

## ELABORAÇÃO DE REDES NEURONAIS PARA DESCREVER A EPIDEMIA DA FERRUGEM DO CAFEIEIRO

PINTO, A.C.S.<sup>1</sup> e POZZA, E.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DFP/UFLA, C.P. 37, 37200-000, Lavras-MG; <acspinto@ufla.br>

**RESUMO:** O presente trabalho teve por objetivo avaliar o potencial das redes neuronais como método alternativo aos sistemas fundamentais para descrever a epidemia de ferrugem, uma das principais causas de perdas na cultura do café. As redes foram elaboradas com dados de incidência da ferrugem do cafeeiro coletados em Lavras-MG, no período de 13/02/98 a 20/04/2001, e variáveis climáticas. Para construção das redes, as variáveis climáticas foram selecionadas pela análise de regressão “stepwise” ou pelo sistema Braincel<sup>TM</sup>, o qual foi utilizado no desenvolvimento das redes. Séries temporais também foram empregadas na elaboração de redes. Foram testadas 59 redes e 26 modelos de regressão. A escolha dos melhores modelos foi baseada nos menores valores do quadrado médio do desvio (QMD) e erro médio de previsão (EMP). Para os modelos ajustados pela regressão, também foi considerado o maior valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O melhor modelo de rede neuronal apresentou QMD = 4,36 e EMP = 2,43% e incluiu as variáveis: temperatura média, dias com precipitação, umidade relativa do ar e insolação, defasadas 30, 45, 60 e 60 dias, respectivamente. O melhor modelo ajustado pela análise de regressão foi desenvolvido com 29 variáveis climáticas selecionadas na elaboração de rede e apresentou EMP = 6,58%, QMD = 4,36 e  $R^2 = 0,80$ . As redes neuronais elaboradas a partir de séries temporais também foram adequadas para descrever a epidemia. As observações da incidência das cinco semanas anteriores resultaram em um modelo com EMP = 7,01% e QMD = 3,95.

**Palavras-chave:** inteligência artificial, epidemiologia, *Coffea arabica*, rede neuronal.

### DEVELOPMENT OF NEURON NET TO DESCRIBE THE COFFEE RUST EPIDEMIC

**ABSTRACT:** The present work had for objective to evaluate the potential of the neural networks (NN) as alternative method to the basic systems to describe the rust epidemic, one of the main causes of loss in the coffee crop. The NN had been elaborated from data of coffee rust collected in Lavras – MG, between 13/02/98 a 20/04/2001 and climatic variable. The NN had been built with climatic variable selected by the "stepwise" regression analysis or by the Braincel<sup>TM</sup> system, which was used in the development of the

networks. Time series had been also used in the elaboration of networks. 59 networks and 26 models of regression had been tested. The choice of the best models was based on the lesser values of the mean square deviation (MSD) and mean prediction error (MPE). For the regression models also the biggest value of the determination coefficient was considered ( $R^2$ ). The best model of neural network presented MSD = 4,36 and MPE = 2.43% and included the variable: mean temperature, days with precipitation, relative humidity of air and insolation, on the 30, 45, 60 and 60 days before the occurrence, respectively. The best regression model was developed with 29 selected climatic variable in the network elaboration and presented MPE = 6.58%, MSE=4,36 and  $R^2=0,80$ . The elaborated neural networks from time series had been also adjusted to describe the epidemic. The dates of the incidence of the four previous fortnight resulted in a model with MPE = 7,01% and MSD = 3,95.

