

**VICENTE DE PAULA LELIS**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA NO  
ESTADO DE MINAS GERAIS**

Tese apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Meteorologia Agrícola, para  
obtenção do título de *Doctor  
Scientiae*.

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2007**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

L732m  
2007

Lelis, Vicente de Paula, 1956-

Mudanças climáticas e ferrugem asiática da soja no  
Estado de Minas Gerais / Vicente de Paula de Lelis.  
– Viçosa, MG, 2007.

xvii, 89f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Luiz Cláudio Costa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 83-89.

1. Climatologia agrícola. 2. Aquecimento global.
  3. Mudanças climáticas - Modelos matemáticos.
  4. Ferrugem da soja (Doença). 5. Redes neurais (Computação). 6. Soja - Doenças e pragas.
- I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

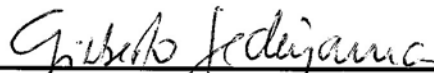
CDD 22.ed. 630.2515

VICENTE DE PAULA LELIS

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA NO  
ESTADO DE MINAS GERAIS**

Tese apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Meteorologia Agrícola, para  
obtenção do título de *Doctor  
Scientiae*.

APROVADA: 22 de outubro de 2007.



Prof. Gilberto Chohaku Sedyama

(Co-Orientador)

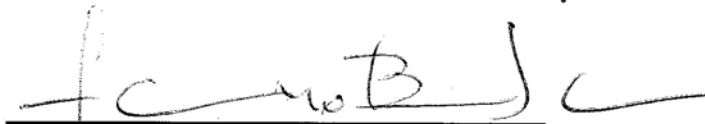


Prof. Francisco Xavier R. de Vale

(Co-Orientador)



Prof. Waldir Cintra de Jesus Júnior



Prof. Flávio Barbosa Justino



Prof. Luiz Cláudio Costa

(Orientador)

*A Deus*

*A Maria Marta, minha mãe (in memoriam)*

*A Maria, Davi, Levi e Marina*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por agraciar-me com o necessário e não com tudo que eu ousava pedir.

À minha esposa, Maria, e aos meus filhos, Davi, Levi e Marina pelo amor, carinho e incentivo constantes.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de aperfeiçoamento da minha formação acadêmica.

Aos funcionários do Registro Escolar, amigos com quem tenho partilhado os momentos bons e alegres e também os difíceis e tristes nos últimos anos.

Ao professor Luiz Cláudio Costa, pela zelosa orientação e amizade.

Aos co-orientadores, Gilberto Chohaku Sedyama e Francisco Xavier Ribeiro do Vale, pelas valiosas sugestões e amizade.

Aos Professores, Flávio Barbosa Justino e Waldir Cintra de Jesus Júnior pelas contribuições enriquecedoras.

Aos colegas de curso da pós-graduação em Meteorologia Agrícola, pela amizade, apoio e troca de experiências.

Aos servidores do Departamento de Engenharia Agrícola pelo apoio e amizade.

Aos professores e servidores do departamento de Física pela amizade, incentivo e apoio.

## **BIOGRAFIA**

Vicente de Paula Lelis, filho de Raimundo Camilo de Lelis e Maria Marta Lelis, nasceu em 14 de março de 1956 na cidade de Canaã, Estado de Minas Gerais. Graduou-se em Engenharia Agrônômica em 1979 pela Universidade Federal de Viçosa - UFV; ingressando, em junho de 1980, no departamento de Física, como professor. Obteve, em 1986, o título de Magister Scientiae pela UFV. Dedicou-se, na UFV, de 1980 até a presente data, principalmente, ao Ensino, totalizando 8093 horas-aulas ministradas para 8217 alunos. Participou também da Extensão, administrando e coordenando projetos de ensino; e da Administração, tendo sido chefe do Departamento de Física, em dois mandatos. Sobre cargos administrativos, foi, também, Presidente do Conselho Técnico de Graduação e Presidente da COPEVE e, atualmente, é Diretor do Registro Escolar. Ingressou no Programa de Doutorado em Meteorologia Agrícola em maio de 2006, tendo defendido tese em 22 de outubro de 2007.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiii
RESUMO .....	xiv
ABSTRACT .....	xvi
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	1
CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS FAVORÁVEIS AO DESENVOLVIMENTO DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA NO ESTADO DE MINAS GERAIS .....	5
1. INTRODUÇÃO .....	5
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	10
2.1. Região de estudo e dados utilizados .....	10
2.2. Desenvolvimento dos modelos .....	11
2.3. Validação do modelo .....	15
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	17
3.1. Análise da favorabilidade .....	17
3.2. O modelo e os resultados experimentais .....	23
3.2.1. Experimento conduzido em Uberlândia .....	23
3.2.2. Experimento conduzido em Viçosa .....	25
CAPÍTULO 2 – UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES FAVORÁVEIS AO DESENVOLVIMENTO DA FERRUGEM ASIÁTICA .....	29
1. INTRODUÇÃO .....	29
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	38
2.1. Condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem .....	38
2.2. Relação entre NHFDD e a temperatura e umidade relativa média diária .....	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	41

