

MODELOS EM ÁRVORE DE DECISÃO PARA ALERTA DA FERRUGEM DO CAFEIEIRO

Carlos Alberto Alves Meira¹; Luiz Henrique Antunes Rodrigues²

¹ Pesquisador, D.Sc., Embrapa Informática Agropecuária, Campinas-SP, carlos@cnptia.embrapa.br

² Professor, D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas-SP, lique@agr.unicamp.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi desenvolver modelos em árvore de decisão para alerta da ferrugem do cafeeiro. Dados de oito anos de incidência mensal da doença no campo foram transformados em valores binários, considerando o limite de 5 pontos percentuais na taxa de infecção. Dois modelos foram gerados a partir de dados meteorológicos e do espaçamento entre plantas, sendo um para lavouras com alta carga pendente de frutos e outro para lavouras com baixa carga pendente. O alerta é indicado quando a taxa de infecção, prevista para o prazo de um mês, atingir ou ultrapassar 5 pontos percentuais. A acurácia do modelo para lavouras com alta carga pendente foi de 81%, calculada por validação cruzada. Este modelo apresentou bons resultados também para outras medidas de avaliação importantes, como sensibilidade (80%), especificidade (83%) e confiabilidades positiva (79%) e negativa (84%). O modelo para lavouras com baixa carga pendente não apresentou o mesmo bom desempenho. A acurácia foi estimada em 72% e não houve equilíbrio entre as medidas de avaliação. O modelo de alerta para lavouras com alta carga pendente pode auxiliar na tomada de decisão referente ao controle da ferrugem do cafeeiro no campo. O modelo em árvore de decisão facilita a interpretação e a compreensão de suas regras e assim pode contribuir para que o tomador de decisões tenha maior confiança em adotá-lo como ferramenta de apoio.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, *Hemileia vastatrix*, modelos, predição de doenças de plantas, mineração de dados.

DECISION TREE MODELS FOR COFFEE RUST WARNING

ABSTRACT: The objective of this work was to develop decision tree models for coffee rust warning. Monthly data of disease incidence in the field collected during eight years were transformed into binary values considering the limit of 5 percentage points in the infection rate. Two models were generated from meteorological data and space between plants, one for growing areas with large fruit load and the other for growing areas with small fruit load. The warning is indicated when the infection rate is expected to reach or exceed 5 percentage points in a month. The accuracy by cross validation of the model for growing areas with large fruit load was 81%. This model also showed good results for other important evaluation measures, as sensitivity (80%), specificity (83%), positive reliability (79%) and negative reliability (84%). The model for growing areas with small fruit load did not have the same good performance. It had an estimated accuracy of 79% and did not show the same balance among the evaluation measures. The warning model for growing areas with large fruit load can aid the decision making related to coffee rust control in the field. The decision tree model facilitates the interpretation and understanding of its rules and thus can contribute to increase the decision maker confidence for using that model as a support tool.

Keywords: *Coffea arabica*, *Hemileia vastatrix*, models, plant disease prediction, data mining.

INTRODUÇÃO

A ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) é a principal doença da cultura do café em todo o mundo. No Brasil, os prejuízos na produção atingem cerca de 35%, em média, podendo chegar a mais de 50%, nas regiões onde as condições climáticas são favoráveis à doença (Zambolim et al., 1997). A importância econômica e outros aspectos, como a variação na intensidade da doença em cada ano agrícola e a disponibilidade de medidas de controle economicamente viáveis, justificam o desenvolvimento de modelos de alerta ou de previsão da ferrugem do cafeeiro.

A forma mais comum de modelagem de epidemias de doenças de plantas é a análise de regressão. A maioria dos modelos empíricos de previsão da ferrugem do cafeeiro utilizou o ajuste dos dados observados a equações de regressão (Kushalappa & Eskes, 1989; Zambolim et al., 2002). Mais recentemente, outras técnicas foram utilizadas, como redes neurais (Pinto et al., 2002) e modelagem neuro-fuzzy (Alves et al., 2007). A indução de árvores de decisão é outra alternativa, com exemplos de modelos para doenças de outras culturas agrícolas, como a cercosporiose do milho (Paul & Munkvold, 2004) e a giberela do trigo (Molineros et al., 2005).