**Key words:** artificial intelligence, epidemiology, *Coffea arabica*, neural network.

## INTRODUÇÃO

A produção mundial de café é avaliada em torno de 95 milhões de sacas, o que movimenta cerca de US\$15 bilhões por ano (Mendes & Guimarães, 1997). O Brasil, devido às condições favoráveis à cultura, tornou-se o maior produtor e exportador mundial, posição que ocupa desde o século XIX, tendo exportado no ano de 1999 23,02 milhões de sacas de 60 kg (Silva-Acuña et al., 1998; Agriannual, 2001). A ferrugem é a principal doença em *Coffea arabica*, a qual constitui aproximadamente 75% da área plantada (Mendes & Guimarães, 1997; Zambolim et al., 1997). As perdas decorrentes dessa doença podem chegar a 30% se nenhum controle for adotado, causando prejuízos de US\$1-2 bilhões anualmente (Kushalappa, 1989; Zambolim et al., 1997).

Com o objetivo de melhor entender o comportamento epidemiológico da doença, foram desenvolvidos alguns sistemas fundamentais ou explicativos, que se baseiam nos estudos das relações das condições biológicas e de meio ambiente que governam a interação patógeno-hospedeiro (Akutsu, 1981; Kushalappa et al., 1984; Sierras & Montoya-Restepo, 1993). Uma alternativa aos modelos desenvolvidos pelos métodos matemáticos-padrão, embora ainda pouco utilizadas em fitopatologia, são as redes neuronais, as quais apresentam grande potencial no reconhecimento de padrões e previsão de séries temporais, por oferecerem um método flexível e mais próximo dos processos biológicos, podendo ser empregado na previsão e simulação de doenças (Pozza, 1998). As redes neuronais são sistemas de inteligência artificial capazes de simular o funcionamento do cérebro humano, através de “mecanismos de

aprendizado”, apresentando a capacidade de aprender e a possibilidade de serem treinadas para uma determinada situação de interesse (Mizubuti et al., 1994; Olson & Sequeira, 1995; Pozza, 1998). Empregadas nas mais diversas áreas de conhecimento, na agropecuária, as primeiras aplicações das redes neuronais datam do início da década de 90, sendo empregadas como ferramentas para identificar fungos apodrecedores de madeiras (Morris et al., 1992), em sistema de identificação de imagens de raízes no solo (Nater et al., 1992), na classificação, por olhos mecânicos, de ovos destinados à incubação (Das & Evans, 1992) e no controle de nutrientes em culturas hidropônicas (Honjo & Takakura, 1991). Em fitopatologia, as redes neuronais foram aplicadas para quantificar e prever ocorrência de doenças, como também na descrição de epidemias. Assim, uma RN foi usada por Ruan et al. (1998) para quantificar o percentual de mancha de giberela (*Gibberella zea* – *Fusarium graminearum*), com base nas características de cor e textura de amostras de trigo. De Wolf & Franel (2000) avaliaram a utilização de redes neuronais para previsão de ocorrência da mancha amarela (*Pyrenophora tritici-repentis*) e da mancha de Stagonospora (*Phaeosphaeria nodorum*) em trigo. A aplicabilidade de redes neuronais foi testada por Mizubuti et al. (1994) para descrever a epidemia de ferrugem do feijoeiro (*Uromyces appendiculatus*) e por Pozza (1998) para previsão e descrição de epidemias de vassoura-de-bruxa (*Crinipelis perniciosa*) em cacauzeiro. Assim, considerando os resultados alcançados em diversos patossistemas e a importância da ferrugem do cafeeiro, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as redes neuronais como método potencial para descrever a epidemia dessa doença.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de incidência de ferrugem utilizados foram os mesmos obtidos por Talamini (1999), Boldini<sup>\*2</sup> (não publicados) e Santos (não publicados), referentes a avaliações quinzenais realizadas no período de 13/02/98 a 20/04/2001, em cafezal formado com a cultivar Acaiá Cerrado MG1474, instalado no campus da Universidade Federal de Lavras – MG. Como “inputs” foram utilizados os dados climáticos diários, a partir de 60 dias antes do início das avaliações, das variáveis climáticas: PP = precipitação, em mm; UR = umidade relativa média do ar, em %; IN = horas de insolação; Tma = temperatura máxima; Tme = temperatura média; e Tmi = temperatura mínima. Foram calculadas as médias dos últimos 15, 30, 45 e 60 dias que antecederam as avaliações da incidência de ferrugem, exceto precipitação, para a qual foi calculado o valor total no período. Também foram calculadas as variáveis número de dias com e sem precipitação pluviométrica (DCP e DSP, respectivamente). Foi introduzida nos modelos a variável