CAPÍTULO 3 – PROJEÇÕES FUTURAS DAS CONDIÇÕES FAVORÁVEIS AO DESENVOLVIMENTO DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA .....	54
1. INTRODUÇÃO.....	54
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	64
2.1. A doença e o modelo .....	64
2.2. A região em estudo e os dados utilizados .....	64
2.3. Condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem.....	65
2.4. Relação entre O NHFDD e a temperatura e umidade relativas médias diárias .....	65
2.5. Análise dos dados.....	67
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	68
3.1. Análise dos dados do Modelo de Circulação Geral-HadCM3 .....	68
3.2. Análise dos NDFDD identificados pelo modelo e gerados pelas RNAs	73
CONCLUSÕES GERAIS .....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 1

Figura 1 –	Modelo para identificação dos períodos de favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja, com $UR \geq 90,0\%$ .....	13
Figura 2 –	Modelo para identificação dos períodos de favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja, com a $DPO < 2,0^{\circ}\text{C}$ .....	14
Figura 3 –	Número de dias com condições de baixa, média e alta favorabilidade, na região de Viçosa, em 2006, conforme modelo 1.....	18
Figura 4 –	Soma do NDFDD de média e alta favorabilidade, na região de Viçosa, durante os anos de 2005 e de 2006, conforme modelo 1.....	18
Figura 5 –	Total de dias com as condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem, nas localidades em estudo, em 2005 e 2006.....	19
Figura 6–	Número de dias de favorabilidade e temperatura média mensal no ano de 2006, em Viçosa e em Nanuque.....	20
Figura 7 –	Número de dias de favorabilidade para o desenvolvimento da doença (NDFDD), nos meses de julho e novembro de 2005 e 2006, nas localidades pesquisadas.....	21
Figura 8 –	Número de dias de favorabilidade ao desenvolvimento da doença nos meses de janeiro, março, agosto e novembro de 2006, identificado pelo modelo 1, no Estado de Minas Gerais.....	22
Figura 9 –	Severidade na cultura da soja em experimento realizado no Campus da UFU, Uberlândia.....	23

Figura 10 – Severidade e NHFDD para o período entre o 14° DAP e 106° DAP.....	24
Figura 11 – Severidade da ferrugem asiática e NDFDD em Uberlândia e NDFDD médio da região.....	25
Figura 12– NHFDD no período do 27° DAE ao 130° DAE, em Viçosa .....	26
Figura 13 – Severidade da ferrugem asiática e NHFDD, durante o experimento em Viçosa.....	27
Figura 14 – Severidade da ferrugem asiática e NDFDD acumulados, no ano de 2006 em Viçosa.....	28
 Capítulo 2	
Figura 1 – Modelo do neurônio de McCulloch e Pitts (MCP), adaptado de Braga <i>et al.</i> (2000).....	35
Figura 2 – Estrutura de uma RNA do tipo multicamada, adaptada de Haykin (2001).....	35
Figura 3 – Modelo da rede neural treinada, com número variável de neurônios.....	39
Figura 4 – NHFDD em função da temperatura média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 5 neurônios.....	42
Figura 5 – NHFDD em função da temperatura média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 10 neurônios.....	42
Figura 6 – NHFDD em função da temperatura média diária em Minas Gerais, gerado em uma RNA com 15 neurônios.....	43
Figura 7 – NHFDD em função da umidade relativa média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 5 neurônios.....	44
Figura 8 – NHFDD em função da umidade relativa média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 10 neurônios.....	45
Figura 9 – NHFDD em função da umidade relativa média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 15 neurônios.....	45
Figura 10 – NHFDD em função da temperatura e umidade relativa, médias diárias em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 5 neurônios.....	47

Figura 11 – NHFDD em função da temperatura e umidade relativa, médias diárias em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 10 neurônios.....	47
Figura 12 – NHFDD em função da temperatura e umidade relativa, médias diárias em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 15 neurônios.....	48
Figura 13 – NHFDD gerado pelas redes de 5, 10 e 15 neurônios, em função da temperatura média diária.....	49
Figura 14 – NHFDD gerado pelas redes de 5, 10 e 15 neurônios, em função da umidade relativa média diária.....	49
Figura 15 – Comparação entre os NHFDD, identificados pelo modelo e aqueles gerados nas RNAs de temperatura média e umidade relativa média, ambas com 10 neurônios, no período de janeiro a abril, em Uberlândia.....	51
Figura 16 – Comparação entre os NDFDD, identificados pelo modelo e aqueles gerados nas RNAs de temperatura média e umidade relativa média, ambas com 10 neurônios, no período de janeiro a abril, em Uberlândia.....	52
Figura 17 – Comparação entre os NDFDD identificados pelo modelo e aqueles gerados pelas RNAs de temperatura média e umidade relativa média, ambas com 10 neurônios, no período de janeiro a abril, em Uberlândia.....	53
 Capítulo 3	
Figura 1 – Modelo da rede neural treinada, com número variável de neurônios.....	66
Figura 2 – Temperatura média mensal nos meses de janeiro e julho, medida para 2006 e projetada, pelo HadCM3, para os anos de 2020, 2050 e 2080, nas 14 localidades.....	68
Figura 3 – Temperatura média mensal em Viçosa, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.....	70