Uma árvore de decisão é um modelo representado graficamente por nós e ramos, parecido com uma árvore, mas no sentido invertido (Witten & Frank, 2005). O nó raiz, no topo da estrutura, e os nós internos são nós de decisão. Cada um contém um teste sobre uma variável independente e os resultados desse teste formam os ramos da árvore. Os nós folhas, nas extremidades da árvore, representam valores de predição da variável dependente ou distribuições de probabilidade desses valores.

Por utilizarem representação simbólica e interpretável, o que facilita a compreensão das regras dos modelos, as

árvores de decisão possuem interesse especial na descoberta de conhecimento em bases de dados (Fayyad et al., 1996). O propósito da indução de árvores de decisão é descobrir a estrutura preditiva de um problema ou produzir modelos de predição precisos. O objetivo deste trabalho foi desenvolver modelos em árvore de decisão para alerta da ferrugem do cafeeiro em lavouras com alta e baixa carga pendente de frutos, a partir de dados meteorológicos e do espaçamento entre plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados analisados foram do acompanhamento mensal da incidência da ferrugem do cafeeiro na fazenda experimental da Fundação Procafé, em Varginha-MG (21°34'00"S, 45°24'22"W, 940 m de altitude), de outubro de 1998 a outubro de 2006 (Japiassú et al., 2007). Em cada ano, no mês de setembro, foram selecionadas oito lavouras de café em produção, quatro em espaçamento largo e quatro adensadas. Para cada espaçamento, foram escolhidas duas lavouras com alta carga pendente de frutos e duas com baixa carga pendente. Não houve controle da doença durante o ano agrícola nos talhões escolhidos. O processo de amostragem, realizado no final de cada mês, foi o recomendado por Chalfoun (1997). Dados meteorológicos foram registrados a cada 30 min por uma estação meteorológica automática instalada próximo dos locais de avaliação da incidência da ferrugem.

A análise dos dados foi conduzida como um processo de descoberta de conhecimento em bases de dados (Fayyad et al., 1996), de acordo com o modelo de processo de mineração de dados CRISP-DM (Chapman et al., 2000). A instância do processo (Meira, 2008) compreendeu as fases de compreensão do domínio, de entendimento dos dados, de preparação dos dados, de modelagem e de avaliação dos modelos obtidos. A modelagem foi específica para cada opção de carga pendente, produzindo modelos de alerta próprios para cafeeiros com alta carga pendente e com baixa carga. O motivo dessa separação foi simplificar e melhorar o desempenho dos modelos em relação à árvore de decisão usada na análise das epidemias da ferrugem do cafeeiro (Meira et al., 2008).

A característica da epidemia de interesse foi o progresso da ferrugem do cafeeiro entre uma avaliação e a outra. Foram calculadas taxas de infecção para cada mês, calculando-se a diferença entre a incidência da doença no mês e a incidência no mês anterior. Em seguida, os valores numéricos das taxas de infecção foram mapeados para duas categorias ou classes: '1' para taxas de infecção maiores ou iguais a 5 pontos percentuais (p.p.) e '0', caso contrário. A variável dependente foi esta taxa de infecção binária, chamada TAXA_INF_M5. O limite de decisão em 5 p.p. foi estabelecido com base no limite de 5% de incidência da ferrugem do cafeeiro recomendado para o controle da doença via foliar (Zambolim et al., 1997).

As variáveis independentes meteorológicas (Tabela 1) foram construídas a partir do nível horário (registros da estação), passando pelo nível diário, até o nível que permitisse a análise de seu relacionamento com a variável dependente. O número de horas com alta umidade relativa do ar ($\geq 95\%$) foi utilizado como medida indireta de molhamento foliar contínuo (Sutton et al., 1984). Considerando um período de incubação estimado, de acordo com a equação proposta por Moraes et al. (1976), cada dia foi tratado como um eventual dia de infecção e foi associado ao mês correspondente da taxa de infecção para a qual possivelmente teve parcela de contribuição. O conjunto de dias associado a uma taxa de infecção foi denominado de período de infecção (PINF). As variáveis meteorológicas usadas na modelagem foram derivadas para esses períodos de infecção. O espaçamento da lavoura completou o conjunto das variáveis independentes (Tabela 1).