produção (PD), a qual assumiu valores zero (0) para a planta sem frutos ou um (1) com frutos. Para construção das planilhas e organização dos dados, utilizou-se o programa Microsoft®Excel-97 (Microsoft Corp.) para Windows 98 (Microsoft Corp.).

Na avaliação das variáveis, empregou-se a análise de regressão múltipla e redes neurais desenvolvidas com o “software” BRAINCEL™ (Promised Land Tec., Inc.), versão 3.0, executado em microcomputador compatível com padrão IBM-PC, Pentium 350 Mhz, e 64 Mb de memória RAM. Foram construídos modelos para cada período de defasagem, os quais foram submetidos a dois procedimentos. No primeiro, foram utilizadas todas as variáveis para treinamento de uma rede neuronal, empregando-se as opções dadas pelo sistema, de procura da melhor rede e dos melhores “inputs”. Assim, a camada de entrada foi formada pelas variáveis independentes (PP<sub>15</sub>, IN<sub>15</sub>, Tme<sub>15</sub>, etc), e a de saída, pela variável dependente Incidência de Ferrugem. Na busca da melhor rede, foi definido o número de camadas intermediárias entre 1 e 6, sendo o número de elementos de processamento (EP) ou neurônios artificiais dessas camadas definidas pelo próprio sistema. Definido os melhores “inputs”, estes foram organizados em nova planilha para o teste da rede e para a análise de regressão múltipla. As variáveis selecionadas pela RN foram submetidas à análise de regressão, utilizando-se o seguinte modelo:

$$Y = b_0 + b_1V1_{15} + b_2V2_{15} + \dots b_9V9_{15}$$

em que a variável dependente Y é a incidência de ferrugem; V1, V2... são as variáveis, no máximo nove, selecionadas pela rede neuronal; e b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, ..., b<sub>9</sub> são os coeficientes de regressão parcial. No segundo procedimento, foram selecionadas as variáveis que expressam a incidência de ferrugem, por meio da análise de regressão múltipla “Stepwise”, utilizando-se modelo semelhante ao anteriormente descrito. As variáveis mantidas no modelo foram então utilizadas para treinamento de rede neuronal. Nesse caso foram definidas duas camadas intermediárias, contendo seis e três EP, e erro de previsão de 5%. Também foram construídos modelos para todos os períodos em conjunto, agrupando-se as variáveis climáticas dos quatro períodos antecedentes à avaliação (15, 30, 45 e 60 dias antes), as quais foram empregadas para treinamento de rede, utilizando-se o procedimento de procura de melhor rede e de melhores “inputs”, conforme anteriormente descrito, como também a seleção das melhores variáveis por meio da regressão “Stepwise”. Na avaliação das variáveis selecionadas pela RN, foi utilizado o seguinte modelo de regressão:

$$Y = b_0 + b_1PD + b_2PP_{15} + \dots b_{33}DSP_{60}$$

Para as séries temporais utilizou-se um modelo recursivo, conforme descrito por Pozza (1998), no qual a atual incidência de ferrugem (“output”) seria explicada pela ocorrência observada nas avaliações anteriores. As observações empregadas na construção dessas redes também foram avaliadas pela análise de regressão, sendo as melhores equações selecionadas pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pela significância do teste F ( $P \leq 0,05$  e  $P \leq 0,01$ ). Para a escolha das melhores redes, empregou-se o erro médio de previsão (EMP) e o quadrado médio dos desvios (QMD):

$$\text{EMP (\%)} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{X}_{\text{OBS.}} - \text{X}_{\text{CALC.}}) * 100}{(\text{X}_{\text{OBS.}} + 1) * n}$$