Figura 4 –	Temperatura média mensal em Machado, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.....	70
Figura 5 –	Umidade relativa média mensal, no mês de janeiro, nas localidades em estudo, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.....	71
Figura 6 –	Umidade relativa média mensal, no mês de julho, nas localidades em estudo, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.....	71
Figura 7 –	Umidade relativa média mensal para Viçosa, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.....	72
Figura 8 –	Umidade relativa média mensal para Araxá, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.....	72
Figura 9 –	NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, nas 14 localidades, no mês de janeiro.....	75
Figura 10 –	NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, nas 14 localidades, no mês de abril.....	75
Figura 11 –	NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, nas 14 localidades, no mês de agosto.....	76
Figura 12 –	NDFDD em Viçosa no ano 2006, identificado pelo modelo e, nos anos de 2020, 2050 e 2080, gerado pela RNA.....	77
Figura 13 –	NDFDD em Araxá no ano de 2006, identificado pelo modelo e, nos anos de 2020, 2050 e 2080, gerado pela RNA.....	77
Figura 14 –	NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, em Viçosa.....	78

Figura 15 – NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, em Araxá.....	78
Figura 16 – NDFDD nos meses de janeiro e março de 2006, identificado pelo modelo e as projeções pelas temperaturas do HadCM3 nos anos de 2020, 2050 e 2080.....	80
Figura 17 – NDFDD nos meses de agosto e novembro de 2006, identificado pelo modelo e as projeções pelas temperaturas do HadCM3 nos anos de 2020, 2050 e 2080.....	81

## LISTA DE TABELAS

Capítulo 1	
Tabela 1 –	Estações meteorológicas do Estado de Minas Gerais que fazem parte da pesquisa..... 11
Capítulo 2	
Tabela 1 –	Valores máximos de temperatura média diária e do número de horas favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD), nas RNAs com 5, 10 e 15 neurônios..... 41
Tabela 2 –	Valores máximos de umidade relativa média diária e do número de horas favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD), nas RNAs com 5, 10 e 15 neurônios..... 44
Tabela 3 –	Valores máximos de temperatura média diária, umidade relativa média diária e do número de horas favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD), nas RNAs com 5, 10 e 15 neurônios..... 46
Tabela 4 –	Raiz quadrada do erro médio (RSME) e número de Willmott entre os NHFDD identificados pelo modelo, no experimento em Uberlândia, em comparação com os NHFDD, gerados pelas RNAs de temperaturas e umidades relativas médias diárias, com 5, 10 e 15 neurônios..... 50
Tabela 5 –	Raiz quadrada do erro médio (RSME) e número de Willmott entre os NDFDD identificados pelo modelo, no experimento em Uberlândia, em comparação com os NDFDD, gerados pelas RNAs de temperaturas e umidades relativas médias diárias, com 5, 10 e 15 neurônios..... 51
Capítulo 3	
Tabela 1 –	Comparação dos NDFDD no ano de 2006, identificados pelo modelo, com dados das estações e gerados pelas RNAs com as projeções do HadCM3..... 73

## LISTA DE SÍMBOLOS

CEPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
PMF	Período de molhamento foliar
UR	Umidade relativa
DPO	Depressão do ponto de orvalho
$T_{ar}$	Temperatura do ar
$T_d$	Temperatura do ponto de orvalho
NHDPO	Número de horas de depressão do ponto de orvalho
NHUR	Número de horas de umidade relativa
$e_a$	Pressão parcial de vapor
$e_s$	Pressão de saturação de vapor
NHFDD	Número de horas favoráveis ao desenvolvimento da doença
NDFDD	Número de dias favoráveis ao desenvolvimento da doença
HFDD	Horas favoráveis ao desenvolvimento da doença
DFDD	Dias favoráveis ao desenvolvimento da doença
DAE	Dias após a emergência
DAP	Dias após o plantio
IAF	Índice de área foliar
RNA	Redes neurais artificiais
$n$	Número de entradas dos neurônios
$x_i$	Entrada dos neurônios
$w_i$	Peso associado à entrada $x_i$
$\Theta$	Limiar do neurônio
RSME	Raiz quadrada do erro médio
$d$	Número de Willmott
$T_{med}$	Temperatura média
$e(T_d)$	pressão de vapor do ponto de orvalho
$e(T_{med})$	pressão de saturação de vapor da temperatura média
$e(T_{min})$	pressão parcial de vapor para a temperatura mínima

## RESUMO

LELIS, Vicente de Paula. D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2007. **Mudanças climáticas e ferrugem asiática da soja no Estado de Minas Gerais**. Orientador: Luiz Cláudio Costa. Co-Orientadores: Gilberto Chohaku Sedyama e Francisco Xavier Ribeiro de Vale.