O conjunto de dados preparado totalizou 384 exemplos ou casos (8 anos x 12 meses x 4 combinações carga-espaçamento). Períodos de falha no registro da estação meteorológica motivaram a eliminação de 20 exemplos, resultando em 364 exemplos para a modelagem. Estes exemplos foram separados por carga pendente, produzindo dois conjuntos de dados de treinamento com 182 exemplos. As árvores de decisão foram geradas com a ferramenta "Decision Tree" do SAS® Enterprise Miner™ (versão 4.3, SAS Institute, 2004) e depois visualizadas e analisadas com a ferramenta SAS® Enterprise Miner™ Tree Desktop Application (versão 9.1.32, SAS Institute, 2007).

A acurácia e a taxa de erro (Witten & Frank, 2005) foram avaliadas para cada árvore de decisão. Elas são estimativas dos percentuais de acertos e de erros do modelo na predição da classe de novos exemplos. Outras medidas de avaliação também foram consideradas (Monard & Baranauskas, 2002): sensibilidade, especificidade, confiabilidade positiva e confiabilidade negativa. Todas as medidas foram estimadas por validação cruzada (Witten & Frank, 2005).

Tabela 1. Variáveis independentes usadas na indução dos modelos de alerta da ferrugem do cafeeiro.

Variável	Tipo	Medida	Descrição
DCHUV_PINF	numérico	dias	Número de dias chuvosos (precipitação ≥ 1 mm) no PINF (período de infecção).
LAVOURA	binário	-	Espaçamento: lavoura ADENSADA ou LARGA.
MED_PRECIP_PINF	numérico	mm	Média das precipitações pluviárias diárias no PINF.
NHNUR95_PINF	numérico	h	Média diária do número de horas noturnas (das 20h às 8h) com umidade relativa do ar $\geq 95\%$ no PINF.
NHUR95_PINF	numérico	h	Média diária do número de horas com umidade relativa do ar $\geq 95\%$ no PINF.
PRECIP_PINF	numérico	mm	Precipitação pluvial acumulada no PINF.
THUR95_PINF	numérico	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura média diária durante as horas com umidade relativa do ar $\geq 95\%$ no PINF.
TMAX_PINF	numérico	$^{\circ}\text{C}$	Média das temperaturas máximas diárias no PINF.
TMAX_PI_PINF	numérico	$^{\circ}\text{C}$	Média das temperaturas máximas diárias no período de incubação para os dias do PINF.
TMED_PINF	numérico	$^{\circ}\text{C}$	Média das temperaturas médias diárias no PINF.
TMED_PI_PINF	numérico	$^{\circ}\text{C}$	Média das temperaturas médias diárias no período de incubação para os dias do PINF.
TMIN_PINF	numérico	$^{\circ}\text{C}$	Média das temperaturas mínimas diárias no PINF.
TMIN_PI_PINF	numérico	$^{\circ}\text{C}$	Média das temperaturas mínimas diárias no período de incubação para os dias do PINF.
UR_PINF	numérico	%	Umidade relativa do ar média diária no PINF.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os alertas da ferrugem do cafeeiro são considerados quando a taxa de infecção da doença, prevista para o prazo de um mês, atingir ou ultrapassar o limite de 5 p.p. Este tipo de alerta pode ser útil na tomada de decisão de quais medidas e qual o melhor momento de aplicá-las no controle da doença. Alertas emitidos corretamente e situações acertadas em que os alertas não são emitidos permitem identificar os momentos oportunos para a aplicação de fungicidas.

O modelo de alerta para lavouras com alta carga pendente de frutos é apresentado na Figura 1 (Meira et al., 2009). O nó raiz (nó 1) indica a distribuição percentual dos exemplos entre as duas classes no conjunto de treinamento: 46% (84 exemplos) da classe '1' e 54% (98 exemplos) da classe '0'. Os nós da árvore de decisão são coloridos em tons de cinza com base na proporção de exemplos da classe '1' – quanto mais escuro, maior a proporção. Segundo a árvore de decisão, os alertas devem ser emitidos quando as condições das variáveis meteorológicas entre o nó raiz e os nós folhas 14 ou 29 forem satisfeitas. Caso contrário, é provável que a taxa de infecção da ferrugem do cafeeiro fique abaixo de 5 p.p.