$$\text{QMD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{X}_{\text{OBS.}} - \text{X}_{\text{CALC.}})^2}{n}$$

em que  $\sum_{i=1}^n$  é o somatório de  $i$  até  $n$ ;  $\text{X}_{\text{OBS.}}$ , o valor da incidência de ferrugem observada no campo;  $\text{X}_{\text{CALC.}}$ , o valor calculado pela equação de regressão ou rede neuronal; e “ $n$ ”, o número de observações. O EMP e o QMD também foram empregados para comparação entre a regressão linear e as redes neurais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de pesquisa automática das melhores redes e variáveis, realizada pelo Braincel<sup>TM</sup>, demandou tempo, sendo gastos de 20 a 30 minutos para cada um dos períodos. Apesar disso, o tempo de treinamento de cada rede foi pequeno, variando de 1 a 20 segundos, como também o foi o número de ciclos, o qual não passou de 2.543. A topologia das redes foi relativamente simples, com apenas uma camada intermediária com no máximo quatro neurônios artificiais (6-4-0-1). Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos ajustados pela análise de regressão, para cada período, foram relativamente baixos, variando de 0,54 para o intervalo de 15 dias a 0,63 para o de 60 dias (Tabelas 1 e 2).

**Tabela 1** - Incidência de ferrugem: comparação entre redes neurais e análise de regressão das variáveis selecionadas pela RN, para cada período antecedente à avaliação

| Intervalo de tempo | Regressão |       |        | Redes Neurais |        |      |
|--------------------|-----------|-------|--------|---------------|--------|------|
|                    | QME       | $R^2$ | EMP(%) | QMD           | EMP(%) | QMD  |
| 15                 | 14,69     | 0,57* | 35,01  | 14,39         | 9,46   | 7,06 |
| 30                 | 14,46     | 0,57* | 32,05  | 14,12         | 12,0   | 9,68 |
| 45                 | 12,31     | 0,64* | 25,82  | 12,06         | 24,33  | 5,69 |
| 60                 | 12,56     | 0,63* | 26,23  | 12,34         | 39,49  | 9,19 |

(\*) =  $P \leq 0,01$ ; QME = quadrado médio do erro; EMP= erro médio de previsão; QMD= quadrado médio dos desvios.

As redes neuronais construídas com as variáveis selecionadas pela análise de regressão múltipla “stepwise” apresentaram topologia mais complexa que as anteriores, com duas camadas intermediárias formadas no máximo por seis e três neurônios artificiais, respectivamente (4-6-3-1). Também foram, em relação às regressões, mais eficientes na previsão da incidência de ferrugem, pois apresentaram menores EMPs e QMDs (Tabela 2). A incidência de ferrugem foi mais bem explicada pela rede neuronal treinada com as variáveis climáticas umidade relativa (UR), horas de insolação (IN), temperatura mínima (Tmin), mais a variável produção (PD), relativas ao período de 30 dias anteriores à avaliação, selecionadas pela análise de regressão “stepwise”. Essa rede apresentou EMP = 2,44% e QMD = 7,81 (Tabela 2).

**Tabela 2** - Incidência de ferrugem: comparação entre regressão e redes neuronais elaboradas com as variáveis selecionadas na análise de regressão “stepwise”, para cada período antecedente à avaliação

| Intervalo de tempo | Regressão |                |       |       | Redes Neuronais |       |
|--------------------|-----------|----------------|-------|-------|-----------------|-------|
|                    | QME       | R <sup>2</sup> | EMP   | QMD   | EMP             | QMD   |
| 15                 | 15,57     | 0,54*          | 37,17 | 15,34 | 1,18            | 12,36 |
| 30                 | 14,40     | 0,58*          | 31,72 | 14,18 | 2,44            | 7,81  |
| 45                 | 13,50     | 0,60*          | 28,52 | 13,30 | 12,24           | 8,53  |
| 60                 | 13,84     | 0,59*          | 28,75 | 13,64 | 18,49           | 8,32  |

(\*) =  $P \leq 0,01$ ; QME = quadrado médio do erro; EMP= erro médio de previsão; QMD= quadrado médio dos desvios.