No ano de 2001, a ferrugem asiática da soja, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi* (Syd & P. Syd), apareceu no continente sul americano, provocando danos às lavouras no Brasil, principalmente nos Estados de Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, nas safras de 2004/2005 e 2005/2006. A temperatura, a umidade relativa e a presença de água líquida nas folhas favorecem o desenvolvimento do fungo. Para identificar a favorabilidade ao desenvolvimento da doença no Estado de Minas Gerais, testaram-se dois modelos. No primeiro, considerou-se o número de horas com a umidade relativa maior ou igual a 90,0% e, no segundo, a depressão do ponto de orvalho menor que 2,0°C. Em ambos, a faixa de temperatura de 18,0°C a 25,0°C foi considerada ideal ao desenvolvimento do fungo *Phakopsora pachyrhizi*. A pesquisa foi realizada, utilizando-se os dados de temperatura e umidade relativa horários, obtidos em 14 estações meteorológicas da plataforma de coleta de dados do CPTEC-INPE, em 2005 e 2006. Como os modelos apresentaram resultados semelhantes, ao dar seqüência à pesquisa, optou-se pelo primeiro, que foi, novamente, testado com dados de dois experimentos de campo, realizados no ano de 2006: um em Viçosa, cidade da zona da mata; outro em Uberlândia, cidade do triângulo mineiro. Nessa etapa da pesquisa, foram obtidas as medidas de severidade na cultura da soja. Na análise da relação entre a favorabilidade e os dados (temperatura e umidade relativa), utilizaram-se redes neurais artificiais (RNAs). Esse procedimento possibilitou a geração de redes neurais, para obtenção de informações sobre favorabilidade em função das temperaturas e das umidades relativas médias diárias, separadamente e simultaneamente, como dados de entrada na rede.

As redes com melhores desempenhos continham 10 e 15 neurônios e, como tipo de aprendizagem, utilizou-se a propagação retroativa do erro. Após a identificação das redes que melhor responderam à relação, calculou-se a umidade relativa a partir dos dados de temperatura média e mínima diários, oriundos do modelo de circulação geral - HadCM3. Com esses dados, fizeram-se projeções de favorabilidade para os anos de 2020, 2050 e 2080, cujos resultados mostraram uma tendência de aumento da favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem, em quase todas as regiões do Estado.

## ABSTRACT

LELIS, Vicente de Paula. D. Sc. Universidade Federal de Viçosa. October, 2007. **Climatic changes and the soybean asiatic rust in Minas Gerais State.** Adviser: Luiz Cláudio Costa. Co-Advisers: Gilberto Chohaku Sedyama and Francisco Xavier Ribeiro do Vale.

In 2001, the soybean Asian rust caused by the fungus *Phakopsora pachyrhizi* (Syd & P. Syd) appeared in the South American continent, as causing many damages to the crops in Brazil, mainly in the states of Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais and Mato Grosso do Sul at the seasons 2004/2005 and 2005/2006. The temperature, air relative humidity and the presence of the liquid water on the leaves rather favor the development of this fungus. Two models were tested to identify the favorableness to the development of the disease in Minas Gerais State. The number of hours with air relative humidity higher or equal to 90% were considered in the first model, whereas the dew point depression lower than 2 °C was considered in the second one. The temperature range from 18 °C to 25 °C was considered as ideal for development of the fungus *Phakopsora pachyrhizi*. The research with data of the hourly temperature, minimum temperature and hourly air relative humidity obtained on 2005 and 2006 in 14 meteorological stations of the data collection platform pertaining to CPTEC-INPE. As the models showed similar results, the first model was chosen and again tested, by using data from two field experiments that were accomplished in 2006: one in Viçosa county located in Zona da Mata region; and another one in Uberlândia county located in Triângulo Mineiro. In this stage of the research, the measures of the severity in soybean crop were obtained. In analyzing the relationship between favorableness and the data (temperature and air relative humidity), the neural artificial networks (RNAs) were used. This procedure made possible the generation of neural nets for the separation and simultaneous obtainment of the information about the favorableness as a function of either temperatures and daily average relative humidity as input

data into network. The networks with better performance contained 10 and 15 neurons, and the used learning type was the back propagation. After identification of the networks providing better response to relationship, the air relative humidity was calculated from the daily data of the average and minimum temperatures proceeding from the general circulation - HadCM3 model. Using the data, the favorableness projections were performed for the years 2020, 2050 and 2080, from which the results showed a tendency to increased favorableness to the development of the rust in almost all regions in the State.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A soja é considerada a mais importante fonte de proteína e de óleo vegetal no mundo, em função da sua qualidade e do baixo custo de produção. Além disso, ela tem várias outras utilidades. Há uma estimativa de que 50 milhões de quilos de óleo de soja são usados para composição de tintas gráficas no mundo. Nos Estados Unidos, por exemplo, este tipo de tinta à base de óleo de soja, representa no mercado, entre 10,0 e 15,0% na cor preta e cerca de 30,0% nas outras cores (ANUÁRIO BRASILEIRO DA SOJA, 2000).

A produção brasileira de soja tem crescido a cada ano, sendo que, em 2004, produziu 50 milhões de toneladas, o que correspondeu a 25,0% da safra mundial, colocando o Brasil como o segundo maior produtor mundial. No ano de 2005, a produção chegou a 52 milhões de toneladas, representando 27,0% da safra mundial. A área plantada na safra 2006/2007 foi de, aproximadamente, 20 milhões de hectares, com uma produção de 58,4 milhões de toneladas, número ainda baixo se comparado aos 86,8 milhões de toneladas produzidos pelos Estados Unidos, maior produtor mundial de grãos. A produção brasileira, embora possa aumentar, tem uma importante participação nas exportações do país. Em 2006, ela contribuiu com US\$ 9,3 bilhões, o que representou 6,8% do total exportado pelo Brasil (EMPRAPA SOJA, 2007).