O caminho de decisão entre o nó raiz e um nó folha pode ser traduzido para uma regra na forma 'SE <condição> ENTÃO <decisão>'. Por exemplo, o caminho até o nó 14 se traduz na regra 'SE (THUR95_PINF $\geq 16,5^{\circ}\text{C}$) e (UR_PINF $\geq 78\%$) e (TMED_PI_PINF $< 22,35^{\circ}\text{C}$) ENTÃO TAXA_INF_M5 = 1'.

Conforme mostra o modelo da Figura 1, as influências da temperatura e da umidade relativa do ar se revelaram mais importantes no progresso da ferrugem do cafeeiro. Temperaturas médias mais baixas durante o molhamento foliar (THUR95_PINF) foram desfavoráveis às taxas de infecção maiores ou iguais a 5 p.p. (Figura 1, nó 2). Montoya & Chaves (1974) indicaram que o ponto mínimo de germinação de *H. vastatrix* seria encontrado em temperaturas inferiores a 18°C e Kushalappa et al. (1983) consideraram 14°C como limite mínimo de atividade do patógeno. Temperaturas médias diárias no período de incubação (TMED_PI_PINF) mais elevadas também exerceram efeito negativo nas taxas de infecção da ferrugem do cafeeiro (nós 15 e 30). Segundo Moraes et al. (1976), temperaturas médias máximas elevadas no período de incubação ocasionaram efeito depressivo sobre o desenvolvimento de *H. vastatrix*.

