modelos de regressão linear simples aos dados originais e linearizados da severidade de Mancha de Phoma do cafeeiro para estimar as taxas de progresso da doença.....	78

ARTIGO 2

Tabela 1.	Variáveis ambientais criadas com auxílio da estação modelo Datalogger CR1000, marca Campbell Scientific Inc. [®] , instalada na área experimental.	96
Tabela 2.	Variáveis do ambiente com correlação de Person significativa ($p \leq 0,05$) com os dados mensais de incidência da Mancha de Phoma do cafeeiro (média dos 85 pontos georreferenciados), considerando como método de defasagem os dias imediatamente anteriores às avaliações da doença, identificados por 7A, 14A, 21A, 28A, 42A e 56A. Os valores	

	das correlações e o tipo de correlação (positiva ou negativa) são apresentados entre parênteses.	102
Tabela 3.	Variáveis do ambiente com correlação de Person significativa ($p \leq 0,05$) com os dados mensais de incidência da Mancha de Phoma do cafeeiro (média dos 85 pontos georreferenciados), considerando as defasagens de 1SD, 2SD, 3SD, 5SD e 7SD. Os valores das correlações e o tipo de correlação (positiva ou negativa) são apresentados entre parênteses.....	103
Tabela 4.	Valores observados para as variáveis T15-20med (2SD), T25-30med (2SD), T25-30med (28A), UR70min (3SD), UR80max (3SD), NDMFmax (3SD) e NDMFmax (28A), geradas com auxílio dos sensores instalados na estação automática Datalogger CR1000 (altitude de 1145,04 m).	105
Tabela 5.	Variáveis do ambiente e períodos de defasagens usados na composição dos quatro MRLM de melhor desempenho para modelar a Mancha de Phoma do cafeeiro.	106
Tabela 6.	Estimativas dos parâmetros dos Modelos 1, 2 e 3, e valores de erro padrão e significância dos coeficientes de regressão parciais segundo o teste t ($p \leq 0,05$).	108
Tabela 7.	Valores mensais de incidência da Mancha de Phoma do cafeeiro na lavoura (média dos 85 pontos georreferenciados) e no <i>subgride</i> (parcela de 121 plantas), e valores de incidência obtidos por meio dos Modelos 3 e 4.....	111
 ARTIGO 3		
Tabela 1.	Corretivos e fertilizantes utilizados na área experimental da pesquisa. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG.	134

Tabela 2.	Valores médios da ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência’ (AACPID) e da ‘severidade’ (AACPSD) da doença, ‘Área Abaixo da Curva de Progresso do Enfolhamento’ (AACPE) e produção de frutos (kg.planta ⁻¹) nos períodos de 2013/14 e 2014/15.....	140
Tabela 3.	Resultados das análises de correlação dos valores da incidência mensal e ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença’ (AACPID) 2013/14 e 2014/15 com as variáveis ambientais e do hospedeiro.....	142
Tabela 4.	Valores de mínimo, média e máximo observados na lavoura para os teores foliares de P (2013/14) e N (2014/15) e para a ‘Área Abaixo da Curva de Progresso do Enfolhamento’ (AACPE) em 2013/14.	143
Tabela 5.	Modelos selecionados, estimativas dos parâmetros dos semivariogramas isotrópicos ajustados e grau de dependência espacial (GDE) para a ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença’ (AACPID) e para as variáveis ambientais e do hospedeiro em 2013/14 e 2014/15.....	145

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	19
1 INTRODUÇÃO GERAL	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 A Mancha de Phoma do cafeeiro e sua relação com variáveis climáticas	23
2.2 Sistemas de alerta para controle de doenças de plantas	26
2.3 Técnicas estatísticas para análises temporais de doenças de plantas	29
2.4 Nutrição mineral no manejo de doenças de plantas	34
2.5 A geoestatística como ferramenta no manejo de doenças de plantas	36
REFERÊNCIAS	41
SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	49
ARTIGO 1 – SÉRIES TEMPORAIS E PROGRESSO TEMPORAL DA MANCHA DE PHOMA DO CAFEIEIRO EM DIFERENTES ALTITUDES	49
ARTIGO 2 – MODELOS DE REGRESSÃO PARA AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO DO CONTROLE DA MANCHA DE PHOMA DO CAFEIEIRO BASEADO EM VARIÁVEIS AMBIENTAIS	89
ARTIGO 3 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA MANCHA DE PHOMA DO CAFEIEIRO E SUA RELAÇÃO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DO HOSPEDEIRO	125

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil destaca-se no cenário internacional de comercialização de café, sendo o maior produtor e exportador mundial, enquanto os principais importadores são a União Europeia (UE) e os Estados Unidos (EUA) (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2017). Considerando apenas a espécie *Coffea arabica* L., foram produzidas, no território brasileiro, mais de 43 milhões de sacas, beneficiadas de 60 kg em área plantada num total de 1,76 milhão de hectares, no ano de 2016 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2017). Mesmo com essa produção, é importante destacar a suscetibilidade dos principais cultivares plantados às diversas doenças, dentre as quais se destaca a Mancha de Phoma (*Phoma* spp.). Quando suas lesões atingem os bordos das folhas, elas se encurvam, podendo apresentar rachaduras, reduzindo a área fotossinteticamente ativa. Nos ramos doentes, observam-se lesões deprimidas escuras, capazes de envolver todo o seu diâmetro e, assim, causar a sua morte. A doença ainda pode atingir as rosetas florais, necrosando, de forma indireta, flores e frutos, reduzindo a produtividade do cafeeiro (POZZA; CARVALHO; CHALFOUN, 2010).

A penetração de *Phoma* spp. é facilitada por danos mecânicos, nos tecidos da planta, produzidos por insetos ou por atrito entre folhas, em decorrência dos ventos intensos no período frio (CARVALHO et al., 2013). Lavouras situadas em maiores altitudes são mais propensas à ocorrência de ventos frios, por estarem mais expostas, favorecendo o progresso espaço temporal da doença. Entretanto essa informação carece de dados de pesquisa, pois a hipótese tem sido afirmada sem a comprovação científica da variação da altitude, sua influência nas variáveis ambientais e na intensidade da doença.

Além disso, a Mancha de Phoma não possui padrão de ocorrência, ao longo da estação de crescimento do cafeeiro (SANTOS et al., 2014), dificultando o manejo. Dessa forma, muitos produtores fazem a aplicação de fungicidas, de forma preventiva, utilizando calendários fixos de pulverização para tentar impedir o progresso da doença. Isso torna o controle oneroso, pois, muitas vezes, são feitas aplicações desnecessárias, além de gerar impactos negativos ao ambiente (GARCIA, 1999). Nesse contexto, modelos estatísticos podem ser usados, para modelar curvas de progresso e, assim, serem utilizados para alerta de períodos favoráveis à ocorrência de doenças. Com isso, é possível realizar a pulverização de fungicidas apenas sob condições ambientais favoráveis à doença, reduzindo custos e minimizando impactos ambientais negativos (CAMPBELL; MADDEN, 1990). Dentre as diversas classes de modelos estatísticos disponíveis, destacam-se as séries temporais, os modelos de regressão não linear e os modelos de regressão linear múltipla.

A aplicação de técnicas de séries temporais está condicionada à existência de autocorrelação temporal dos resíduos das observações de interesse (MORETTIN; TOLOI, 2006). Nas séries temporais, as estimativas dos valores futuros de uma variável de interesse são obtidas, em função da própria variável, em instante de tempo diferente, não necessitando de outras variáveis auxiliares. Nesse sentido, os modelos de séries temporais podem ser usados, para modelar o progresso temporal da Mancha de Phoma do cafeeiro, caso haja dependência entre as avaliações da doença nas diferentes datas.

Entretanto, se a pressuposição de independência for atendida, é possível ajustar modelos de regressão não linear e também modelos de regressão linear múltipla às curvas de progresso (CHARNET et al., 2008). Os modelos de regressão não linear são apropriados, para descrever processos como crescimento, nascimento, mortalidade, abundância, competição e produção, pois essas variáveis raramente são relacionadas linearmente às variáveis explicativas

(SCHABENBERGER; PIERCE, 2002). Os modelos de regressão linear múltipla, também, podem ser usados para modelar curvas de progresso de doenças e, nesse caso, as estimativas de intensidade da doença são feitas com o uso de variáveis auxiliares relacionadas à sua ocorrência. Para a Mancha de Phoma do cafeeiro, temperaturas entre 15 e 20 °C, combinadas com precipitação média diária superior a 4 mm, são condições altamente favoráveis a essa doença (LORENZETTI et al., 2015; POZZA; ALVES, 2008; SANTOS et al., 2014). Essas variáveis são importantes para o ciclo do patógeno, porém outras também merecem atenção e devem ser estudadas.

O manejo da fertilidade dos solos e da nutrição mineral das plantas, de igual modo, pode contribuir na redução da intensidade das doenças de plantas (HUBER; ROMHELD; WEINMANN, 2012; TAIZ; ZEIGER, 2013). Entretanto os nutrientes não estão presentes nos solos de forma homogênea e, de acordo com as necessidades da cultura, dada a variabilidade natural do solo (SILVA et al., 2003). Essa condição afeta não somente a nutrição das plantas, mas também as relações planta-patógeno. Dessa forma, é necessário compreender o aspecto da distribuição espacial dos nutrientes, nem sempre homogênea na área plantada, com a finalidade de manejar a fertilidade, para aumentar a produtividade e, ao mesmo tempo, tornar as plantas mais resistentes. Nesse sentido, a geoestatística pode ser utilizada para modelar a distribuição espacial de variáveis ambientais e, assim, auxiliar a definir as melhores estratégias de manejo para reduzir problemas fitossanitários.

Assim, o objetivo deste trabalho foi modelar a distribuição temporal e espacial da Mancha de Phoma, em cafeeiro sob manejo convencional, usando técnicas de séries temporais, modelos de regressão não linear, modelos de regressão linear múltipla e análises geoestatísticas, com a finalidade de otimizar o uso de insumos, reduzir custos e impactos ambientais negativos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A Mancha de Phoma do cafeeiro e sua relação com variáveis climáticas

O primeiro relato da Mancha de Phoma do cafeeiro ocorreu na Costa Rica, associada ao fungo *Phoma costarricensis* Ech. (ECHANDI, 1957). No Brasil, além de *P. costarricensis*, outras espécies do gênero *Phoma* estão associadas a essa doença, sendo *P. tarda* (R.B. Stewart) H. Verm a mais frequente no país. Logo a melhor designação para os agentes etiológicos associados a essa doença, no Brasil, até o momento, é *Phoma* spp. (SALGADO; PFENNING, 2000). Em 2007, foi realizado o primeiro relato da ocorrência de *Didymella* sp., fase sexuada de *P. tarda*, em cafeeiros no Brasil (SALGADO et al., 2007). A relevância dessa informação está relacionada à geração de variabilidade genética do patógeno, capaz de interferir nas estratégias de manejo a serem adotadas no campo.

Essa doença apresenta grande importância, para a cultura do café, pois ocorre desde a fase de formação de mudas no viveiro até a produção da cultura, levando a perdas entre 15 e 43% na produção. Isso porque a doença causa danos como seca de ponteiros, necroses em rosetas florais, mumificação de chumbinho e manchas foliares (POZZA; CARVALHO; CHALFOUN, 2010).

Echandi (1957) verificou, em ensaios de laboratório e no campo, a necessidade de ferimentos, para o progresso da doença, os quais são provocados sob condições naturais por insetos ou atrito entre folhas, de acordo com o autor. Além disso, foi observado maior crescimento das lesões em folhas jovens em comparação com folhas velhas. Firman (1965), também, verificou esse comportamento em folhas jovens feridas, artificialmente, antes da inoculação do patógeno. Nas folhas velhas, mesmo com ferimentos, os sintomas não foram observados. Em estudos de microscopia eletrônica de varredura, Lorenzetti et al.

(2015) observaram eventos iniciais de estabelecimento das relações patógeno hospedeiro, tais como a separação da cutícula a partir do tecido foliar. Em outros patossistemas, espécies do gênero *Phoma* possuem a habilidade de penetrar seus hospedeiros tanto de forma direta, rompendo a epiderme celular (GRAAF et al., 2002), quanto por ferimentos (ZUCKER; CATARA, 1985) e aberturas naturais (ROUSTAEI et al., 2000).

Fatores climáticos podem favorecer o surgimento da Mancha de *Phoma* do cafeeiro. Na Colômbia, inicialmente, a doença foi observada, nas regiões com altitudes mais elevadas, entre 1400 e 1900 m, com temperaturas médias variando entre 20 e 17 °C, respectivamente. Ensaios realizados sob condições controladas indicaram maior desenvolvimento da doença sob a temperatura de 22 °C e menor quantidade de luz diária, 3 horas (GÓMEZ; BUSTAMANTE, 1977). Já no Brasil, as primeiras constatações foram realizadas em cafezais localizados em altitudes acima de 900 m, no Estado do Espírito Santo e em regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, no estado de Minas Gerais. No entanto a doença tem sido encontrada em outras regiões, em lavouras expostas a ventos fortes e frios, com as faces voltadas para o Sul, Sudeste e Leste (CARVALHO; CHALFOUN; CUNHA, 2013). Apesar da relevância dessa informação, ela é genérica, pois não indica, com precisão, os valores de temperatura, velocidade e direção dos ventos associados ao progresso da doença. Além disso, ainda não foram realizados estudos científicos esclarecendo como a altitude está associada à Mancha de *Phoma* do cafeeiro.

Santos et al. (2014) estudaram a Mancha de *Phoma* do cafeeiro sob sistema de cultivo irrigado, registrando os maiores picos da doença, nos períodos com temperaturas entre 16 e 19 °C, nos meses de agosto de 2010 (11%) e junho de 2011 (13,7%). Entretanto, nesses meses, assim como nos antecedentes aos picos, houve baixa precipitação mensal, com valores de 0 mm, em agosto de 2010 e 14 mm, para o mês anterior, enquanto, em junho de 2011, houve

precipitação de 35 mm e, no mês anterior, 10 mm. Ou seja, os autores observaram as maiores incidências nos períodos com registros de menores valores de chuva, durante o período de condução da pesquisa, além de valores de umidade relativa do ar média não atingindo 75%. Resultados semelhantes foram obtidos por Vasco (2012), o qual também estudou esse mesmo patossistema sob cultivo irrigado com diferentes densidades de plantio, encontrando o maior pico da doença, no mês de julho de 2010, com incidência média de 21,43%. Nesse mês, a temperatura média do ar foi de 17,84 °C, sendo a precipitação mensal registrada uma das menores, durante o período da pesquisa, 19 mm, enquanto, no mês anterior, o valor foi de 8 mm. Já a umidade relativa do ar, média, foi próxima de 75%. Segundo Pozza e Alves (2008), em seu estudo sobre o impacto de mudanças climáticas nas doenças do cafeeiro, a doença ocorre em regiões com temperaturas entre 16 e 20 °C, combinadas com precipitação média diária superior a 4 mm. De acordo com Zambolim (1999), valores de umidade relativa do ar acima de 90%, além de chuvas constantes de baixa intensidade, são condições favoráveis ao progresso dessa doença. Lorenzetti et al. (2015), estudando o monociclo da Mancha de Phoma em mudas de cafeeiro, em função da temperatura e do molhamento foliar, observaram o maior progresso da doença, na faixa de temperatura entre 15 e 20 °C, associada a períodos de molhamento foliar acima de 36 horas, com máxima intensidade observada para 48h, a maior duração de molhamento foliar testada no ensaio.

Assim, observa-se existência de consenso entre os pesquisadores sobre a faixa de temperatura ideal para o progresso da Mancha de Phoma, no Brasil, entre 15 e 20 °C (LIMA, 2009; LORENZETTI et al., 2015; POZZA; ALVES, 2008; POZZA; SALGADO; PFENNING, 2003; SALGADO; POZZA; PFENNING, 2002; SANTOS et al., 2014; VASCO, 2012). Todavia as informações sobre o molhamento foliar são pouco consistentes, havendo divergências entre os autores. Além disso, nenhum deles informa como a

duração dessas variáveis no ambiente pode interferir no progresso da doença de forma conjunta.

A influência das temperaturas baixas pode estar relacionada ao crescimento dos tubos germinativos dos conídios. Lorenzetti et al. (2015) verificaram maior crescimento dos tubos germinativos de *Phoma tarda* nas temperaturas entre 15 e 20 °C. Com isso, há maior possibilidade de o fungo conseguir encontrar local de penetração, pois percorre maiores distâncias e maiores áreas, em busca de local de entrada, para, dessa forma, estabelecer relações parasitárias bem-sucedidas. O molhamento foliar é outra variável essencial ao crescimento e desenvolvimento do patógeno, e a ausência de molhamento, nas primeiras etapas do seu ciclo de vida, pode comprometer a germinação e o crescimento do tubo germinativo dos conídios, mesmo sob condições ideais de temperatura. Assim sendo, a ocorrência de água livre na superfície foliar é responsável por menor transpiração da cultura e potencial de água próximo de zero, proporcionando maior disponibilidade de água interna para o patógeno, favorecendo a colonização (HUBER; GILLESPIE, 1992).

2.2 Sistemas de alerta para controle de doenças de plantas

Sistemas de alerta fitossanitários são ferramentas de suporte à decisão para auxiliar os agricultores a definirem os melhores momentos da aplicação de técnicas para controlar doenças de plantas (GLEASON et al., 2008). Dessa forma, há redução da frequência de pulverizações, geralmente fungicidas, pois os riscos de ocorrência de epidemias são continuamente monitorados, e as aplicações de produtos para manejo das doenças são realizadas apenas sob condições ambientais favoráveis ao seu progresso (CAMPBELL; MADDEN, 1990). Portanto pulverizações desnecessárias não são efetuadas, otimizando o uso dos insumos e do tempo (GILLESPIE; SENTELHAS, 2008). Além disso,

problemas relacionados à contaminação de trabalhadores responsáveis por manusear diretamente os produtos tóxicos e, também, problemas ambientais são minimizados (GARCIA, 1999).

Os sistemas de alerta utilizam-se de informações do ambiente, da cultura ou do patógeno para predizer os valores futuros de intensidades de doenças (CAMPBELL; MADDEN, 1990). Zadoks (1984) prefere o termo sistema de aviso ou alerta a sistema de previsão ou preditor, porque os sistemas utilizam informações sobre infecções ou condições ambientais observadas no passado. De acordo com Madden e Ellis (1988), todos os sistemas “preveem” o aumento geral da doença, utilizando informações do seu ciclo, logo Campbell e Madden (1990) concordam com o uso de qualquer um desses termos.

Para sucesso na implementação de um sistema de alerta fitossanitário, é necessário atender os critérios descritos abaixo (CAMPBELL; MADDEN, 1990):

- a) Confiabilidade: o sistema de alerta deve ser desenvolvido com dados biológicos e do ambiente. Além disso, precisa ser validado no nível de operação pretendido e na região onde será implementado;
- b) Simplicidade: quanto mais simples for o sistema maiores são as chances de ser aceito por produtores;
- c) Importância: o sistema de alerta deve ser construído, para doenças com ocorrência esporádica, mas de relevância para a cultura;
- d) Utilidade: o sistema de alerta deve ser desenvolvido, para doenças passíveis de serem detectadas e para as quais existam medidas de controle eficazes;
- e) Disponibilidade: o monitoramento do ambiente, do patógeno ou da doença deve ser fornecido por meio de tecnologias apropriadas e acessíveis;

- f) Aplicabilidade multiuso: de preferência, o sistema deve servir para monitorar várias doenças;
- g) Relação custo benefício: deve ser disponível a preços razoáveis, considerando as potenciais economias, nos custos de gestão e redução das perdas de culturas, em razão das doenças.

De acordo com os dados utilizados para construir os sistemas de alerta, esses podem ser classificados em empíricos e fundamentais. Os modelos empíricos são desenvolvidos, a partir das relações estatísticas observadas entre variáveis ambientais e doenças, enquanto os modelos fundamentais são aqueles obtidos, a partir de experimentos laboratoriais, de estufa ou de campo, com possibilidade de controle das variáveis ambientais (KRAUSE; MASSIE, 1975). Existem ainda outras abordagens para classificar os sistemas de alerta. Essas classificações levam em conta se a informação da cultura, da doença, do patógeno ou do ambiente são usadas para fazer as previsões; se estas são realizadas em pré ou pós-plantio; e se características específicas das epidemias, como inóculo primário, secundário ou taxa de progresso da doença, servem de base para as previsões (CAMPBELL; MADDEN, 1990).

Vários sistemas de alerta utilizam-se das informações do ambiente para estimar os valores futuros de intensidade das doenças, porque o ambiente pode determinar a ocorrência ou não de epidemias (AGRIOS, 2004). A ocorrência do processo doença está condicionada à duração mínima de condições ambientais favoráveis ao estabelecimento das relações parasitárias do patógeno com o seu hospedeiro, conhecidas como período crítico. Caso este não seja atendido, fases do ciclo de vida do patógeno como germinação, infecção e colonização podem ser comprometidas. Dentre essas variáveis, destacam-se a temperatura do ar e a umidade do ambiente, caracterizadas por meio da umidade relativa do ar e da duração do molhamento foliar, originado por chuva, orvalho, nevoeiro ou

irrigação. Essas variáveis estão intimamente associadas ao desenvolvimento de doenças de plantas (HUBER; GILLESPIE, 1992) e, por isso, são frequentemente usadas nas estimativas de valores futuros das doenças (GILLESPIE; SENTELHAS, 2008).

Muitos sistemas de alerta utilizam-se de modelos para elaborar estratégias de controle de doenças. Modelos são simplificações da realidade e tentativas de resumir os principais processos visando testar hipóteses e verificar sua coerência (MAANEN; XU, 2003). Qualquer modelo capaz de prever o início ou o desenvolvimento futuro de uma doença, a partir de informações do hospedeiro, do patógeno ou do ambiente, pode ser considerado um modelo de previsão de doenças. Este conceito é amplo o suficiente para nele serem incluídos desde sofisticados programas de computador até simples regras relacionando, por exemplo, a infecção com horas de molhamento foliar (BERGAMIN FILHO; AMORIM, 1995).

Tradicionalmente, os sistemas de alerta, para doenças do cafeeiro, baseiam-se no uso de modelos de regressão (KUSHALAPPA; AKUTSU; LUDWIG, 1983; PINTO et al., 2002). Entretanto outras abordagens como técnicas de séries temporais, redes neurais, rede bayesiana, árvore de decisão, entre outras vêm ganhando a atenção de pesquisadores. Essas novas ferramentas, em conjunto com as técnicas tradicionais, podem auxiliar a compreender a dinâmica do processo doença, proporcionando melhores resultados ao controle das enfermidades.

2.3 Técnicas estatísticas para análises temporais de doenças de plantas

Conhecer a dinâmica das doenças de plantas, ao longo do tempo, pode auxiliar a definir estratégias de controle, para reduzir as aplicações de fungicidas e, conseqüentemente, minimizar os custos e impactos ambientais negativos

(CAMPBELL; MADDEN, 1990). A Mancha de Phoma do cafeeiro não tem padrão de ocorrência, ao longo da estação de crescimento da cultura (SANTOS et al., 2014), dificultando o manejo. Nesse contexto, os modelos estatísticos podem ser úteis para descrever a dinâmica de doenças e, assim, serem utilizados como sistemas de alerta para auxiliar na tomada de decisão quanto ao controle. Dentre as várias técnicas desenvolvidas, para modelagem de dados, destacam-se as análises de séries temporais, os modelos de regressão não linear (MRNL) e os modelos de regressão linear múltipla (MRLM).

Em séries temporais, a curva de progresso da doença é designada por Z e seu valor, no momento t , pode ser escrito como Z_t ($t=1, 2, \dots, n$). Essas observações ($Z_t, t=1, 2, \dots, n$) podem ser decompostas no modelo aditivo: $Z_t = T_t + S_t + a_t$, em que T_t e S_t representam a tendência e a sazonalidade, respectivamente, enquanto a_t é uma componente aleatória de média zero e variância constante. A tendência pode ser entendida como o aumento ou a redução gradual das observações ao longo do tempo. A sazonalidade representa flutuações ocorridas em períodos menores ou iguais a doze meses. Já a componente a_t representa os resíduos dos dados e, se ela for correlacionada, os dados do momento presente, isto é, a incidência ou severidade influenciam o comportamento dos dados futuros (ou passados) em t instantes de tempo (MORETTIN; TOLOI, 2006).

Quando a componente a_t apresenta autocorrelação significativa, esses modelos podem ser úteis, para descrever a dinâmica de doenças, pois consideram ausência de independência dos erros associados aos dados, visto que os mesmos indivíduos são avaliados, ao longo do tempo, possibilitando, assim, melhores ajustes (BOX; JENKINS; REINSEL, 1994). Técnicas de séries temporais são especialmente empregadas na área da Economia. Seu uso, porém vem sendo difundido na Fitopatologia para compreender a dinâmica de doenças de plantas (HOLB, 2008; SCHERM; YANG, 1995; SOUZA et al., 2015;

WORKNEH; RUSH, 2002; XU; BUTT; RIDOUT, 1995; YANG; ZENG, 1992; ZAUZA, 2007).

Souza et al. (2015) utilizaram modelos de regressão não linear com erros não independentes, ou seja, gerados por processos autorregressivos (AR) e de médias móveis (MA), ARMA, para estudar a dinâmica da incidência e da severidade da Cercosporiose do cafeeiro. De acordo com os autores, os modelos ajustados foram apropriados, para descrever as curvas de progresso, com valores médios de R^2 de 79,03 e 75,42% para a incidência e para a severidade, respectivamente. De acordo com os autores, com o uso de técnicas de séries temporais na modelagem, é possível avaliar o mesmo indivíduo, isto é, a mesma planta, ao longo do tempo, situação pertinente para o estudo de doenças de natureza poliética.

Yang e Zeng (1992) estudaram padrões de distribuição espaço temporal da Ferrugem amarela do trigo, causada por *Puccinia striiformis* Westend. Nas análises temporais, os autores aplicaram técnicas de séries temporais, para compreender a dinâmica da doença, em cinco regiões estratégicas, localizadas ao Norte da China. Ajustou-se um modelo ARIMA (3, 1, 0) aos dados da série temporal da epidemia, na região fonte de inóculo, enquanto, nas quatro regiões de dispersão, ajustou-se um modelo ARIMA (2, 2, 0). De acordo com os autores, os valores da epidemia da Ferrugem amarela em determinado ano têm relação com as epidemias ocorridas nos últimos quatro anos.

Zauza (2007) usou técnicas de séries temporais, para modelar a curva de progresso da incidência da Ferrugem (*Puccinia psidii* Winter), em plantas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden obtidas, a partir de mudas seminais e mudas clonadas, plantadas em esquema de jardim clonal e idade de um ano no início da pesquisa. No material seminal, a alta suscetibilidade e a grande variabilidade, na intensidade da doença, inviabilizaram as análises de séries temporais. Já no material clonal de *E. grandis*, comprovou-se o efeito sazonal anual da incidência

da doença, com o ajuste de modelos autorregressivos com sazonalidade anual, considerando a eliminação de até três das últimas avaliações mensais, para realizar as previsões. De acordo com o autor, as estimativas, considerando até três meses, foram viáveis mediante a utilização do modelo considerado.

Entretanto, quando os resíduos dos dados são independentes, ou seja, não correlacionados, não se justifica o uso de modelos de séries temporais (MORETTIN; TOLOI, 2006). Nessas circunstâncias, a intensidade de uma doença observada em determinado instante não apresenta nenhuma relação com sua ocorrência passada ou futura para o intervalo de tempo considerado. Assim, MRNL são uma alternativa para modelar curvas de progresso com esse padrão, pois a premissa de independência dos resíduos foi atendida.

Cada vez mais observa-se consenso entre os pesquisadores, no uso de funções não lineares, para explicar as relações entre variáveis biológicas. Processos como crescimento, nascimento, mortalidade, abundância, competição e produção raramente são relacionadas linearmente às variáveis explicativas (SCHABENBERGER; PIERCE, 2002), embora a função linear possa ser utilizada, para estimar a taxa de progresso da doença, enquanto os modelos não lineares são mais promissores para modelar as curvas de progresso.

Nos modelos de regressão linear, a variável resposta é expressa como função linear dos coeficientes de regressão, ou seja, cada termo no modelo é aditivo e contém apenas um parâmetro para multiplicá-lo. Ainda assim, um modelo é classificado como não linear se ao menos uma das derivadas parciais da função não linear em relação aos parâmetros depende de, no mínimo, um dos parâmetros do modelo (RATKOWSKY, 1990). Nesse caso, os ajustes são feitos por métodos de aproximações sucessivas.

Os modelos não lineares têm a vantagem de possuir parâmetros com interpretações biológicas, como o valor máximo da característica em questão e a velocidade do crescimento. Porém, diante da possibilidade de diferentes

modelos, torna-se relevante a comparação da qualidade do seu ajuste (REIS et al., 2014). Na ciência da epidemiologia de doenças de plantas, os principais MRNL usados, para modelar curvas de progresso de doenças de plantas, são o exponencial, o monomolecular, o logístico e o de Gompertz (CAMPBELL; MADDEN, 1990). Vanderplank (1963) propôs o uso dessa classe de modelos para modelar o progresso de doenças de plantas. Desde então, várias pesquisas têm sido desenvolvidas nesse sentido (AMORIM; BERGAMIN FILHO, 1993; BERGER, 1981; KUSHALAPPA; LUDWIG, 1982; MADDEN; PIRONE; RACCAH, 1987).

Fargette et al. (1993) usaram os MRNL monomolecular, logístico, Gompertz e Von Bertalanffy-Richards para modelar 49 curvas de progresso de *African cassava mosaic virus* na cultura da mandioca. Os dados foram coletados na Costa do Marfim (África Ocidental) de plantações mensais entre 1981 e 1986. O modelo de Gompertz foi o mais apropriado para descrever as epidemias, e as análises dos parâmetros dos modelos ajustados indicaram taxa máxima de aumento da doença, dois meses após o plantio, com componente sazonal na taxa de progresso.

Outra classe de modelos usada, para analisar dados de epidemiologia de doenças de plantas, é a dos MRLM. Esses estimam o valor da variável resposta como função de várias variáveis regressoras ou variáveis explicativas (CHARNET et al., 2008). Dessa forma, sabendo das relações das variáveis climáticas com o progresso da Mancha de Phoma, elas podem ser utilizadas como variáveis explicativas à ocorrência da doença. Segundo Campbell e Madden (1990), a importância dos modelos lineares está baseada na metodologia usada para estimar os parâmetros e a vasta quantidade de conhecimento nas propriedades desses modelos. Isso tem facilitado a sua adoção na fitopatologia, pois, em muitos casos, os pesquisadores estão interessados em avaliar a relação da doença com as variáveis climáticas (BURLEIGH;

EVERSMeyer; ROELFS, 1972; OLATINWO et al., 2008; PIETRAVALLE et al., 2003). Na cultura do cafeeiro, já foram desenvolvidos alguns MRLM, para estimar a ocorrência da Ferrugem, causada por *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome (KUSHALAPPA; AKUTSU; LUDWIG, 1983; PINTO et al., 2002). O melhor MRLM ajustado por Kushalappa, Akutsu e Ludwig (1983) apresentou R^2 de 72%, enquanto Pinto et al. (2002) obtiveram R^2 de 80% para o melhor modelo.

Para a Mancha de Phoma, Lorenzetti et al. (2015) ajustaram MRLM para explicar o monociclo da doença em mudas de cafeeiro em função da temperatura e do molhamento foliar, com valor de R^2 igual a 71%. Entretanto o modelo não informa por quanto tempo deve durar a faixa de temperatura ideal (entre 15 e 20°C) para ocorrer o progresso da doença. Além disso, o modelo não tem aplicação como sistema de alerta, pois não indica com antecedência os riscos futuros de progresso da doença, sendo necessárias novas pesquisas nesse sentido.

2.4 Nutrição mineral no manejo de doenças de plantas

O controle da Mancha de Phoma do cafeeiro é realizado com o uso de fungicidas de contato e sistêmicos. Contudo esses produtos são de custo elevado e nem sempre apresentam resultados satisfatórios. Com isso, é necessário integrar outras estratégias. Dentre elas, cita-se o manejo da resistência horizontal por meio do uso de adubação equilibrada (HUBER; RÖMHELD; WEINMANN, 2012; TAIZ; ZEIGER, 2013).