A produtividade média da soja cresceu nas últimas décadas, atingindo 2343 kg.ha<sup>-1</sup> na safra 2003/04, sendo, atualmente, 2823 kg.ha<sup>-1</sup>. Na safra 2006/2007, a produtividade alcançou 3000 kg.ha<sup>-1</sup> nos Estados do Mato Grosso e Paraná, mas ficou abaixo do potencial produtivo que é de 3600 kg.ha<sup>-1</sup>. No Brasil, o principal produtor é o Estado do Mato Grosso, vindo a seguir o Paraná (EMBRAPA SOJA, 2007). Diversos fatores limitam os rendimentos no Brasil, dentre os quais encontram-se as doenças que incidem na cultura. Aproximadamente, 50 doenças causadas por diversos agentes já foram identificadas no Brasil. Este número continua aumentando

com a expansão da soja em novas áreas, como consequência da monocultura e com a introdução de novos patógenos (REIS, 2005).

Sabe-se que, em plantas, as doenças resultam da complexa interação entre hospedeiro, patógeno e ambiente. Trata-se de um processo conhecido em fitopatologia, como o clássico triângulo de doenças, que estabelece as condições necessárias ao desenvolvimento das mais variadas patologias na agricultura. A terminologia “triângulo de doenças” retrata bem a dinâmica do processo: se um dos três componentes (hospedeiro, patógeno ou ambiente) não interagir com os outros dois, a doença não se desenvolverá.

Quanto ao ambiente, dentre as variáveis climáticas que mais afetam o desenvolvimento de doenças em plantas, destacam-se a temperatura, umidade relativa do ar e a presença de água na forma líquida sobre a superfície das plantas (HUBER & GILLESPIE, 1992; VALE *et al.*, 2004). Embora se tenha consciência da influência negativa da oscilação brusca do clima sobre as plantas, ainda não foram, científica e detalhadamente, estudados os impactos que as mudanças de temperatura podem causar nos sistemas agrícolas no que tange às doenças por elas favorecidas. Mudança nas temperaturas e alteração da umidade nos vários agroecossistemas poderão levar à intensificação dos estresses bióticos, favorecendo o surgimento de pragas até então pouco expressivas ou de importância secundária, com danos à produtividade (GHINI, 2005).

Na última década, vários modelos de simulação de crescimento de culturas vêm sendo desenvolvidos por pesquisadores, tais como APSIM, CERES, DAISY, DSSAT, WOFOST e SUCROS. Estes modelos integram diferentes fatores na produtividade e têm sido utilizados para determinar o potencial de produção e a otimização do manejo, para quantificar perdas no campo e, também, para o estudo das consequências das variações e mudanças climáticas. No entanto, a maior limitação desses modelos tem sido não considerar as perdas devido a pragas e doenças, que são muito comuns em ambientes tropicais e subtropicais (AGGARWAL *et al.*, 2006; PAVAN, 2007).

A ferrugem asiática da soja, recentemente introduzida no Brasil, já causou grandes perdas às lavouras nas safras de 2004/2005 e 2005/2006, quando foi considerada uma epidemia (EMBRAPA SOJA, 2007). É causada

pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi* (Syd & P. Syd.), sendo altamente agressiva em condições ambientais favoráveis, causando rápida desfolha nas plantas e prejudicando a produção de grãos (DEL PONTE *et al.*, 2006). A doença tem causado perdas em vários países, como perdas de 10,0% a 40,0% na Tailândia, 10,0% a 90,0% na Índia, 10,0% a 50,0% no sul da China, 23,0% a 90,0% em Taiwan e 40,0% no Japão (OLIVEIRA *et al.*, 2005; GODOY *et al.*, 2006). Reduções de produtividade próximas a 70,0% podem ser observadas, quando se comparam áreas tratadas e não tratadas com fungicidas. A perda esperada, sob condições ótimas para o desenvolvimento do fungo, é superior a 80,0% (EMBRAPA SOJA, 2005). Sobre esta doença, existem poucos estudos específicos para regiões como as do Estado de Minas Gerais. Assim, é necessário conhecer melhor as condições das diversas regiões do Estado de Minas, favoráveis ou não ao desenvolvimento da ferrugem, bem como a sua variação temporal, o que poderá contribuir para um zoneamento agrícola e a definição das melhores épocas de plantio.

As previsões do IPCC nos levam a pensar sobre o tema mudanças climáticas em escala global, ou seja, concebemos a realidade das alterações como um fenômeno, que atinge todo o planeta terra, embora algumas regiões sejam mais afetadas que outras. Eventos extremos, tais como ocorrência de temperaturas máximas e mínimas, grandes tempestades, inundações, secas, furacões, tornados e nevascas constam das previsões dos estudos do IPCC. Há indícios que alguns desses fenômenos já estão ocorrendo como, por exemplo, as diversas enchentes no Brasil e em outros países da América do Sul, da Ásia, Oceania e Europa. Todos esses fenômenos terão, obviamente, influência direta na produção agrícola, na intensidade de pragas e doenças na agricultura, afetando seriamente a produção e, conseqüentemente, a vida humana em muitos aspectos (CUNHA *et al.*, 2006).

Neste contexto, este trabalho foi conduzido com os seguintes objetivos gerais: (a) Identificar a favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja, para algumas regiões do Estado de Minas Gerais, nas condições climáticas atuais. (b) Avaliar o modelo considerado na identificação da favorabilidade com experimentos de campo. (c) Buscar uma relação entre a temperatura e a umidade relativa médias diárias com as

condições de favorabilidade, utilizando como ferramenta as redes neurais.