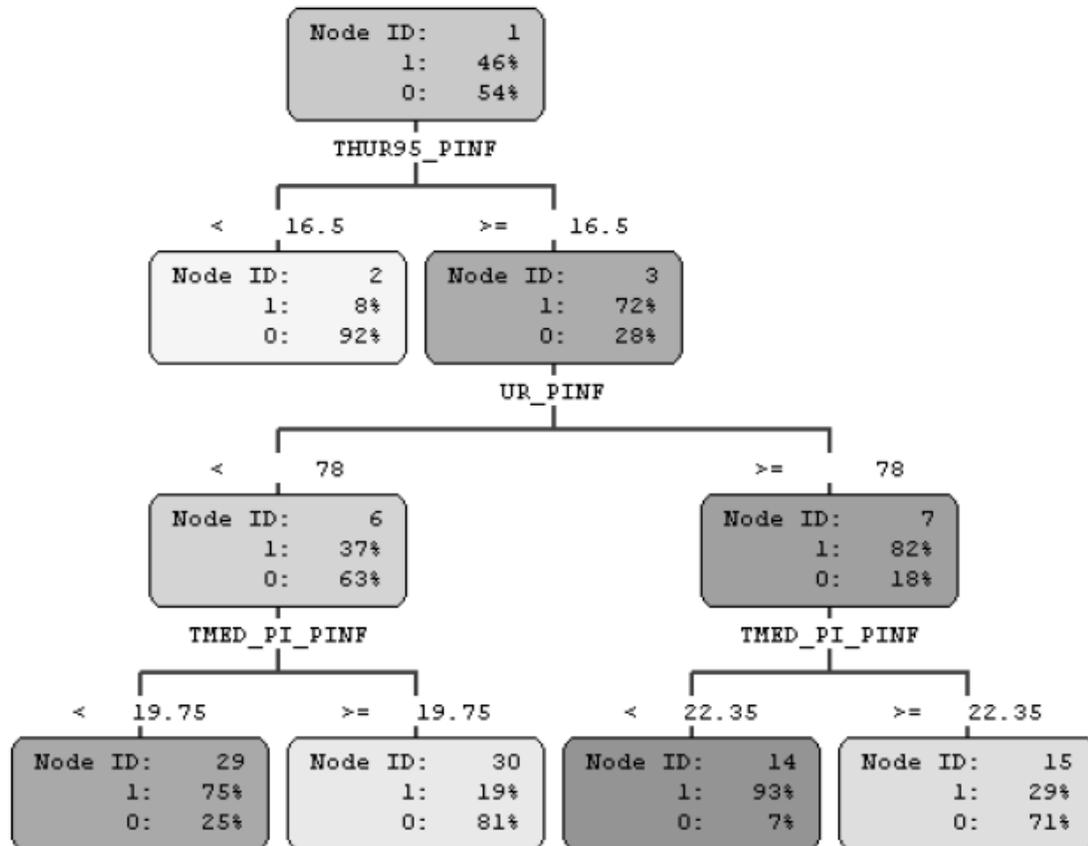


Figura 1. Árvore de decisão para alerta da ferrugem do cafeeiro em lavouras com alta carga pendente de frutos, considerando o limite de 5 p.p. na taxa de infecção. Os nós da árvore indicam o seu número identificador e a distribuição de probabilidade das duas classes. A classe de predição em um nó folha é a que apresenta a maior probabilidade (Fonte: Meira et al., 2009).

Umidade relativa média diária (UR_PINF) mais alta foi favorável às taxas de infecção maiores ou iguais a 5 p.p. (Figura 1, nó 7). A umidade relativa parece ter expressado melhor a importância das chuvas do que as variáveis independentes relacionadas com a precipitação (Meira et al., 2008). Dependendo das condições para a infecção, menos favoráveis (nó 6) ou mais favoráveis (nó 7), a influência da temperatura no período de incubação foi diferenciada. Meira et al. (2008) observaram que infecções ocorridas em condições menos favoráveis foram mais sensíveis ao efeito da temperatura durante o período de incubação.

O modelo da Figura 1 é simples e compacto, com cinco regras e com base apenas em três variáveis de teste. O modelo foi bem avaliado, com acurácia estimada em 81,3% e valores próximos a este para as outras medidas (Tabela 2). A acurácia dá a noção da proporção de acertos que o modelo pode ter caso venha a ser aplicado no problema real. As outras medidas de avaliação também são importantes: a sensibilidade estima a capacidade do modelo de acertar nas situações em que se deve emitir um alerta; a confiabilidade positiva, por sua vez, estima a capacidade do modelo de emitir corretamente os alertas; a especificidade e a confiabilidade negativa são correspondentes às duas primeiras, mas para as situações em que o alerta não é necessário ou não é emitido.

O modelo de alerta da ferrugem do cafeeiro para lavouras com baixa carga pendente de frutos é apresentado na Figura 2. A distribuição percentual dos exemplos entre as duas classes no conjunto de treinamento não foi balanceada, conforme indica o nó raiz (nó 1): 29% (53 exemplos) da classe „1” e 79% (129 exemplos) da classe „0”. Os nós da árvore de decisão também são coloridos em tons de cinza com base na proporção de exemplos da classe „1”. Os alertas devem ser emitidos quando as condições de uma entre cinco regras forem satisfeitas: regras correspondentes aos nós folhas 13, 16, 19, 23 ou 27 (Figura 2). Caso contrário, é provável que a taxa de infecção fique abaixo de 5 p.p.

Tabela 2. Avaliação dos modelos de alerta da ferrugem do cafeeiro.

Medida de avaliação	Alta carga pendente	Baixa carga pendente
Acurácia	81,3±4,8%	71,8±2,5%
Taxa de erro	18,7±4,8%	28,2±2,5%
Sensitividade	79,9±6,9%	46,3±6,9%
Especificidade	82,6±4,3%	82,1±2,1%
Confiabilidade positiva	79,4±6,1%	49,9±5,9%
Confiabilidade negativa	83,9±4,7%	79,4±2,1%

O primeiro atributo de teste da árvore de decisão foi o mesmo do modelo de alerta para lavouras com alta carga pendente, mas com o limite de decisão 1°C acima. Temperaturas médias diárias durante o molhamento foliar (THUR95_PINF) abaixo de 17,55°C foram menos favoráveis à infecção (Figura 2, nó 2), e maiores ou iguais a esse limite foram mais favoráveis às taxas de infecção maiores ou iguais a 5 p.p. (nó 3). A indução do modelo ramificou o nó à esquerda do nó raiz, utilizando a média diária da temperatura máxima no período de incubação (TMAX_PI_PINF) e a temperatura média diária no período de infecção (TMED_PINF). Essa ramificação identificou melhor os exemplos das duas classes, contribuindo para reduzir a taxa de erro do modelo.