Os efeitos dos nutrientes, no crescimento e produção das plantas, geralmente, são explicados em termos das funções desses elementos no metabolismo vegetal. Todavia, a nutrição também pode ter efeitos secundários, muitas vezes, imprevisíveis, induzindo mudanças no padrão de crescimento, na

morfologia e anatomia da planta, ou mesmo na sua composição química, podendo aumentar ou reduzir sua tolerância a patógenos (HUBER; RÖMHELD; WEINMANN, 2012). Nesse sentido, pesquisas têm sido realizadas com o intuito de analisar a relação dos nutrientes minerais com doenças de plantas, nas mais diversas culturas, por exemplo, milho (CARVALHO et al., 2013; DORNELAS et al., 2015), soja (PINHEIRO et al., 2009, 2011), banana (FREITAS et al., 2017), entre outras.

Na cultura do cafeeiro, a relação da nutrição mineral com as doenças tem sido estudada para vários patossistemas. Como exemplos, cita-se a relação do N x K com a Mancha aureolada, causada por *Pseudomonas syringae* pv. *garcae* Young, Dye & Wilkie (PÉREZ et al., 2017), a relação do N x K (POZZA et al., 2001) e do Ca x K (GARCIA JÚNIOR et al., 2003) com a Cercosporiose causada por *C. coffeicola*, e a relação do N x K (LIMA et al., 2010) e do Ca x K (CATARINO et al., 2016) com a intensidade da Mancha de Phoma, dentre outros.

Lima et al. (2010) estudaram a relação do suprimento de doses de N e K com a Mancha de Phoma. O ensaio foi conduzido com mudas mantidas em solução nutritiva, em esquema fatorial 5 x 5, sendo cinco doses de N (3, 7, 11, 15 e 19 mmol L⁻¹) e cinco de K (4, 5, 6, 7 e 8 mmol L⁻¹), totalizando 25 tratamentos. Não houve interação significativa entre os fatores, entretanto houve efeito isolado tanto do N quanto do K. Os autores observaram aumento linear das áreas abaixo da curva de progresso da incidência (AACPI) e da severidade (AACPS) com o aumento nas doses de N, e redução quadrática da doença em função das doses de K, com as menores AACPI e AACPS obtidas com as doses de 6,59 e 6,57 mmol L⁻¹, respectivamente.

Catarino et al. (2016) avaliaram a relação Ca x K com a Mancha de Phoma, em esquema fatorial 5 x 5, sendo cinco doses de K (3, 4, 5, 6 e 7 mmol L⁻¹) e cinco de Ca (2, 4, 6, 8 e 10 mmol L⁻¹), totalizando 25 tratamentos. Houve

interação entre os fatores, e a menor AACPS foi observada para as menores doses de Ca e K. Nas maiores doses desses nutrientes, observou-se a maior AACPS. É importante ressaltar a competição dos nutrientes Ca, K e Mg por mesmos sítios de absorção (MARSCHNER, 2012) e, dessa forma, teores elevados de Ca e K podem ter induzido deficiência de Mg, tornando as plantas mais predispostas a infecções por esse patógeno. Esses resultados, como tantos outros publicados, comprovam a importância da nutrição no manejo de doenças de plantas.

Belan et al. (2015) estudaram a distribuição de nutrientes, em tecidos de folhas de cafeeiro com o uso de técnicas de microanálises de raio-X e sua relação com doenças foliares, dentre elas, a Mancha de Phoma. Os autores observaram gradiente de distribuição para o Ca e o K entre os tecidos assintomáticos e sintomáticos para diversas doenças. Para a Mancha de Phoma, houve maior concentração de Ca, nos tecidos necróticos, enquanto as maiores concentrações de K foram observadas nos tecidos assintomáticos. A inversão dos teores de Ca e K ocorreram na área de transição entre o tecido necrótico e o halo amarelado. Esses resultados podem auxiliar na melhor compreensão do efeito dos nutrientes minerais no estabelecimento das relações patógeno-hospedeiro.

2.5 A geoestatística como ferramenta no manejo de doenças de plantas

Classicamente, o estudo da distribuição espacial das doenças de plantas é feito, por meio das análises de *Run* e *Doublet*, as quais permitem classificar a ocorrência em três padrões: aleatório, agregado e regular (CAMPBELL; MADDEN, 1990). Esses métodos, no entanto são indicados para analisar dados binários e não levam em conta as coordenadas geográficas associadas a cada ponto amostrado e, assim, a posição de cada amostra é definida por métodos

manuais, tornando o processo laborioso e limitado. Além disso, informações como grau de dependência espacial e alcance da doença não são fornecidas por meio desses métodos. Na fitopatologia e na epidemiologia moderna, a metodologia de análise geoestatística, também, está sendo aplicada, de forma integrada, aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), para analisar padrões espaciais e gerar hipóteses sobre aspectos ecológicos e epidemiológicos de doenças de plantas, impossíveis ou difíceis de serem estudados no passado (AGRIOS, 2004; ALVES et al., 2006; NELSON et al., 1999).

Com a geoestatística, é possível quantificar a estrutura e a magnitude da variação espacial dos fenômenos ambientais, não concebível com o uso de métodos tradicionais (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Assim, é possível estudar não apenas o comportamento espacial das doenças de plantas, mas também das covariáveis relacionadas à sua ocorrência.

A geoestatística teve início na África do Sul. Krige (1951), ao realizar estudo baseado na concentração de ouro obtido nas jazidas, observou a necessidade de considerar a distância entre as unidades amostrais para assim descrever com precisão a distribuição espacial do fenômeno. A partir daí, Matheron (1963) desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas. Entende-se por variável regionalizada, uma função numérica com distribuição espacial, variável de um ponto a outro com continuidade aparente, cujas mudanças não podem ser representadas por uma função determinística. De acordo com a teoria das variáveis regionalizadas, uma variável aleatória pode ser expressa como a soma de três componentes: a) uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; e c) um ruído aleatório ou erro residual (BURROUGH, 1987).

A geoestatística está fundamentada em, basicamente, dois conceitos, ajuste de semivariograma e krigagem dos modelos ajustados. O primeiro tem o

papel de descrever a estrutura da variabilidade espacial, e o segundo, a função de predizer, sem tendência e com variância mínima, os valores não medidos (ALVES et al., 2009; SILVA et al., 2003).

O semivariograma apresenta três parâmetros importantes: o efeito pepita (C_0), o patamar (C_0+C_1) e o alcance (A) (SILVA et al., 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013). O C_0 refere-se ao valor da semivariância na distância zero e significa a variação não atribuída à dependência espacial, o C_0+C_1 é o valor da variância, quando esta passa a ser constante, correspondendo ao máximo da variância, permitindo identificar a distância entre a dependência e a independência entre as amostras, e o A é a distância da origem até o ponto em que o patamar atinge valores estáveis, sendo considerado o limite da dependência espacial da grandeza mensurada (SILVA et al., 2003).

Há uma série de modelos disponíveis, para analisar a dependência espacial das variáveis de interesse, sendo os modelos esférico, exponencial e gaussiano os mais aplicados nos estudos de fenômenos espaciais (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Dessa forma, esses modelos, em conjunto com a krigagem, têm sido largamente empregados na agricultura de precisão para confecção de mapas de auxílio à tomada de decisão, a fim de otimizar a aplicação de insumos a taxas variadas, de acordo com as necessidades de cada cultura (ALMEIDA; GUIMARÃES, 2016; CARVALHO et al., 2017). Com isso, observam-se melhorias na fertilidade dos solos, na nutrição mineral das plantas, no uso de defensivos agrícolas, dentre outros, proporcionando maior produtividade, redução de custos e de impactos ambientais negativos.

Dentre os diversos atributos com variabilidade espacial no sistema agrícola, destacam-se os solos (SILVA et al., 2003). Quando esses são manejados, levando-se em conta o aspecto da variabilidade espacial e as necessidades de cada cultura, as plantas tornam-se melhor nutridas e,

consequentemente, mais resistentes à ocorrência de doenças (HUBER; RÖMHELD; WEINMANN, 2012).

Vários pesquisadores têm usado a geoestatística para compreender a variação espacial da fertilidade dos solos e da nutrição mineral das plantas. De forma semelhante, muitos fitopatologistas têm aplicado essa ferramenta para compreender o aspecto da distribuição espacial das doenças. Entretanto, comparativamente, há um menor número de trabalhos relacionando, ao mesmo tempo, a distribuição espacial dos nutrientes com a distribuição espacial das doenças, e a relação desses fatores com a produtividade das culturas (FREITAS et al., 2016; UCHÔA et al., 2011). Para a cultura do cafeeiro, pesquisas recentes têm sido desenvolvidas nesse sentido (CHAVES, 2015; DORNELAS, 2017; FREITAS, 2017; LIMA, 2009; VASCO, 2016).

Lima (2009) estudou a variabilidade espacial da Mancha de Phoma do cafeeiro e sua relação com a nutrição das plantas, em dois sistemas de cultivo, convencional e orgânico. As malhas demarcadas em cada lavoura foram de 100 x 12 m, com 60 pontos equidistantes de 10 x 2 m. Os dados de incidência e severidade mensal foram convertidos em AACPI e AACPS, considerando cada período de seis meses, e as amostragens de folhas, para análise nutricional, foram realizadas semestralmente. De acordo com a autora, no primeiro período, tanto a AACPI quanto a AACPS apresentaram padrão de distribuição agregado ao sistema convencional, com ajuste do modelo exponencial e aleatório ao sistema orgânico. No segundo período, ajustou-se o modelo linear para a AACPI e AACPS no sistema orgânico. Quando se ajusta o modelo linear, pode-se interpretar a existência de infinita capacidade de dispersão do fenômeno estudado. Entretanto, isso pode tratar-se de problema relativo ao tamanho da malha de pontos, pois é insuficiente para detectar o limite da dependência espacial. Além disso, os nutrientes não apresentaram autocorrelação no estudo e, novamente, a causa pode estar relacionada com o tamanho da malha de pontos.

Dornelas (2017) estudou a distribuição espacial da Mancha de Phoma do cafeeiro e sua relação com a fertilidade do solo e nutrição das plantas em área irrigada por pivô central. O estudo foi conduzido, entre agosto de 2012 e maio de 2015, com avaliações a cada 60 dias, totalizando 17 avaliações. O pivô possuía 50 pontos amostrais em malha de 50 x 50 m. De acordo com o autor, os nutrientes foliares K, P, Ca, B e Mn correlacionaram-se, significativamente, com os meses de alta incidência da doença e também apresentaram autocorrelação espacial e, por isso, foram submetidos às análises geoestatísticas. Já os nutrientes dos solos não tiveram correlação significativa com a doença e, por isso, não foram analisados. A dependência espacial da Mancha de Phoma foi explicada com o modelo exponencial, tendo grau de dependência espacial fraco a moderado e alcance variando de 38,74 a 130,39 m, de acordo com o mês em análise. Entretanto o experimento foi conduzido em lavoura irrigada e relevo plano. Dessa forma, é necessário realizar novas pesquisas com esse patossistema, em lavouras de sequeiro com topografia acidentada, pois essas condições podem afetar a dinâmica de dispersão do patógeno, alterando suas relações com o hospedeiro e no desenvolvimento do processo doença.

REFERÊNCIAS

AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. 5th ed. San Diego: Academic, 2004.

ALMEIDA, L. S.; GUIMARÃES, E. C. Geoestatística e análise fatorial exploratória para representação espacial de atributos químicos do solo na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 195-203, 2016.

ALVES, M. C. et al. Geoestatística como metodologia para estudar a dinâmica espaço-temporal de doenças associadas a *Colletotrichum* spp. transmitidos por sementes. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, n. 6, p. 557-563, 2006.

ALVES, M. C. et al. Modeling spatial variability and pattern of rust and brown eye spot in coffee agroecosystem. **Journal of Pest Science**, Heidelberg, v. 82, n. 2, p. 137-148, 2009.

AMORIM, B. H.; BERGAMIN FILHO, A. Mathematical functions to describe disease progress curves of double sigmoid pattern. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 83, p. 928-932, 1993.

BELAN, L. L. et al. Nutrients distribution in diseased coffee leaf tissue. **Australasian Plant Pathology**, Berlin, v. 44, p. 105-111, 2015.

BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. Sistemas de previsão e avisos. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (Ed.). **Manual de fitopatologia**. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995. p. 627-646.

BERGER, R. D. Comparison of the Gompertz and logistic equations to describe plant disease progress. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 71, p. 716-719, 1981.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. **Time series analysis: forecasting and control**. San Francisco: Holden-Day, 1994.

BURLEIGH, J. R.; EVERSMEYER, M. G.; ROELFS, A. P. Development of linear equations for predicting wheat leaf rust. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 62, p. 947-953, 1972.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon, 1987.

CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. **Introduction to plant disease epidemiology**. New York: J. Wiley, 1990.

CARVALHO, D. O. et al. Adubação nitrogenada e potássica na severidade da antracnose em dois cultivares de milho. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 60, n. 3, p. 380-387, 2013.

CARVALHO, L. C. C. et al. Comparação entre a amostragem foliar convencional e de precisão para análise de micronutrientes na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 272-281, 2017.

CARVALHO, V. L.; CHALFOUN, S. M.; CUNHA, R. L. **Doenças do cafeeiro**: diagnose e controle. Belo Horizonte: EPAMIG, 2013. 48 p.

CATARINO, A. M. et al. Calcium and potassium contents in nutrient solution on Phoma leaf spot intensity in coffee seedlings. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 63, p. 486-491, 2016.

CHARNET, R. et al. **Análise de modelos de regressão linear**: com aplicações. 2. ed. Campinas: Ed. UNICAMP, 2008.

CHAVES, E. **Potássio, fósforo, boro e irrigação na distribuição espaço-temporal da Cercosporiose do cafeeiro**. 2015. 157 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: café, safra 2016. Brasília, DF, 2017.

DORNELAS, G. A. **Mancha de phoma do cafeeiro**: relação com irrigação, fertilidade do solo e nutrição de plantas. 2017. 169 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

DORNELAS, G. A. et al. Nitrogen and potassium fertilization on the yield and intensity of the maize white spot. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 62, n. 4, p. 351-359, 2015.

ECHANDI, E. La quema de loscafetos causada por *Phoma costarricensis* sp. **Revista de Biología Tropical**, San Jose, v. 5, n. 1, p. 81-102, 1957.

FARGETTE, D. et al. Analysis of temporal disease progress of *African cassava mosaic virus*. **Ecology and Epidemiology**, São Paulo, v. 84, n. 1, p. 91-98, 1993.

FIRMAN, I. D. Some investigations on a disease of *Coffea arabica* caused by *Ascochyta tarda*. **Transactions of the British Mycological Society**, Cambridge, v. 48, p. 161-166, 1965.

FREITAS, A. S. et al. Interaction between potassium (K) and calcium (Ca) on the severity of Yellow Sigatoka in banana plants. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 12, p. 1353-1361, 2017.

FREITAS, A. S. et al. Spatial distribution of Yellow Sigatoka Leaf Spot correlated with soil fertility and plant nutrition. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 17, p. 93-107, 2016.

FREITAS, M. L. O. **Epidemiologia e controle da mancha aureolada do cafeeiro**. 2017. 92 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

GARCIA, A. **Fungicidas I: utilização no controle químico de doenças e sua ação contra os fitopatógenos**. Porto Velho: EMBRAPA-CPAF, 1999. 32 p.

GARCIA JÚNIOR, D. et al. Incidência e severidade da cercosporiose do cafeeiro em função do suprimento de potássio e cálcio em solução nutritiva. **Fitopatologia Brasileira**, Fortaleza, v. 28, n. 3, p. 286-291, 2003.

GILLESPIE, T. J.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorology and plant disease management: a happy marriage. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 71-75, 2008.

GLEASON, M. L. et al. Review: obtaining weather data for input to crop disease-warning systems: leaf wetness duration as a case study. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 76-87, 2008.

GÓMEZ, R.; BUSTAMANTE, E. Influencia de la luz y la temperatura em el desarrollo de lamuerte descendente delcaféto, causada por *Phoma* sp. **Fitopatologia Colombiana**, Santa Fé de Bogotá, v. 6, p. 73-80, 1977.

GRAAF, P. V. et al. Prepenetration stages in infection of clematis by *Phoma clematidina*. **Plant Pathology**, Honolulu, v. 51, p. 331-337, 2002.

HOLB, I. J. Monitoring conidial density of *Monilinia fructigena* in the air in relation to brown rot development in integrated and organic apple orchards. **European Journal of Plant Pathology**, Dordrecht, v. 120, p. 397-408, 2008.

HUBER, D.; RÖMHELD, V.; WEINMANN, M. Relationship between nutrition, plant diseases and pests. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner, H. Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2012. p. 283-298.

HUBER, L.; GILLESPIE, T. J. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 30, p. 553-577, 1992.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

KRAUSE, R. A.; MASSIE, L. B. Predictive systems: modern approaches to disease control. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 13, p. 31-47, 1975.

KRIGE, D. G. **A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand**. 1951. 139 f. Thesis (Ph.D. in Science)-University of the Witwatersrand, Johannesburg, 1951.

KUSHALAPPA, A. C.; AKUTSU, M.; LUDWIG, A. Application of survival ratio for monocyclic process of *Hemileiavastatrix* in predicting coffee rust infection rates. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 73, n. 1, p. 96-103, 1983.

KUSHALAPPA, A. C.; LUDWIG, A. Calculation of apparent infection rate in plant diseases: development of a method to correct for host growth. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 72, p. 1373-1377, 1982.

LIMA, L. M. **Variabilidade espacial da mancha de Phoma relacionada à nutrição do cafeeiro e incidência da cercosporiose na qualidade do café**. 2009. 110 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

LIMA, L. M. et al. Relação nitrogênio/potássio com a Mancha de Phoma e nutrição de cafeeiro em solução nutritiva. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, DF, v. 35, n. 4, p. 223-228, 2010.

LORENZETTI, E. R. et al. Effect of temperature and leaf wetness on *Phoma tarda* and Phoma leaf spot in coffee seedlings. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2015.

MAANEN, A. van; XU, X. M. Modelling plant disease epidemics. **European Journal of Plant Pathology**, Dordrecht, v. 109, n. 7, p. 669-682, 2003.

MADDEN, L. V.; ELLIS, M. A. **How to develop plant disease forecasters: experimental techniques in plant disease epidemiology**. Berlin: Springer-Verlag, 1988.

MADDEN, L. V.; PIRONE, T. P.; RACCAH, B. Temporal analysis of two viruses increasing in the same tobacco fields. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 77, p. 974-980, 1987.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Lancaster, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. 2. ed., rev. e ampl. São Paulo: Blucher, 2006.

NELSON, M. R. et al. Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management. **Plant Disease**, Quebec, v. 83, p. 308-319, 1999.

OLATINWO, R. O. et al. A predictive model for spotted wilt epidemics in peanut based on local weather conditions and the *Tomato spotted wilt virus* risk index. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 98, n. 10, p. 1066-1074, Oct. 2008.

PEREZ, C. D. P. et al. Nitrogênio e potássio na intensidade da mancha aureolada do cafeeiro em solução nutritiva. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, p. 60-68, 2017.

PIETRAVALLE, S. et al. Modeling of relationships between weather and *Septoria tritici* epidemics on winter wheat: a critical approach. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 93, n. 10, p. 1329-1339, Oct. 2003.

PINHEIRO, J. B. et al. Estudo da influência do potássio e do cálcio na reprodução do nematoide do cisto da soja. **Nematologia Brasileira**, Campinas, v. 33, p. 17-27, 2009.

PINHEIRO, J. B. et al. Severidade da ferrugem da soja em função do suprimento de potássio e cálcio em solução nutritiva. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 58, p. 43-50, 2011.

PINTO, A. C. S. et al. Descrição da epidemia da ferrugem do cafeeiro com redes neuronais. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, p. 517-524, 2002.

POZZA, A. A. A. et al. Influência da nutrição mineral na intensidade da mancha-de-olho-pardo em mudas de cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 1, p. 53-60, jan. 2001.

POZZA, E. A.; ALVES, M. C. Impacto potencial de mudanças climáticas sobre as doenças fúngicas do cafeeiro no Brasil. In: GHINI, R.; RAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2008. p. 220-238.

POZZA, E. A.; CARVALHO, V. L.; CHALFOUN, S. M. Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In: GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; BALIZA, D. P. (Ed.). **Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas**. Lavras: Ed. UFLA, 2010. p. 69-101.

POZZA, E. A.; SALGADO, M.; PFENNING, L. H. Intensidade da mancha de Phoma do cafeeiro (*Phoma tarda*) em diferentes temperaturas e tempo de molhamento foliar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOPATOLOGIA, 36., 2003, Uberlândia. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Fitopatologia, 2003. p. 223-223.

RATKOWSKY, D. A. **Handbook of nonlinear regressions models**. New York: M. Dekker, 1990.

REIS, R. M. et al. Nonlinear regression models applied to clusters of garlic accessions. **Horticultura Brasileira**, Vitória da Conquista, v. 32, n. 2, p. 178-183, 2014.

ROUSTAE, A. et al. Ultrastructural studies of the mode of penetration by *Phoma macdonaldii* in sunflower seedlings. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 90, n. 8, p. 915-920, 2000.

SALGADO, M. et al. Primeiro relato da ocorrência de *Didymella* sp., fase sexuada de *Phoma tarda*, em *Coffea arabica* no Brasil. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 5., 2007, Águas de Lindóia. **Anais...** Brasília, DF: EMBRAPA Café, 2007. 1 CD-ROM.

SALGADO, M.; PFENNING, L. H. Identificação e caracterização morfológica de espécies de *Phoma* do cafeeiro no Brasil. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA

DOS CAFÉS DO BRASIL, 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Brasília, DF: EMBRAPA Café, 2000. p. 183-186.

SALGADO, M.; POZZA, E. A.; PFENNING, L. H. Influência da temperatura e do tempo de incubação no crescimento micelial e produção de conídios *in vitro* de espécies de Phoma do cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOPATOLOGIA, 35., 2002, Recife. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Fitopatologia, 2002. p. 159.

SANTOS, L. S. D. et al. Incidência da Mancha de Phoma em cafeeiro irrigado por gotejamento, sob diferentes manejos de irrigação. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 77-89, 2014.

SCHABENBERGER, O.; PIERCE, F. J. **Contemporary statistical models for the plant and soil sciences**. Boca Raton: CRC, 2002.

SCHERM, H.; YANG, X. B. Interannual variations in wheat rust development in China and United States in relation to the El Niño/Southern oscillation. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 85, p. 970-976, 1995.

SILVA, V. R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003.

SOUZA, A. G. C. et al. A time series analysis of brown eye spot progress in conventional and organic coffee production systems. **Plant Pathology**, Honolulu, v. 64, n. 1, p. 1-10, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

UCHOA, C. N. et al. Geoestatística da sigatoka-negra e sua relação com a fertilidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, p. 357-362, 2011.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Coffee: world markets and trade**. Washington, 2017. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>>. Acesso em: 8 fev. 2018.

VANDERPLANK, J. E. **Plant diseases: epidemics and control**. New York: Academic, 1963.

VASCO, G. B. **Análise espaço temporal da ferrugem do cafeeiro e sua relação com o clima e a nutrição mineral com K e B.** 2016. 117 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

VASCO, G. B. **Intensidade da mancha de Phoma em função da densidade de plantio e manejo de irrigação em cafeeiro.** 2012. 54 p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

WORKNEH, F.; RUSH, C. M. Evaluation of relationships between weather patterns and prevalence of sorghum ergot in the Texas Panhandle. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 92, p. 659-666, 2002.

XU, X. M.; BUTT, D. J.; RIDOUT, U. S. Temporal patterns of airborne conidia of *Podosphaera leucotricha*, causal agent of apple powdery mildew. **Plant Pathology**, Honolulu, v. 44, p. 944-955, 1995.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

YANG, X. B.; ZENG, S. M. Detecting patterns of wheat stripe rust pandemics in time space. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 82, p. 571-576, 1992.

ZADOKS, J. C. A quarter century of disease warning, 1958-1983. **Plant Disease**, Quebec, v. 68, p. 352-355, 1984.

ZAMBOLIM, L. **I encontro sobre produção de café com qualidade.** Viçosa, MG: Ed. UFV, 1999.

ZAUZA, E. A. V. **Epidemiologia da ferrugem do eucalipto e resistência genética.** 2007. 67 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

ZUCKER, W. V.; CATARA, A. Observations in the scanning electron microscope on the foliar penetration of *Phoma tracheiphila*. **Informatore Fitopatologico**, Bologna, v. 35, n. 4, p. 33-35, 1985.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

**ARTIGO 1 – SÉRIES TEMPORAIS E PROGRESSO TEMPORAL DA
MANCHA DE PHOMA DO CAFEIEIRO EM DIFERENTES ALTITUDES**

**H.R. Silva¹ • E.A. Pozza¹ • A.S. Freitas¹ • M.L.O. Freitas¹ • L.L. Belan¹ • M.P.
Barbosa Junior¹**

¹Departamento de Fitopatologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais
37200-000, Brasil

e-mail: humbersonagronomo@yahoo.com.br

(VERSÃO PRELIMINAR)

Elaborado de acordo com as normas do periódico “Precision Agriculture”.

Resumo

A descrição do comportamento da curva de progresso de doenças de plantas utilizando modelos estatísticos é relevante, pois pode auxiliar a definir estratégias de controle para reduzir as aplicações de fungicidas, minimizando ainda, custos e impactos ambientais. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento da Mancha de Phoma (*Phoma* spp.) do cafeeiro sob diferentes altitudes e utilizar modelos de séries temporais e modelos de regressão linear e não linear para explicar o comportamento da doença. O ensaio foi conduzido por dois anos, com avaliações mensais, de setembro de 2013 a agosto de 2015, numa lavoura de *Coffea arabica* L. com idade de quatro anos no início da pesquisa. Demarcou-se na área uma malha regular com 85 pontos. As curvas de progresso da incidência (CPI) e da severidade (CPS) foram construídas considerando-se as médias gerais dos 85 pontos em cada mês. Além disso, foram construídas CPI e CPS para as altitudes médias de 1130,54, 1140,65, 1143,18 e 1143,40 m. As CPI e CPS apresentaram comportamento variável dentro de cada ano, e também, entre os anos avaliados. Maiores altitudes proporcionaram maiores valores da incidência e da severidade da doença. Apenas as CPI e CPS na altitude de 1143,18 m apresentaram autocorrelação ao longo do tempo, com ajuste de modelos auto-regressivos de primeira ordem. Ajustou-se o modelo de Gompertz para as CPI e CPS no período de fevereiro a junho de 2014. As taxas estimadas para a incidência e para a severidade foram de 5,19 e 0,28%, respectivamente.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L. *Phoma* spp. Modelos auto-regressivos. Modelos de médias móveis. Modelos de regressão não linear.

Introdução

O Brasil destaca-se no cenário internacional de comercialização de café, sendo o maior produtor e exportador mundial, enquanto os principais importadores são a União Europeia (UE) e os Estados Unidos (EUA) (USDA 2017). Considerando apenas a espécie *Coffea arabica* L., foram produzidas no território brasileiro mais de 43 milhões de sacas beneficiadas de 60 kg em área plantada total de 1,76 milhão de hectares no ano de 2016 (Conab 2017). Mesmo com essa produção, é importante destacar a suscetibilidade dos cultivares plantados a diversas doenças, as quais limitam ganhos em produtividade e comprometem a qualidade de bebida. Entre essas, destaca-se a Mancha de Phoma (*Phoma* spp.), por causar perdas entre 15 e 43%. Isso porque causa danos como seca de ponteiros, necroses em rosetas florais, mumificação de chumbinho e manchas foliares (Pozza et al. 2010). A penetração do fungo é facilitada por danos mecânicos nos tecidos da planta, produzidos por insetos ou por atrito entre folhas em decorrência dos ventos intensos no período frio (Carvalho et al. 2013). Lavouras situadas em maiores altitudes são mais propensas a ocorrência de ventos frios por estarem mais expostas, favorecendo o progresso temporal e/ou espacial da doença. Entretanto, essa informação carece de dados de pesquisa, pois a hipótese tem sido afirmada sem a comprovação científica da variação da altitude, sua influência nas variáveis ambientais e na intensidade da doença.

Outro aspecto importante é conhecer a dinâmica das doenças de plantas ao longo do tempo, pois pode auxiliar a definir estratégias de controle para reduzir as aplicações de fungicidas e conseqüentemente, minimizar os custos e impactos ambientais (Campbell e Madden 1990). A Mancha de Phoma do cafeeiro não possui

padrão de ocorrência ao longo da estação de crescimento da cultura, dificultando seu manejo (Santos et al. 2014). Nesse contexto, os modelos de séries temporais podem ser úteis para descrever a dinâmica de doenças (Box et al. 1994), e assim, auxiliar a definir os períodos apropriados para pulverizar fungicidas.

A aplicação de técnicas de séries temporais está condicionada à existência de autocorrelação temporal dos resíduos das observações de interesse (Morettin e Toloí 2006). Nas séries temporais, as estimativas dos valores futuros de uma variável de interesse são obtidas em função da própria variável, em instante de tempo diferente, não necessitando de outras variáveis auxiliares. Nesse sentido, os modelos de séries temporais podem ser usados para modelar o progresso temporal da Mancha de Phoma do cafeeiro, caso haja dependência entre as avaliações da doença nas diferentes datas.

Alguns autores têm usado abordagens envolvendo técnicas de séries temporais para compreender a dinâmica das doenças de plantas (Yang e Zeng 1992, Scherm e Yang 1995, Xu et al. 1995, Workneh e Rush 2002, Zauza et al. 2007, Holb 2008). Técnicas de séries temporais também podem ser implementadas em análises de regressão, de modo a contemplar o efeito temporal nas estimativas dos parâmetros dos modelos. Souza et al. (2015) utilizaram modelos de regressão não linear com erros não independentes, ou seja, gerados por processos auto-regressivos (AR) e de médias móveis (MA), ARMA, para estudar a dinâmica da incidência e da severidade da Cercosporiose do cafeeiro. De acordo com os autores, os modelos ajustados foram apropriados para descrever as curvas de progresso, com valores médios de R^2 de 79,03 e 75,42% para a incidência e para a severidade, respectivamente.

Entretanto, dada a suposição dos erros independentes, ou seja, não correlacionados, pode-se utilizar os modelos de regressão não linear, sem as abordagens envolvendo técnicas de séries temporais, para descrever as curvas de progresso das doenças. Cada vez mais observa-se consenso entre os pesquisadores no uso de funções não lineares para explicar as relações entre variáveis biológicas. Processos como crescimento, nascimento, mortalidade, abundância, competição e produção raramente são relacionadas linearmente às variáveis explicativas (Schabenberger e Pierce 2002), embora a função linear possa ser utilizada para estimar a taxa de progresso da doença, enquanto os modelos não lineares são mais promissores para modelar as curvas de progresso.

Em virtude do que foi mencionado, os objetivos dessa pesquisa foram analisar a influência da altitude na incidência e na severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro, e modelar as curvas de progresso da doença com modelos de séries temporais e de regressão não linear.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido por dois anos, de setembro de 2013 a agosto de 2015, em plantio comercial da 'NKG Fazendas Brasileiras Ltda', localizada no município de Santo Antônio do Amparo, Estado de Minas Gerais, Brasil. As coordenadas geográficas do ponto de referência são latitude 20°53'23,7" Sul, longitude 44°52'56,9" Oeste e altitude de 1145,9 m. A área utilizada no estudo foi de 7,65 ha, cultivada com a espécie *Coffea arabica* L. cultivar Catucaí amarelo 2 SL, suscetível à Mancha de Phoma e resistente à Ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome), implantada no

espaçamento de 3,7 x 0,7 m e idade de quatro anos no início da pesquisa. Foi demarcada nessa área uma malha regular de 7,65 ha com 85 pontos, no espaçamento de 30 x 30 m entre pontos (Fig. 1). Estes foram georreferenciados com auxílio de receptor GNSS Topcon® Hiper Lite L1 L2. Os dados foram levantados pelo método PPK (pós-processamento cinemático). Foi montada uma base e percorreu-se a área com o receptor, demarcando todos os vértices amostrais. Cada ponto amostral georreferenciado da malha foi constituído por cinco plantas de café, sendo três plantas na mesma linha, uma acima da central, e outra abaixo dessa.