Para os modelos ajustados com as variáveis de todos os períodos em conjunto, foram selecionadas apenas as variáveis Tme<sub>30</sub>, DCP<sub>45</sub>, UR<sub>60</sub> e IN<sub>60</sub>. Na seleção das melhores variáveis feita pelo programa Braincel<sup>TM</sup>, foram excluídas apenas as variáveis Tma<sub>45</sub>, DCP<sub>45</sub> e DSP<sub>60</sub>. O modelo ajustado pela regressão linear apresentou o maior coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,82$ ), embora tenha apresentado EMP relativamente alto (Tabela 3). A rede neuronal desenvolvida com as variáveis selecionadas por esse modelo apresentou os menores QMD (4,36) e EMP (2,43%) (Figura 2).

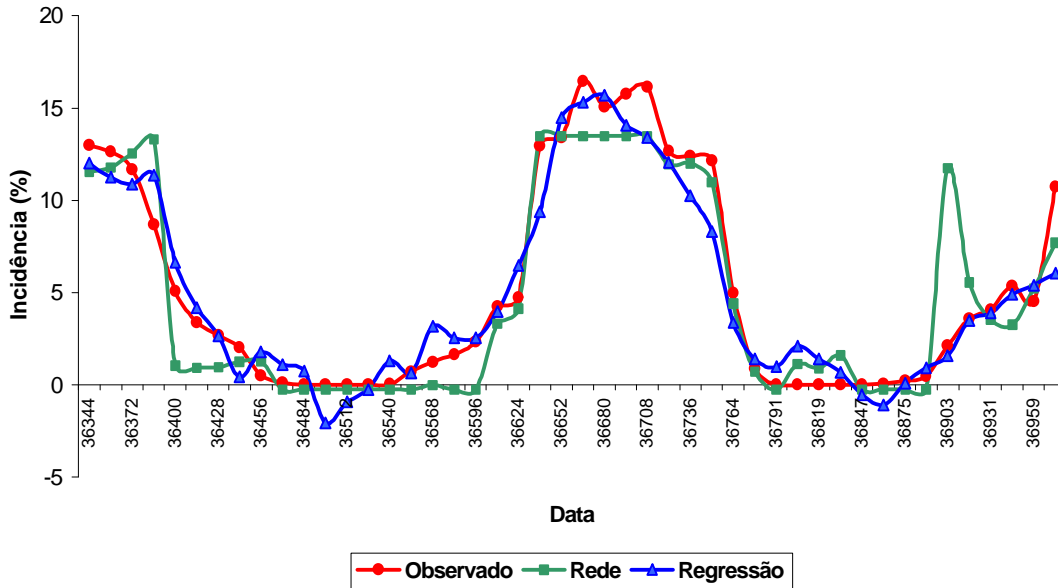
**Tabela 3** - Incidência de ferrugem: comparação entre análise de regressão e redes neuronais, em todos os períodos antecedentes à avaliação

| Seleção Variáveis | Regressão |                |        |      | Redes Neuronais |      |
|-------------------|-----------|----------------|--------|------|-----------------|------|
|                   | QME       | R <sup>2</sup> | EMP(%) | QMD  | EMP(%)          | QMD  |
| Stepwise          | 5,56      | 0,82*          | 20,06  | 4,98 | 2,43            | 4,36 |
| Braincel          | 6,40      | 0,80*          | 6,59   | 2,53 | 7,31            | 5,81 |

(\*) =  $P \leq 0,01$ ; QME = quadrado médio do erro; EMP= erro médio de previsão; QMD= quadrado médio dos desvios.