A precipitação acumulada no período de infecção (PRECIP_PINF) apareceu com influência no modelo da Figura 2, mas esta variável sozinha não foi suficiente para indicar uma condição mais ou menos favorável à taxa de infecção da ferrugem do cafeeiro. Foi preciso incluir outras variáveis para compor as regras de decisão, como a temperatura média durante o molhamento foliar (THUR95_PINF), o espaçamento da lavoura (LAVOURA) e o molhamento foliar noturno (NHUR95_PINF). A média do número de horas de molhamento foliar (NHUR95_PINF), com valores a partir de 14h, causou efeito depressivo nas taxas de infecção (Figura 2, nó 15). O modelo parece ter capturado efeito negativo do molhamento foliar sobre a doença, semelhante ao observado por Silva-Acuña et al. (1998), também em ano de baixa carga pendente de frutos.

O modelo da Figura 2, com 11 regras e 7 atributos de teste, não foi bem avaliado como o modelo de alerta para lavouras com alta carga pendente (Tabela 2). A acurácia foi de 71,8%, equivalente à acurácia de 71% de um classificador que atribuisse a classe majoritária „0” a todos os exemplos. Não houve equilíbrio entre as medidas de avaliação. A especificidade (82,1%) e a confiabilidade negativa (79,4%) foram melhores do que a sensibilidade (46,3%) e a confiabilidade positiva (49,9%), provavelmente em decorrência da distribuição desbalanceada dos exemplos entre as classes no conjunto de treinamento. Ou seja, apesar de predizer corretamente alguns alertas (classe „1”), o modelo teve a tendência de predizer a classe „0” da maioria dos exemplos do conjunto de treinamento.

A principal limitação dos modelos de alerta desenvolvidos está relacionada com a sua abrangência. O uso desses modelos deve ficar restrito à região onde os dados foram coletados ou a regiões com clima parecido. Outras regiões podem apresentar condições meteorológicas que não foram representadas nos dados analisados e que podem condicionar o progresso da ferrugem do cafeeiro de maneira diferente da capturada pelos modelos. Cabe ressaltar ainda que, antes da adoção dos modelos apresentados, é importante que seja realizada uma etapa de validação desses modelos.

CONCLUSÕES

O modelo em árvore de decisão para alerta da ferrugem do cafeeiro em lavouras com alta carga pendente de frutos apresenta bom desempenho e pode auxiliar na decisão de quando e quais medidas devem ser tomadas no controle da doença no campo. Segundo Zambolim et al. (2002), nos anos de alta carga pendente, não são recomendadas atomizações tardias, após a constatação de nível de incidência da ferrugem do cafeeiro maior do que 5%. O modelo de alerta para lavouras com baixa carga pendente não apresenta tão bom desempenho.

Os modelos em árvore de decisão facilitam a interpretação e a compreensão de suas regras e podem contribuir para a confiança do tomador de decisões em adotá-los como ferramenta de suporte na análise de risco de epidemias da ferrugem do cafeeiro. A indução de árvores de decisão se mostra uma técnica de modelagem adequada ao desenvolvimento de modelos de alerta, alternativa às técnicas convencionalmente utilizadas na epidemiologia de doenças de plantas.