O manejo da fertilidade, de pragas e de outras doenças na área do estudo foi realizado de forma homogênea e de acordo com as necessidades da cultura.



Fig. 1. Imagem de satélite da área experimental. 'NKG Fazendas Brasileiras Ltda', Santo Antônio do Amparo, MG, 2014 (Google Earth, 2014), e malha de pontos georreferenciados. S1 e S4 (em azul) indicam, respectivamente, as posições das estações automáticas modelo Datalogger CR1000 e CR10X, marca Campbell Scientific Inc.®, instaladas na área.

Para estudar a curva de progresso da Mancha de Phoma ao longo do tempo, foram realizadas 24 avaliações mensais da incidência e da severidade da doença ao longo do período informado anteriormente. Em cada planta avaliou-se, aleatoriamente, o primeiro par de folhas completamente expandido de quatro ramos no terço superior da copa, sendo dois ramos em cada face de exposição, totalizando oito folhas por planta e 40 folhas por ponto georreferenciado. Os dados da incidência da doença foram obtidos por meio da Equação 1.

$$I(\%) = \frac{FD}{TF} * 100$$

(1)

Em que:

I(%)= incidência da doença, em porcentagem;

FD= número de folhas doentes da amostra no ponto georreferenciado;

TF= Total de folhas avaliadas no ponto georreferenciado.

Já a severidade da doença foi avaliada com auxílio de escala diagramática desenvolvida por Salgado et al. (2009). As notas da severidade atribuídas às 40 folhas de cada ponto georreferenciado foram transformadas em porcentagem de área lesionada. Em seguida calculou-se a severidade média da doença em cada ponto georreferenciado. Para construir as curvas de progresso da incidência e da severidade ao longo do tempo, utilizou-se a média dos 85 pontos em cada mês avaliado.

Além disso, foram construídas outras quatro curvas de progresso com esses mesmos dados, considerando o sentido de maior declividade do terreno, para analisar o efeito da altitude no progresso da doença, nas altitudes médias de 1130,54, 1140,65, 1143,18 e 1143,40 m (Tabela 1 e Fig. 1). Cada curva foi plotada com média da intensidade da doença de 10 pontos georreferenciados ao longo dos 24 meses. As curvas de progresso de 1130,54 e 1143,40 m de altitude foram construídas com a média dos pontos amostrais mais próximos das estações automáticas, modelo Datalogger CR10X e CR1000, marca Campbell Scientific Inc.®, instaladas à 1130,89 e 1145,04 m de altitude, respectivamente. As outras duas curvas foram construídas com os dados das plantas situadas em altitudes intermediárias a essas duas (Tabela 1 e Fig. 1). As estações forneceram informações de temperatura média do ar, velocidade e direção dos ventos, cujos valores corresponderam às médias semanais, defasadas em duas semanas.

Tabela 1. Altitude média dos pontos georreferenciados utilizados para construir cada curva de progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro, levando-se em conta o desnível da lavoura.

Altitude média	Pontos georreferenciados correspondentes a cada curva
1130,54	36, 37, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 65, 66
1140,65	26, 33, 34, 35, 38, 47, 48, 49, 61, 62
1143,18	14, 18, 22, 23, 24, 25, 30, 31, 32, 52
1143,40	07, 08, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 21

As curvas de progresso da incidência e da severidade da doença, tanto a média geral dos 85 pontos quanto as curvas das diferentes altitudes, foram modeladas com técnicas de séries temporais.

A curva de progresso da doença será denominada série temporal, ou simplesmente, série. Caso esta seja designada por Z , seu valor no momento t pode ser escrito como Z_t ($t=1, 2, \dots, n$). Essas observações ($Z_t, t=1, 2, \dots, n$) podem ser decompostas no seguinte modelo aditivo: $Z_t = T_t + S_t + a_t$, em que, T_t e S_t representam a tendência e a sazonalidade, respectivamente, enquanto a_t é uma componente aleatória de média zero e variância constante. A tendência pode ser entendida como o aumento ou a redução gradual das observações ao longo do tempo. A sazonalidade representa flutuações ocorridas em períodos menores ou iguais a doze meses. Já a componente a_t representa os resíduos dos dados, e se ela for correlacionada, os dados do momento presente, isto é, a incidência ou severidade, influenciam o comportamento dos dados futuros (ou passados) em t instantes de tempo (Morettin e Toloi 2006). Logo, a existência de autocorrelação na componente a_t é condição essencial para usar modelos de séries temporais.

As séries analisadas devem ser estacionárias, ou seja, devem desenvolver-se aleatoriamente em torno de uma média constante, refletindo alguma forma de equilíbrio estável. Uma série é dita estacionária quando apresenta-se livre das componentes tendência (T_t) e sazonalidade (S_t) (Morettin e Toloi 2006). A estacionariedade das curvas de progresso da incidência e da severidade foi checada por meio da análise do autocorrelograma. Quando essa premissa não foi atendida, foram tomadas diferenças sucessivas das séries originais (Equação 2) para torná-las estacionárias.

$$\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1} \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Onde: ΔZ_t , na expressão acima, representa a primeira diferença tomada na série temporal original;

E de modo geral, a n -ésima diferença de Z_t é denotada por:

$$\Delta^n Z_t = \Delta(\Delta^{n-1} Z_t) \quad (3)$$

Sendo n o número de diferenças adotadas para tornar a série estacionária.

Em seguida, ajustaram-se os modelos de séries temporais auto-regressivos (AR), de médias móveis (MA), auto-regressivo de médias móveis (ARMA), e ARIMA, uma generalização do modelo ARMA, usado na modelagem e previsão de séries não estacionárias quanto à tendência. A representação ARIMA (p, d, q) refere-se às ordens de auto-regressão (p), de integração (ou número de diferenças para tornar a série estacionária) (d) e de médias móveis (q). No caso de $d = 0$, tem-se o modelo ARMA (p, q), dado por:

$$Y_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} \quad (4)$$

Onde:

Y_t = Variável aleatória dependente, no instante t ; no presente caso, refere-se à quantidade de doença no tempo t ;

θ_q = Parâmetro de médias móveis de ordem q ;

ϕ_p = Parâmetro auto-regressivo de ordem p ;

$a_t =$ Variável aleatória *i.i.d.* $\sim N(0, \sigma^2)$

No caso de $d = 0$ e $q = 0$, tem-se o modelo AR(p), auto-regressivo de ordem p , dado por:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + a_t \quad (5)$$

A seleção dos modelos foi realizada com base na significância dos parâmetros da equação ($p \leq 0,05$), na qualidade do ajuste dos modelos (critério de Akaike) e no princípio da parcimônia. Após o ajuste de cada modelo, foi realizada a análise do correlograma dos resíduos como critério indicador da adequação do modelo para modelagem da correlação existente na componente aleatória a_t .

Quando a_t não foi correlacionada, ou seja, ocorreu ruído branco, utilizaram-se modelos de regressão não lineares para modelar as curvas de progresso da incidência e da severidade construídas com as médias mensais dos 85 pontos georreferenciados. Para tanto, os dados originais foram divididos por 100. Foram ajustados os modelos de regressão não linear exponencial, monomolecular, logístico e de Gompertz, além do modelo de regressão linear da reta (Equações 6 a 10). Os ajustes foram realizados considerando apenas os meses com progresso regular da doença.

$$y_i = y_0 e^{rt_i} + \varepsilon_i \text{ (Exponencial)} \quad (6)$$

$$y_i = 1 - (1 - y_0) e^{-rt_i} + \varepsilon_i \text{ (Monomolecular)} \quad (7)$$

$$y_i = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{-\ln y_0}{1 - y_0} + rt_i\right)}} + \varepsilon_i \text{ (Logístico)} \quad (8)$$

$$y_i = e^{(\ln y_0 e^{(-rt_i)})} + \varepsilon_i \text{ (Gompertz)} \quad (9)$$

$$y_i = y_0 + rt_i + \varepsilon_i \text{ (Linear da reta)} \quad (10)$$

Onde:

y_i = quantidade de doença no tempo t_i ;

y_0 = quantidade de inóculo inicial;

r_i = taxa de progresso da doença;

t_i = tempo;

ε_i = representa o erro aleatório, $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$.

Para estimar as taxas da incidência e da severidade da doença, os dados originais, divididos por 100, foram linearizados por monito (y), exponito (y), logito (y) e gompito (y) (Equações 11 a 14). Posteriormente, procedeu-se com o ajuste do modelo de regressão linear da reta aos mesmos.

$$y_m = \ln[1/(1-y)] \quad (11)$$

$$y_e = \ln(y) \quad (12)$$

$$y_l = \ln[y/(1-y)] \quad (13)$$

$$y_g = -\ln[-\ln(y)] \quad (14)$$

Onde:

y_i = incidência ou severidade da doença observada na parcela avaliada; subíndice i corresponde à transformação por monito (m), exponito (e), logito (l) e gompito (g).

Os dados foram submetidos ao teste F da análise de variância (ANAVA), e quando houve diferenças significativas, procedeu-se com o ajuste dos modelos de regressão para modelar as curvas e as taxas de progresso da doença. A seleção foi realizada levando-se em consideração a significância dos parâmetros por teste t ($p \leq 0,05$) e menor erro padrão dos mesmos, maior coeficiente de determinação (R^2), menor quadrado médio dos resíduos (QMR) e ausência de tendências indesejáveis nos gráficos de dispersão dos resíduos.

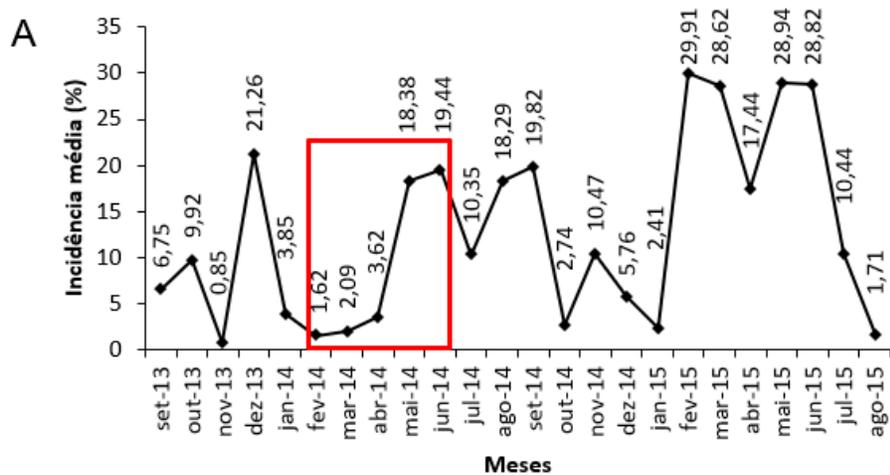
As análises de séries temporais foram realizadas com auxílio do software Gretl (Gretl 2016). Para ajustar os modelos de regressão lineares e não lineares utilizou-se a função *nls* do pacote *stats* do software livre R versão 3.4.0 (R Development Core Team 2017), por método dos mínimos quadrados ordinários. O método iterativo utilizado foi o de Gauss-Newton.

Resultados

As curvas de progresso da incidência e da severidade da Mancha de Phoma tiveram diversos pontos de máximo dentro de cada período de 12 meses, porém em datas diferentes nos dois anos de estudo, ou seja, apresentando comportamento variável desse patossistema ao longo do tempo (Fig. 2A e 2B). Para o primeiro período de 12 meses, entre setembro de 2013 e agosto de 2014, foram observados quatro picos na curva de progresso da incidência, correspondendo aos meses de outubro e dezembro de 2013, e junho e agosto de 2014, cujos valores foram de 9,76, 21,26, 19,44 e 18,29%, respectivamente (Fig. 2A). Já no segundo período (setembro de 2014 a agosto de 2015), os picos da incidência foram registrados nos meses de setembro e novembro de 2014, e

fevereiro e maio de 2015, cujos valores foram de 19,82, 10,47, 29,91 e 28,94%, respectivamente (Fig. 2A). A curva de progresso da severidade da doença apresentou padrão semelhante ao da incidência, com a ressalva de ocorrência de picos em março e junho de 2015, ao invés de fevereiro e maio de 2015, aproximadamente um mês após o registro de altas incidências (Fig. 2B).

Levando-se em conta os 24 meses, o único período com progresso regular da incidência e da severidade da doença foi entre os meses de fevereiro e junho de 2014 (Fig. 2A e 2B).



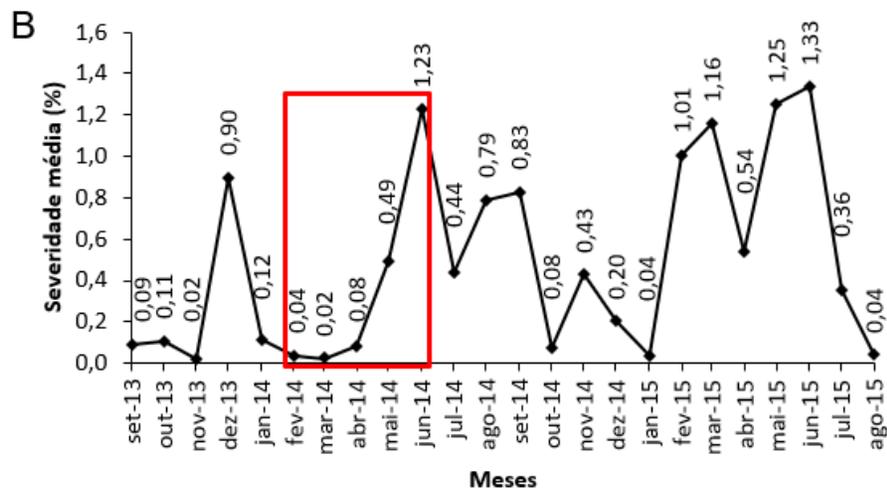


Fig. 2. Curvas de progresso da (A) incidência e da (B) severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro (média dos 85 pontos georreferenciados) registradas na área experimental de setembro de 2013 a agosto de 2015. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG. Os meses em destaque (fevereiro a junho de 2014) correspondem ao período de progresso regular da doença.

As curvas de progresso localizadas nos pontos mais altos da lavoura apresentaram, de forma geral, maiores valores da incidência e da severidade da doença ao longo dos 24 meses do estudo (Fig. 3A e 3B). Dessa forma, a curva de progresso à 1143,40 m de altitude foi a de maior intensidade média da doença, enquanto a de 1130,54 m apresentou os menores valores tanto da incidência quanto da severidade (Fig. 3A e 3B).

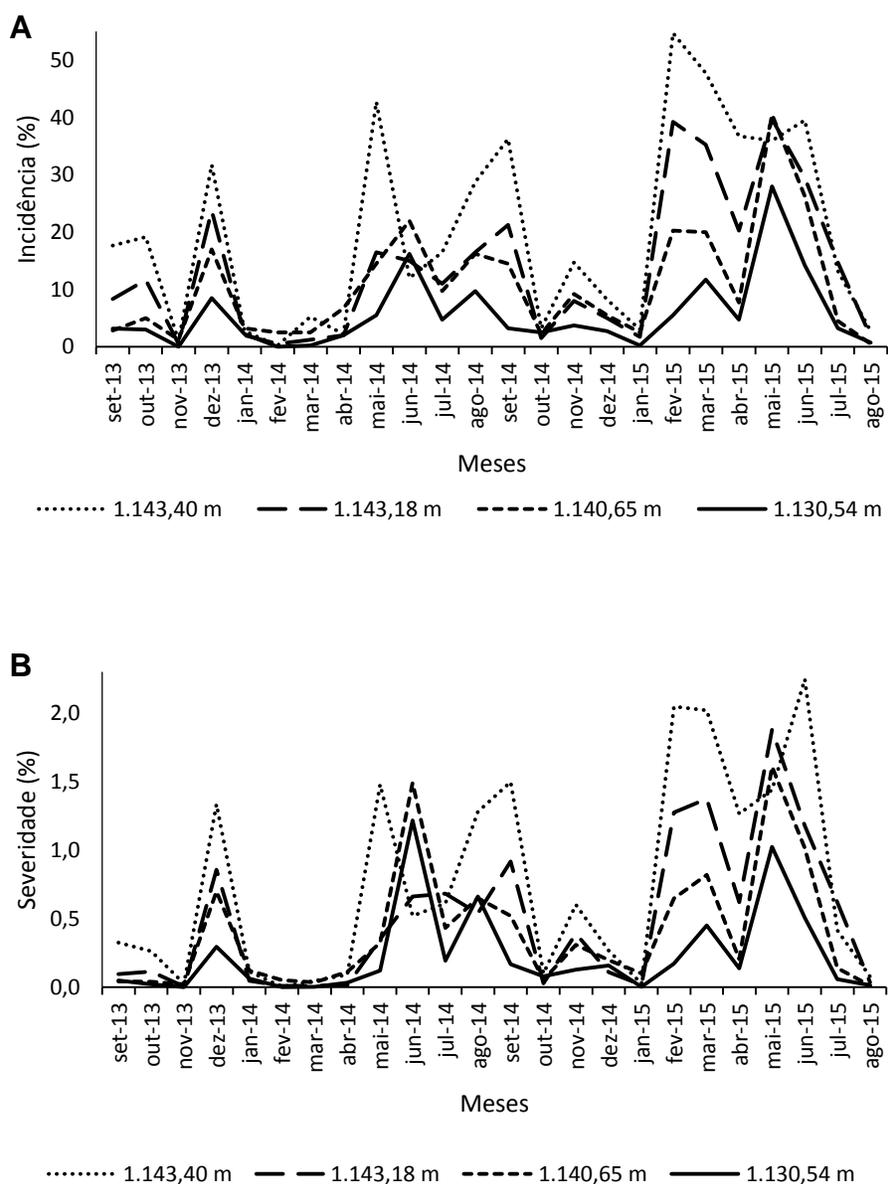


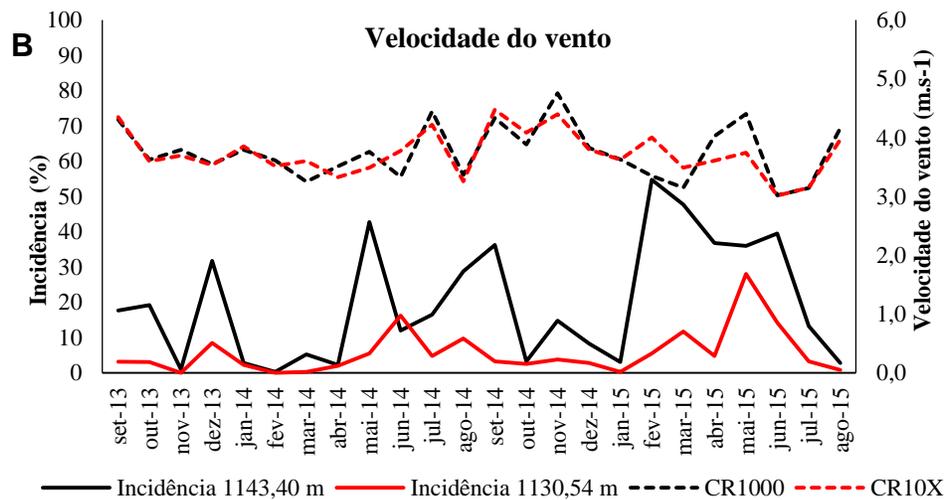
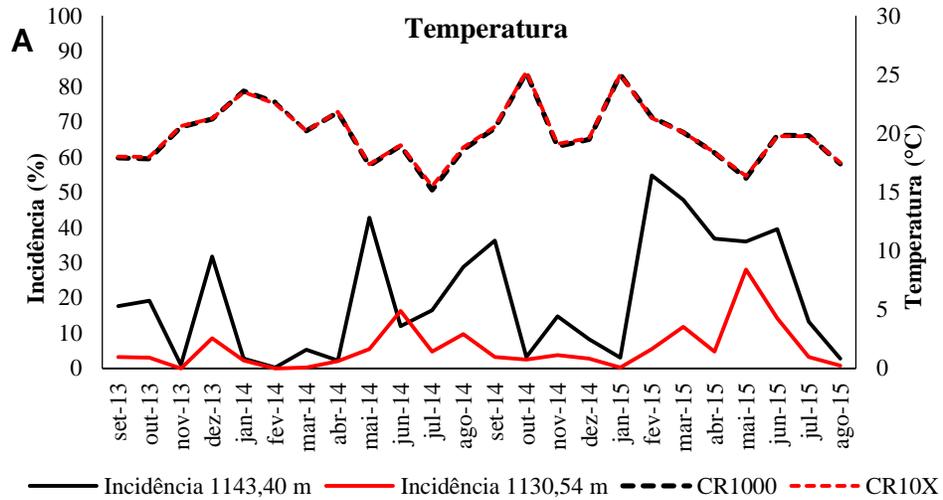
Fig. 3. Curvas de progresso da (A) incidência e da (B) severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro nas diferentes altitudes (1143,40, 1143,18, 1140,65 e 1130,54 m), registradas na área experimental de setembro de 2013 a agosto de 2015. 'NKG Fazendas Brasileiras Ltda', Santo Antônio do Amparo, MG.

De forma geral, maiores valores da doença foram observados quando a temperatura manteve-se entre 15 e 20 °C ao longo do tempo (Tabela 2 e Fig. 4A). Para os períodos de maior velocidade do vento, também verificou-se maior ocorrência da Mancha de Phoma, sendo a direção dos ventos uma variável claramente associada à esse patossistema (Tabela 2 e Fig. 4B e 4C). Em relação à altitude, a temperatura e a velocidade do vento variaram pequenas unidades em relação somente à média. Já a direção dos ventos mais voltados para o sul foi predominante na maior altitude da lavoura, em todos os meses avaliados (Fig. 4C).

Tabela 2. Médias semanais da temperatura média do ar, velocidade e direção dos ventos, defasadas duas semanas em relação às avaliações da doença, registradas na maior e menor altitude da lavoura com auxílio das estações automáticas CR1000 (altitude de 1145,04 m) e CR10X (altitude de 1130,89 m).

Meses	Temperatura média do ar (°C) ¹		Velocidade do vento (m.s ⁻¹) ¹		Direção do vento (graus) ¹	
	CR1000	CR10X	CR1000	CR10X	CR1000	CR10X
	1145,04 m	1130,89 m	1145,04 m	1130,89 m	1145,04 m	1130,89 m
Set13	17,90	18,01	4,31	4,35	133,00	123,80
Out13	17,83	18,00	3,62	3,60	157,96	141,02
Nov13	20,53	20,62	3,79	3,70	162,07	136,45
Dez13	21,22	21,27	3,55	3,53	162,66	138,52
Jan14	23,60	23,50	3,79	3,85	150,18	137,47
Fev14	22,64	22,52	3,62	3,52	143,53	109,08
Mar14	20,20	20,21	3,25	3,60	111,37	102,40
Abr14	21,78	21,83	3,51	3,33	163,68	145,56
Mai14	17,25	17,36	3,76	3,49	191,86	161,28
Jun14	18,95	18,98	3,33	3,77	106,80	96,15
Jul14	15,19	15,51	4,45	4,22	134,23	111,74
Ago14	18,61	18,79	3,37	3,26	189,63	152,61
Set14	20,42	20,55	4,33	4,47	103,36	98,17
Out14	25,15	25,23	3,89	4,09	139,73	128,12
Nov14	18,90	19,11	4,76	4,40	158,03	128,09
Dez14	19,48	19,59	3,83	3,80	141,91	123,54
Jan15	25,00	25,01	3,63	3,63	138,05	106,84
Fev15	21,36	21,28	3,35	4,00	112,12	104,39
Mar15	20,07	20,08	3,15	3,49	145,84	130,15
Abr15	18,33	18,36	4,03	3,61	161,56	122,80
Mai15	16,17	16,36	4,41	3,75	179,43	153,21
Jun15	19,84	19,75	3,02	3,01	174,16	161,26
Jul15	19,80	19,76	3,14	3,15	113,99	116,01
Ago15	17,40	17,50	4,16	3,97	88,55	93,81

¹ Valores referentes à média de sete dias, defasados em duas semanas em relação às avaliações da doença.



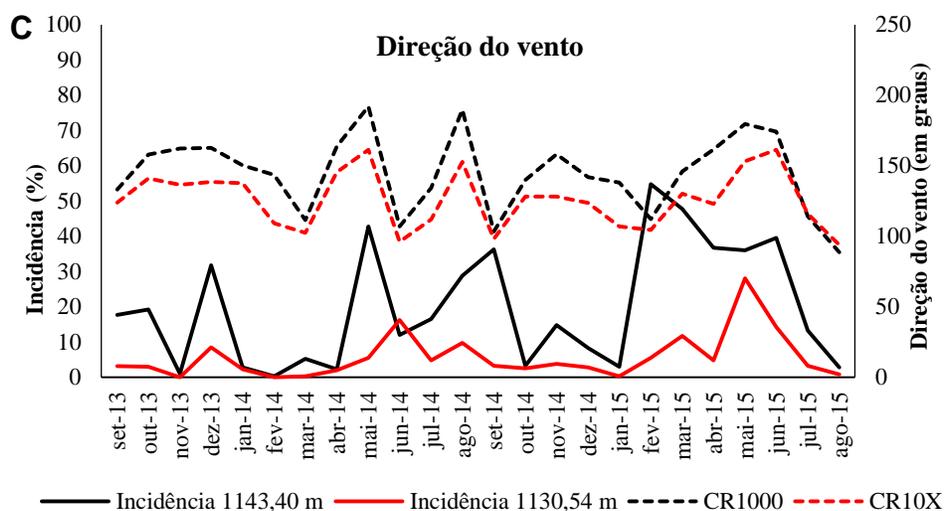


Fig. 4. Curvas de progresso da incidência da Mancha de Phoma nas altitudes de 1143,40 e 1130,54 m, e valores das médias semanais, defasadas em duas semanas, para a temperatura média do ar, velocidade e direção dos ventos, registrados com as estações CR1000 e CR10X.

De acordo com as análises de autocorrelação das curvas de progresso da incidência e da severidade, médias dos 85 pontos, os resíduos foram apenas *ruido branco*, ou seja, variáveis aleatórias não correlacionadas. Quando a análise foi realizada nas diferentes altitudes, as curvas de progresso da incidência e da severidade à 1130,54, 1140,65 e 1143,40 m tiveram o mesmo comportamento. Já para a curva de progresso à 1143,18 m dessas duas variáveis, houve autocorrelação significativa por meio do teste Q ($p \leq 0,05$) (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados da função de autocorrelação (FAC), autocorrelação parcial (FACP) e estatística $Q(k)$ para as defasagens significativas ($p \leq 0,05$) das curvas de progresso da incidência e da severidade à 1143,18 m de altitude.

Curva de progresso	Defasagem significativa	FAC	FACP	$Q(k)$	p-valor
Incidência 1143,18 m	1	0,3691	0,3691	3,6951	0,055
Severidade 1143,18 m	1	0,3775	0,3775	3,8656	0,049

As condições de estacionariedade dessas séries foram checadas por meio da análise dos correlogramas, os quais apresentaram ausência tanto de tendência quanto de sazonalidade (Fig. 5). Para a curva de progresso da incidência e da severidade à 1143,18 m, segundo a função de autocorrelação parcial (FACP) houve ajuste de modelo autorregressivo de primeira ordem, AR(1), e de igual modo, para a função de autocorrelação (FAC) o ajuste de modelo de médias móveis de primeira ordem, MA(1), pois apenas 1 lag foi significativo em cada um dos casos analisados.

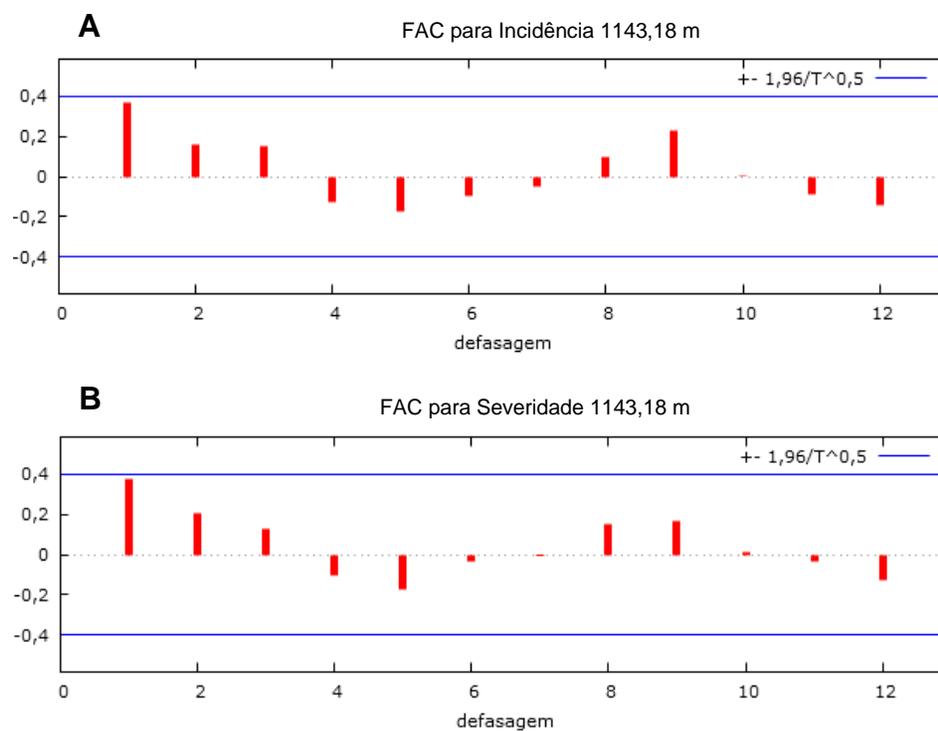


Fig. 5. Correlogramas das funções de autocorrelação (FAC) das curvas de progresso da incidência (A) e da severidade (B) da Mancha de Phoma do cafeeiro à 1143,18 m de altitude.

O modelo auto-regressivo AR(1) foi o mais adequado para modelar a autocorrelação da componente a_t , da incidência e da severidade dessa altitude. Em ambos os casos, os modelos apresentaram parâmetros significativos, enquanto os modelos MA(1) ajustados não os tiveram, além de terem apresentado maiores valores de AIC (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4. Ajuste dos modelos AR(1) e MA(1) aos dados da curva de progresso da incidência à 1143,18 m de altitude, e valores do indicador de qualidade de ajuste dos modelos (critério de Akaike - AIC).

Parâmetro	Coefficiente	Erro padrão	z	p-valor	Critério AIC
AR (1)					
μ	13,2210	3,6238	3,648	0,0003	190,97
ϕ_1	0,3721	0,1885	1,974	0,0483	
MA (1)					
μ	13,3305	3,2055	4,159	0,00003	191,18
θ_1	0,3876	0,2158	1,796	0,0725	

Tabela 5. Ajuste dos modelos AR(1) e MA (1) aos dados da curva de progresso da severidade à 1143,18 m de altitude, e valores do indicador de qualidade de ajuste dos modelo (critério de Akaike).

Parâmetro	Coefficiente	Erro padrão	z	p-valor	Critério AIC
AR (1)					
μ	0,4719	0,1554	3,037	0,0024	38,80
ϕ_1	0,3851	0,1885	2,043	0,0411	
MA (1)					
μ	0,4817	0,1313	3,668	0,0002	39,46
θ_1	0,3396	0,1857	1,829	0,0674	

Após ajustar os modelos aos dados, foi realizada a análise de resíduos por meio do teste de Box e Pierce. De acordo com esse método, as séries resultantes após o ajuste dos modelos também foram *ruído branco*. Sendo assim, de acordo com as análises, os modelos ajustados foram satisfatórios para descrever o comportamento das curvas de

progresso da incidência e da severidade da Mancha de Phoma nessa altitude, pois a dependência temporal foi adequadamente modelada.

Entretanto, quando realizaram-se as previsões da incidência e da severidade usando os modelos ajustados, os valores estimados não acompanharam satisfatoriamente o progresso da doença, com valores de resíduos altos e viés temporal (Tabela 6 e Fig. 6).

Tabela 6. Valores mensais das porcentagens da incidência e da severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro na altitude de 1143,18 m, e valores das previsões obtidos por meio dos modelos auto-regressivos ajustados às séries temporais.