As séries temporais avaliadas apresentaram resultados satisfatórios. Das cinco redes treinadas, o menor QMD foi obtido empregando-se os dados referentes à incidência de ferrugem das cinco quinzenas anteriores à avaliação, e o menor EMP, com os dados de quatro quinzenas (Tabela 4). Os modelos ajustados pela análise de regressão apresentaram coeficiente de determinação crescente em função do

aumento do número de quinzenas incluídas. Os QMs e EMPs foram altos, quando comparados com os das redes. A melhor rede para a descrição da incidência da ferrugem foi a construída com os dados de incidência das quatro quinzenas anteriores (Figura 3), a qual apresentou QMD = 3,95 e EMP = 4,72%. A melhor rede para previsão da incidência de ferrugem foi a elaborada com as variáveis Tme<sub>30</sub>, DCP<sub>45</sub>, UR<sub>60</sub> e IN<sub>60</sub>, selecionadas pela regressão de análise múltipla “stepwise” (Tabela 4). A variável Tme<sub>30</sub> apareceu na maioria das redes elaboradas. Ribeiro et al. (1978) demonstraram que a temperatura afeta as diferentes fases do ciclo das relações patógeno-hospedeiro. Assim, a temperatura ótima para a germinação dos uredosporos de *Hemileia vastatrix* é de 21°C a 23,7 °C (Nutman et al., 1963; Montoya et al., 1974; Akutsu, 1981). O período de incubação e o período latente também são influenciados pela temperatura, podendo variar de 29 a 62 dias e de 38 a 70 dias, respectivamente (Kushalappa & Chaves, 1980). Silva-Acuña et al. (1998), utilizando análise de trilha, identificaram temperatura entre 21 e 26°C e molhamento foliar noturno como explicativas da taxa de infecção da ferrugem para a região de Patrocínio-MG. A inclusão no modelo das variáveis DCP<sub>45</sub> e UR<sub>60</sub> pode ser justificada pela necessidade da presença de água livre para germinação dos esporos (Nutman & Roberts, 1963; Kushalappa & Eskes, 1989; Silva-Acuña et al., 1998) e pela influência da chuva na disseminação dos uredosporos (Chaves et al., 1970; Martinez et al., 1975). A presença da variável IN<sub>60</sub> no modelo pode ser justificada pelos resultados obtidos nos trabalhos realizados por Nutman et al. (1963) e Montoya & Chaves (1974), os quais demonstraram que a germinação dos esporos é máxima na ausência de luz, intermediária na presença de luz difusa e nula sob luz direta. As redes neuronais apresentaram resultados satisfatórios para previsão da ferrugem a partir de séries temporais (Tabela 7). Praticamente não há, na área de fitopatologia, trabalhos relativos a desenvolvimento de redes neuronais com dados de séries temporais. Pozza (1998) utilizou redes neuronais para descrever a produção de basidiocarpos de *Crinipellis pernicioso* a partir de séries temporais. As redes desenvolvidas não apresentaram resultados satisfatórios, com altos valores para o erro médio de previsão. Os resultados demonstram ser as redes neuronais uma ferramenta alternativa para explicar a epidemia de ferrugem do cafeeiro. No entanto, mais estudos são necessários para aprimorar o modelo, como diferentes combinações de variáveis, inclusão de outras, utilização de dados de outras regiões e emprego de maior número de dados.