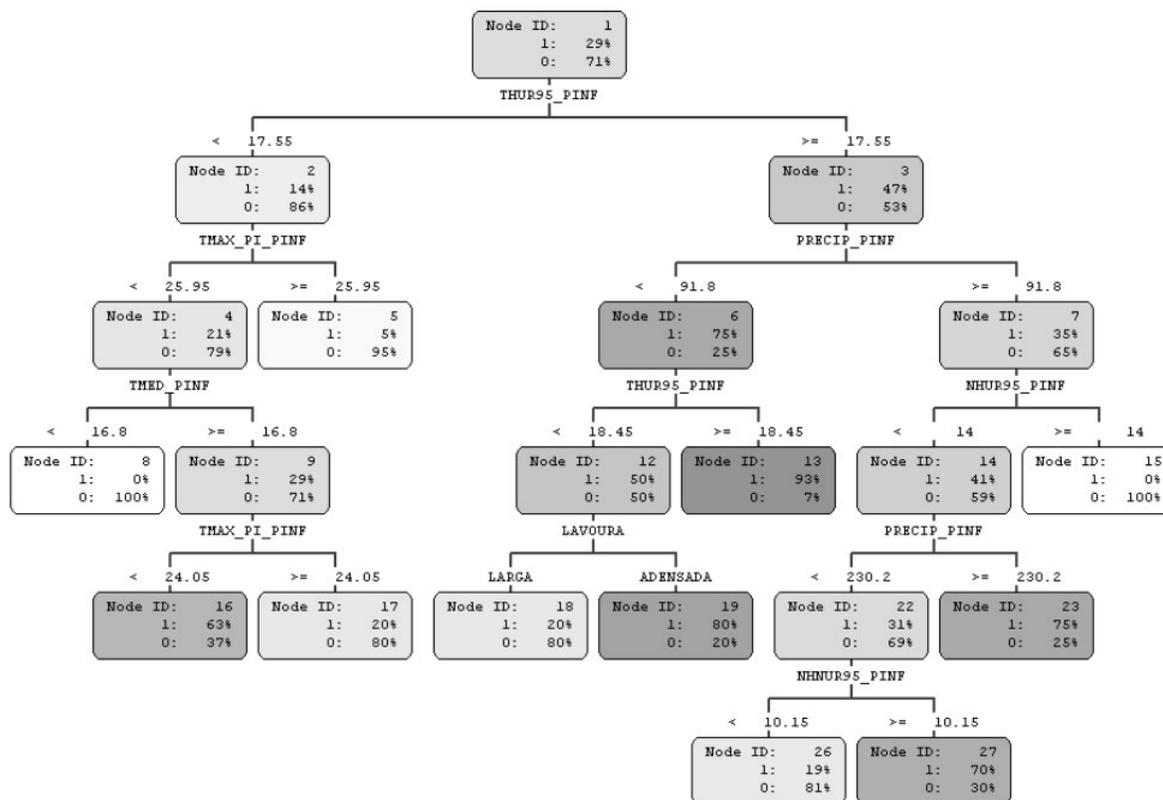


Figura 2. Árvore de decisão para alerta da ferrugem do cafeeiro em lavouras com baixa carga pendente de frutos, considerando o limite de 5 p.p. na taxa de infecção. Os nós da árvore indicam o seu número identificador e a distribuição de probabilidade das duas classes. A classe de predição em um nó folha é a que apresenta a maior probabilidade.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Procafé pela concessão dos dados relacionados com o monitoramento da incidência da ferrugem do cafeeiro. Ao SAS Brasil pela concessão da licença de uso do SAS Enterprise Miner por meio de seu Programa Acadêmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, M.C.; POZZA, E.A.; SILVA, R.M.A.; OLIVEIRA, M.S.; MACHADO, J.C.; CARVALHO, L.G.; OLIVEIRA, A.A.S. Modelagem neuro-fuzzy do processo monocíclico da ferrugem do cafeeiro. In: CONGRESSO PAULISTA DE FITOPATOLOGIA, 30., 2007, Jaboticabal, SP. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v.33(supl.):36, 2007.
- CHALFOUN, S.M. **Doenças do cafeeiro**: importância, identificação e métodos de controle. Lavras, MG: UFLA/FAEPE, 1997.
- CHAPMAN, P.; CLINTON, J.; KERBER, R.; KHABAZA, T.; REINARTZ, T.; SHEARER, C.; WIRTH, R. **CRISP-DM 1.0**: step-by-step data mining guide. [Illinois]: SPSS, 2000. 78p.
- FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. From data mining to knowledge discovery in databases. **AI Magazine**, Menlo Park, v.17, p.37-54, 1996.
- JAPIASSÚ, L.B.; GARCIA, A.W.R.; MIGUEL, A.E.; CARVALHO, C.H.S.; FERREIRA, R.A.; PADILHA, L.; MATIELLO, J.B. Influência da carga pendente, do espaçamento e de fatores climáticos no desenvolvimento da ferrugem do cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 5., 2007, Águas de Lindóia, SP. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa Café, 2007. 1 CD-ROM.
- KUSHALAPPA, A.C.; ESKEES, A.B. Advances in coffee rust research. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v.27, p.503-531, 1989.
- KUSHALAPPA, A.C.; AKUTSU, M.; LUDWIG, A. Application of survival ratio for monocyclic process of *Hemileia vastatrix* in predicting coffee rust infection rates. **Phytopathology**, St. Paul, v.73, p.96-103, 1983.
- MEIRA, C.A.A.; RODRIGUES, L.H.A.; MORAES, S.A. Modelos de alerta para o controle da ferrugem-do-cafeeiro