Data	Incidência 1143,18 m	Previsão Incidência	Resíduos Incidência*	Severidade 1143,18 m	Previsão Severidade	Resíduos Severidade*
set/13	8,33	13,22	-4,89	0,096	0,472	-0,376
out/13	11,67	11,40	0,27	0,114	0,327	-0,213
nov/13	0,50	12,64	-12,14	0,007	0,334	-0,328
dez/13	23,75	8,49	15,26	0,857	0,293	0,565
jan/14	2,00	17,14	-15,14	0,047	0,620	-0,574
fev/14	0,50	9,04	-8,54	0,010	0,308	-0,299
mar/14	1,25	8,49	-7,24	0,010	0,294	-0,284
abr/14	2,00	8,77	-6,77	0,015	0,294	-0,279
mai/14	16,50	9,04	7,46	0,351	0,296	0,055
jun/14	15,00	14,44	0,56	0,661	0,425	0,236
jul/14	11,00	13,88	-2,88	0,684	0,545	0,139
ago/14	16,50	12,39	4,11	0,539	0,553	-0,015
set/14	21,25	14,44	6,81	0,918	0,498	0,420
out/14	1,50	16,21	-14,71	0,029	0,644	-0,615
nov/14	8,00	8,86	-0,86	0,391	0,301	0,090
dez/14	5,00	11,28	-6,28	0,110	0,441	-0,331
jan/15	1,75	10,16	-8,41	0,016	0,333	-0,316
fev/15	39,25	8,95	30,30	1,275	0,296	0,979
mar/15	35,25	22,91	12,34	1,374	0,781	0,593
abr/15	20,25	21,42	-1,17	0,622	0,819	-0,198
mai/15	39,75	15,84	23,91	1,879	0,530	1,350
jun/15	29,50	23,09	6,41	1,177	1,014	0,163
jul/15	14,75	19,28	-4,53	0,620	0,743	-0,123
ago/15	1,75	13,79	-12,04	0,035	0,529	-0,494

*Os resíduos correspondem aos valores observados menos os estimados.

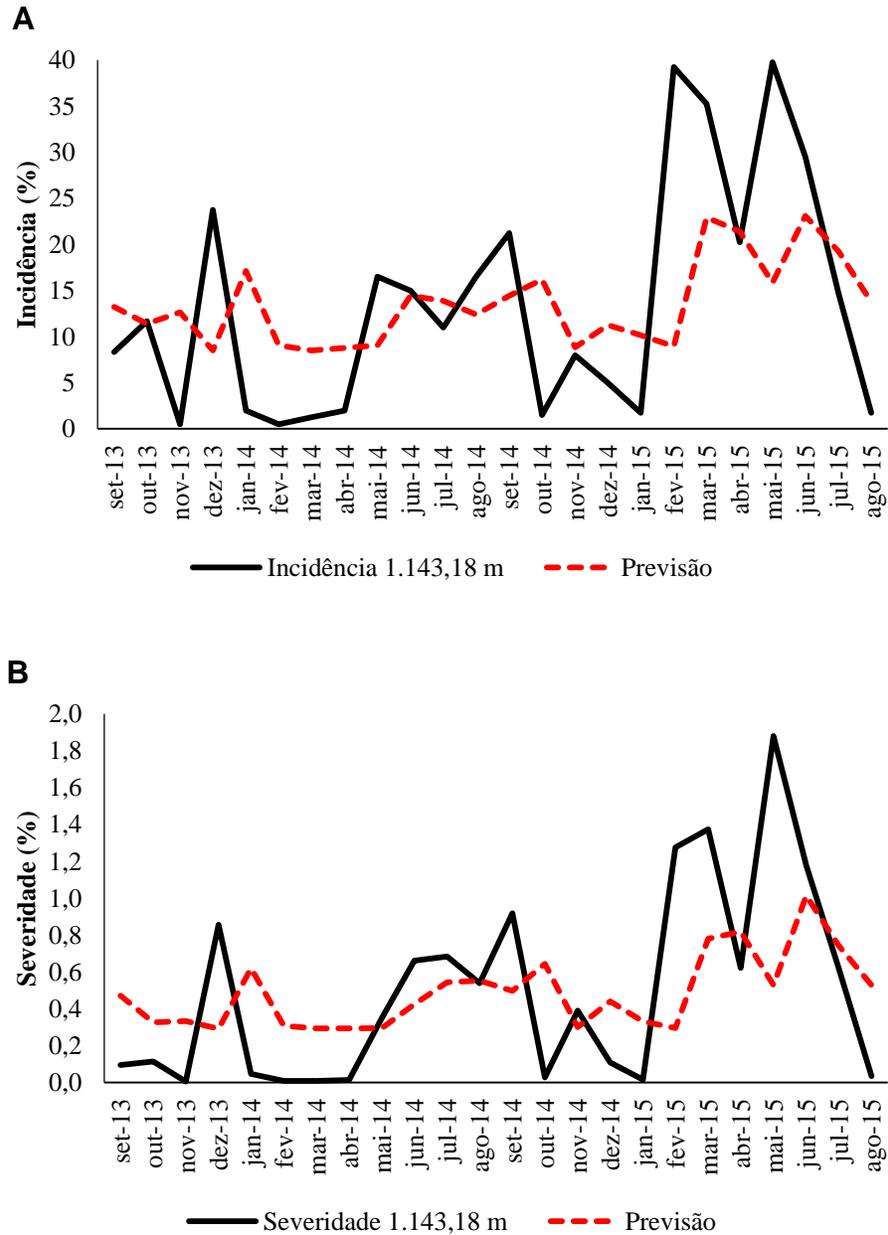


Fig. 6. Curvas de progresso da incidência (A) e da severidade (B) da Mancha de Phoma do cafeeiro à 1143,18 m de altitude e previsões obtidas com o uso dos modelos auto-regressivos ajustados às séries temporais.

Dada a ausência de autocorrelação da componente a_t , nas curvas de progresso da incidência e da severidade das médias dos 85 pontos e nas altitudes de 1130,54, 1140,65 e 1143,40 m, e as limitações observadas nas previsões das curvas à 1143,18 m dessas variáveis, optou-se por fazer os ajustes com modelos de regressão não lineares e lineares. O período com progresso regular da doença ocorreu entre os meses de fevereiro e junho de 2014, sendo o teste F significativo ($p < 0,001$) tanto para a incidência quanto para a severidade (Fig. 2A e 2B).

O modelo ajustado para a curva de progresso com parâmetro de taxa significativo e menores valores de erro padrão dos coeficientes, maior R^2 , menor QMR e melhor gráfico de distribuição de resíduos foi o modelo Gompertz. Com esse ajuste foi possível verificar a fase exponencial ou logarítmica do progresso da doença do mês de fevereiro a junho de 2014 (Fig. 7A e 7B), tanto para a curva de progresso da incidência quanto da severidade (Tabelas 7 e 8).

Tabela 7. Modelos de regressão linear e não linear ajustados aos dados da incidência mensal (fevereiro a junho de 2014) da Mancha de Phoma do cafeeiro, e indicadores de qualidade do ajuste. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG.

Coeficientes e indicadores de qualidade do ajuste (curva de progresso) - INCIDÊNCIA							
Modelo ¹	y ₀	Erro padrão y ₀	r	Erro padrão r	R ²	QMresíduo	Gráfico de resíduos ²
Linear	-0,11747 ^{ns}	0,05924	0,05194*	0,01396	0,8218	0,0019498	4
Monomolecular	-0,13517 ^{ns}	0,07327	0,05613*	0,01602	0,8078	0,0021029	5
Exponencial	0,007378 ^{ns}	0,008757	0,56155 ^{ns}	0,212244	0,8260	0,0019043	3
Logístico	0,005497 ^{ns}	0,007028	0,65107 ^{ns}	0,233418	0,8394	0,0017569	2
Gompertz	0,0003084 ^{ns}	0,001135	0,277043*	0,086059	0,8680	0,0014447	1

¹Dados divididos por 100.

²Num ranqueamento de 1 a 5, 1 indica o modelo com resíduos mais próximos de zero e sem tendências indesejáveis, enquanto 5 é o modelo com pior gráfico de resíduos. * p≤ 0,05; **p< 0,01.

Tabela 8. Modelos de regressão linear e não linear ajustados aos dados da severidade mensal (fevereiro a junho de 2014) da Mancha de Phoma do cafeeiro, e indicadores de qualidade do ajuste. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG.

Coeficientes e indicadores de qualidade do ajuste (curva de progresso) - SEVERIDADE							
Modelo ¹	y ₀	Erro padrão y ₀	r	Erro padrão r	R ²	QMresíduo	Gráfico de resíduos
Linear	-0,0076354 ^{ns}	0,0038895	0,0028407*	0,0009168	0,7619	8,404 x10 ⁻⁶	4
Monomolecular	-0,0076710 ^{ns}	0,0039357	0,0028460*	0,0009229	0,7605	8,454 x10 ⁻⁶	5
Exponencial	2,326 x10 ⁻⁵ ^{ns}	1,446 x10 ⁻⁵	1,046**	1,058 x10 ⁻¹	0,9911	3,124 x10 ⁻⁷	3
Logístico	2,261 x10 ⁻⁵ ^{ns}	1,402 x10 ⁻⁵	1,053**	1,056 x10 ⁻¹	0,9913	3,080 x10 ⁻⁷	2
Gompertz	3,064 x10 ⁻⁷ ^{ns}	3,883 x10 ⁻⁷	0,2046**	1,456 x10 ⁻²	0,9952	1,706 x10 ⁻⁷	1

¹Dados divididos por 100.

²Num ranqueamento de 1 a 5, 1 indica o modelo com resíduos mais próximos de zero e sem tendências indesejáveis, enquanto 5 é o modelo com pior gráfico de resíduos. * p≤ 0,05; **p< 0,01.

Em relação aos dados linearizados, para estimar as taxas de progresso da incidência e da severidade da doença, os dados originais, apesar de não terem apresentado os maiores valores de R^2 , foram os de menores valores de erro padrão dos coeficientes, menores valores de QMR e melhores gráficos de distribuição de resíduos, tanto para a incidência quanto para a severidade, em comparação aos dados linearizados (Tabelas 9 e 10).

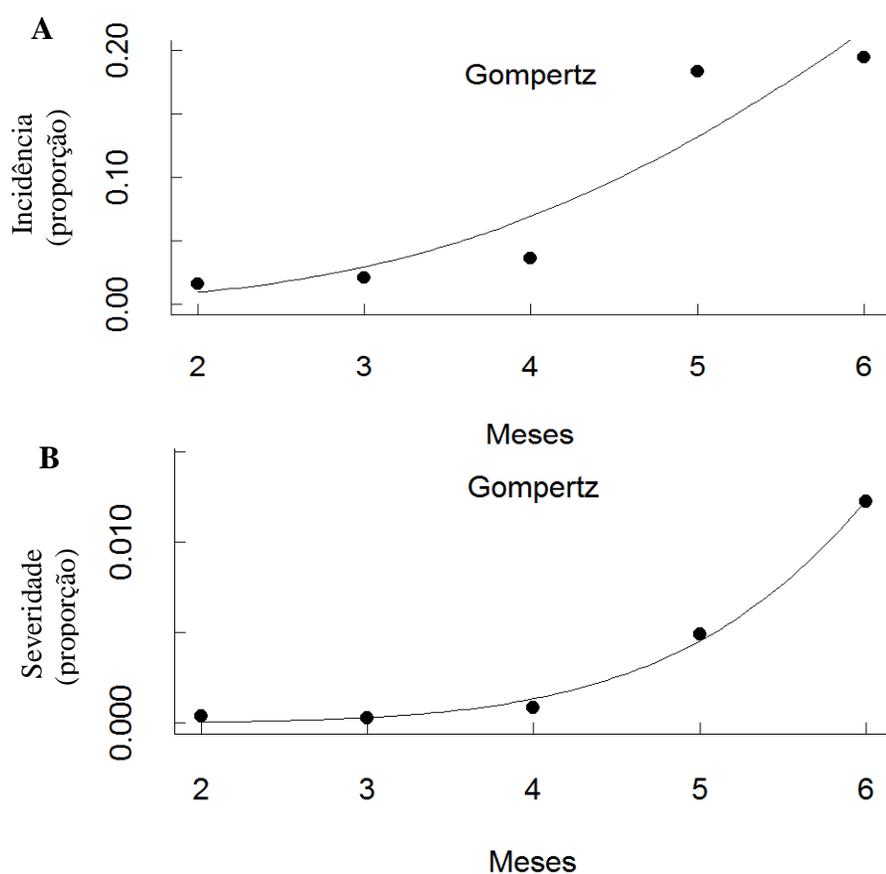


Fig. 7. Representação do ajuste do modelo de Gompertz aos dados das curvas de progresso da incidência (A) e da severidade (B) da Mancha de Phoma do cafeeiro para o período de fevereiro (mês 2) à junho (mês 6) de 2014.

Tabela 9. Ajuste de modelos de regressão linear simples aos dados originais e linearizados da incidência de Mancha de Phoma do cafeeiro para estimar as taxas de progresso da doença.

Coefficientes e indicadores de qualidade do ajuste (taxas) - INCIDÊNCIA							
Linearização¹	y₀	Erro padrão	r	Erro padrão	R²	QMresíduo	Gráfico de resíduos²
		y₀		r			
Dados originais	-0,11747 ^{ns}	0,05924	0,05194*	0,01396	0,8218	0,0019497	1
Monito	-0,13399 ^{ns}	0,06706	0,05818*	0,01581	0,8187	0,0024986	2
Exponito	-5,7880**	0,5734	0,7148*	0,1351	0,9031	0,1826499	4
Logito	-5,9220**	0,6370	0,7730*	0,1501	0,8983	0,2254084	5
Gompito	-2,06720**	0,25003	0,26731*	0,05893	0,8727	0,0347317	3

¹Dados divididos por 100.

²Num ranqueamento de 1 a 5, 1 indica o modelo com resíduos mais próximos de zero e sem tendências indesejáveis, enquanto 5 é o modelo com pior gráfico de resíduos. * p≤ 0,05; **p< 0,01.

Tabela 10. Ajuste de modelos de regressão linear simples aos dados originais e linearizados da severidade de Mancha de Phoma do cafeeiro para estimar as taxas de progresso da doença.

Coefficientes e indicadores de qualidade do ajuste (taxas) - SEVERIDADE							
Linearização¹	y₀	Erro padrão	r	Erro padrão	R²	QMresíduo	Gráfico de resíduos²
		y₀		r			
Dados originais	-0,007632 ^{ns}	0,003886	0,002840*	0,000916	0,7621	8,39 e-06	1
Monito	-0,007682 ^{ns}	0,0039191	0,002857*	0,0009237	0,7613	8,53 e-06	2
Exponito	-10,5488**	0,9263	0,9887*	0,2183	0,8724	0,4767213	4
Logito	-10,5565**	0,9288	0,9915*	0,2189	0,8724	0,4792445	5
Gompito	-2,49931**	0,15074	0,16033*	0,03553	0,8716	0,0126237	3

¹Dados divididos por 100.

²Num ranqueamento de 1 a 5, 1 indica o modelo com resíduos mais próximos de zero e sem tendências indesejáveis, enquanto 5 é o modelo com pior gráfico de resíduos. * p≤ 0,05; **p< 0,01.

Sendo assim, a taxa de progresso da incidência da Mancha de Phoma, de fevereiro a junho de 2014, foi de 5,19% ao mês, enquanto a taxa de progresso da severidade mensal foi de 0,28% (Tabelas 9 e 10 e Fig. 8A e 8B).

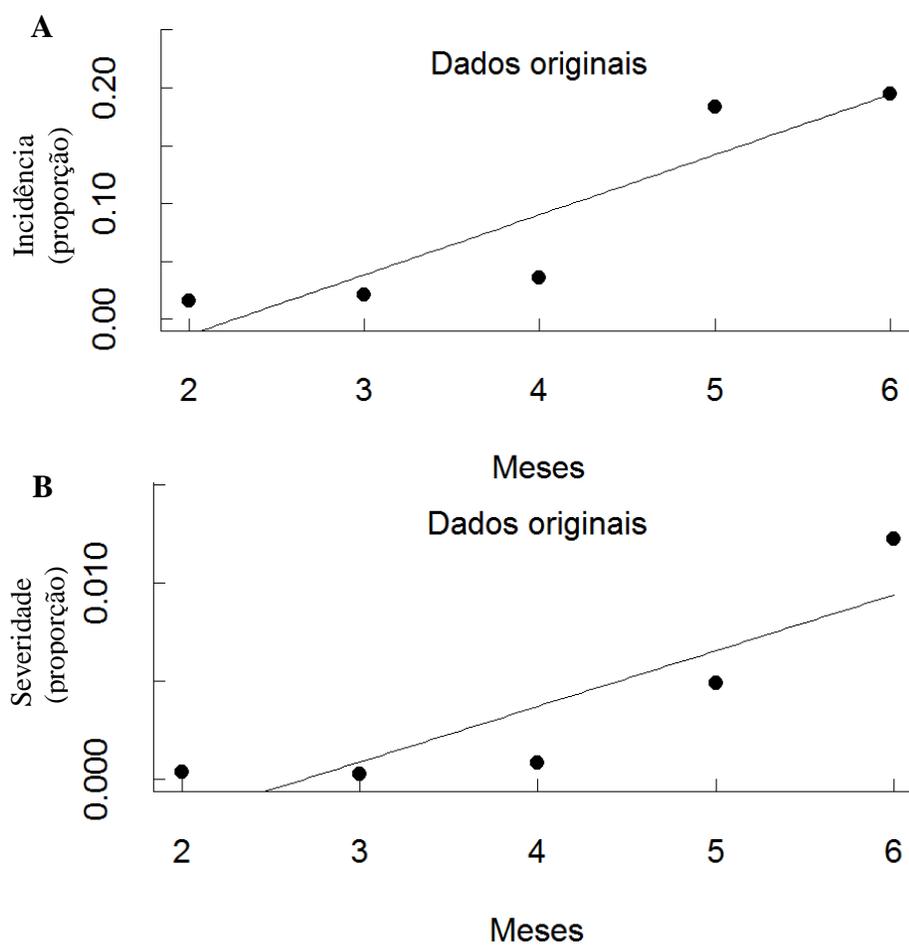


Fig. 8. Representação do ajuste do modelo de regressão linear simples aos dados originais das curvas de progresso da incidência (A) e da severidade (B) da Mancha de Phoma do cafeeiro para o período de fevereiro (mês 2) à junho (mês 6) de 2014.

Discussão

As curvas de progresso da incidência e da severidade apresentaram diversos picos ou pontos de máximo ao longo dos 24 meses de avaliação, com progresso regular, ou forma exponencial típica apenas entre fevereiro e junho de 2014. Isso pode ser explicado por terem ocorrido condições ambientais favoráveis ao progresso da doença nesse período, com redução gradual da temperatura do ar e ocorrência de picos com maior velocidade dos ventos oriundos do sul. Esses ventos, com velocidades médias atingindo até $4,76 \text{ m.s}^{-1}$ e as diferenças de temperatura média da maior para a menor altitude podem ter proporcionado na superfície foliar temperaturas ainda menores, além de ferimentos na cutícula, facilitando a penetração do patógeno.

Vasco (2012) e Santos et al. (2014) observaram as maiores incidências dessa doença na cultura do café nos períodos com menores temperaturas médias, variando entre 16 e 19 °C. Lorenzetti et al. (2015) verificaram maior crescimento dos tubos germinativos dos conídios desse patógeno quando submetidos a baixas temperaturas entre 15 e 20 °C. Ou seja, temperaturas nessa faixa aumentam as chances de infecção do patógeno, pois ao crescerem mais, os tubos germinativos têm maiores chances de encontrar portas de entrada para penetrar. Além disso, a penetração do fungo é facilitada por danos mecânicos nos tecidos da planta, os quais podem ser produzidos por ventos intensos no período frio (Carvalho et al. 2013).

As curvas de progresso localizadas nos pontos mais altos da lavoura apresentaram, de forma geral, maiores valores da incidência e da severidade, e associação evidente com os ventos mais voltados para o sul, sugerindo ausência de obstáculos desviando a massa de ar frio a partir de sua origem, favorecendo assim o progresso da doença. Esses resultados estão de acordo com as observações de Carvalho

et al. (2013), os quais informaram estar a doença associada com os ventos das direções sul, sudeste e leste.

Espécies do gênero *Phoma* têm a habilidade de penetrar em seus hospedeiros por diferentes mecanismos, como aberturas naturais (Roustae et al. 2000), ferimentos (Zucker e Catara 1985) e de forma direta (Graaf et al. 2002), rompendo a epiderme e estabelecendo os processos infecciosos. Em estudos de microscopia eletrônica de varredura, Lorenzetti et al. (2015) observaram eventos iniciais de estabelecimento das relações patógeno hospedeiro, tais como a separação da cutícula a partir do tecido foliar. Firman (1965), estudando esse mesmo patossistema, verificou o desenvolvimento de sintomas dessa doença apenas em folhas jovens feridas artificialmente. De acordo com o autor, folhas não feridas, e mesmo folhas maduras feridas, não desenvolveram os sintomas quando inoculadas com a suspensão de conídios. Essas informações estão de acordo com as observações feitas em campo, pois os sintomas dessa doença geralmente ocorrem no primeiro e segundo pares de folhas, provavelmente por serem as folhas mais tenras e predispostas aos danos mecânicos. Consequentemente, os ferimentos gerados são usados como porta de entrada para o patógeno penetrar.

Quando analisou-se a autocorrelação temporal dos resíduos dos dados das curvas de progresso, médias dos 85 pontos georreferenciados e das altitudes de 1130,54, 1140,65 e 1143,40 m, os valores não foram significativos, ou seja, os resíduos foram independentes. Mesmo para as curvas de progresso da incidência e da severidade à 1143,18 m, os modelos de séries temporais não proporcionaram boas previsões. Embora a modelagem para esse patossistema não tenha sido satisfatória nas condições testadas, futuramente novos ajustes na metodologia poderão ser feitos para permitir a aplicação

desse tipo de análise. No caso da Mancha de Phoma, para ajustar esses modelos, dependentes da existência de autocorrelação dos resíduos, uma das propostas seria avaliar a doença em intervalos semanais ou no máximo, quinzenais. Isso porque o ciclo da doença é rápido no campo, geralmente inferior a um mês sob condições ambientais favoráveis, com queda das folhas sintomáticas, refletindo na ausência de autocorrelação dos resíduos quando as avaliações são realizadas em intervalos de tempos prolongados. Souza et al. (2015), estudando a dinâmica da incidência e da severidade da Cercosporiose do cafeeiro, verificaram que os erros associados aos dados foram gerados por processos auto-regressivos (AR) e de médias móveis (MA), ARMA. Apesar de não terem usado modelos de séries temporais, os autores ajustaram modelos de regressão considerando o efeito temporal nas estimativas dos parâmetros, para compreender a dinâmica da incidência e da severidade da doença. De acordo com os autores, os modelos ajustados foram apropriados para descrever as curvas de progresso, com valores médios de R^2 de 79,03 e 75,42% para a incidência e para a severidade, respectivamente.

O modelo de Gompertz foi utilizado para modelar as curvas de progresso da incidência e da severidade da doença entre fevereiro e junho de 2014, explicando satisfatoriamente o seu comportamento, embora não tenha ocorrido a estabilização da doença. As taxas de progresso foram melhor explicadas com o ajuste do modelo de regressão linear da reta para os dados originais, com parâmetro de taxa de incidência igual a 5,19%, e da severidade igual a 0,28%. Entretanto, para o mesmo período do ano seguinte, não procedeu-se com o ajuste de modelos não lineares, devido ao comportamento irregular da doença. O mesmo é válido para as taxas de progresso. Ou seja, não é possível generalizar o ajuste de um modelo para diferentes épocas devido à

dinâmica temporal dessa doença, fortemente influenciada por variáveis ambientais, tanto climáticas quanto do solo.

Os modelos de regressão linear e não linear também têm sido aplicados com êxito em outros patossistemas para modelar as taxas e curvas de progresso, respectivamente. Fargette et al. (1993) usaram os modelos monomolecular, logístico, Gompertz e Von Bertalanffy-Richards para modelar 49 curvas de progresso de *African cassava mosaic virus* na cultura da mandioca. Os dados foram coletados na Costa do Marfim (África Ocidental) de plantações mensais entre 1981 e 1986. O modelo de Gompertz também foi o mais apropriado para descrever as epidemias, e as análises dos parâmetros dos modelos ajustados indicaram taxa máxima de aumento da doença dois meses após o plantio, com componente sazonal na taxa de progresso.

Dessa forma, os modelos de regressão não linear são uma alternativa aos modelos de séries temporais para modelar a curva de progresso da Mancha de Phoma quando os erros são independentes, ou seja, não correlacionados. Entretanto, não podem ser generalizados para explicar o progresso dessa doença em anos distintos devido à influência das variáveis ambientais no seu desenvolvimento. O mesmo é válido em relação aos modelos lineares utilizados para estimar as taxas de progresso.

Conclusões

As curvas de progresso da incidência e da severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro apresentaram padrão aleatório ao longo de cada ano da pesquisa.

Maiores intensidades da doença foram observadas na altitude média de 1143,40 m.

Observou-se autocorrelação temporal dos resíduos dos dados apenas para as curvas de progresso da incidência e da severidade na altitude média de 1143,18 m.

O modelo de Gompertz ajustou-se satisfatoriamente aos dados da curva de progresso da média dos 85 pontos da incidência e da severidade da doença, considerando o período entre fevereiro e junho de 2014.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e à fazenda Neumann Kaffee Gruppe (NKG), pela concessão da área para realizar a pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Box, G. E. P.; Jenkins, G. M.; Reinsel, G. C. (1994). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco, CA, USA: Holden-Day.
- Campbell, C.L.; Madden, L.V. (1990). *Introduction to plant disease epidemiology*. New York: John Wiley & Sons.
- Carvalho, V. L.; Chalfoun, S. M.; Cunha, R.L. (2013). *Doenças do cafeeiro: diagnose e controle*. Belo Horizonte: EPAMIG, 48 p.
- Charnet, R.; Freire, C. A. L.; Charnet, E. M. R.; Bonvino, H. (2008). *Análise de modelos de regressão linear: com aplicações*. 2 ed. Campinas: UNICAMP.
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. (2017). Acompanhamento da Safra Brasileira. Café, Safra 2016, Brasília.

- Fargette, D.; Jeger, M.; Fauquet, C.; Fishpool, L.D.C. (1993). Analysis of temporal disease progress of *African cassava mosaic virus*. *Ecology and Epidemiology*, 84(1), 91-98.
- Firman, I. D. (1965). Some investigations on a disease of *Coffea arabica* caused by *Ascochyta tarda*. *Transactions of the British Mycological Society*, Cambridge, 48, 161-166.
- Graaf, P. V.; Joseph, M. E.; Chartier-Hollis J. M.; O'Neill, T. M. (2002). Prepenetration stages in infection of clematis by *Phoma clematidina*. *Plant Pathology*, 51, 331-337.
- Gretl: Econometric software for the GNU generation. 2016.
- Holb I. J. (2008). Monitoring conidial density of *Monilinia fructigena* in the air in relation to brown rot development in integrated and organic apple orchards. *European Journal of Plant Pathology*, 120, 397-408.
- Jesus Junior, W. C.; Pozza, E. A.; Vale, F. X. R.; Aguilera, G. M. (2004). Análise temporal de epidemias. In Vale, F. X. R.; Jesus Junior, W. C.; Zambolim, L. *Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas*. (pp. 125-191). Belo Horizonte: Editora Perfil.
- Lima, L. M. (2009). *Variabilidade espacial da Mancha de Phoma relacionada à nutrição do cafeeiro e incidência da cercosporiose na qualidade do café*. 102 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Lorenzetti, E. R. et al. (2015). Effect of temperature and leaf wetness on *Phoma tarda* and *Phoma* leaf spot in coffee seedlings. *Coffee Science*, Lavras, 10(1), 1-9.

- Morettin P. A.; Tolo, C. M. C. (2006). *Análise de séries temporais*. 2 ed. Rev. e ampl., São Paulo: Blucher.
- Pozza, E. A.; Salgado, M.; Pfenning, L. H. (2003). Intensidade da Mancha de Phoma do cafeeiro (*Phoma tarda*) em diferentes temperaturas e tempo de molhamento foliar. In Congresso Brasileiro de Fitopatologia, 36, Uberlândia. Anais... Fortaleza: Sociedade Brasileira de Fitopatologia, 28, 223-223.
- Pozza, E. A.; Carvalho, V. L. Chalfoun, S. M. (2010). Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In Guimarães, R. J.; Mendes, A.N.G.; Baliza, D.P. (Ed.). *Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas*. Lavras: UFLA, 69-101.
- R Development Core Team. (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ratkowsky, D. A. (1990). *Handbook of nonlinear regressions models*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Reis, E. M. (2004). *Previsão de doenças de plantas*. Passo Fundo: UPF.
- Roustaee, A.; Dechamp-Guillaume, G.; Gelie, B.; Savy, C.; Dargent, R.; Barrault, G. (2000). Ultrastructural Studies of the Mode of Penetration by *Phoma macdonaldii* in Sunflower Seedlings. *Phytopathology*, 90(8), 915-920.
- Salgado, M.; Pozza, E. A.; Lima, L. M.; Pereira, R. T. G.; Pfenning, L. H. (2009). Escala diagramática para avaliação da severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro. *Tropical Plant Pathology*, Lavras, 34(6), 422-427.
- Salgado, M.; Pozza, E. A.; Pfenning, L.H. (2002). Influência da temperatura e do tempo de incubação no crescimento micelial e produção de conídios *in vitro* de espécies

- de Phoma do cafeeiro. In Congresso brasileiro de fitopatologia, 35, 2002, Recife. Anais... Fortaleza: Sociedade Brasileira de Fitopatologia, 27, 159-159.
- Santos, L. S. D. et al (2014). Incidência da Mancha de Phoma em cafeeiro irrigado por gotejamento, sob diferentes manejos de irrigação. *Coffee Science*, Lavras, 9(1), 77-89.
- Scherm, H.; Yang, X. B. (1995). Interannual variations in wheat rust development in China and United States in relation to the El Niño/Southern oscillation. *Phytopathology*, 85, 970-976.
- Souza, A. G. C.; Maffia, L. A.; Silva, F. F.; Mizubuti, E. S. G.; Teixeira, H. (2015). A time series analysis of brown eye spot progress in conventional and organic coffee production systems. *Plant Pathology*, 64(1), 1-10.
- Schabenberger, O.; Pierce, F. J. (2002). *Contemporary Statistical Models for the Plant and Soil Sciences*. Boca Raton: CRC Press.
- StatSoft, Inc. (2004). STATISTICA (data analysis software system), version 7. www.statsoft.com.
- USDA 2017. (2018) Coffee: World Markets and Trade. Foreign Agricultural Service/USDA 2017. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>. Accessed 02 August 2018.
- Xu, X. M.; Butt, D. J.; Ridout, U. S. (1995). Temporal patterns of airborne conidia of *Podosphaera leucotricha*, causal agent of apple powdery mildew. *Plant Pathology*, 44, 944-955.

- Workneh, F.; Rush, C. M. (2002). Evaluation of relationships between weather patterns and prevalence of sorghum ergot in the Texas Panhandle. *Phytopathology*, 92, 659-666.
- Yang, X. B.; Zeng, S. M. (1992). Detecting patterns of wheat stripe rust pandemics in time space. *Phytopathology*, 82, 571-576.
- Zauza, E. A. V. (2007). *Epidemiologia da ferrugem do eucalipto e resistência genética*. Tese de Doutorado. Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa.
- Zucker, W. V.; Catara, A. (1985). Observations in the scanning electron microscope on the foliar penetration of *Phoma tracheiphila*. *Informatore Fitopatologico*, 35(4), 33-35.

**ARTIGO 2 – MODELOS DE REGRESSÃO PARA AUXÍLIO À TOMADA
DE DECISÃO DO CONTROLE DA MANCHA DE PHOMA DO
CAFFEEIRO BASEADO EM VARIÁVEIS AMBIENTAIS**

**H.R. Silva¹ • E.A. Pozza¹ • A.S. Freitas¹ • M.L.O. Freitas¹ • L.L. Belan¹ • M.P.
Barbosa Junior¹ M.J.F. Vivanco²**

¹Departamento de Fitopatologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais
37200-000, Brasil

²Departamento de Estatística, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais
37200-000, Brasil

e-mail: humbersonagronomo@yahoo.com.br

(VERSÃO PRELIMINAR)

Elaborado de acordo com as normas do periódico “Precision Agriculture”.