(d) Avaliar a tendência do desenvolvimento da ferrugem para as condições climáticas projetadas pelo modelo de circulação geral, HadCM3, para os anos de 2020, 2050 e 2080, para o cenário A2.

# **CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS FAVORÁVEIS AO DESENVOLVIMENTO DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA NO ESTADO DE MINAS GERAIS**

## **1. INTRODUÇÃO**

As doenças em plantas resultam da interatividade entre hospedeiro, patógeno e ambiente, um processo que, em fitopatologia, é conhecido como o clássico triângulo de doenças, o qual estabelece as condições para o desenvolvimento das mesmas. Dentro do ambiente, destacam-se as variáveis climáticas de temperatura, umidade relativa, radiação e chuva. Cada uma dessas variáveis exerce papel importante nas diversas etapas do desenvolvimento da doença. A infecção, a incubação, o crescimento de lesões, a esporulação, a dispersão de esporos e sua sobrevivência, são etapas de uma doença que, com maior ou menor intensidade, são afetadas pelas variáveis climáticas (MAANEN & XU, 2003; SENDELHAS, 2004; VALE *et al.*, 2004; SENDELHAS *et al.*, 2006). A água, na forma líquida, sobre o tecido foliar tem papel importante em vários processos epidemiológicos, afetando principalmente a infecção e a esporulação (HUBER & GILLESPIE, 1992). O ambiente exerce papel fundamental ao interferir, de forma diferenciada, no desenvolvimento do patógeno, do hospedeiro e da doença. Em contrapartida, estas populações também exercem influência sobre o ambiente, especialmente o microclima (BERGAMIN FILHO & AMORIM, 1996).

Esta interdependência é tão eficaz para explicar a ocorrência da doença, que as variações climáticas são utilizadas em sistemas de previsão e manejo de epidemias (GHINI, 2005). Segundo Coakley e Scherm (1996) e Scherm *et al.* (2002), a alteração de uma determinada variável climática pode ter efeitos positivos em uma das partes do triângulo da doença, mas negativo em outras. Além disso, os efeitos podem ser, também, contrários nas diversas fases do ciclo de vida do patógeno.

Marchetti *et al.* (1976) observaram que, com temperaturas na faixa de 20,0 a 25,0°C, eram necessárias 6,0 horas de molhamento foliar, no mínimo, para a ocorrência de infecção; sendo que, com períodos de 10,0 a 12,0 horas de molhamento, a infecção era máxima e não aumentava com a extensão do período de molhamento. Vê-se com esses dados que não é possível ter-se claramente uma faixa ideal ao desenvolvimento da doença. Não existe uma única forma de definir as condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem em todas as regiões, pois elas apresentam distintas condições climáticas. Além do clima, deve-se observar as mais diversas formas de cultivo, como a da entressafra com a utilização de irrigação e a presença de plantas hospedeiras susceptíveis, que são fontes de preservação de inóculo durante o ano todo.

Segundo Vale (1985), de acordo com experimentos realizados em Viçosa-MG, o período mínimo de molhamento, necessário à ocorrência de infecção por *Phakopsora pachyrhizi*, em soja, foi estimado em 6,0 horas, para temperaturas entre 18,0°C a 25,0°C e aumenta para temperaturas superiores e inferiores. Temperaturas que favorecem o crescimento e desenvolvimento da soja favorecem, igualmente, o desenvolvimento da ferrugem. Batchelor *et al.* (1997), no desenvolvimento de um modelo para previsão da ferrugem asiática da soja, com dados de experimento de campo realizado em Taiwan, consideraram faixas diferenciadas para patógeno e hospedeiro. Esses autores consideraram 30,0°C a temperatura ideal para o desenvolvimento do fungo e 22,0°C para o desenvolvimento da soja.

O conhecimento dessas informações permite estabelecer os limites críticos das condições ambientais, a partir dos quais as doenças terão plenas condições para um rápido desenvolvimento, quando, então, o uso de fungicidas passa a ser indispensável (GILLESPIE *et al.*, 1993). Esta é uma importante e promissora contribuição da Agrometeorologia para o setor produtivo, possibilitando otimização da produção, cultivo de alimentos mais saudáveis, racionalização de defensivos agrícolas e menor dano ao meio ambiente. Estudos realizados por diversos pesquisadores, contribuíram significativamente com o desenvolvimento de modelos para estimar a ferrugem asiática. Esses estudos, além de considerarem os componentes ligados ao patógeno, tais com a esporulação, germinação e formação de

lesões, consideraram ainda o estudo dos componentes ligados ao clima, como a temperatura e o orvalho (YANG, 2006).

A temperatura e o período de molhamento foliar são, portanto, fundamentais para o desenvolvimento da ferrugem (VALE *et al.*, 1990; DEL PONTE *et al.*, 2006). A determinação do período de molhamento foliar (PMF) pode ser feita de diversas maneiras, como relatado por Sentelhas (2004), desde medidas diretas por meio de sensores mecânicos ou automáticos, ou por meio de estimativas baseadas em relações empíricas, normalmente com o número de horas em que a umidade relativa está acima de 90,0%, até modelos mais complexos, envolvendo o balanço de energia sobre a cultura (PEDRO JÚNIOR & GILLESPIE, 1982a e b; KIM *et al.*, 2005; KIM *et al.*, 2006), dentre outros. Mesmo com os sensores automáticos, que foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos, a medição do PMF continua sendo muito difícil (MADEIRA *et al.*, 2002).