- em lavouras com alta carga pendente. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, p.233-242, 2009.
- MEIRA, C.A.A.; RODRIGUES, L.H.A.; MORAES, S.A. Análise da epidemia da ferrugem do cafeeiro com árvore de decisão. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v.33, p.114-124, 2008.
- MEIRA, C.A.A. **Processo de descoberta de conhecimento em bases de dados para a análise e o alerta de doenças de culturas agrícolas e sua aplicação na ferrugem do cafeeiro**. 2008. 198p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MOLINEROS, J.E.; DE WOLF, E.D.; FRANCL, L.; MADDEN, L.; LIPPS, P. Modeling epidemics of fusarium head blight: trials and tribulations. **Phytopathology**, St. Paul, v.95(Suppl.):S71. 2005.
- MONARD, M.C.; BARANAUSKAS, J.A. Conceitos sobre aprendizado de máquina. In: REZENDE, S.O. (Org.). **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri: Manole, 2002. p.89-114.
- MONTOYA, R.H.; CHAVES, G.M. Influência da temperatura e da luz na germinação, infectividade e período de geração de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. **Experientiae**, Viçosa, v.18, p.239-266, 1974.
- MORAES, S.A.; SUGIMORI, M.H.; RIBEIRO, I.J.A.; ORTOLANI, A.A.; PEDRO JR., M.J. Período de incubação de *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. em três regiões do Estado de São Paulo. **Summa Phytopathologica**, Piracicaba, v.2, p.32-38, 1976.
- PAUL, P.A.; MUNKVOLD, G.P. A model-based approach to preplanting risk assessment for gray leaf spot of maize. **Phytopathology**, St. Paul, v.94, p.1350-1357, 2004.
- PINTO, A.C.S.; POZZA, E.A.; SOUZA, P.E.; POZZA, A.A.A.; TALAMINI, V.; BOLDINI, J.M.; SANTOS, F.S. Descrição da epidemia da ferrugem do cafeeiro com redes neurais. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v.27, p.517-524, 2002.
- SILVA-ACUÑA, R.; ZAMBOLIM, L.; CRUZ, C.D.; VALE, F.X.R. Estudo epidemiológico da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) utilizando a análise de trilha. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v.23, p.425-430, 1998.
- SUTTON, J.C.; GILLESPIE, T.J.; HILDEBRAND, P.D. Monitoring weather factors in relation to plant disease. **Plant Disease**, St. Paul, v.68, p.78-84, 1984.
- WITTEN, I.H.; FRANK, E. **Data mining: practical machine learning tools and techniques**. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2005. 525p.
- ZAMBOLIM, L.; VALE, F.X.R.; COSTA, H.; PEREIRA, A.A.; CHAVES, G.M. Epidemiologia e controle integrado da ferrugem-do-cafeeiro. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora, 2002. p.369-449.
- ZAMBOLIM, L.; VALE, F.X.R.; PEREIRA, A.A.; CHAVES, G.M. Café (*Coffea arabica* L.): controle de doenças – doenças causadas por fungos, bactérias e vírus. In: VALE, F.X.R.; ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Controle de doenças de plantas: grandes culturas**. Viçosa: UFV, v.1, 1997. p.83-139.