Resumo

Modelos estatísticos podem auxiliar na tomada de decisão para o controle de doenças de plantas, proporcionando menor uso de insumos, maior economia e menores impactos ambientais negativos. Dessa forma, esse trabalho teve por objetivo ajustar modelos de regressão linear múltipla (MRLM) para estimar o progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro a partir de variáveis ambientais. O ensaio foi conduzido por dois anos, com avaliações mensais, de setembro de 2013 a agosto de 2015, numa lavoura de *Coffea arabica* L. cultivar Catucaí amarelo 2 SL, implantada sob espaçamento de 3,7 x 0,7 m e idade de quatro anos no início da pesquisa. Foi demarcada nessa área uma malha regular de 7,65 ha com 85 pontos, no espaçamento de 30 x 30 m entre pontos. A curva de progresso da incidência foi construída considerando-se a média geral dos 85 pontos em cada mês. Foram geradas 52 variáveis ambientais com auxílio de estação automática instalada na lavoura, e essas foram utilizadas no desenvolvimento dos MRLM. Foram ajustados 126 modelos, sendo quatro deles de maior êxito para estimar a dinâmica da doença ao longo do tempo. Dois desses modelos permitiram obter os valores estimados da incidência da doença duas semanas anteriores às avaliações, com alta precisão e acurácia.

Palavras-chave: Epidemiologia. Modelos de regressão linear múltipla. Temperatura. Umidade relativa do ar. Molhamento foliar.

Introdução

O café é uma das principais *commodities* comercializadas mundialmente. O Brasil é o maior produtor e exportador mundial dos grãos, sendo os principais importadores a União Europeia (EU) e os Estados Unidos (EUA) (USDA 2017). A principal espécie cultivada no Brasil é *Coffea arabica* L., com 1,76 milhão de hectares plantados em 2016, e produção de mais de 43 milhões de sacas beneficiadas de 60 kg (Conab 2017).

Uma série de fatores contribuiu para a safra recorde verificada nesse ano, dentre eles, o controle de doenças, principalmente com o uso de fungicidas. O controle químico é empregado devido as principais cultivares plantadas na maioria das regiões produtoras serem suscetíveis às doenças, as quais podem causar perdas na produção e na qualidade dos grãos, além da morte das plantas, sob condições favoráveis.

Dentre elas, destaca-se a Mancha de Phoma (*Phoma* spp.), a qual pode causar perdas entre 15 e 43%. Os sintomas observados nas plantas infectadas são manchas foliares, seca de ponteiros, necroses em rosetas florais e mumificação de chumbinho (Pozza et al. 2010). Além disso, essa doença não possui padrão de ocorrência ao longo da estação de crescimento da cultura (Santos et al. 2014), dificultando o manejo.

Dessa forma, muitos produtores fazem a aplicação de fungicidas de forma preventiva, utilizando calendários fixos de pulverização para tentar impedir o progresso da doença. Isso torna o controle oneroso, pois muitas vezes são feitas aplicações desnecessárias, além de gerar impactos negativos no ambiente (Garcia 1999). Entretanto, doenças de plantas ocorrem somente sob condições ambientais favoráveis, e no caso da Mancha de Phoma do cafeeiro, temperaturas entre 15 e 20 °C, associadas a volumes

diários de chuva acima de 4 mm, são condições altamente favoráveis a essa doença (Pozza e Alves 2008, Vasco 2012, Santos et al. 2014, Lorenzetti et al. 2015). Essas variáveis são importantes para o ciclo do patógeno, porém, outras também merecem atenção, e devem ser estudadas.

Nesse sentido, os modelos estatísticos capazes de abordar diversas variáveis podem contribuir a entender sua influência no processo doença e assim no seu manejo racional, utilizando informações do ambiente para estimar valores futuros de incidência ou de severidade. Com isso, podem ser definidos períodos estratégicos para aplicar fungicidas, reduzindo assim o número de pulverizações (Campbell e Madden 1990). Várias classes de modelos estatísticos podem ser utilizadas para essa finalidade, dentre elas, os modelos de regressão linear múltipla (MRLM). Esses estimam o valor da variável resposta como função de várias variáveis regressoras ou variáveis explicativas (Charnet et al. 2008). Segundo Campbell e Madden (1990), a importância dos modelos lineares está baseada na metodologia usada para estimar os parâmetros e a vasta quantidade de conhecimento nas propriedades desses modelos.

Na cultura do café, sistemas de alerta à ocorrência de doenças têm sido desenvolvidos, principalmente para o monitoramento da Ferrugem (Kushalappa et al. 1983, Garçon 2001, Pinto et al. 2002, Meira et al. 2009). Para a Mancha de Phoma, Lorenzetti et al. (2015) ajustaram um MRLM para explicar o monociclo da doença em mudas de cafeeiro em função da temperatura e do molhamento foliar. De acordo com os autores, temperaturas entre 15 e 20 °C associadas a períodos de molhamento foliar acima de 36 horas são condições favoráveis ao progresso da doença. Entretanto, o modelo não informa a relação do número de horas nessa faixa de temperatura com o progresso da

doença. Além disso, não tem aplicação como sistema de alerta, pois não informa com antecedência os riscos futuros de progresso da doença.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi identificar as variáveis ambientais relacionadas ao progresso da Mancha de Phoma no campo e desenvolver um sistema de alerta ou de apoio à decisão para essa doença.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido por dois anos em plantio comercial da 'NKG Fazendas Brasileiras Ltda', localizada no município de Santo Antônio do Amparo, Estado de Minas Gerais, Brasil. As coordenadas geográficas do ponto de referência são latitude 20°53'23,7" Sul, longitude 44°52'56,9" Oeste e altitude de 1145,9 m. A área utilizada no estudo foi de 7,65 ha, cultivada com a espécie *Coffea arabica* L. cultivar Catucaí amarelo 2 SL, suscetível à Mancha de Phoma e resistente à Ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome), implantada no espaçamento de 3,7 x 0,7 m e idade de quatro anos no início da pesquisa. Foi demarcada nessa área uma malha regular de 7,65 ha com 85 pontos, no espaçamento de 30 x 30 m entre pontos (Fig. 1). Estes foram georreferenciados com auxílio de receptor GNSS Topcon® Hiper Lite L1 L2. Os dados foram levantados pelo método PPK (pós-processamento cinemático). Foi montada uma base e percorreu-se a área com o receptor, demarcando todos os vértices amostrais. Cada ponto amostral georreferenciado da malha foi constituído por cinco plantas de café, sendo três plantas na mesma linha, uma acima da central, e outra abaixo dessa.

O manejo da fertilidade, de pragas e doenças na área do estudo foi realizado de forma homogênea e de acordo com as necessidades da cultura.



Fig. 1. Imagem de satélite da área experimental e malha de pontos georreferenciados. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG, 2014 (Google Earth, 2014). S1 (em azul) indica o local de instalação da estação automática modelo Datalogger CR1000, marca Campbell Scientific Inc.®

Foram ajustados modelos de regressão linear múltipla (MRLM) para explicar a flutuação da curva de progresso da incidência da doença ao longo do tempo. Para tanto, foram efetuadas 24 avaliações mensais da incidência, com início no mês de setembro de 2013 e término em agosto de 2015. Em cada planta avaliou-se, aleatoriamente, o primeiro par de folhas completamente expandido de quatro ramos no terço superior da copa, sendo dois ramos em cada face de exposição, totalizando oito folhas por planta e 40 folhas por ponto georreferenciado. Os dados de incidência da doença foram obtidos por meio da Equação 1. Com esses dados, construiu-se a curva de progresso da incidência geral na lavoura, considerando a média dos 85 pontos em cada mês avaliado.

$$I(\%) = \frac{FD}{TF} * 100 \quad (1)$$

Em que:

I(%)= incidência da doença, em porcentagem;

FD= número de folhas doentes da amostra no ponto georreferenciado;

TF= Total de folhas avaliadas no ponto georreferenciado.

Para registrar as variáveis ambientais, instalou-se na lavoura uma estação automática modelo Datalogger CR1000, marca Campbell Scientific Inc.[®], a uma altitude de 1145,04 m (Fig. 1). A partir das informações coletadas com essa estação, gerou-se um total de 52 variáveis (Tabela 1), as quais foram utilizadas para auxiliar no desenvolvimento dos MRLM.

Tabela 1. Variáveis ambientais criadas com auxílio da estação modelo Datalogger CR1000, marca Campbell Scientific Inc.[®], instalada na área experimental.

Variável*	Descrição
Vel.vento max ¹	Média da velocidade máxima do vento diária
Direção do vento ¹	Direção média do vento no dia, em graus (azimute)
Tmin, Tmed ¹	Média da temperatura diária
URmin, URmed, URmax ¹	Média da umidade relativa do ar diária
Vel.vento max acumulada ²	Acumulado da velocidade máxima diária
T15min, T15med ²	Nº de horas no dia com temperatura abaixo de 15°C
T15-20min, T15-20med ²	Nº de horas no dia com temperatura maior ou igual à 15 e inferior a 20°C
T20-25min, T20-25med ²	Nº de horas no dia com temperatura maior ou igual à 20 e inferior a 25°C
T25-30min, T25-30med ²	Nº de horas no dia com temperatura maior ou igual à 25 e inferior a 30°C
UR70min, UR70med, UR70max ²	Nº de horas no dia com UR menor ou igual à 70%
UR80min, UR80med, UR80max ²	Nº de horas no dia com UR maior ou igual à 80%
UR90min, UR90med, UR90max ²	Nº de horas no dia com UR maior ou igual à 90%
NDMFmin, NDMFmed, NDMFmax ²	Nº de dias com molhamento foliar (wet) (se não houve molhamento no dia= 0, se houve= 1)
NDMFminPAR, NDMFmedPAR, NDMFmaxPAR ²	Nº de dias com molhamento foliar PARCIAL (slightly wet) (se não houve molhamento no dia= 0, se houve= 1)
NDMFmin3, NDMFmed3, NDMFmax3 ²	Nº de dias com molhamento foliar maior ou igual à 3h no dia (wet)
NDMFminPAR3, NDMFmedPAR3, NDMFmaxPAR3 ²	Nº de dias com molhamento foliar PARCIAL maior ou igual à 3h no dia (slightly wet)
NDMFmin6, NDMFmed6, NDMFmax6 ²	Nº de dias com molhamento foliar maior ou igual à 6h no dia (wet)
NDMFminPAR6, NDMFmedPAR6, NDMFmaxPAR6 ²	Nº de dias com molhamento foliar PARCIAL maior ou igual à 6h no dia (slightly wet)
NDMFmin9, NDMFmed9, NDMFmax9 ²	Nº de dias com molhamento foliar maior ou igual à 9h no dia (wet)
NDMFminPAR9, NDMFmedPAR9, NDMFmaxPAR9 ²	Nº de dias com molhamento foliar PARCIAL maior ou igual à 9h no dia (slightly wet)
NDP ²	Nº de dias com precipitação pluvial (se não houve precipitação no dia= 0, se houve= 1)
TPP ²	Total de chuva no dia, em mm
DPP ²	Duração, em horas, da precipitação no dia. Obs.: menor unidade de medida é a hora.

*mín., med e máx referem-se aos valores mínimo, médio e máximo de cada variável.

¹Variável criada a partir da média dos valores considerados na defasagem.

²Variável criada a partir dos valores acumulados considerados na defasagem.

A seleção das variáveis ambientais para compor os MRLM foi realizada com o auxílio da análise de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$). Para tanto, essas variáveis foram defasadas em relação às datas de avaliação da doença, de duas formas:

- 1) valores médios/acumulados de 7, 14, 21, 28, 42 e 56 dias imediatamente anteriores às avaliações da doença, incluindo o próprio dia da avaliação, identificadas por 7A, 14A, 21A, 28A, 42A e 56A, respectivamente, e;
- 2) valores médios/acumulados de uma semana anterior às avaliações da doença, incluindo o próprio dia da avaliação, defasados em 1, 2, 3, 5 e 7 semanas anteriores, identificadas por 1SD, 2SD, 3SD, 5SD e 7SD, respectivamente. Para as variáveis ‘Vel.vento max’, ‘Direção do vento’, ‘Tmin’, ‘Tmed’, ‘URmin’, ‘URmed’ e ‘URmax’, trabalharam-se com as médias diárias. Já para as demais variáveis apresentadas na Tabela 1, foram utilizados os valores acumulados no período de defasagem. As análises de correlação também auxiliaram na seleção do melhor período de defasagem de cada variável correlacionada com a doença.

As variáveis ambientais selecionadas foram incorporadas aos MRLM, cuja equação geral é apresentada a seguir (Equação 2).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon \quad (2)$$

Onde:

Y = incidência da doença, em porcentagem;

x_1, x_2, x_p = variáveis ambientais;

β_0 = constante de regressão;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ = parâmetros ou coeficientes de regressão parciais;

ε = erros aleatórios independentes.

Foram avaliadas combinações lineares, e também efeitos quadráticos e de interação entre as variáveis ambientais. Inicialmente, foram ajustados modelos completos aos dados. Em seguida, foram eliminados de cada modelo os coeficientes parciais da regressão de menor significância, até chegar-se aos modelos reduzidos com estimativas de parâmetros significativos de acordo com o teste t ($p \leq 0,05$), menor AIC e maiores valores de R^2 e R^{2*} .

O valor do Critério de Informação de Akaike (AIC) é definido como:

$$AIC_p = -2\log(L_p) + 2[(p+1)+1] \quad (3)$$

Onde:

L_p : função de máxima verossimilhança do modelo;

p : número de variáveis auxiliares.

O AIC permite encontrar o modelo mais parcimonioso, isto é, com menor número de parâmetros possíveis e melhor explicação do comportamento da variável resposta (Akaike 1974). O AIC aumenta conforme o aumento da soma de quadrado do erro (SQerro). Esse critério também penaliza modelos com maior número de parâmetros. Sendo assim, um modelo com menor AIC é melhor em comparação aos demais avaliados.

Para validar os modelos ajustados, construiu-se uma curva de progresso com 24 avaliações mensais da Mancha de Phoma, a partir dos dados da parcela denominada *subgride*, composta por 121 plantas situadas ao lado da estação Datalogger CR1000.

Essas plantas pertenciam ao mesmo cultivar e eram da mesma idade das demais, porém os dados coletados nessa área não foram usados para ajustar os modelos de regressão.

As análises de correlação foram executadas com auxílio do software Statistica 7 (StatSoft. Inc. 2004). Para ajustar os MRLM, utilizou-se a função *lm* implementada no software livre R versão 3.4.0 (R Development Core Team 2017), fundamentada no método dos mínimos quadrados ordinários.

Resultados

A Mancha de Phoma ocorreu de forma esporádica ao longo do tempo, variando desde 0,85% até próximo de 30% de incidência nas folhas. Em 2013, as maiores incidências da Mancha de Phoma do cafeeiro foram observadas em outubro e dezembro, cujos valores foram de 9,92 e 21,26%, respectivamente. Em 2014, os picos da incidência foram observados em junho, setembro e novembro, com valores de 19,44, 19,82 e 10,47%, respectivamente. Já em 2015, os picos foram registrados nos meses de fevereiro e maio de 2015, com valores de 29,91 e 28,94%, respectivamente (Fig. 2).

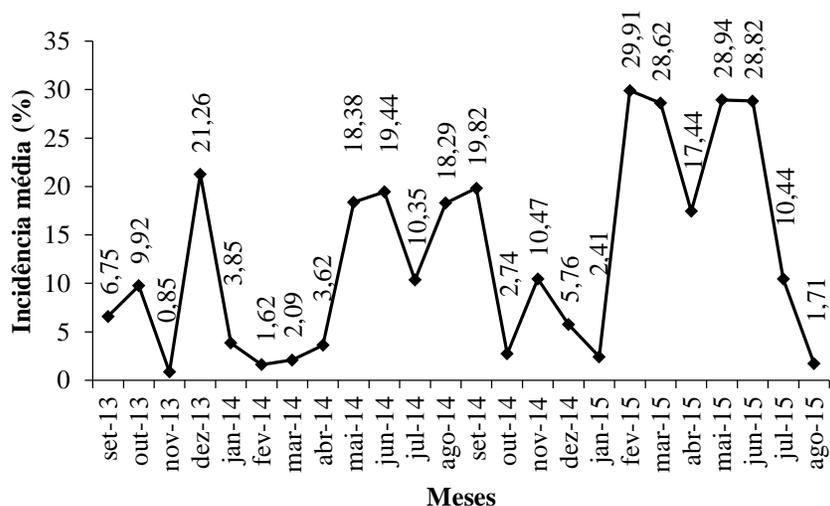


Fig. 2. Curva de progresso da incidência da Mancha de Phoma do cafeeiro para a média geral dos 85 pontos georreferenciados no período de setembro de 2013 a agosto de 2015, em área de 7,65 ha.

Das 52 variáveis ambientais geradas com a estação automática, 34 apresentaram correlação significativa com a incidência da Mancha de Phoma (Tabelas 2 e 3). As variáveis relacionadas ao número de dias com molhamento foliar, número de horas com umidade relativa do ar menor ou igual à 70% e maior ou igual à 80%, e número de horas com temperaturas entre 15 e 20°C e 25 e 30°C, foram as de maior associação com a doença ao longo do tempo, considerando as duas formas de defasagens dos dados (Tabelas 2 e 3). Logo, essas foram as cinco classes de variáveis do ambiente pré-definidas para auxiliar no ajuste dos MRLM.

Dentre as variáveis relacionadas ao número de dias com molhamento foliar, a variável NDMFmax defasada em 42A teve maior coeficiente de correlação positivo com a doença, com valor de 55%. Para as variáveis relacionadas ao número de horas com

umidade relativa do ar menor ou igual à 70%, a variável UR70min com defasagem de 3SD apresentou o maior coeficiente de correlação negativo com a doença, 54%. Já em relação ao número de horas com umidade relativa do ar maior ou igual à 80%, a variável UR80max defasada em 3SD apresentou maior coeficiente de correlação positivo, cujo valor foi de 49%. Em relação ao número de horas com temperatura maior ou igual a 15°C e inferior a 20°C, o maior coeficiente de correlação positivo, com valor de 53%, foi observado para a variável T15-20med, defasada em 2SD. Por fim, em relação ao número de horas com temperatura maior ou igual a 25°C e inferior a 30°C, a variável T25-30med, com defasagem de 28A, apresentou maior correlação negativa com a doença, cujo valor foi de 48%.

Entretanto, para fins de modelagem dos dados, essas cinco variáveis mencionadas anteriormente, ou seja, NDMFmax, UR70min, UR80max, T15-20med e T25-30med, foram todas defasadas em 2SD, 3SD, 21A e 28A, para permitir maior número de combinações para gerar os modelos de regressão, pois, de forma geral, esses intervalos de defasagens retornaram os maiores valores de correlação com os dados de incidência da doença. Dessa forma, ajustou-se um total de 126 modelos.

Tabela 2. Variáveis do ambiente com correlação de Person significativa ($p \leq 0,05$) com os dados mensais de incidência da Mancha de Phoma do cafeeiro (média dos 85 pontos georreferenciados), considerando como método de defasagem os dias imediatamente anteriores às avaliações da doença, identificados por 7A, 14A, 21A, 28A, 42A e 56A. Os valores das correlações e o tipo de correlação (positiva ou negativa) são apresentados entre parênteses.

7A	14A	21A	28A	42A	56A
DPP (-0,50)	T25-30med (-0,44)	T25-30min (-0,47)	T25-30min (-0,48)	UR70min (-0,49)	UR70min (-0,44)
NDP (-0,43)	T25-30min (-0,42)	T25-30med (-0,47)	T25-30med (-0,48)	UR70med (-0,47)	T25-30med (-0,42)
T25-30min (-0,42)	NDMFmin (+0,44)	T15-20med (+0,46)	UR70min (-0,47)	T25-30med (-0,46)	UR70med (-0,42)
	NDMFmed3 (+0,43)	NDMFmed3 (+0,46)	UR70med (-0,46)	T25-30min (-0,44)	NDMFmax (+0,48)
	NDMFmin3 (+0,41)	T15-20min (+0,42)	T20-25min (-0,43)	UR70max (-0,44)	NDMFmed (+0,46)
		NDMFmax (+0,42)	UR70max (-0,43)	NDMFmax (+0,55)	NDMFmax3 (+0,45)
		NDMFmax3 (+0,42)	Tmed (-0,41)	NDMFmed (+0,54)	NDMFmaxPAR6 (+0,44)
			T15-20med (+0,49)	NDMFmed3 (+0,52)	NDMFmaxPAR9 (+0,44)
			NDMFmax (+0,49)	NDMFmax3 (+0,51)	NDMFmaxPAR9 (+0,44)
			NDMFmed (+0,48)	T15-20med (+0,48)	NDMFmedPAR9 (+0,43)
			NDMFmed3 (+0,46)	UR80med (+0,47)	NDMFmed3 (+0,43)
			NDMFmax3 (+0,46)	UR80max (+0,47)	Direção do vento (+0,42)
			URmin (+0,45)	NDMFmin (+0,47)	
			T15-20min (+0,44)	UR80min (+0,46)	
			UR80min (+0,44)	NDMFmaxPAR6 (+0,46)	NDMFmaxPAR9 (+0,46)
			UR80med (+0,44)	NDMFmaxPAR9 (+0,46)	T15-20min (+0,44)
			UR80max (+0,44)	NDMFminPAR9 (+0,44)	NDMFminPAR9 (+0,44)
			NDMFmin (+0,44)	NDMFmedPAR9 (+0,44)	NDMFmedPAR9 (+0,44)
			URmed (+0,43)	URmin (+0,43)	URmin (+0,43)
			URmax (+0,41)	NDMFmax6 (+0,42)	NDMFmax6 (+0,42)
				NDMFminPAR6 (+0,42)	NDMFminPAR6 (+0,42)
				NDMFmedPAR6 (+0,42)	NDMFmedPAR6 (+0,42)

Tabela 3. Variáveis do ambiente com correlação de Person significativa ($p \leq 0,05$) com os dados mensais de incidência da Mancha de Phoma do cafeeiro (média dos 85 pontos georreferenciados), considerando as defasagens de 1SD, 2SD, 3SD, 5SD e 7SD. Os valores das correlações e o tipo de correlação (positiva ou negativa) são apresentados entre parênteses.

1SD	2SD	3SD	5SD	7SD
T20-25min(-0,51)	T25-30min (-0,46)	UR70min (-0,54)		
T20-25med(-0,45)	T25-30med(-0,45)	UR70med (-0,50)		
UR70min (-0,44)	T15-20min (+0,53)	UR70max (-0,48)		
UR70med (-0,44)	T15-20med (+0,53)	URmin (+0,49)		
T25-30med(-0,43)		UR80max (+0,49)		
UR70max (-0,42)		URmed (+0,48)		
Tmed (-0,41)		UR80min (+0,47)		
T15-20med(+0,51)		UR80med (+0,47)		
NDMFmin3 (+0,45)		URmax (+0,46)		
UR80min (+0,44)		NDMFmax (+0,44)		
UR80med (+0,44)		UR90max (+0,43)		
NDMFmax (+0,44)		NDMFmed (+0,42)		
NDMFmed3 (+0,44)		NDMFmaxPAR9 (+0,42)		
URmin (+0,43)				
NDMFmax6 (+0,43)				
UR80max (+0,42)				
UR90max (+0,42)				
URmed (+0,41)				
T15-20min(+0,41)				
UR90med (+0,40)				

Os valores das variáveis ambientais utilizadas nos modelos são apresentados a seguir (Tabela 4). Considerando os 24 meses de avaliação, o mês de janeiro de 2015 apresentou os menores valores de T15-20med defasada em 2SD e UR80max defasada em 3SD, e também os maiores valores de T25-30med defasada em 2SD e UR70min defasada em 3SD (Tabela 4). Nesse mês, houve baixa incidência da doença (Fig. 2). O maior valor de T25-30med defasada em 28A foi registrado para o mês de fevereiro de 2014, enquanto o menor valor de NDMFmax 3SD ocorreu em outubro de 2014. Nesses meses, a incidência não atingiu 3% (Fig. 2). Os maiores valores de T15-20med defasada em 2SD, UR80max 3SD e NDMFmax defasada em 28A foram observados para os meses de outubro e dezembro de 2013 e março de 2015, respectivamente, com valores de incidência atingindo 28,62%. Os menores valores de T25-30med defasada em 2SD e 28A foram observados no mês de julho de 2014, enquanto o menor valor de UR70min defasado em 3SD foi observado em dezembro de 2013, também associados a valores elevados de incidência (Fig. 2).

Tabela 4. Valores observados para as variáveis T15-20med (2SD), T25-30med (2SD), T25-30med (28A), UR70min (3SD), UR80max (3SD), NDMFmax (3SD) e NDMFmax (28A), geradas com auxílio dos sensores instalados na estação automática Datalogger CR1000 (altitude de 1145,04 m).

Meses	T15-20 med (2SD)	T25-30 med (2SD)	T25-30 med (28A)	UR70 min (3SD)	UR80 max (3SD)	NDMF max (3SD)	NDMF max (28A)
Set13	49	13	57	134	22	1	9
Out13	105	10	50	107	54	2	16
Nov13	63	38	91	82	81	3	16
Dez13	80	31	75	27	143	7	20
Jan14	33	50	174	43	126	7	15
Fev14	46	48	201	74	104	7	9
Mar14	95	17	122	94	57	3	8
Abr14	52	36	82	61	109	5	19
Mai14	90	2	27	59	102	4	9
Jun14	89	5	5	67	97	7	19
Jul14	61	0	0	102	46	2	14
Ago14	63	10	19	28	129	5	8
Set14	64	35	122	116	38	1	5
Out14	30	45	97	137	26	0	8
Nov14	55	17	83	80	86	7	21
Dez14	100	16	75	61	109	6	25
Jan15	8	65	181	140	22	1	10
Fev15	75	28	107	52	118	5	23
Mar15	101	15	63	50	116	7	28
Abr15	75	4	36	47	116	7	26
Mai15	84	0	7	34	130	7	24
Jun15	99	3	3	69	85	6	18
Jul15	83	14	19	52	87	4	7
Ago15	65	1	46	138	19	2	6

Dos 126 modelos ajustados, chegaram-se a quatro de melhor desempenho para modelar a curva de progresso da Mancha de Phoma, cujas variáveis ambientais e períodos de defasagens envolvidos nos modelos são apresentados a seguir (Tabela 5). Para representação nos modelos, as variáveis foram rotuladas conforme a Tabela 5. Em relação aos seus valores de correlação com a Mancha de Phoma, considerando as análises bivariadas de cada variável com a incidência da doença, os valores ficaram entre

44 e 54% (Tabela 5). Apesar desses valores não serem tão elevados numa primeira observação, quando as variáveis foram combinadas nos MRLM, os resultados da modelagem foram promissores, com precisão e acurácia elevadas.

Tabela 5. Variáveis do ambiente e períodos de defasagens usados na composição dos quatro MRLM de melhor desempenho para modelar a Mancha de Phoma do cafeeiro.

Variável do ambiente	Defasagem	Código da variável nos modelos	Coefficiente de correlação
T15-20med	2SD	x ₁	+0,53*
T25-30med	2SD	x ₅	-0,45*
T25-30med	28A	x ₈	-0,48*
UR70min	3SD	x ₁₀	-0,54*
UR80max	3SD	x ₁₄	+0,49*
NDMFmax	3SD	x ₁₈	+0,44*
NDMFmax	28A	x ₂₀	+0,49*

*Significativo por meio do teste de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$).

O primeiro modelo apresentado possui intercepto e 19 coeficientes de regressão parciais, numa combinação de efeitos lineares, quadráticos e efeitos de interações entre fatores. As estatísticas das estimativas dos parâmetros, erro padrão, e significância são apresentadas a seguir (Tabela 6). Os valores de R^2 e R^{2*} foram de 96,82 e 81,69%, respectivamente. Já o valor do AIC foi de 66,76 (Tabela 6). Nesse modelo, quatro coeficientes de regressão não foram significativos ($p > 0,05$). Entretanto, eliminar os mesmos causou redução dos valores de R^2 e R^{2*} e aumento do valor de AIC. O Modelo 2 eliminou três coeficientes não significativos do Modelo 1, e reestimou os parâmetros.

Nesse caso, os valores de R^2 e R^{2*} foram de 90,87 e 70,01%, respectivamente. Já o AIC aumentou para 86,03 (Tabela 6).

O Modelo 3 foi proposto levando-se em conta a necessidade de trabalhar somente com variáveis ambientais de valores médios/acumulados semanais defasados em duas ou três semanas anteriores às avaliações da doença. Com esse critério, foi possível estimar a incidência da doença com duas semanas de antecedência. Logo, foram usadas no Modelo 3 as variáveis T15-20med e T25-30med, ambas defasadas em 2SD, e as variáveis UR70min, UR80max e NDMFmax, todas defasadas em 3SD. Já as variáveis T25-30med e NDMFmax defasadas em 28A foram excluídas dessa análise. O Modelo 3 ajustou-se bem ao conjunto de dados mensais de incidência da doença, com estimativas de parâmetros significativas e valores de R^2 e R^{2*} de 96,44 e 79,51%, respectivamente. O valor do AIC para esse modelo foi de 69,46 (Tabela 6).

O Modelo 4 consistiu unicamente de uma alteração manual do valor do intercepto do Modelo 3, de -3775 para -3773,5. Com isso, foi possível minimizar erros de viés observados na maioria dos meses. Não foram feitas novas estimativas de parâmetros ou de indicadores de qualidade de ajuste para esse último modelo.

Tabela 6. Estimativas dos parâmetros dos Modelos 1, 2 e 3, e valores de erro padrão e significância dos coeficientes de regressão parciais segundo o teste t ($p \leq 0,05$).

Parâmetro	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3		
	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Estimativa	Erro padrão	Teste t
β_0	-11790	2472	-4,771 **	-5844	1482	-3,943 **	-3775	923,3	-4,088 *
β_1	-3,707	1,144	-3,240 *	-0,967	0,4235	-2,283 *	-7,325	2,701	-2,712 *
β_2	-25,74	5,102	-5,045 **	-13,91	3,316	-4,194 **	-13,33	4,654	-2,865 *
β_3	171,9	35,67	4,818 **	85,96	21,39	4,019 **	60,76	12,81	4,743 **
β_4	171,6	36,36	4,720 **	83,8	21,54	3,890 **	51,06	11,81	4,323 *
β_5	-167,1	37,33	-4,476 *	-80,98	25,03	-3,236 *	86,75	18,26	4,750 **
β_6	0,01503	0,006322	2,378 ^{ns}	-0,3089	0,07629	-4,049 **	-0,09681	0,01691	-5,727 **
β_7	-0,6111	0,1259	-4,855 **	-0,2941	0,07688	-3,826 **	-0,2071	0,03596	-5,759 **
β_8	-0,6117	0,1312	-4,663 **	0,01706	0,004704	3,626 **	-0,2663	0,04982	-5,344 **
β_9	-0,109	0,06336	-1,720 ^{ns}	0,06739	0,02403	2,804 *	-0,2261	0,04686	-4,824 **
β_{10}	0,03128	0,006644	4,708 **	0,08336	0,02	4,168 **	-0,2914	0,05218	-5,583 **
β_{11}	0,005634	0,003975	1,417 ^{ns}	0,07385	0,01832	4,031 **	0,169	0,03228	5,237 **
β_{12}	0,04302	0,02451	1,755 ^{ns}	0,07658	0,02184	3,506 **	0,196	0,0359	5,459 **
β_{13}	0,1541	0,0305	5,053 **	-0,5886	0,1507	-3,906 **	-0,7529	0,1598	-4,711 **
β_{14}	0,1437	0,02943	4,884 **	0,459	0,1568	2,927 *	0,2597	0,04801	5,409 **
β_{15}	0,06652	0,02101	3,166 *	0,479	0,1512	3,167 *	0,2705	0,05063	5,343 **
β_{16}	-1,201	0,2537	-4,733 **	-1,883x10 ⁻⁷	4,923x10 ⁻⁸	-3,826 **	-0,8367	0,2189	-3,822 *
β_{17}	1,022	0,2421	4,222 *	NA	NA	NA	-0,4969	0,09618	-5,166 **
β_{18}	1,063	0,2449	4,340 *	NA	NA	NA	-0,2886	0,0832	-3,469 *
β_{19}	-2,623x10 ⁻⁷	4,951x10 ⁻⁸	-5,297 **	NA	NA	NA	2,345x10 ⁻⁶	5,821x10 ⁻⁷	4,029 *
R²		96,82%			90,87%			96,44%	
R^{2*}		81,69%			70,01%			79,51%	
AIC		66,76			86,03			69,46	

ns, * e ** - Não significativo e significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, por meio do teste t. NA- Não aplicável.