O processo de formação de orvalho depende, diretamente, da umidade relativa do ar. Lelis (1986) observou a formação de minúsculas gotas de água na superfície das folhas na cultura do café, em experimento realizado em Viçosa-MG, sempre que a umidade relativa (UR) atingia 80,0%.

Diversos modelos têm considerado que o início da condensação na superfície das folhas ocorre quando a umidade relativa é maior ou igual a 90,0%. Dentre os métodos empíricos de estimativa do PMF, o mais comum é o que considera a umidade relativa como referência. Rao *et al.* (1998) observaram que as estimativas do PMF, a partir de métodos mais simples, baseados na umidade relativa, tiveram acurácia tão satisfatória quanto estimativas realizadas com modelos físicos mais complexos. A escolha de um método apropriado, de estimativa do PMF para fins operacionais, depende basicamente da disponibilidade de dados meteorológicos. Sendo os dados de temperatura e a umidade relativa mais facilmente obtidos, justifica-se a escolha de modelos que considera apenas estas variáveis.

Sentelhas (2004), em estudo comparativo do modelo que considera somente a umidade relativa com valores de PMF, medidos por sensores, verificou que o modelo subestimou, em apenas 6,0%, o PMF em relação aos sensores.

Outro método, que tem sido investigado na determinação do período de molhamento foliar, é a depressão do ponto de orvalho. A depressão do ponto de orvalho (DPO) é a diferença entre a temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e a temperatura do ponto de orvalho ( $T_d$ ). A temperatura do ponto de orvalho é a temperatura na qual a saturação ocorreria se o ar fosse resfriado a pressão constante e sem adição ou remoção de vapor d'água. Em outras palavras: é a temperatura na qual a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera estaria em sua máxima concentração (MONTEITH & BUTLER, 1979; VIANELLO & ALVES, 1991). Entretanto, como a superfície das folhas atinge o ponto de orvalho antes do ar que a envolve, devido ao resfriamento intenso, por perda de radiação de ondas longas, principalmente em noite de céu limpo, sem vento e com alta umidade próxima à superfície, a formação de água líquida, em sua superfície, inicia-se com uma diferença maior que 0°C entre as temperaturas do ar e a do ponto de orvalho (LELIS, 1986).

Segundo Sentelhas (2004), a formação da película de água sobre a superfície foliar ocorre também devido à precipitação de orvalho, quando há condensação do vapor proveniente da camada imediatamente superior, adjacente à superfície, enquanto a destilação do orvalho, ocorre devido à condensação do vapor proveniente de uma superfície evaporante, sendo ambas funções do gradiente de pressão de vapor existente. No entanto, a condensação na face inferior é, geralmente, insignificante em comparação com o processo de condensação na face superior das plantas.

Gillespie e Kidd (1984) observaram uma pequena subestimativa para PMF medido por meio de sensores, em comparação com as estimativas obtidas com base no critério do número de horas com a depressão do ponto de orvalho menor que 2,0°C ( $NHDPO < 2,0^\circ\text{C}$ ). Estes resultados são esperados, pois, quanto mais próximo de 2,0°C, menor é a formação do orvalho, principalmente em dias com muita incidência de ventos, quando a formação de orvalho ocorre, somente, com a DPO próxima de zero.

Kim *et al.* (2005), utilizando um modelo cujos dados de entrada são a temperatura, umidade relativa, radiação líquida e velocidade do vento, para a determinação do PMF, na Costa Rica, consideraram que a formação do orvalho ocorria com a  $DPO < 3,7^\circ\text{C}$ . Os resultados encontrados por meio desse método superestimaram o PMF em até 5,1h para a estação úmida,

em relação a medidas com sensores. Sentelhas *et al.* (2004) também considerando a  $DPO < 3,7^{\circ}\text{C}$  na determinação do período de molhamento foliar para o algodoeiro, em Piracicaba-SP, encontraram uma superestimativa de 2,0% em relação a medidas efetuadas por meio de sensores. Sentelhas (2004) comparou, ainda, o modelo de  $NHDPO < 2,0^{\circ}\text{C}$  a sensores de medidas diretas do PMF, com e sem pintura, nas seguintes localidades: Ames, IA, Estados Unidos; Elora, ON, Canadá; Jundiaí e Piracicaba, SP, Brasil. Os sensores foram instalados a diversas alturas e ângulos de inclinações em superfícies gramadas, bem como nas culturas de algodão, café, milho, melão, maçã, tomate e uva. Os resultados, encontrados para os sensores com pintura, correlacionaram melhor com o  $NHDPO < 2,0^{\circ}\text{C}$  do que os sensores sem pintura.

Segundo Chakraborty *et al.* (2000b), a utilização dos dados do período de molhamento foliar, obtidos em locais específicos, bem como outros dados para a pesquisa de doenças de plantas são variáveis, que carecem de discussão mais detalhada.