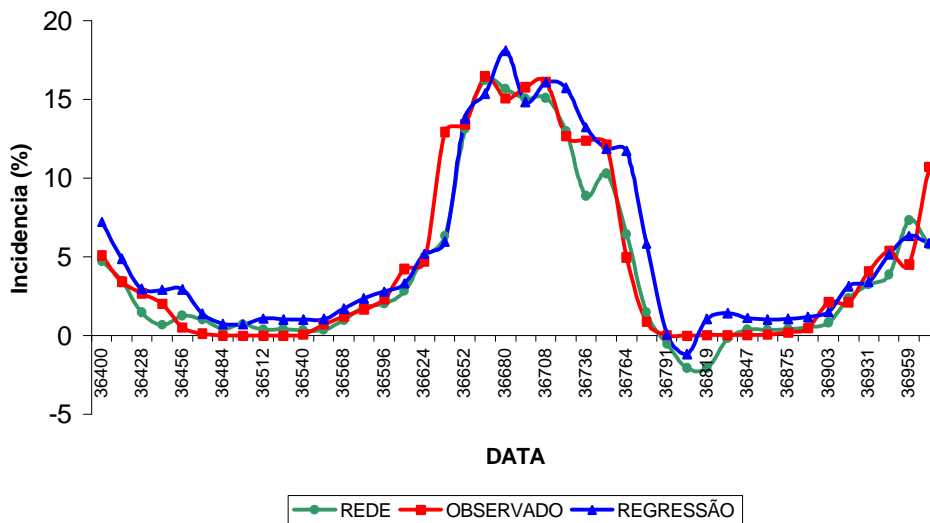


**Figura 2** - Incidência de ferrugem observada e prevista por rede neuronal e regressão linear, em função de Tme<sub>30</sub>, DSP<sub>45</sub>, UR<sub>60</sub> e IN<sub>60</sub>.

**Tabela 4** - Incidência de ferrugem: comparação entre análise de regressão e redes neurais, em função da ocorrência anterior (série temporal)

| Intervalo de tempo | Regressão |                |        | Redes Neurais |        |
|--------------------|-----------|----------------|--------|---------------|--------|
|                    | QME       | R <sup>2</sup> | EMP(%) | QMD           | EMP(%) |
| 15                 | 8,19      | 0,75*          | 34,66  | 7,84          | 24,75  |
| 15 e 30            | 5,04      | 0,84*          | 20,56  | 20,56         | 25,69  |
| 15,30 e 45         | 4,72      | 0,86*          | 16,96  | 4,3           | 40,78  |
| 15,30,45 e 60      | 4,62      | 0,86*          | 15,05  | 4,08          | 4,72   |
| 15,30,45,60 e 75   | 4,49      | 0,87*          | 14,74  | 3,85          | 7,01   |

(\*) = P ≤ 0,01; QME = quadrado médio do erro; EMP= erro médio de previsão; QMD= quadrado médio dos desvios.



**Figura 3** - Incidência de ferrugem observada e prevista por rede neuronal e regressão linear, em função da ocorrência observada nas cinco quinzenas anteriores a avaliação (série temporal).



## CONCLUSÕES

A utilização conjunta da análise de regressão múltipla “stepwise” e redes neuronais possibilitou o desenvolvimento de modelos de redes adequadas para descrever a epidemia de ferrugem do cafeeiro, a partir de dados climáticos. O melhor modelo de rede neuronal incluiu as variáveis: temperatura média, dias com precipitação, umidade relativa do ar e horas de insolação, defasadas 30, 45, 60 e 60 dias, respectivamente.