As equações dos quatro MRLM descritos anteriormente são apresentadas a seguir (Equações 4, 5, 6 e 7). Com a substituição das variáveis x_1, x_5, \dots, x_n nos modelos utilizando os valores registrados com a estação automática (Tabela 4), pôde-se obter os valores de incidência em cada mês.

Modelo 1: (4)

$$\begin{aligned} \text{Inc} = & - 11790 - 3,707x_1 - 25,74x_8 + 171,9x_{10} + 171,6x_{14} - 167,1x_{20} + 0,01503x_1^2 - 0,6111x_1 \\ & x_{10}^2 - 0,6117x_{14}^2 - 0,109x_{20}^2 + 0,03128 (x_1 x_8) + 0,005634 (x_1 x_{14}) + 0,04302 (x_1 x_{20}) \\ & + 0,1541 (x_8 x_{10}) + 0,1437 (x_8 x_{14}) + 0,06652 (x_8 x_{20}) - 1,201 (x_{10} x_{14}) + 1,022 (x_{10} x_{20}) \\ & + 1,063 (x_{14} x_{20}) - 0,0000002623 (x_1 x_8 x_{10} x_{14} x_{20}) \end{aligned}$$

Modelo 2: (5)

$$\begin{aligned} \text{Inc} = & - 5844 - 0,967x_1 - 13,91x_8 + 85,96x_{10} + 83,8x_{14} - 80,98x_{20} - 0,3089x_{10}^2 - 0,2941x_{14}^2 + \\ & 0,01706 (x_1 x_8) + 0,06739 (x_1 x_{20}) + 0,08336 (x_8 x_{10}) + 0,07385 (x_8 x_{14}) + 0,0765 (x_8 \\ & x_{20}) - 0,5886 (x_{10} x_{14}) + 0,459 (x_{10} x_{20}) + 0,479 (x_{14} x_{20}) - 0,0000001883 (x_1 x_8 x_{10} x_{14} \\ & x_{20}) \end{aligned}$$

Modelo 3: (6)

$$\begin{aligned} \text{Inc} = & - 3775 - 7,325x_1 - 13,33x_5 + 60,76x_{10} + 51,06x_{14} + 86,75x_{18} - 0,09681x_1^2 - 0,2071x_5^2 \\ & - 0,2663x_{10}^2 - 0,2261x_{14}^2 - 0,2914 (x_1 x_5) + 0,169 (x_1 x_{10}) + 0,196 (x_1 x_{14}) - 0,752 \\ & 9 (x_1 x_{18}) + 0,2597 (x_5 x_{10}) + 0,2705 (x_5 x_{14}) - 0,8367 (x_5 x_{18}) - 0,4969 (x_{10} x_{14}) - 0,2 \\ & 886 (x_{10} x_{18}) + 0,000002345 (x_1 x_5 x_{10} x_{14} x_{18}) \end{aligned}$$

Modelo 4: (7)

$$\begin{aligned} \text{Inc} = & -3773,5 - 7,325x_1 - 13,33x_5 + 60,76x_{10} + 51,06x_{14} + 86,75x_{18} - 0,09681x_1^2 - 0,2071x_5^2 \\ & - 0,2663x_{10}^2 - 0,2261x_{14}^2 - 0,2914(x_1 x_5) + 0,169(x_1 x_{10}) + 0,196(x_1 x_{14}) - 0,7529 \\ & (x_1 x_{18}) + 0,2597(x_5 x_{10}) + 0,2705(x_5 x_{14}) - 0,8367(x_5 x_{18}) - 0,4969(x_{10} x_{14}) - 0,28 \\ & 86(x_{10} x_{18}) + 0,000002345(x_1 x_5 x_{10} x_{14} x_{18}) \end{aligned}$$

O Modelo 3 apresentou boa precisão na estimativa dos valores de incidência ao longo dos dois anos de avaliação, e em termos de acurácia, apresentou pequeno viés de subestimação na maior parte do tempo (Tabela 7 e Fig. 3). Com a modificação do valor do intercepto desse modelo, deu-se origem ao Modelo 4, o qual foi, ao mesmo tempo, altamente preciso e acurado (Tabela 7 e Fig. 3).

A validação foi realizada apenas para esses dois modelos por permitirem estimar a doença com antecedência de duas semanas (Tabela 7 e Fig. 4). Todos os picos da doença ajustados aos modelos 3 e 4 foram observados na curva de progresso construída com os dados do *subgride* (Fig. 4). Entretanto, os valores da incidência dessa parcela foram superiores às estimativas dos modelos, principalmente nos meses de dezembro de 2013 e 2014, e fevereiro, março e junho de 2015, quando foram registrados os maiores picos, e conseqüentemente, os maiores desvios (Tabela 7).

Tabela 7. Valores mensais de incidência da Mancha de Phoma do cafeeiro na lavoura (média dos 85 pontos georreferenciados) e no *subgride* (parcela de 121 plantas), e valores de incidência obtidos por meio dos Modelos 3 e 4.

Data	Incidência	Incidência <i>subgride</i>	Previsão Modelo 3	Resíduos Modelo 3*	Previsão Modelo 4	Resíduos Modelo 4*
set/13	6,75	2,62	4,32	-1,70	5,82	-3,20
out/13	9,92	9,23	7,19	2,03	8,69	0,53
nov/13	0,85	3,41	-1,69	5,10	-0,19	3,60
dez/13	21,26	48,97	20,88	28,09	22,38	26,59
jan/14	3,85	2,69	2,52	0,17	4,02	-1,33
fev/14	1,62	3,93	0,23	3,70	1,73	2,20
mar/14	2,09	1,65	0,30	1,35	1,80	-0,15
abr/14	3,62	1,96	3,41	-1,44	4,91	-2,94
mai/14	18,38	20,14	18,74	1,40	20,24	-0,09
jun/14	19,44	24,17	15,37	8,80	16,87	7,30
jul/14	10,35	16,32	8,02	8,30	9,52	6,80
ago/14	18,29	11,67	17,30	-5,62	18,80	-7,13
set/14	19,82	19,94	19,40	0,54	20,90	-0,96
out/14	2,74	1,55	1,20	0,35	2,70	-1,15
nov/14	10,47	22,93	8,22	14,71	9,72	13,21
dez/14	5,76	32,85	7,69	25,16	9,19	23,66
jan/15	2,41	1,86	1,14	0,72	2,64	-0,78
fev/15	29,91	66,00	26,73	39,27	28,23	37,77
mar/15	28,62	65,39	25,94	39,45	27,44	37,95
abr/15	17,44	13,53	21,65	-8,11	23,15	-9,61
mai/15	28,94	29,24	23,86	5,38	25,36	3,88
jun/15	28,82	39,15	29,14	10,01	30,64	8,51
jul/15	10,44	10,33	9,33	1,00	10,83	-0,50
ago/15	1,71	8,78	0,55	8,23	2,05	6,73

*Os resíduos referem-se às diferenças entre os valores observados na parcela *subgride* e os valores estimados com os Modelos 3 e 4.

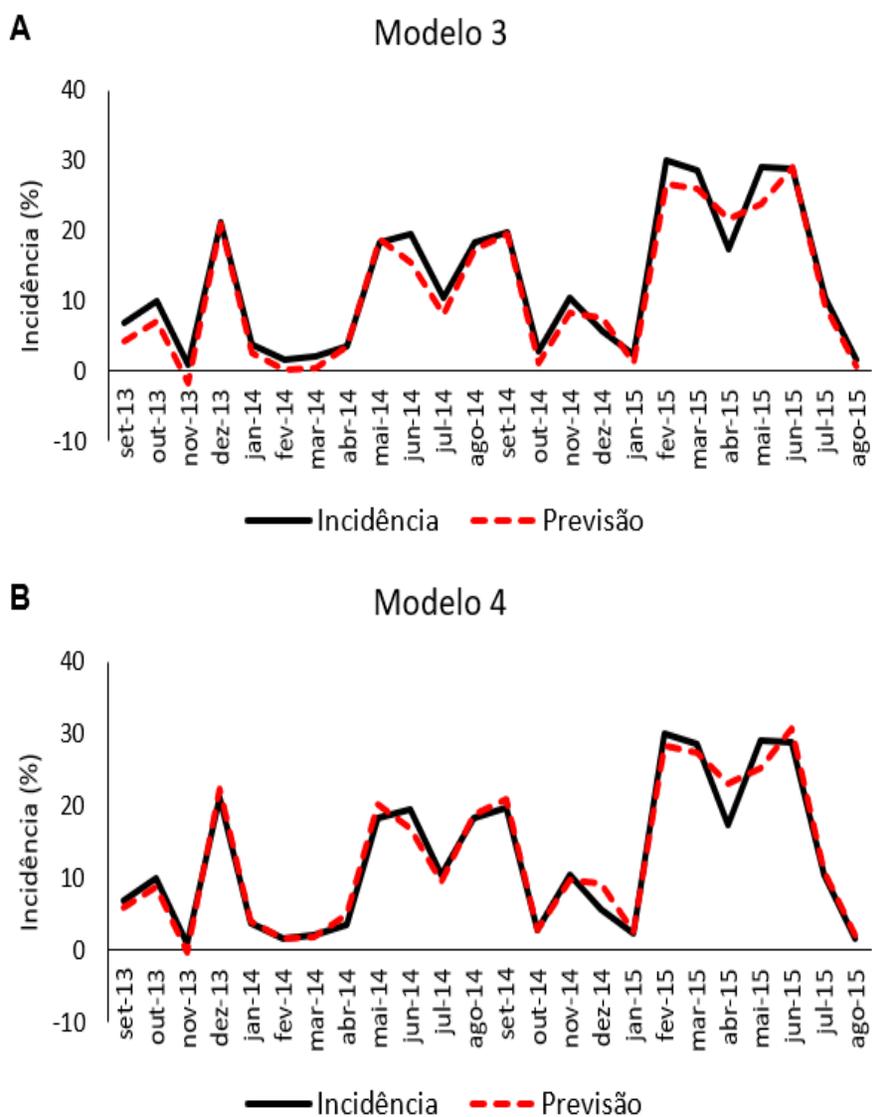


Fig. 3. Curva de progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro na lavoura (média dos 85 pontos georreferenciados) e estimativas obtidas com os Modelos 3 e 4.

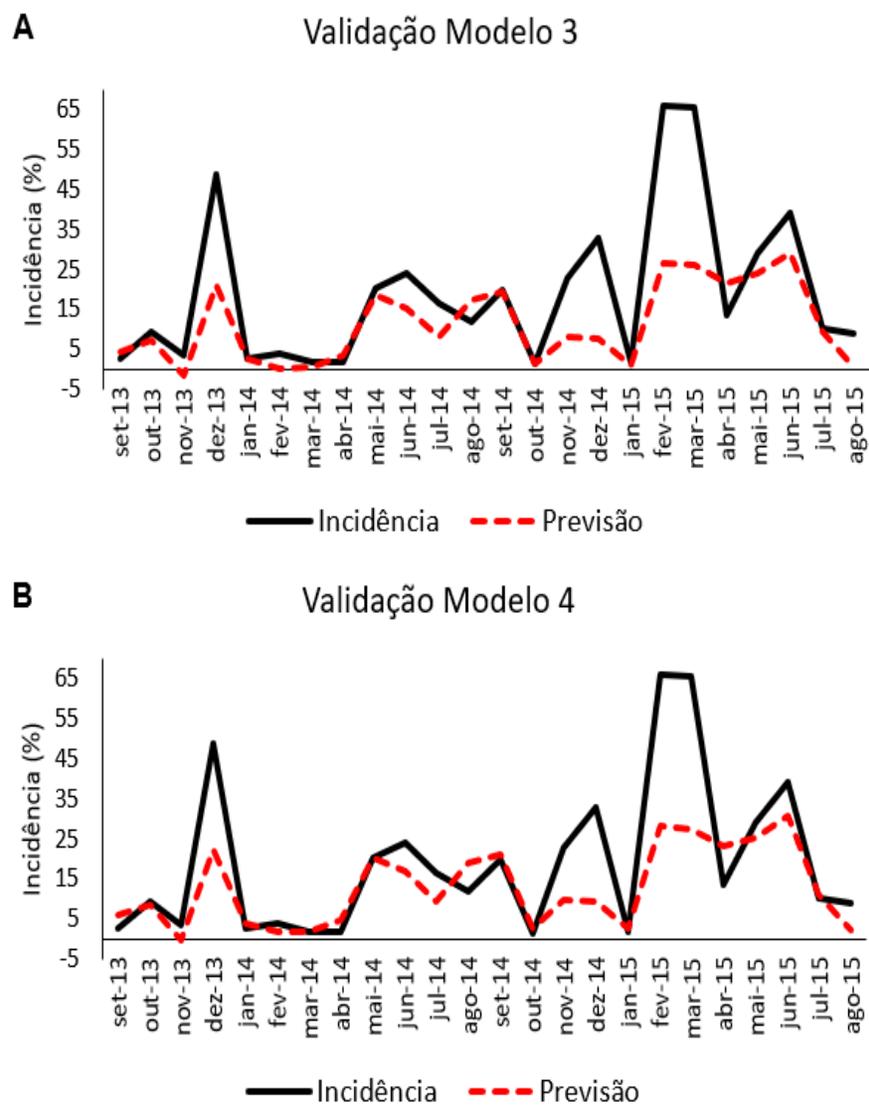


Fig. 4. Curva de progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro no *subgride* (parcela composta por 121 plantas) e estimativas obtidas com os Modelos 3 e 4.

Discussão

A doença ocorreu ao longo de todo o período de avaliação, de forma esporádica, um dos princípios básicos para ajustar modelos de previsão ou de apoio à decisão (Campbell e Madden 1990). Os maiores valores da incidência da Mancha de Phoma do cafeeiro foram observados nos períodos mais frios e úmidos, com picos atingindo valores próximos de 30% (Fig. 2). O menor pico de incidência registrado nos 24 meses foi observado no mês de outubro de 2013, 9,92%. Nesse mês, foi registrado o maior número de horas com temperaturas entre 15 e 20°C por sete dias defasados em 2SD (105h), enquanto o número de horas com UR80max por sete dias defasados em 3SD foi de 54h. Já o molhamento foliar na forma de NDMFmax considerando sete dias e defasagem 3SD, foi observado em apenas 2 dias. Já no mês de maio de 2015, quando a incidência atingiu 28,62%, para as mesmas variáveis mencionadas anteriormente e mesmos períodos de defasagens, T15-20med foi de 84h, enquanto UR80max e NDMFmax foram de 130h e 7 dias, respectivamente. Ou seja, mesmo apresentando menor número de horas com temperaturas entre 15 e 20°C em relação a outubro de 2013, o mês de maio de 2015 apresentou maior incidência por causa da maior duração da umidade no microclima. A mesma tendência foi observada para outros picos, como dezembro de 2013 e fevereiro de 2015. Outros autores também observaram essa mesma faixa de temperatura associada ao progresso da doença (Pozza e Alves 2008, Vasco 2012, Santos et al. 2014). Pozza e Alves (2008) relataram temperaturas entre 16 e 20 °C, combinadas com precipitação média diária acima de 4 mm, como condições altamente favoráveis à Mancha de Phoma. Santos et al. (2014) registraram os maiores picos da doença nos períodos com temperaturas entre 16 e 19 °C, nos meses de agosto de 2010 e

junho de 2011. Entretanto, nesses meses, assim como nos antecedentes aos picos, os autores observaram baixa precipitação mensal, com valores de 0 mm em agosto de 2010 e 14 mm para o mês anterior, enquanto em junho de 2011, houve precipitação de 35 mm, e no mês anterior, 10 mm. Ou seja, houve maiores incidências nos períodos com registros de menores valores de chuva e também menores valores de umidade relativa do ar média, não atingindo 75%. Provavelmente houve maior número de horas com temperaturas amenas para compensar os baixos valores de umidade registrados nos períodos de pico da doença. Em observações de microscopia eletrônica de varredura, Lorenzetti et al. (2015) verificaram temperaturas entre 15 e 20°C aumentarem significativamente o comprimento do tubo germinativo do patógeno, em curto intervalo de tempo, aumentando assim, as chances de encontrar um ferimento abaixo da cutícula para ocorrer a infecção. A umidade é outra variável essencial na fase de germinação, expansão do tubo germinativo e infecção do patógeno, assim como a ausência de umidade suficiente na superfície foliar pode afetar esses processos, mesmo sob condições ideais de temperatura. Além disso, a ocorrência de água livre na superfície foliar é responsável por menor transpiração da cultura e potencial de água próximo de zero, proporcionando maior disponibilidade de água interna para o patógeno, podendo favorecer sua colonização (Huber e Gillespie 1992).

De forma geral, há consenso entre os pesquisadores sobre a faixa de temperatura ideal para o progresso da Mancha de Phoma, entre 15 e 20 °C (Salgado et al. 2002, Pozza et al. 2003, Pozza e Alves 2008, Lima 2009, Vasco 2012, Santos et al. 2014, Lorenzetti et al. 2015). Entretanto, as informações sobre o molhamento foliar são pouco consistentes, havendo divergências entre os autores. Além disso, nenhum deles

informa como a duração dessas variáveis no ambiente pode interferir no progresso da doença de forma conjunta. Lorenzetti et al. (2015) também ajustaram um MRLM para explicar o monociclo da Mancha de Phoma em mudas de cafeeiro em função da temperatura e do molhamento foliar. De acordo com os autores, temperaturas entre 15 e 20 °C associadas a períodos de molhamento foliar acima de 36 horas são condições favoráveis ao progresso da doença, com máxima intensidade observada para 48h, a maior duração de molhamento foliar estudada. Entretanto, o modelo não informa a relação do número de horas nessa faixa de temperatura com o progresso da doença. Além disso, não tem aplicação como sistema de alerta, pois não informa com antecedência os riscos futuros de progresso da doença.

De acordo com Campbell e Madden (1990), os sistemas de alerta devem ser desenvolvidos utilizando dados biológicos e do ambiente, para assegurarem o critério da confiabilidade. Com base nas informações de NDMFmax, UR70min, UR80max, T15-20med e T25-30med, os Modelos 3 e 4 puderam estimar a incidência futura da Mancha de Phoma no campo, com duas semanas de antecedência. Esse tempo é fundamental em termos de logística, pois caso a pulverização de fungicida seja necessária, o responsável precisará remanejar pessoal e implementos para executarem tarefas como preparo de calda e aplicação, de forma preventiva. Campbell e Madden (1990) também ressaltam a importância do critério da utilidade dos sistemas de alerta, pois esses devem ser desenvolvidos para doenças passíveis de serem monitoradas e com existência de medidas de controle eficazes, ou seja, a Mancha de Phoma do cafeeiro também atende a esse critério.

O Modelo 3 apresentou boa precisão na estimativa dos valores de incidência ao longo dos dois anos de avaliação, e termos de acurácia, o modelo apresentou pequeno viés de subestimação na maior parte do tempo, sendo solucionado com a modificação do valor do intercepto desse modelo, dando origem ao modelo 4, o qual foi, ao mesmo tempo, altamente preciso e acurado (Tabela 7 e Fig. 3). Em relação à esses quesitos, o Modelo 1 apresentou melhores resultados em termos de ajuste ao conjunto de dados quando comparado ao Modelo 2, por meio da análise dos valores de R^2 , R^{2*} e AIC. Entretanto, os valores de incidência obtidos com o Modelo 1 apresentaram viés de superestimação em todos os meses, tratando-se de um modelo viciado. Apesar dos Modelos 1 e 2 terem apresentado boas estimativas da ocorrência da doença, os mesmos têm pouca contribuição prática para auxiliar na tomada de decisão do controle da doença. Isso porque para estimar a incidência da Mancha de Phoma, eles precisaram ser alimentados com informações ambientais considerando os dias imediatamente anteriores às avaliações da incidência, inclusive informações do próprio dia da avaliação, e nesse caso, a doença já estava estabelecida, para os meses com ocorrência de condições ambientais favoráveis. Entretanto, eles podem ser utilizados em trabalhos de cunho teórico, visando, por exemplo, simular o progresso da doença.

Na cultura do café, os sistemas de auxílio à tomada de decisão para controlar doenças têm sido desenvolvidos principalmente para a Ferrugem (Kushalappa et al. 1983, Garçon 2001, Pinto et al. 2002, Meira et al. 2009). Considerando apenas os trabalhos envolvendo modelagem por regressão para esse patossistema, o melhor MRLM ajustado por Kushalappa et al. (1983) apresentou R^2 de 72%, enquanto Pinto et al. (2002) obtiveram R^2 de 80% para o melhor modelo. Considerando o patossistema

Phoma x cafeeiro, o MRLM ajustado por Lorenzetti et al. (2015) apresentou R^2 de 71%, inferior ao obtido para os MRLM dessa pesquisa, com valores de R^2 de até 96,82% e R^{2*} de 81,69%.

O sistema desenvolvido por Garçon et al. (2001) para estimar a ocorrência da ferrugem, causada por *Hemileia vastatrix*, utiliza-se das variáveis molhamento foliar e temperatura média do ar durante o período de molhamento, associadas à fisiologia da planta e à intensidade da doença para aviso do momento ideal de pulverização com fungicidas sistêmicos. Os autores testaram o sistema em duas lavouras em regiões distintas, uma com alta carga pendente de frutos, e a outra com carga média de frutos. Com o uso do modelo, eles verificaram na lavoura com alta carga pendente de frutos a recomendação de duas pulverizações, semelhante ao calendário fixo de pulverização. Já para a lavoura com média carga pendente de frutos, o sistema recomendou apenas uma aplicação do fungicida sistêmico, com resultados semelhantes aos obtidos segundo o calendário, comprovando a contribuição desses sistemas na redução de custos e impactos ambientais. A relação custo benefício é outro critério mencionado por Campbell e Madden (1990) para os sistemas de alerta. De acordo com os autores, os sistemas de alerta devem estar disponíveis a custos razoáveis, considerando as potenciais economias nos custos de gestão e redução das perdas em decorrência das doenças. Para o patossistema Mancha de Phoma x cafeeiro, ainda há a necessidade de definir os níveis de controle da doença em pesquisas futuras, considerando o uso de sistemas de alerta.

Os Modelos 3 e 4 foram validados utilizando-se as informações mensais da incidência coletadas na parcela *subgride*. De forma geral, os valores da incidência dessa parcela foram superiores às estimativas dos modelos, principalmente nos meses de

dezembro de 2013 e 2014, e fevereiro, março e junho de 2015, quando foram registrados os maiores picos (Fig. 4). Isso porque o *subgride* foi disposto em um local dentro da lavoura onde observou-se a maior ocorrência da Mancha de Phoma ao longo dos anos. Dessa forma, sob condições ambientais ideais ao progresso da doença, os valores observados nessa parcela sempre eram superiores à média geral observada na lavoura como um todo. Essa informação aponta para a necessidade da correção de viés desses modelos quando implementados em softwares para monitorar diferentes lavouras, pois apesar de acompanharem bem a flutuação da doença ao longo do tempo, o nível médio da doença pode variar de lavoura para lavoura em função da genética do cultivar, altitude do local e tratos culturais dispensado à plantação. Campbell e Madden (1990) também enfatizam a importância da validação do sistema de alerta no nível de operação pretendido e na região onde será implementado para torná-lo confiável. Caso contrário, o sistema poderá não corresponder às expectativas.

A Mancha de Phoma é uma doença de importância econômica na cultura do cafeeiro. Apesar disso, até o momento não havia sido desenvolvido um modelo para auxílio à tomada de decisão do controle da doença no campo. Ao invés disso, o manejo da doença tem sido realizado exclusivamente com o uso de calendários fixos de pulverização. Dessa forma, espera-se que os resultados dessa pesquisa possam contribuir na otimização do manejo desse patossistema, com a realização de pulverizações apenas em condições favoráveis ao progresso da doença. Para isso, é necessário validar os modelos sugeridos nas diferentes áreas produtoras de café no Brasil, um país de dimensões continentais, para possivelmente ajustar os coeficientes dos parâmetros às condições edafoclimáticas dessas regiões, tornando o modelo confiável. Entretanto, é

necessário implementar a equação em software e hardware atendendo ao critério da simplicidade (Campbell e Madden 1990), ou seja, qualquer pessoa com o mínimo de instrução deve ser capaz de interpretar os resultados fornecidos. Com isso, será possível estimar os valores futuros da doença, auxiliando na tomada de decisão quanto à pulverização de fungicidas nos momentos necessários. Assim, o sistema representará economia na gestão da lavoura, com redução de custos, minimização de riscos para a saúde do aplicador e de contaminação do ambiente. Entretanto, a fase de testes em diferentes regiões produtoras requer apoio técnico e financeiro de parceiros, pois a coleta de dados meteorológicos *in loco* e as avaliações da doença requerem equipamentos e mão de obra apropriados para tais fins.

Conclusões

Os modelos de regressão linear múltipla desenvolvidos com auxílio das variáveis NDMFmax, UR70min, UR80max, T15-20med e T25-30med apresentaram alta precisão e acurácia para auxiliar na modelagem da Mancha de Phoma do cafeeiro.

Os Modelos 3 e 4 podem auxiliar na tomada de decisão para iniciar o controle da Mancha de Phoma com fungicidas, com duas semanas de antecedência à ocorrência da doença.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e à fazenda Neumann Kaffee Gruppe (NKG), pela concessão da área para realizar a pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Boston, 19(6), 716-723.
- Batista, D. C.; Lima, M. A.; Haddad, F.; Maffia, L. A.; Mizubuti, E. S. G. (2006). Validation of decision support systems for tomato early blight and potato late blight, under Brazilian conditions. *Crop Protection*, Amsterdam, 25(7), 664-670.
- Campbell, C. L.; Madden, L. V. (1990). *Introduction to plant disease epidemiology*. New York: John Wiley & Sons.
- Carvalho, V. L.; Chalfoun, S. M.; Cunha, R. L. (2013). *Doenças do cafeeiro: diagnose e controle*. Belo Horizonte: EPAMIG, 48 p.
- Charnet, R.; Freire, C. A. L.; Charnet, E. M. R.; Bonvino, H. (2008). *Análise de modelos de regressão linear: com aplicações*. 2 ed. Campinas: UNICAMP.
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. (2017). Acompanhamento da Safra Brasileira. Café, Safra 2016, Brasília.
- Garcia, A. (1999). Fungicidas I: utilização no controle químico de doenças e sua ação contra os fitopatógenos. Porto Velho: EMBRAPA-CPAF. Rondônia, 32p.
- Garçon, C. L. P. (2001). *Sistema de previsão e progresso da ferrugem do cafeeiro em diferentes altitudes*. Viçosa, MG, 82p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) – Universidade Federal de Viçosa.
- Garçon, C. L. P.; Zambolim, L.; Mizubuti, E. S. G.; Vale, F. X. R.; Costa, H. (2004). Controle da ferrugem do cafeeiro com base no valor de severidade. *Fitopatologia Brasileira*, Brasília, 29(5), 486-491.

- Huber L, Gillespie T. J. (1992). Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 30, 553-577.
- Katsurayama, Y.; Boneti, J. I. S; Amorim Neto, A. (1997). Agrometeorologia operacional: Sistemas de alerta fitossanitário estação de avisos fitossanitários de São Joaquim. In: Congresso Brasileiro De Agrometeorologia, 10, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 63-77.
- 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.
- Lima, L.M. (2009). *Variabilidade especial da Mancha de Phoma relacionada à nutrição do cafeeiro e incidência da cercosporiose na qualidade do café*. 102 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Lorenzetti, E. R. et al. (2015). Effect of temperature and leaf wetness on *Phoma tarda* and Phoma leaf spot in coffee seedlings. *Coffee Science*, Lavras, 10(1), 1-9.
- Meira, C. A. A.; Rodrigues, L. H. A.; Moraes, S. A. (2009). Modelos de alerta para o controle da ferrugem-do-cafeeiro em lavouras com alta carga pendente. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 44(3), 233-242.
- Pinto, A. C. S. et al. (2002). Descrição da epidemia da ferrugem do cafeeiro com redes neuronais. *Fitopatologia Brasileira*, 27, 517-524.
- Pozza, E. A.; Salgado, M.; Pfenning, L. H. (2003). Intensidade da Mancha de Phoma do cafeeiro (*Phoma tarda*) em diferentes temperaturas e tempo de molhamento foliar. In Congresso Brasileiro de Fitopatologia, 36, Uberlândia. Anais... Fortaleza: Sociedade Brasileira de Fitopatologia, 28, 223-223.

- Pozza, E. A.; Alves, M. C. (2008). Impacto potencial de mudanças climáticas sobre as doenças fúngicas do cafeeiro no Brasil. In Ghini, R.; Ramada, E. (Ed.). *Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil*. Brasília: EMBRAPA.
- Pozza, E. A.; Carvalho, V. L.; Chalfoun, S. M. (2010). Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In Guimarães, R. J.; Mendes, A. N. G.; Baliza, D. P. (Ed.). *Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas*. Lavras: UFLA.
- R Development Core Team. (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reis, E. M. (2004). *Previsão de doenças de plantas*. Passo Fundo: UPF.
- Salgado, M.; Pozza, E. A.; Pfenning, L.H. (2002). Influência da temperatura e do tempo de incubação no crescimento micelial e produção de conídios *in vitro* de espécies de Phoma do cafeeiro. In Congresso brasileiro de fitopatologia, 35, 2002, Recife. Anais... Fortaleza: Sociedade Brasileira de Fitopatologia, 27, 159-159.
- Santos, L. S. D. et al (2014). Incidência da Mancha de Phoma em cafeeiro irrigado por gotejamento, sob diferentes manejos de irrigação. *Coffee Science*, Lavras, 9(1), 77-89.
- Souza, R. T.; Forcelini, C. A.; Reis, E. M.; Calvete, E. O. (2002). Validação de dois sistemas de previsão para a queima das folhas da cenoura. *Fitopatologia Brasileira*, Brasília, 27(1), 87-90.
- StatSoft, Inc. (2004). STATISTICA (data analysis software system), version 7. www.statsoft.com.

USDA 2017. (2018) Coffee: World Markets and Trade. Foreign Agricultural Service/USDA 2017. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>. Accessed 02 August 2018.

Vasco, G. B. (2012). *Intensidade da mancha de Phoma em função da densidade de plantio e manejo de irrigação em cafeeiro*. 54 p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Zambolim, L. (1999). *I Encontro sobre produção de café com qualidade*. Viçosa: UFV.

**ARTIGO 3 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA MANCHA DE PHOMA
DO CAFEIEIRO E SUA RELAÇÃO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS E
DO HOSPEDEIRO**

H.R. Silva¹ • E.A. Pozza¹ • A.S. Freitas¹ • M.L.O. Freitas¹ • L.L. Belan¹ • M.C. Alves²,
M.P. Barbosa Junior¹

¹Departamento de Fitopatologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais
37200-000, Brasil

²Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais
37200-000, Brasil

e-mail: humbersonagronomo@yahoo.com.br

(VERSÃO PRELIMINAR)

Elaborado de acordo com as normas do periódico “*Precision Agriculture*”.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi estudar a distribuição espacial da Mancha de Phoma do cafeeiro e sua relação com as variáveis ambientais altitude, textura do solo e nutrientes minerais. Além disso, avaliou-se a relação da doença com os nutrientes foliares, enfolhamento e produção das plantas. O estudo foi conduzido numa lavoura de café de 7,65 ha durante dois anos. Foram georreferenciados 86 pontos nessa área, no espaçamento de 30 x 30 m entre pontos. As avaliações da incidência e da severidade da doença foram realizadas mensalmente, e os dados foram transformados para valores anuais de 'Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência' (AACPID) e da 'Severidade' (AACPSD) da doença. Da mesma forma, os dados mensais do enfolhamento foram transformados para valores anuais de 'Área Abaixo da Curva de Progresso do Enfolhamento' (AACPE). As variáveis ambientais e relacionadas ao hospedeiro correlacionadas significativamente com a AACPID foram submetidas à modelagem geoestatística. Houve maior AACPID e AACPSD no segundo ano da pesquisa. A altitude, o P-rem e o Ca presente no solo, e o P e o N presentes nas folhas tiveram correlação positiva significativa com a AACPID. Já o K, o Cu e o Mn presentes nas folhas, a AACPE e a produção, correlacionaram-se negativamente com essa variável. O modelo de semivariograma exponencial foi o mais apropriado para modelar a autocorrelação espacial das variáveis analisadas, com exceção da altitude. A AACPID teve alcance de 96,82 m em 2013/14, e de 162,35 m em 2014/15. Os valores de alcance dos nutrientes correlacionados com a doença variaram entre 50,09 e 174,18 m. Já a produção teve alcance de 126,41 m.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L. *Phoma* spp. Altitude. Nutrição mineral de plantas. Geoestatística.

Introdução

O café destaca-se como importante *commodity*, sendo uma das principais bebidas consumidas no mundo. O Brasil é o principal produtor e exportador mundial de café, enquanto os principais importadores mundiais são a União Europeia (UE) e os Estados Unidos (EUA) (USDA 2017). A principal espécie produzida no Brasil é *Coffea arabica* L., com mais de 43 milhões de sacas beneficiadas de 60 kg e área plantada total de 1,76 milhão de hectares em 2016 (Conab 2017), porém os cultivares plantados são suscetíveis a diversas doenças. Essas têm grande relevância, pois podem reduzir a produtividade e a qualidade dos grãos, e em alguns casos, causar a morte das plantas (Pozza et al. 2010). Entre elas, destaca-se a Mancha de Phoma (*Phoma* spp.), por causar perdas entre 15 e 43%. Quando as lesões da Mancha de Phoma atingem os bordos das folhas, estas se encurvam, podendo apresentar rachaduras, reduzindo a área fotossinteticamente ativa. Nos ramos doentes, observam-se lesões deprimidas escuras, capazes de envolver todo o seu diâmetro e assim causar a sua morte. A doença ainda pode atingir as rosetas florais, necrosando de forma indireta, flores e frutos, reduzindo a produtividade do cafeeiro (Pozza et al. 2010).

O progresso da Mancha de Phoma do cafeeiro é favorecido por temperaturas entre 15 e 20 °C, associadas a volumes diários de chuva acima de 4 mm (Pozza e Alves 2008, Vasco 2012, Santos et al. 2014, Lorenzetti et al. 2015). Em estudos de microscopia eletrônica, Lorenzetti et al. (2015) observaram maior crescimento dos tubos

germinativos de *Phoma tarda* (R.B. Stewart) H. Verm do cafeeiro quando os conídios foram também submetidos a temperaturas entre 15 e 20 °C. Essa doença tem sido encontrada em regiões com lavouras expostas a ventos fortes e frios, com as faces voltadas para o sul, sudeste e leste (Carvalho et al. 2013). Nessas circunstâncias, o atrito entre folhas em decorrência dos ventos pode causar ferimentos, principalmente nas folhas jovens, e provavelmente são utilizados para o patógeno penetrar.

Em relação ao manejo da doença, o controle é feito com o uso de fungicidas. Entretanto, esses produtos são de custo elevado, e nem sempre apresentam resultados satisfatórios. Com isso, é necessário integrar outras estratégias. Dentre elas, cita-se o manejo da resistência horizontal por meio do uso de adubação equilibrada. Nutrientes fornecidos em quantidades apropriadas podem aumentar a resistência de plantas à infecção por patógenos (Huber et al. 2012).

Nutrientes como o Ca podem conferir maior resistência horizontal à infecção do patógeno, pois apresenta função estrutural, formando o pectato de cálcio na lamela média da parede celular, uma barreira física ao desenvolvimento do patógeno (Huber et al. 2012, Taiz e Zieger 2013). Entretanto, os nutrientes não estão presentes nos solos de forma homogênea e de acordo com as necessidades da cultura, dada a variabilidade natural dos solos. Essa condição afeta não somente a nutrição das plantas, mas também as relações planta-patógeno. Dessa forma, é necessário compreender o aspecto da distribuição espacial dos nutrientes, nem sempre homogênea na área plantada, com a finalidade de manejar a fertilidade para aumentar a produtividade, e ao mesmo tempo, tornar as plantas mais resistentes. Nesse sentido, a geoestatística pode ser utilizada para

modelar a distribuição espacial de variáveis ambientais, e assim, auxiliar a definir as melhores estratégias de manejo para reduzir problemas fitossanitários.

A geoestatística é uma ferramenta estritamente relacionada com a agricultura de precisão, e permite reconhecer padrões de distribuição espacial de variáveis do ambiente por meio de mapas de krigagem e ainda estabelecer relação entre elas (Yamamoto e Landim 2013). Com isso, podem ser realizadas aplicações de insumos a taxas variadas de acordo com as necessidades de cada local da lavoura. Sendo assim, o conhecimento da distribuição espacial da Mancha de Phoma com o uso da geoestatística pode auxiliar no desenvolvimento de novas estratégias para o seu manejo.

Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa foi estudar a distribuição espacial da Mancha de Phoma do cafeeiro e sua relação com variáveis ambientais e do hospedeiro.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido por dois anos em plantio comercial da 'NKG Fazendas Brasileiras Ltda', localizada no município de Santo Antônio do Amparo, Estado de Minas Gerais, Brasil. As coordenadas geográficas do ponto de referência são latitude 20°53'23,7" Sul, longitude 44°52'56,9" Oeste e altitude de 1.145,9 m. A área utilizada no estudo foi de 7,65 ha, cultivada com a espécie *Coffea arabica* L. cultivar Catucaí amarelo 2 SL, suscetível à Mancha de Phoma e resistente à Ferrugem, implantada sob espaçamento de 3,7 x 0,7 m e idade de quatro anos no início da pesquisa. Para realizar os estudos geoestatísticos, foi demarcada malha regular na área de 7,65 ha com 86 pontos, no espaçamento de 30 x 30 m entre pontos (Fig. 1). Estes foram georreferenciados com auxílio de receptor GNSS Topcon® Hiper Lite L1 L2. Os dados

foram levantados pelo método PPK (pós-processamento cinemático). Foi montada uma base e percorreu-se a área com o receptor, demarcando todos os vértices amostrais. Cada ponto amostral georreferenciado da malha foi constituído por cinco plantas de café, sendo três plantas na mesma linha, uma acima da central, e outra abaixo dessa. Foi obtida ainda a altitude associada a cada ponto georreferenciado. Os dados foram processados com base nas coordenadas do marco geodésico localizado no campus da Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil.



Fig. 1. Imagem de satélite da área experimental. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG, 2014 (Google Earth, 2014), e malha de pontos georreferenciados. S1 (em azul) indica o local de instalação da estação automática modelo Datalogger CR1000, marca Campbell Scientific Inc.®

Foram efetuadas avaliações mensais da incidência e da severidade da Mancha de Phoma, com início no mês de setembro de 2013 e término em agosto de 2015. De posse dessas informações, foram construídas as curvas de progresso da incidência e da

severidade da doença, utilizando a média mensal dos 86 pontos georreferenciados. Em cada planta avaliou-se, aleatoriamente, o primeiro par de folhas completamente expandido de quatro ramos no terço superior da copa, sendo dois ramos em cada face de exposição, totalizando oito folhas por planta e 40 folhas por ponto georreferenciado. Os dados da incidência da doença foram obtidos por meio da Equação 1.

$$I(\%) = \frac{FD}{TF} * 100 \quad (1)$$

Em que:

$I(\%)$ = incidência da doença, em porcentagem;

FD = corresponde ao número de folhas doentes da amostra no ponto georreferenciado;

TF = corresponde ao número total de folhas avaliadas no ponto georreferenciado.

Já a severidade foi avaliada com auxílio da escala diagramática desenvolvida por Salgado et al. (2009). As notas da severidade atribuídas às 40 folhas de cada ponto georreferenciado foram transformadas em porcentagem de área lesionada. Em seguida calculou-se a severidade média da doença em cada ponto georreferenciado.

Os dados mensais da incidência e da severidade da doença em cada ponto georreferenciado foram integralizados, individualmente, em 'Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença' (AACPID) e 'Área Abaixo da Curva de Progresso da Severidade da Doença' (AACPSD) anuais, por meio da Equação 2, proposta por Shaner e Finney (1977). Dessa forma, foram obtidos os valores da AACPID e da AACPSD para 2013/14 e 2014/15, em cada ponto georreferenciado.

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

Em que:

AACPD = Refere-se à Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência (*AACPID*)

ou da Severidade (*AACPSD*) da Doença;

y_i = proporção de doença na i -ésima observação;

t_i = tempo, em dias, na i -ésima observação;

n = número total de observações.

O enfolhamento das plantas também foi avaliado mensalmente em cada ponto georreferenciado, com auxílio da escala diagramática desenvolvida por Boldini et al. (2002). Posteriormente, os dados foram integralizados para valores anuais de ‘Área Abaixo da Curva de Progresso do Enfolhamento’ (*AACPE*), usando o mesmo raciocínio apresentado na equação anterior (Equação 2).

Para avaliar as características físico-químicas do solo e a nutrição mineral das plantas, foram coletadas, anualmente, no mês de janeiro de 2014 e de 2015, amostras de solo e de folhas. Em cada ponto georreferenciado, foram coletadas quatro subamostras de solo, na área de projeção da copa das plantas, numa profundidade de 0 a 0,20 m. Posteriormente, as subamostras de cada ponto foram homogeneizadas entre si e identificadas. Cada uma das 86 amostras compostas foi encaminhada para o ‘Laboratório de Análise de Solo’, no ‘Departamento de Ciência do Solo’ da Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde determinaram-se a fertilidade e a textura do solo de cada amostra, segundo as recomendações da ‘Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas

Gerais' (Ribeiro et al. 1999). Para analisar o estado nutricional das plantas, coletou-se, de forma aleatória, amostras de folhas no terço médio das plantas de cada ponto georreferenciado, sendo o terceiro e o quarto pares de folhas em dois ramos plagiotrópicos (um ramo de cada lado da planta), totalizando assim, oito folhas por planta e 40 folhas por ponto. As amostras foram devidamente encaminhadas para 'Laboratório de Análise Foliar' onde foram determinados os teores dos nutrientes minerais N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Zn, Fe e Mo, conforme metodologia proposta por Malavolta et al. (1997).

Em cada ano agrícola, também foi mensurada a produção de frutos. Os resultados foram expressos em peso médio de frutos *in natura* por planta, ou seja, a média da produção das cinco plantas em cada ponto georreferenciado.

Instalou-se na lavoura uma estação meteorológica automática com Datalogger CR1000, marca Campbell Scientific Inc.[®], na altitude de 1.145,04 m (Fig. 1). Com ela, foram obtidas as médias da temperatura do ar, da direção do vento, e a precipitação acumulada, para 30 dias anteriores a cada avaliação mensal da doença.

Não houve distinção no manejo dos talhões da lavoura estudada, ou seja, as aplicações de corretivos de solo, fertilizantes e produtos para controle de pragas e outras doenças foram realizadas considerando a área total como sendo homogênea e de acordo com as necessidades da cultura. Os corretivos e fertilizantes aplicados na lavoura durante o período do experimento são apresentados a seguir (Tabela 1).

Tabela 1. Corretivos e fertilizantes utilizados na área experimental da pesquisa. ‘NKG Fazendas Brasileiras Ltda’, Santo Antônio do Amparo, MG.

Produtos	Quantidade aplicada	Data
Corretivos		
Geox [®] (CaO e MgO)	600 kg.ha ⁻¹	Jul (2013)
Calage [®]	7 L.ha ⁻¹	Jul (2014)
Gesso agrícola	1 ton.ha ⁻¹	Out (2014)
Fertilizantes (aplicação via solo)		
20N-5P-20K + 0,2 B	566 kg.ha ⁻¹	Set (2013)
16N-16P-16K + 0,2 B	700 kg.ha ⁻¹	Nov (2013)
20N-5P-20K + 0,2 B	566 kg.ha ⁻¹	Jan (2014)
20N-5P-20K + 0,2 B	585 kg.ha ⁻¹	Nov (2014)
20N-5P-20K + 0,2 B	470 kg.ha ⁻¹	Fev (2015)
Fertilizantes (foliares)		
Quimifol Café [®]	1,5 L.ha ⁻¹	Set (2013)
Quimifol Boro-L [®]	0,5 L.ha ⁻¹	Set / Dez (2013)
Fera Café [®]	0,06 - 0,15L.ha ⁻¹	Set / Nov / Dez (2013)
Quimifol Boro-L [®]	0,5 - 2,0L.ha ⁻¹	Fev / Set (2014)
Fera Café [®]	0,1 L.ha ⁻¹	Fev / Set / Nov (2014)
Quimifol Café Cerrado L [®]	3 L.ha ⁻¹	Set / Nov (2014)
Stoller Boro [®]	2 L.ha ⁻¹	Nov (2014)
Fera Café [®]	0,1 L.ha ⁻¹	Jan / Abr (2015)
Dacafé Cerrado [®]	1-3 L.ha ⁻¹	Jan / Fev / Abr (2015)
Stoller Boro [®]	1 L.ha ⁻¹	Jan / Fev / Abr (2015)
Dacafé Sul de Minas [®]	1 L.ha ⁻¹	Fev / Abr (2015)

Inicialmente, realizou-se a análise exploratória dos dados da incidência e da severidade da doença e das variáveis ambientais altitude, textura e fertilidade do solo, estado nutricional, enfolhamento e produção das plantas. Posteriormente, verificou-se a existência de correlação das variáveis ambientais e do hospedeiro com a Mancha de Phoma, por meio da análise de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$), com auxílio do software estatístico ‘Statistica’ (StatSoft. Inc. 2004). Para tanto, selecionaram-se três meses de alta incidência no período 2013/14 para correlacionar com as variáveis ambientais e do

hospedeiro. O mesmo foi realizado para o período 2014/15. Além disso, essas variáveis foram correlacionadas com os valores anuais de AACPID 2013/14 e AACPID 2014/15.

Os dados da AACPID foram submetidos à modelagem geoestatística para estudar a autocorrelação espacial. Também foram modeladas as variáveis ambientais e do hospedeiro correlacionadas simultaneamente com a AACPID e no mínimo dois dos três meses de maior incidência previamente escolhidos em cada ano agrícola.

Nas análises geoestatísticas, inicialmente analisou-se a presença da componente *tendência* nos dados. Quando presente, em alguma variável de interesse, essa foi modelada para o seu efeito não ser confundido com a dependência espacial existente entre os pares de pontos dessas variáveis. A análise da presença de autocorrelação nas variáveis foi checada por meio dos semivariogramas (Yamamoto e Landim 2013). As semivariâncias foram calculadas com a Equação 3.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (3)$$

Em que:

$\gamma(h)$: semivariância estimada;

$N(h)$: número de pares de valores medidos;

$Z(x_i + h)$ e $Z(x_i)$ são vetores separados por uma distância h .

Quando constatada presença de autocorrelação, foram ajustados três modelos isotrópicos aos dados, o modelo esférico, o exponencial e o gaussiano, todos com patamar (Equações 4, 5 e 6).

Modelo Esférico:

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C_1 & \text{para } h \geq a \end{cases} \quad (4)$$

Modelo Exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (5)$$

Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right] \quad (6)$$

Onde:

C_0 : efeito pepita;

C_1 : contribuição;

a : alcance;

h : distância entre pares de pontos.

A seleção dos modelos foi realizada de acordo com os critérios da autovalidação, utilizando o erro médio mais próximo de 0 (Equação 7) e raiz quadrada do erro médio padronizado mais próxima de 1 (Equação 8) (Webster e Oliver 2007a, b).

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)] \quad (7)$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)}{\sigma^2(x_i)} \right]^2} \quad (8)$$

Onde:

ME: erro médio;

RMSSE: raiz quadrada do erro médio padronizado;

N: número de observações;

$\hat{Z}(x_i)$: krigagem estimada;

$Z(x_i)$: valor observado no local x_i e σ^2 é a variância da krigagem.

O grau de dependência espacial (GDE) foi calculado (Equação 9). Os semivariogramas com efeito pepita (C_0) de até 25%, entre 25 e 75% e acima de 75% do patamar foram considerados de forte, moderada e fraca dependência espacial, respectivamente (Cambardella et al. 1994).

$$GDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100 \quad (9)$$

Por fim, os dados foram interpolados por meio de krigagem ordinária (Equação 10), e em seguida, foram gerados os mapas para interpretar o comportamento espacial de cada variável. As análises geoestatísticas foram efetuadas com auxílio do software ArcGis 10.1 (Environmental Systems Research Institute- ESRI 2012).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) - \alpha = \gamma(x_i - x_0) \text{ para } i = 1, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{array} \right. \quad (10)$$

Onde:

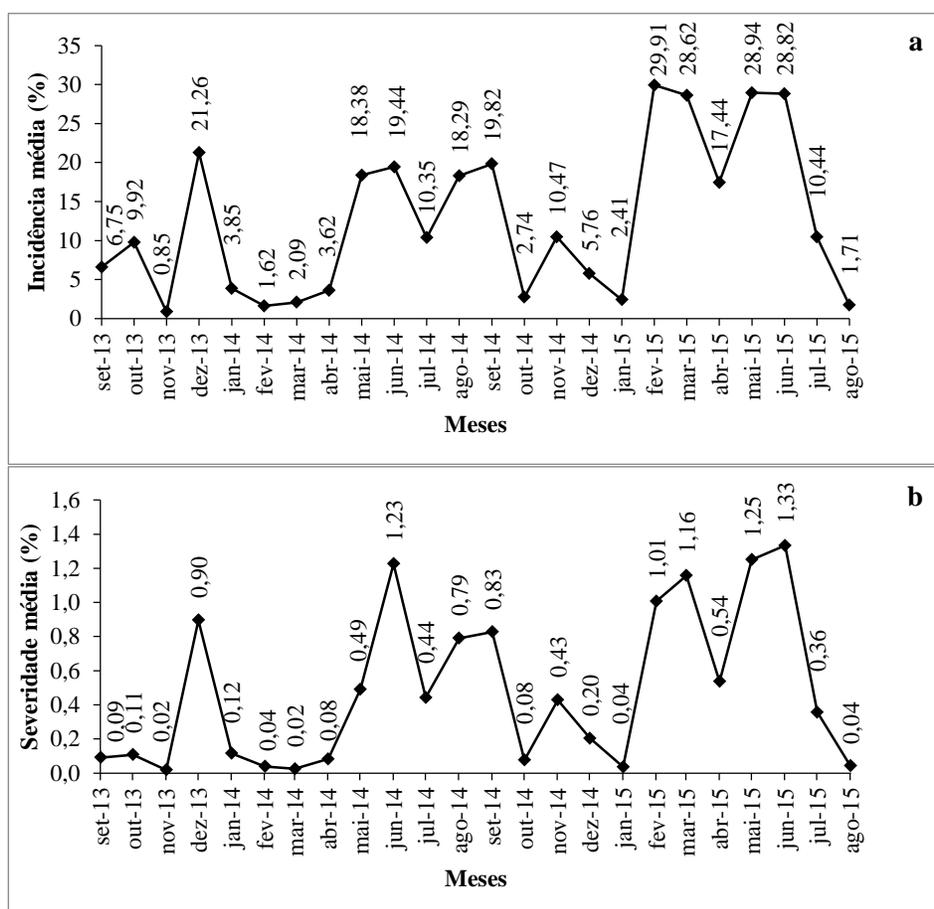
$\gamma(x_i, x_j)$ e $\gamma(x_i, x_0)$ são, respectivamente, a semivariância entre os pontos x_i e x_j e entre os pontos x_i e x_0 ;

α : multiplicador de Lagrange.

Resultados

As curvas de progresso da incidência e da severidade da Mancha de Phoma apresentaram diversos pontos de máxima intensidade da doença ou picos, em cada ano agrícola (Fig. 2a e 2b). No período de setembro de 2013 a agosto de 2014, esses picos foram observados nos meses de outubro e dezembro de 2013, e junho e agosto de 2014. Já no segundo ano agrícola, a doença continuou com tendência crescente no mês de setembro de 2014, apresentando um pico menor em novembro de 2014, e outros dois picos maiores em fevereiro e maio de 2015 (Fig. 2a e 2b).

Ou seja, as maiores intensidades da doença foram observadas nos períodos com temperaturas médias abaixo de 20°C, tanto nas épocas com maiores volumes de chuva acumulada por 30 dias, por exemplo, dezembro de 2013, quanto nas épocas com menores volumes, citando-se o mês de junho de 2014. Além disso, a predominância da direção dos ventos foi em direção sul (Fig. 2c).



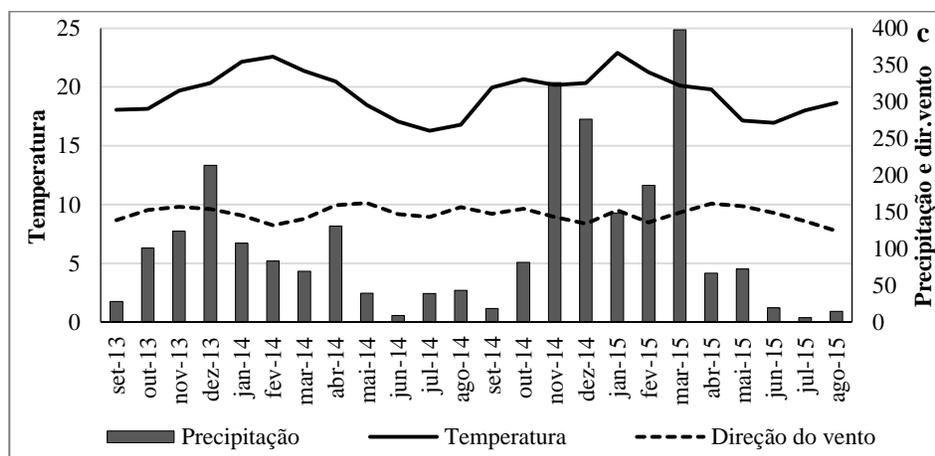


Fig. 2. Curvas de progresso da (a) incidência e da (a) severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro, e (c) médias da temperatura do ar (°C), da direção dos ventos (em graus), e precipitação acumulada (mm), 30 dias anteriores a cada avaliação mensal da doença.

Em média, observou-se menor intensidade da doença no primeiro ano de estudo, com valores de ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência’ (AACPID) e da ‘severidade’ (AACPSD) da doença iguais à 3.175,21 e 121,54, respectivamente, enquanto no segundo ano, a AACPID e a AACPSD foram de 5.284,66 e 204,72, respectivamente (Tabela 2). Esses resultados podem estar relacionados com o menor enfolhamento das plantas observado no primeiro ano. Consequentemente, a média da produção também foi menor no período 2013/14 (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios da ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência’ (AACPID) e da ‘severidade’ (AACPSD) da doença, ‘Área Abaixo da Curva de Progresso do Enfolhamento’ (AACPE) e produção de frutos (kg.planta^{-1}) nos períodos de 2013/14 e 2014/15.

Período	AACPID	AACPSD	AACPE	Produção (kg.planta^{-1})
2013/14	3.175,21	121,54	22.511,46	3,42
2014/15	5.284,66	204,72	23.625,77	4,47

Houve correlação positiva significativa entre os dados da AACPID e da AACPSD, em ambos os anos estudados, com valores de 0,70 no ano agrícola 2013/14 e 0,94 em 2014/15. Diante disso, optou-se por empregar a incidência da Mancha de Phoma na forma de AACPID, para avaliar sua relação com as variáveis ambientais e do hospedeiro.

Para o período 2013/14, analisou-se a correlação das variáveis ambientais e do hospedeiro com a incidência da doença nos meses de dezembro de 2013, maio e agosto de 2014, enquanto no período seguinte (2014/15), as correlações foram realizadas para os meses de setembro de 2014, fevereiro e maio de 2015 (Tabela 3). Isso porque esses meses tiveram alta incidência da doença (Fig. 2a). Além disso, as variáveis apresentadas a seguir (Tabela 3) foram selecionadas porque tiveram correlação significativa com no mínimo dois dos três meses mencionados anteriormente, além de correlação significativa com a AACPID, em cada período.

Houve correlação positiva significativa da altitude com os meses de alta incidência da doença e com a AACPID, tanto para 2013/14 quanto para 2014/15 (Tabela 3). Em relação aos atributos químicos do solo, o Ca apresentou correlação positiva significativa com a incidência da doença nos meses de setembro de 2014 e maio de 2015, e com a AACPID 2014/15. Já o P-rem teve correlações positivas significativas com a doença nos meses de fevereiro e maio de 2015 e com a AACPID 2014/15 (Tabela 3).

Em relação aos nutrientes foliares, houve correlação positiva significativa do P com a doença nos três meses de alta incidência considerados para o primeiro período e também com a AACPID 2013/14. Para o período 2014/15, quatro nutrientes foliares

apresentaram correlação significativa com a doença. O N apresentou correlação positiva nos meses de setembro de 2014 e fevereiro de 2015, e com a AACPID. Já o K, o Cu e o Mn, apresentaram correlação negativa nos meses de fevereiro e maio de 2015, além da AACPID desse período (Tabela 3).

Tanto o enfolhamento na forma de AACPE quanto a produção tiveram correlação negativa significativa com a doença nos meses de dezembro de 2013, maio de 2014 e AACPID 2013/14 (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados das análises de correlação dos valores da incidência mensal e ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença’ (AACPID) 2013/14 e 2014/15 com as variáveis ambientais e do hospedeiro.

	Dezembro 2013	Mai 2014	Agosto 2014	AACPID 2013/14
Atributos do solo				
Altitude (m)	0,64*	0,49*	0,31*	0,60*
Variáveis do hospedeiro				
P (dag.kg⁻¹)	0,41*	0,28*	0,42*	0,30*
AACPE	-0,38*	-0,31*	-0,17 ^{ns}	-0,24*
Produção (kg.planta⁻¹)	-0,53*	-0,45*	0,17 ^{ns}	-0,29*
	Setembro 2014	Fevereiro 2015	Mai 2015	AACPID 2014/15
Atributos do solo				
Altitude (m)	0,41*	0,69*	0,28*	0,74*
Ca (cmol.dm⁻³)	0,29*	0,20 ^{ns}	0,23*	0,32*
P-rem (mg.L⁻¹)	0,12 ^{ns}	0,27*	0,42*	0,27*
Variáveis do hospedeiro				
N (dag.kg⁻¹)	0,26*	0,36*	0,02 ^{ns}	0,35*
K (dag.kg⁻¹)	-0,09 ^{ns}	-0,23*	-0,32*	-0,28*
Cu (mg.kg⁻¹)	-0,16 ^{ns}	-0,29*	-0,31*	-0,38*
Mn (mg.kg⁻¹)	-0,01 ^{ns}	-0,23*	-0,30*	-0,23*

* Correlação significativa ($p \leq 0,05$).

^{ns} Não significativo.

Os estudos geoestatísticos foram realizados visando modelar a distribuição espacial da AACPID 2013/14 e 2014/15, e também das variáveis ambientais e do hospedeiro mencionadas anteriormente (Tabela 3), pois as mesmas correlacionaram-se com a doença conforme os critérios já descritos. Foram ajustados os modelos teóricos clássicos aos semivariogramas das variáveis com nuvens de pontos estruturadas, isto é, com índice de dependência espacial (C_I) via análise gráfica.

Os teores foliares de P em 2013/14 e de N em 2014/15, apesar de terem apresentado correlação significativa com a AACPID, não apresentaram autocorrelação espacial, ou seja, as amostras de cada variável não apresentaram dependência espacial entre si. O mesmo foi observado para a AACPE em 2013/14. Dessa forma, essas variáveis não foram submetidas a análise de krigagem. Os limiares de P e N nas folhas e da AACPE são apresentados a seguir (Tabela 4).

Tabela 4. Valores de mínimo, média e máximo observados na lavoura para os teores foliares de P (2013/14) e N (2014/15) e para a 'Área Abaixo da Curva de Progresso do Enfolhamento' (AACPE) em 2013/14.

Limiares	AACPE (2013/14)	N (2014/15) (dag.kg⁻¹)	P (2013/14) (dag.kg⁻¹)
Mínimo	19.175,50	2,10	0,11
Média	22.511,46	3,00	0,14
Máximo	25.774,50	3,90	0,18

Com base nos critérios da autovalidação, o modelo exponencial foi o mais adequado para modelar todas as variáveis estudadas, com exceção da altitude, apresentando erro médio mais próximo de 0 e raiz quadrada do erro médio padronizado mais próxima de 1. Para a altitude, o modelo de melhores resultados dessas estimativas foi o esférico (Fig. 3 e Tabela 5).

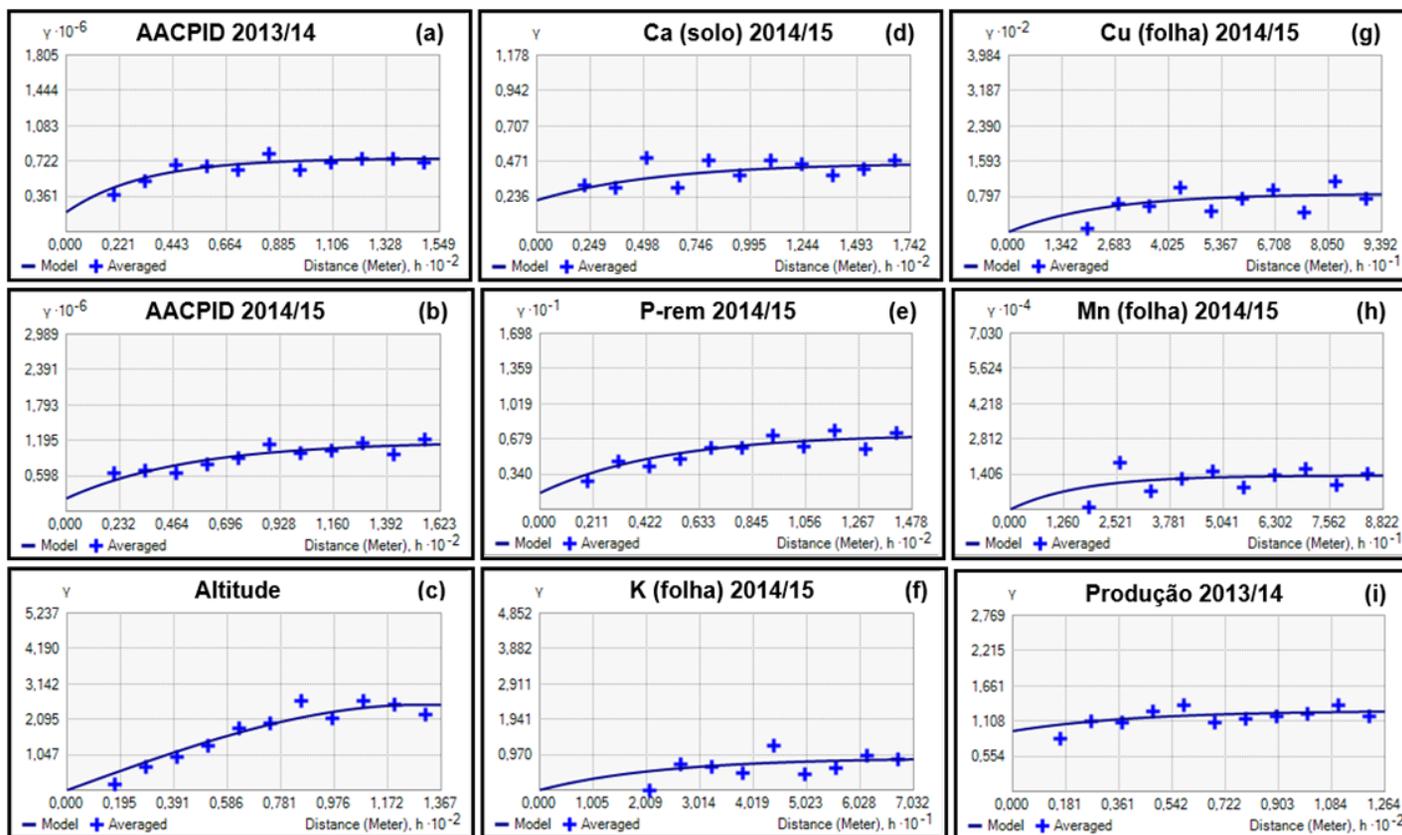


Fig. 3. Semivariogramas ajustados para as variáveis (a) Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença (AACPID) 2013/14; (b) AACPID 2014/15; (c) Altitude (m); (d) Ca (cmol.dm^{-3}) e (e) P-rem (mg.L^{-1}) no solo 2014/15; (f) K na folha 2014/15 (dag.kg^{-1}); (g) e (h) Cu e Mn na folha 2014/15 (mg.kg^{-1}) e (i) Produção 2013/14 (kg.planta^{-1}).