As redes neuronais desenvolvidas a partir de séries temporais também foram adequadas para descrever a epidemia. As observações da incidência das quatro e cinco quinzenas anteriores resultou em um modelo com menores erro médio de previsão e quadrado médio do desvio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRIANUAL 2001- Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: Ed. Agros Comunicação, p.545. 2001.
- AKUTSU, M. **Relação de funções climáticas e bióticas com a taxa de infecção da ferrugem do cafeeiro** (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.). Viçosa: UFV, (Dissertação – Mestrado em Fitopatologia), p.67. 1981.
- DAS, K. & EVANS, M.D. Detecting fertility of hatching eggs using machine vision II. Neural network classifiers. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 35 (6): p.2035-2041. 1992.
- De WOLF, E.D.& FRANEL, L.J. Neural network classification of tan spot and stagonospora blotch infection periods in a wheat field environment. **Phytopathology**, St. Paul, 90 (2): p.108-113. 2000.
- HONJO, T. & TAKAKURA, T. Identification of water and nutrient supply to hydroponic tomato plants by using neural nets. IFAC-Workshop series: Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture, p.285-288. 1991.
- KUSHALAPPA, A.C., AKUTSU, M., OSEGUERA, S.H. *et al.* Equations for predicting the rate of coffee rust development based on net survival ratio for monocyclic process of *Hemileia vastatrix*. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, (9): p.255-271. 1984.
- KUSHALAPPA, A.C. & ESKES, A.B. Advances in coffee rust research. **Annual Review of Phytopathology**, (27): p.503-531. 1989.
- MIZUBUTI, E.S.G., MAFFIA, L.A. & SILVA, C.A.B. Potencial do uso de redes neuronais em simulação de epidemias. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, 19 (Suplemento): 314, (Resumo). 1994.
- MENDES, A.N.G. & GUIMARÃES, A.F. Economia cafeeira: O Agribusiness. Universidade Federal de Lavras - UFLA - FAEPE, Lavras/MG. p.59. 1997.

- MONTOYA, R. & CHAVES, G.M. Influência da temperatura e da luz na germinação, infectividade e período de geração de *Hemileia vastatrix* Berk & Br. **Experientiae**, 18 (11): p.239-266. 1974.
- MORRIS, C.W., BODDY, L. & ALLMAN, R. Identification of basidiomycete spores by neural network. **Mycological Research**, Edinburgh, 96 (8): p.697-701. 1992.
- NATER, E.A., NATER, K.D. & BAKER, J.M. Application of artificial neural system algorithms to image analysis of roots in soil, I. Initial results. **Geoderma**, Amsterdam, 53 (3/4): p.237-253. 1992.
- NUTMAN, F.J. & ROBERTS, F.M. Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. Trans. Br. Mycol. Soc. (46): p.27-48. 1963.
- OLSON, R.L. & SEQUEIRA, R.A. Emergent computation and the modeling and management of ecological systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, 12 (3): p.183-209. 1995.
- POZZA, E.A. **Desenvolvimento de sistemas especialistas e redes neuronais e suas aplicações em fitopatologia**. Viçosa: UFV, (Tese - Doutorado em Fitopatologia). p.139. 1998.
- RIBEIRO, I.J.A., MONACO, L.C., FILHO, O. T. & SUGIMORI, M.H. Efeito de alta temperatura no desenvolvimento de *Hemileia vastatrix* em cafeeiro suscetível. **Bragantia**, 37 (2): p.11-16. 1978.
- RUAN, R., NING, S., SONG, A., et al. Estimation of *Fusarium* scab in wheat using machine vision and a neural network. **Cereal Chemistry**, 75 (4): p.455-459. 1998.
- SIERRAS-S., C.A. & MONTOYA-RESTEPRO, E.C Desarrollo matematico e implantacion del modelo de simulacion de la roya del cafeto en Colombia. **Cenicafé**, 44 (2): p.56-67. 1993.
- SILVA-ACUÑA, R., ZAMBOLIM, L., CRUZ, C.D. & VALE, F.X.R. Estudo epidemiológico da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) utilizando análise de trilha. **Fitopatologia Brasileira**, 23 (4): p.425-430. 1998.
- TALAMINI, V. **Progresso da ferrugem e da cercosporiose do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) irrigado e fertirrigado por gotejamento**. Lavras: UFLA, (Tese – Mestrado em Fitopatologia). 1999.
- ZAMBOLIM, L., RIBEIRO DO VALE, F.X., PEREIRA, A.A. & CHAVES, G.M. Café (*Coffea arabica* L.), controle de doenças. In: RIBEIRO DO VALE, F. X. & ZAMBOLIM, L. **Controle de doenças de plantas: grandes culturas**. Viçosa, MG: Departamento de Fitopatologia; Brasília, DF: Ministério da Agricultura e Abastecimento, (2): 554p. 1997.