Tabela 5. Modelos selecionados, estimativas dos parâmetros dos semivariogramas isotrópicos ajustados e grau de dependência espacial (GDE) para a ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença’ (AACPID) e para as variáveis ambientais e do hospedeiro em 2013/14 e 2014/15.

Variáveis	Coeficientes			GDE (%)	
	Modelo	C ₀	C ₁	A ₀ (m)	(C ₀ /C ₀ +C ₁)*100
2013/14					
AACPID	EXP	199.829,20	550.987,20	96,82	26,61
Altitude (m)	ESF	0	2,52	128,54	0
Produção (kg.planta⁻¹)	EXP	0,95	0,32	126,41	74,80
2014/15					
AACPID	EXP	216.045,50	960.984,40	162,35	18,35
Ca (cmol.dm⁻³) (solo)	EXP	0,21	0,25	174,18	45,65
P-rem (solo)	EXP	1,58	5,68	147,81	21,76
K (dag.kg⁻¹) (folha)	EXP	0	0,88	70,32	0
Cu (mg.kg⁻¹) (folha)	EXP	0	86,35	71,28	0
Mn (mg.kg⁻¹) (folha)	EXP	0	13.487,10	50,09	0

C₀: Efeito Pepita; C₁: Contribuição; A₀: Alcance.
EXP: exponencial; ESF: esférico.

Em 2013/14, a AACPID apresentou Grau de Dependência Espacial (GDE) moderado, com valor igual a 26,61%, e em 2014/15, GDE forte, cujo valor foi de 18,35%. O alcance da doença na forma de AACPID foi de 96,82 m em 2013/14, ou seja, uma única planta infectada pode contribuir para disseminar a doença em um raio de 96,82 m. No ano 2014/15, houve aumento do alcance para 162,35 m, dadas as condições ambientais favoráveis ao progresso da doença nesse período (Tabela 5). Quanto aos valores de AACPID na área, no primeiro ano do estudo, os limiares variaram de 737,08 a 5.654,58, enquanto no segundo ano, foram de 991,25 a 9.572,50 (Fig. 4a e 4b).

A altitude foi a variável com maior correlação significativa com a AACPID, e variou de 1.121,27 a 1.145,90 m (Fig. 4c). Nas altitudes mais elevadas foram observados os maiores valores de AACPID, com aumento de aproximadamente 199,68 unidades na AACPID a cada metro ascendente no relevo, considerando o período 2013/14. Em 2014/15, essa relação foi de aproximadamente 348,45 unidades de AACPID.

Com relação aos nutrientes minerais presentes no solo, o Ca apresentou GDE moderado, 45,65%, enquanto o P-rem teve GDE forte, 21,76%. Já o alcance desses nutrientes foi de 174,18 e 147,81 m, respectivamente (Tabela 5). Os limiares de Ca no solo variam de 0,41 a 5,05 cmol.dm^{-3} , enquanto os limiares de P-rem foram de 2,63 a 19,14 mg.L^{-1} (Fig. 4d e 4e).

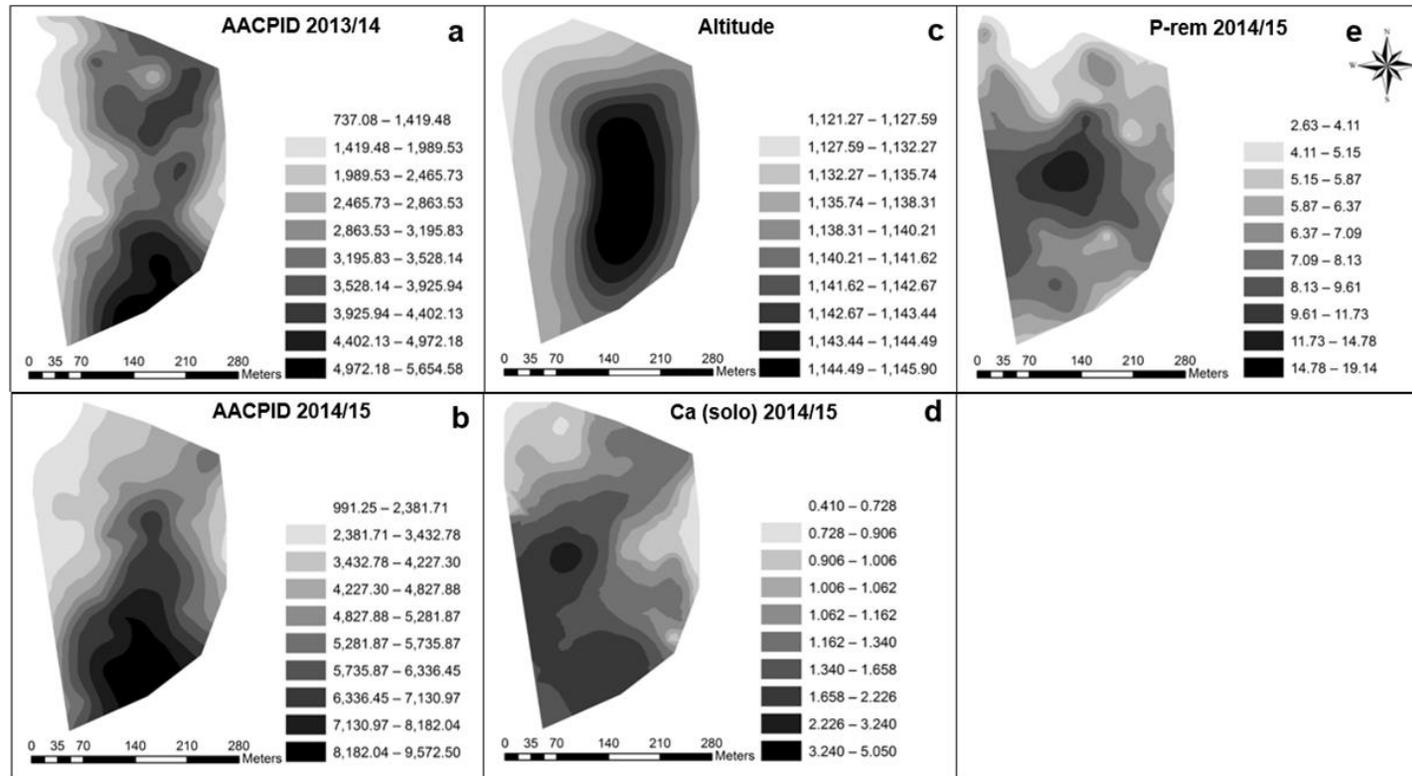


Fig. 4. (a) ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença’ (AACPID) 2013/14; (b) AACPID 2014/15; (c) Altitude (m); (d) e (e) Concentração de Ca ($\text{cmol}\cdot\text{dm}^{-3}$) e P-rem ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) no solo 2014/15.

O K, o Cu e o Mn presentes nas folhas apresentaram GDE forte, com valor de efeito pepita igual a zero para os semivariogramas desses três nutrientes. Eles também apresentaram os menores alcances quando comparados com as demais variáveis estudadas, sendo de 70,32 m para o K, 71,28 m para o Cu e 50,09 m para o Mn (Tabela 5). Quanto aos teores desses nutrientes nas folhas, o K variou de 1,71 a 5,34 dag.kg⁻¹ (Fig. 5c), enquanto o Cu e o Mn variaram de 12 a 55 e de 66 a 861 mg.kg⁻¹, respectivamente (Fig. 5d e 5e).

O modelo de semivariograma ajustado para os dados de produção de frutos em 2013/14 apresentou GDE moderado (Tabela 5), e a produção na lavoura variou entre 0,07 e 6,63 kg.planta⁻¹ (Fig. 5f).

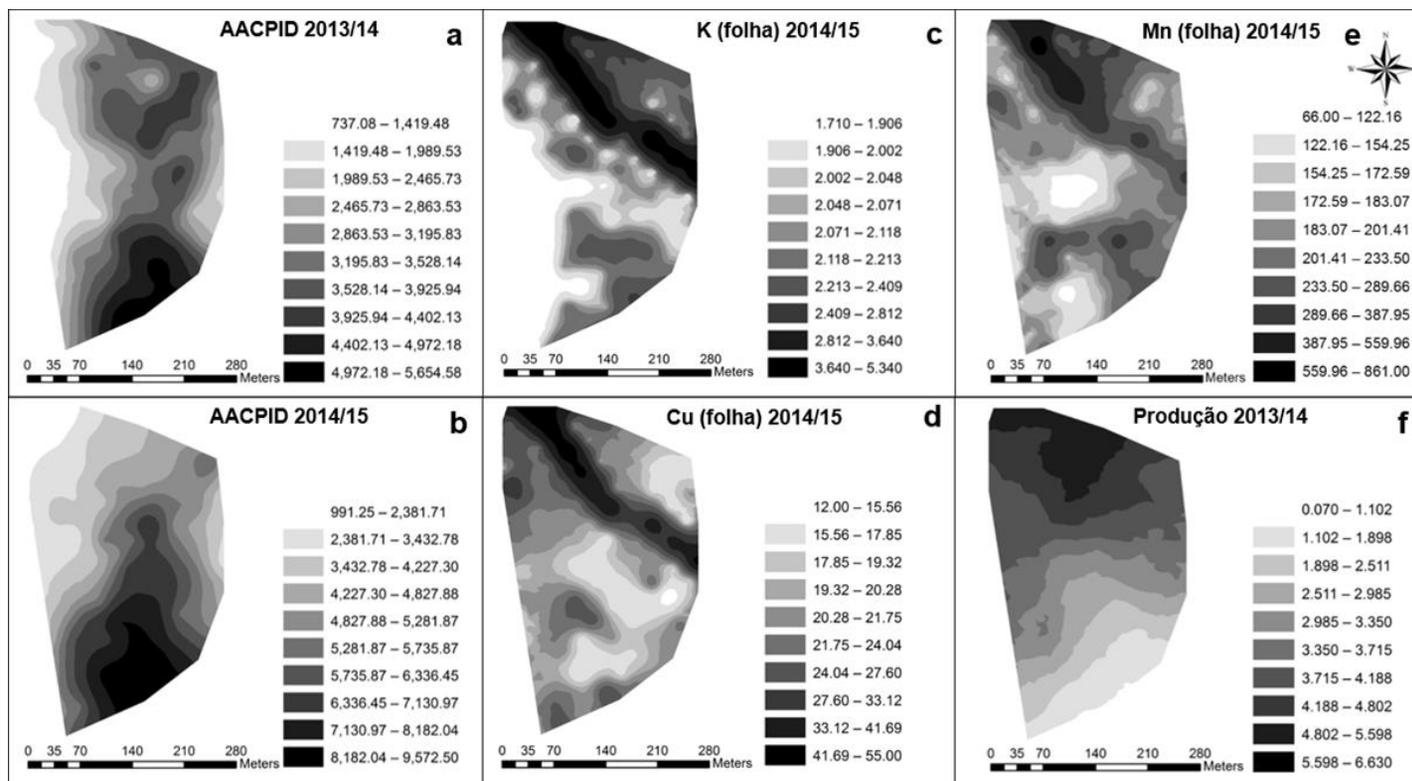


Fig. 5. (a) ‘Área Abaixo da Curva de Progresso da Incidência da Doença’ (AACPID) 2013/14; (b) AACPID 2014/15; (c) Teores de K na folha 2014/15 (dag.kg^{-1}); (d) e (e) Teores de Cu e Mn na folha 2014/15 (mg.kg^{-1}) e (f) Produção de frutos 2013/14 (kg.planta^{-1}).

Discussão

A Mancha de Phoma do cafeeiro apresentou progresso temporal irregular, com maior intensidade em 2014/15. Apesar disso, nesse ano observou-se maior média de produção, $4,47 \text{ kg.planta}^{-1}$ contra $3,42 \text{ kg.planta}^{-1}$ em 2013/14. Isso pode ser explicado em decorrência do maior enfolhamento na forma de AACPE, 23.625,77 em 2014/15 contra 22.511,46 em 2013/14 (Tabela 2), proporcionando maior fornecimento de fotoassimilados para as plantas, compensando dessa forma os maiores valores da incidência e da severidade registrados.

O modelo exponencial foi o mais adequado para modelar todas as variáveis com autocorrelação espacial entre os pontos amostrados do presente estudo, exceto a altitude, para a qual utilizou-se o modelo esférico. Com os modelos ajustados, foi possível determinar os valores de alcance da doença e também das variáveis ambientais e do hospedeiro correlacionadas com essa.

A AACPID apresentou autocorrelação espacial entre os pontos amostrados, com alcance de 96,82 m em 2013/14 e 162,35 m em 2014/15, ou seja, uma única planta infectada pode contribuir para disseminar a doença em um raio de 96,82 e 162,35 m, respectivamente. Essa diferença tem relação com as variáveis do ambiente. Caso as condições meteorológicas e as variáveis relacionadas ao solo sejam favoráveis ao progresso da doença, seu alcance pode aumentar. Dornelas (2017) estudou a distribuição espacial da Mancha de Phoma do cafeeiro por meio da incidência mensal, e sua relação com a fertilidade do solo e nutrição das plantas em área irrigada por pivô central. Semelhantemente, a dependência espacial da doença foi explicada com o modelo exponencial, tendo grau de dependência espacial fraco a moderado, com incidência na

área variando entre 0 e 25%. Entretanto, o alcance observado foi inferior, de 38,74 a 130,39 m, de acordo com o mês em análise. Essa pesquisa foi conduzida em lavoura irrigada e com relevo plano, diferindo das condições de condução do estudo da presente pesquisa. As condições topográficas, associadas ao manejo de irrigação, podem ter causado mudanças na dispersão do inóculo, alterando a dinâmica do patossistema. A umidade pode dificultar a dispersão dos conídios em comparação a uma lavoura conduzida em sistema sequeiro, reduzindo assim o alcance. Além disso, a irrigação permite melhor absorção de nutrientes e crescimento das plantas, podendo torná-las mais resistentes ou predispostas ao ataque por patógenos, de acordo com as funções de cada nutriente. Lima (2009) também estudou a distribuição espacial da Mancha de Phoma do cafeeiro em dois sistemas de cultivo, convencional e orgânico. De acordo com a autora, o melhor ajuste foi observado para o modelo exponencial no cultivo convencional no primeiro período de seis meses do estudo, enquanto o modelo aleatório foi ajustado para o sistema orgânico. Já no segundo período de seis meses do estudo, observou-se comportamento aleatório, ou seja, ausência de dependência espacial, para o cultivo convencional e ajuste do modelo linear para o cultivo orgânico. Entretanto, o tamanho reduzido da malha adotada no estudo (100 x 12 m) pode ter causado interferências na modelagem da dispersão da doença, pois os ajustes foram inconsistentes.

A AACPID teve correlação positiva significativa com a altitude, tanto em 2013/14 quanto em 2014/15. Isso porque nas altitudes mais elevadas, a lavoura fica mais exposta às intempéries do ambiente, como ventos frios da direção sul (Carvalho et al. 2013). Os ventos contribuem para maior ocorrência da doença por causarem atrito entre as folhas, principalmente folhas jovens, as quais são mais tenras. Com isso, são

formados microferimentos, provavelmente usados para penetração do patógeno. Firman (1965) observou o desenvolvimento dos sintomas da doença apenas em folhas jovens feridas artificialmente antes da inoculação do patógeno. Em estudos de microscopia eletrônica de varredura, Lorenzetti et al. (2015) observaram eventos iniciais de estabelecimento das relações patógeno hospedeiro, tais como a separação da cutícula a partir do tecido foliar. É importante ressaltar a versatilidade dos mecanismos de penetração dos fungos desse gênero, pois os mesmos penetram por aberturas naturais (Roustae et al. 2000), ferimentos (Zucker e Catara 1985) e de forma direta (Graaf et al. 2002), rompendo a epiderme celular. Além disso, nos períodos de menor temperatura, o progresso da doença é maior, pois temperaturas entre 15 e 20 °C favorecem o crescimento do tubo germinativo do fungo, aumentando as chances de infecção, mesmo com baixos valores de precipitação (Pozza e Alves 2008; Santos et al. 2014; Lorenzetti et al. 2015), como observado nesse estudo para o acumulado de 30 dias em junho de 2014, com 9,14 mm (Fig. 2c).

Em relação aos nutrientes do solo, o alcance fornecido por meio dos modelos ajustados pode auxiliar a definir áreas de maior ou menor distribuição espacial desses nutrientes, e assim, os mapas de krigagem gerados permitem gerir o solo considerando sua variabilidade espacial, com aplicações de corretivos e fertilizantes a taxas variadas, de acordo com as necessidades da cultura. No caso dos nutrientes presentes nas folhas, os mapas de krigagem gerados com essas informações permitem conhecer o estado nutricional da lavoura em diferentes locais, e ainda, associar essas informações à distribuição espacial de doenças. Dornelas (2017) também observou melhor ajuste do modelo exponencial para os dados de teores foliares de P, K, B, Ca e Mn. Entretanto, de

acordo com o autor, os dados de nutrientes do solo não foram submetidos às análises geoestatísticas por não terem apresentado correlação com a doença. Lima (2009) não propôs o ajuste de modelos de semivariogramas aos dados de nutrientes foliares devido ao padrão das nuvens de pontos, apesar da existência de correlação do N, Ca, Mg e B com a AACPSD no manejo convencional da lavoura.

O Ca do solo apresentou correlação positiva com a doença no período 2014/15, com concentrações entre 0,41 e 5,05 cmol.dm^{-3} , enquanto a AACPID variou entre 991,25 e 9.572,50, ou seja, houve menor progresso da doença nos locais com menor concentração desse nutriente no solo. Segundo Ribeiro et al. (1999), valores de Ca trocável no solo menores ou iguais à 0,40 cmol.dm^{-3} são considerados muito baixos, enquanto valores acima de 4,00 cmol.dm^{-3} são considerados muito bons. As amostras de solo do experimento foram coletadas no mês de janeiro de 2014 e de 2015. Nesse último, não houve aplicação de corretivos de solo, permanecendo com as mesmas concentrações de Ca observadas nas amostras. Além disso, a absorção desse nutriente por meio das plantas pode ter sofrido interferência de outros cátions presentes no solo, como o K e o Mg (Marschner 2012), proporcionando resultados controversos em relação à literatura. O Ca pode conferir maior resistência à infecção do patógeno por apresentar função estrutural, formando o pectato de cálcio na lamela média da parede celular, uma barreira física ao desenvolvimento de agentes patogênicos (Huber et al. 2012, Taiz e Zieger 2013). Assim, espera-se menor intensidade da Mancha de Phoma nas plantas com maior suprimento desse nutriente.

Tanto o P-rem quanto o P e o N foliar apresentaram correlação positiva com a doença. O P é essencial na formação de novos órgãos, como folhas e ramos (Hawkesford

et al. 2012). A função do P como componente de estruturas macromoleculares é mais expressiva nos ácidos nucleicos. Tanto no DNA quanto no RNA, o fosfato faz ligações com unidades de ribonucleosídeos, para formar macromoléculas. Considerando-se o P total ligado a compostos orgânicos, a fração desse montante usada para a síntese de ácido ribonucleico difere entre tecidos e células, sendo maior em folhas jovens, as quais necessitam de maior quantidade de RNA ribossômico para síntese proteica rápida, menor em folhas maduras e muito baixa em folhas senescentes (Suzuki et al. 2001). Os teores foliares de P considerados adequados para a cultura do café variam entre 0,12 e 0,16 dag.kg⁻¹ (Ribeiro et al. 1999). As amostras coletadas em campo apresentaram valores entre 0,11 e 0,18 dag.kg⁻¹, muito próximos ao ideal. Logo, plantas com suprimento adequado desse nutriente apresentam maior formação de folhas jovens, as quais são mais suscetíveis à Mancha de Phoma, explicando as relações observadas.

Já o N é o elemento requerido em maiores quantidades, desempenhando função central no metabolismo das plantas como constituinte de proteínas, ácidos nucléicos, clorofila, coenzimas, fitohormônios e metabólitos secundários (Hawkesford et al. 2012). Logo, o fornecimento de N também contribui para tecidos jovens, mas se fornecido em grandes quantidades, causa efeito diluição dos demais nutrientes. Além disso, o excesso de N reduz a produção de lignina, fitoalexinas e taninos (Huber e Thompson 2007). Conseqüentemente, as plantas tornam-se mais suculentas devido a menor lignificação dos tecidos, e assim, mais predispostas à infecção por patógenos. De acordo com Ribeiro et al. (1999), os teores foliares adequados de N para o cafeeiro variam entre 2,90 e 3,20 dag.kg⁻¹, enquanto os teores observados nas amostras foliares foram de 2,10 a 3,90 dag.kg⁻¹, atingindo valores acima do recomendado na literatura. Lima et al. (2010)

estudaram a relação do suprimento de doses de N e K via solução nutritiva com a Mancha de Phoma em mudas de cafeeiro, e também verificaram aumento, linear, da AACPID e da AACPSD com o aumento nas doses de N, concordando com as observações feitas nesse trabalho.

O K foliar teve relação negativa com a doença. Os teores observados nas amostras foliares variaram entre 1,71 e 5,34 dag.kg⁻¹, enquanto a literatura sugere como valores ideais teores entre 1,80 e 2,20 dag.kg⁻¹ (Ribeiro et al. 1999). Esse macronutriente é essencial para a síntese proteica, pois, apesar de não fazer parte de nenhuma molécula (pois não tem função constitutiva), ele ativa as enzimas envolvidas nesse processo (Hawkesford et al. 2012). Dessa forma, a falta de K acarretará em acúmulo de açúcares e aminoácidos nas folhas (Huber et al. 2012), os quais não serão convertidos em polissacarídeos estruturais e proteínas, respectivamente, tornando as plantas mais propensas à doença. Além disso, esses monômeros estarão prontamente disponíveis para assimilação e uso por patógenos. De acordo com os resultados das análises, as folhas com maiores teores de K apresentaram menor intensidade da doença, concordando com as observações feitas por Lima et al. (2010) no mesmo trabalho mencionado anteriormente, os quais verificaram redução quadrática da doença com o aumento das doses de K em solução nutritiva, até a dose 6,6 mmol.L⁻¹.

O Cu foliar apresentou correlação negativa com a AACPID. Os teores desse nutriente observados nas amostras foliares variaram entre 12 e 55 mg.kg⁻¹, enquanto a literatura sugere valores entre 8 e 16 mg.kg⁻¹ (Ribeiro et al. 1999). Esse nutriente é cofator de enzimas relacionadas à fotossíntese e respiração (Broadley et al. 2012). Desse modo, sua deficiência causa distúrbios no metabolismo vegetal, predispondo as plantas

indiretamente ao ataque por patógenos. Ele também pode afetar diretamente o desenvolvimento de patógenos quando usado em fungicidas, pois forma um filme de proteção na superfície da folha, impedindo o desenvolvimento de fungos. Na forma de Cu^{+2} , esse elemento é prontamente acumulado em células de fungos sensíveis, formando complexos com enzimas associadas aos grupos sulfidríla, hidroxila, amino ou carboxila. Essas enzimas são inativadas, ocorrendo desordem generalizada no metabolismo e o rompimento da integridade da célula (Rodrigues 2006). Para controlar patógenos na parte aérea das plantas, geralmente a aplicação foliar desse nutriente é mais eficaz, devido à baixa disponibilidade do mesmo para as plantas quando aplicado no solo (Huber et al. 2012).

O Mn foliar também correlacionou-se negativamente com a Mancha de Phoma. Os teores foliares na área variaram entre 66 e 861 mg.kg^{-1} , enquanto a literatura sugere valores entre 50 e 200 mg.kg^{-1} (Ribeiro et al. 1999). Dos vários mecanismos de defesa de plantas, os relacionados aos fenóis e ligninas são os mais conhecidos, e o Mn, assim como o Cu, desempenha papéis fundamentais na síntese desses compostos (Broadley et al. 2012). Logo, plantas deficientes em Mn apresentam menor acúmulo dessas substâncias, e assim, estão mais predispostas a ocorrência da doença.

Diante dos resultados dessa pesquisa, verifica-se a necessidade de manejo do solo e da nutrição mineral das plantas considerando a variabilidade espacial dos nutrientes. Dessa forma, a aplicação de corretivos e fertilizantes à taxa variada pode contribuir para maximizar a produtividade e, ao mesmo tempo, servir como ferramenta integrada no manejo da Mancha de Phoma do cafeeiro.

Conclusões

A Mancha de Phoma do cafeeiro apresentou progresso temporal irregular, influenciado por variáveis do ambiente, com maior intensidade da doença em 2014/15 em comparação à 2013/14.

Observou-se maior enfolhamento e a maior produtividade da lavoura no período 2014/15.

A altitude, o P-rem e o Ca do solo, e o N e P foliares apresentaram correlação positiva com a doença, enquanto o K, o Cu e o Mn foliar, assim como a AACPE e a produção, apresentaram correlação negativa.

A AACPID da Mancha de Phoma apresentou autocorrelação, com melhor explicação da dependência espacial com o modelo exponencial. As variáveis ambientais e do hospedeiro relacionadas com a doença apresentaram autocorrelação espacial, exceto a AACPE, o N e o P foliar, e ajuste ao modelo exponencial, exceto a altitude.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e à fazenda Neumann Kaffee Gruppe (NKG), pela concessão da área para realizar a pesquisa.

Referências

Boldini, J. M. (2002). *Epidemiologia da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado*. 67 p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia). Universidade Federal de Lavras – UFLA. Lavras.

- Broadley, M.; Brown, P.; Cakmak, I.; Rengel, Z.; Zhao, F. (2012). Function of Nutrients: Micronutrients. In Marschner, P. (Ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd ed. Netherlands: Elsevier, 283-298.
- Environmental Systems Research Institute. (2012). ArcGIS 10.1: getting started with ArcGIS. Redlands.
- Cambardella, C. A. e al. (1994). Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 58(5), 1501-1511.
- Carvalho, V. L.; Chalfoun, S. M.; Cunha, R. L. (2013). Doenças do cafeeiro: diagnose e controle. Belo Horizonte: EPAMIG, 48 p.
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. (2017). Acompanhamento da Safra Brasileira. Café, Safra 2016, Brasília.
- Dornelas, G. A. (2017). *Mancha de phoma do cafeeiro: Relação com irrigação, fertilidade do solo e nutrição de plantas*. Tese (Doutorado em Agronomia (Fitopatologia)) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Firman, I. D. (1965). Some investigations on a disease of *Coffea arabica* caused by *Ascochyta tarda*. *Transactions of the British Mycological Society*, Cambridge, 48, 161-166.
- Graaf, P.V.; Joseph, M.E.; Chartier-Hollis J.M.; O'Neill, T.M. (2002). Prepenetration stages in infection of clematis by *Phoma clematidina*. *Plant Pathology*, 51, 331-337.
- Hawkesford, M. et al. (2012). Functions of Macronutrients. In Marschner, P. (Ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd ed. Netherlands: Elsevier, 135-189.

- Huber, D.; Römheld, V.; Weinmann, M. (2012). Relationship between Nutrition, Plant Diseases and Pests. In Marschner, P. (Ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd ed. Netherlands: Elsevier, 283-298.
- Huber, D. M.; Thompson, I. A. (2007). Nitrogen and plant disease. In Datnoff, L. E.; Elmer, W. H.; Huber, D. M. (eds.). *Mineral Nutrition and Plant*, Minnesota, USA: APS Press, St. Paul, 31-44.
- Lima, L. M. (2009). *Variabilidade espacial da mancha de Phoma relacionada à nutrição do cafeeiro e incidência da cercosporiose na qualidade do café*. Tese (Doutorado em Agronomia (Fitopatologia)) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Lima, L. M.; Pozza, E. A.; Torres, H. N.; Pozza, A. A. A.; Salgado, M.; Pfenning, L. H. (2010). Relação nitrogênio/potássio com a Mancha de Phoma e nutrição de cafeeiro em solução nutritiva. *Tropical Plant Pathology*, 35(4), 223-228.
- Lorenzetti, E. R. et al. (2015). Effect of temperature and leaf wetness on *Phoma tarda* and Phoma Spot in coffee seedlings. *Coffee Science*. 10(1), 1-9.
- Malavolta E, Vitti G, Oliveira S. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Potafos. Piracicaba, SP, Brazil.
- Marschner, H. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd ed. Netherlands: Elsevier.
- Pozza, E. A.; Alves, M. C. (2008). Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças fúngicas do cafeeiro no Brasil. In Ghini, R.; Hamada, E. *Mudanças climáticas: Impactos sobre doenças de plantas no Brasil*. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 215-233.

- Pozza, E. A.; Carvalho, V. L. Chalfoun, S. M. (2010). Sintomas de injúrias causadas por doenças em cafeeiro. In Guimarães, R. J.; Mendes, A. N. G.; Baliza, D. P. (Ed.). *Semiologia do cafeeiro: sintomas de desordens nutricionais, fitossanitárias e fisiológicas*. Lavras: UFLA, 69-101.
- Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G., Alvarez V., V. H. (1999). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5. Aproximação*. Viçosa: CFSEMG.
- Rodrigues, M. A. T. (2006). *Classificação de fungicidas de acordo com o mecanismo de ação proposto pelo FRAC*. Dissertação. 249 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP, Botucatu.
- Roustaee, A.; Dechamp-Guillaume, G.; Gelie, B.; Savy, C.; Dargent, R.; Barrault, G. (2000). Ultrastructural Studies of the Mode of Penetration by *Phoma macdonaldii* in Sunflower Seedlings. *Phytopathology*. 90(8), 915-920.
- Salgado, M.; Pozza, E. A.; Lima, L. M.; Pereira, R. T. G.; Pfenning, L. H. (2009). Escala diagramática para avaliação da severidade da Mancha de Phoma do cafeeiro. *Tropical Plant Pathology*, Lavras, 34(6), 422-427.
- Santos, L. S. D. et al (2014). Incidência da Mancha de Phoma em cafeeiro irrigado por gotejamento, sob diferentes manejos de irrigação. *Coffee Science*, Lavras, 9(1), 77-89.
- Shaner, G.; Finney, R. E. (1977). The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildew ingresistance in know wheat. *Phytopatology*, Saint Paul, 67, 1051-1056.

- StatSoft, Inc. (2004). STATISTICA (data analysis software system), version 7. www.statsoft.com.
- Suzuki, Y.; Makino, A.; Mae, T. (2001). An efficient method for extraction of RNA from rice leaves at different ages using benzyl chloride. *Journal of Experimental Botany*, 52, 1575–1579.
- Taiz, L.; Zeiger, E. (2013). *Fisiologia vegetal*, 5th ed. Porto Alegre: Artmed.
- USDA 2017. (2018) Coffee: World Markets and Trade. Foreign Agricultural Service/USDA 2017. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>. Accessed 02 August 2018.
- Vasco, G. B. (2012). *Intensidade da mancha de Phoma em função da densidade de plantio e manejo de irrigação em cafeeiro*. 54 p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Webster, R., Oliver, M. A. (2007a). Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *Journal of Soil Science*, 43, 177–192.
- Webster, R., Oliver, M. A. (2007b). *Geostatistics for environmental scientists*. England: Wiley.
- Yamamoto, J. K.; Landim, P. M. B. (2013). *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Zucker, W. V.; Catara, A. (1985). Observations in the scanning electron microscope on the foliar penetration of *Phoma tracheiphila*. *Informatore Fitopatologico*, 35(4), 33-35.