Neste contexto, este trabalho foi conduzido com os objetivos de Identificação da favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja, para algumas regiões do Estado de Minas Gerais, nos anos de 2005 e 2006; avaliar dois modelos para a identificação das favorabilidades e, a partir do melhor modelo, fazer sua validação por meio de experimentos de campo.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Região de estudo e dados utilizados**

As regiões contempladas no estudo encontram-se no Estado de Minas Gerais e foram definidas em função da disponibilidade de dados das estações meteorológicas e de sua distribuição geográfica. A cultura da soja não se adapta em todo o Estado, devido ao clima e disponibilidade de água. Procurou-se, portanto, traçar um mapa das condições com maior favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem e, conseqüentemente, das mais adequadas ao plantio, considerando-se as condições climáticas adequadas ao desenvolvimento da doença.

Os dados meteorológicos necessários à pesquisa foram obtidos em estações meteorológicas, na Plataforma de Coleta de Dados do CPTEC - INPE. Como os dados disponíveis foram obtidos por meio de medições, realizadas a cada 3 horas e os modelos deste estudo careciam de dados registrados a intervalos mais curtos (de uma em uma hora), foram feitas interpolações lineares daqueles dados já registrados. Os modelos, aqui elaborados, prevêm apenas a utilização da temperatura e da umidade relativa. A relação das estações - objeto da pesquisa, com suas respectivas coordenadas geográficas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estações meteorológicas do Estado de Minas Gerais que fazem parte da pesquisa

Código da estação	Estação	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)
32502	Araçuaí	-42,07	-16,84	519
32324	Araxá	-46,97	-19,64	1024
32508	Caratinga	-42,14	-19,74	899
31929	Honorópolis	-50,00	-19,50	492
32507	Ipatinga	-42,52	-19,47	305
32512	Itajubá	-45,44	-22,41	857
32511	Lavras	-44,97	-21,22	960
32510	Leopoldina	-42,72	-21,47	305
32526	Machado	-45,89	-21,70	899
32503	Montes Claros	-43,89	-16,75	701
32519	Nanuque	-40,32	-17,82	104
32505	Paracatu	-46,88	-17,25	625
31930	Santa Fé de Minas	-45,42	-16,50	650
32509	Viçosa	-42,84	-20,74	686

## 2.2. Desenvolvimento dos modelos

Neste trabalho, modelos específicos são propostos para a identificação da favorabilidade da ferrugem da soja. Levando-se em conta que as variáveis meteorológicas consideradas - a temperatura e a umidade relativa -, têm influência direta sobre a maioria das doenças fúngicas, os modelos propostos, com ligeiras modificações, poderão ser igualmente úteis quando empregados no estudo de outras doenças e várias culturas.

Dentre as possibilidades de desenvolvimento de modelos, a partir de princípios como simplicidade, disponibilidade de dados e precisão dos métodos, optou-se por dois modelos para a determinação do PMF, os quais são descritos a seguir.

No primeiro modelo, considerou-se o início da condensação na superfície das folhas, com a umidade relativa do ar maior ou igual a 90,0%

( $NHUR \geq 90,0\%$ ). No segundo, considerou-se que o PMF tem início, quando a DPO é menor que  $2,0^\circ\text{C}$ , ou

$$T_{ar} - T_d < 2,0^\circ\text{C} \quad (1)$$

em que

$T_{ar}$  = temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ ); e

$T_d$  = temperatura do ponto de orvalho ( $^\circ\text{C}$ ).

Jensen *et al.* (1990) afirmam que a temperatura do ponto de orvalho, quando não medida, pode ser calculada por

$$T_d = \frac{116,91 + 237,3 \ln(e_a)}{16,78 - \ln(e_a)} \quad (2)$$

em que

$e_a$  = pressão parcial de vapor (kPa), estimada por meio da equação

$$e_a = \frac{UR \times e_s}{100} \quad (3)$$

em que

$UR$  = umidade relativa média (%); e

$e_s$  = pressão de saturação de vapor (kPa), estimada pela equação de Tetens (VIANELLO & ALVES, 1991), ou

$$e_s = 0,611 \exp\left(\frac{17,27 T_{ar}}{T_{ar} + 237,3}\right) \quad (4)$$

A estrutura dos modelos, para a identificação das favorabilidades ao desenvolvimento da ferrugem, iniciou-se com as condições das duas propostas. Em prosseguimento, outra variável climática foi considerada: a temperatura. Os modelos foram desenvolvidos considerando o intervalo de  $18,0^\circ\text{C}$  a  $25,0^\circ\text{C}$ , como sendo a faixa ideal para o desenvolvimento do fungo. Esta é a faixa de temperatura mais adequada ao desenvolvimento da ferrugem, em presença de água líquida nas folhas (VALE, 1985).

Satisfeitas essas condições primárias, foram considerados três níveis de favorabilidade: baixa, média e alta. A baixa favorabilidade ocorre nas seguintes condições: período de tempo menor que 6,0 horas favoráveis ao desenvolvimento da doença (HFDD); a média no intervalo de 6,0 HFDD a 12,0 HFDD; a alta favorabilidade foi considerada no período maior ou igual a

12,0 HFDD. Além destas condições, considerou-se ainda, como baixa favorabilidade, quando a  $UR < 90,0\%$ , a  $DPO \geq 2,0^\circ\text{C}$  ou para as temperaturas inferiores a  $15,0^\circ\text{C}$  ou superiores a  $18,0^\circ\text{C}$ . As figuras 1 e 2 apresentam as estruturas dos modelos.

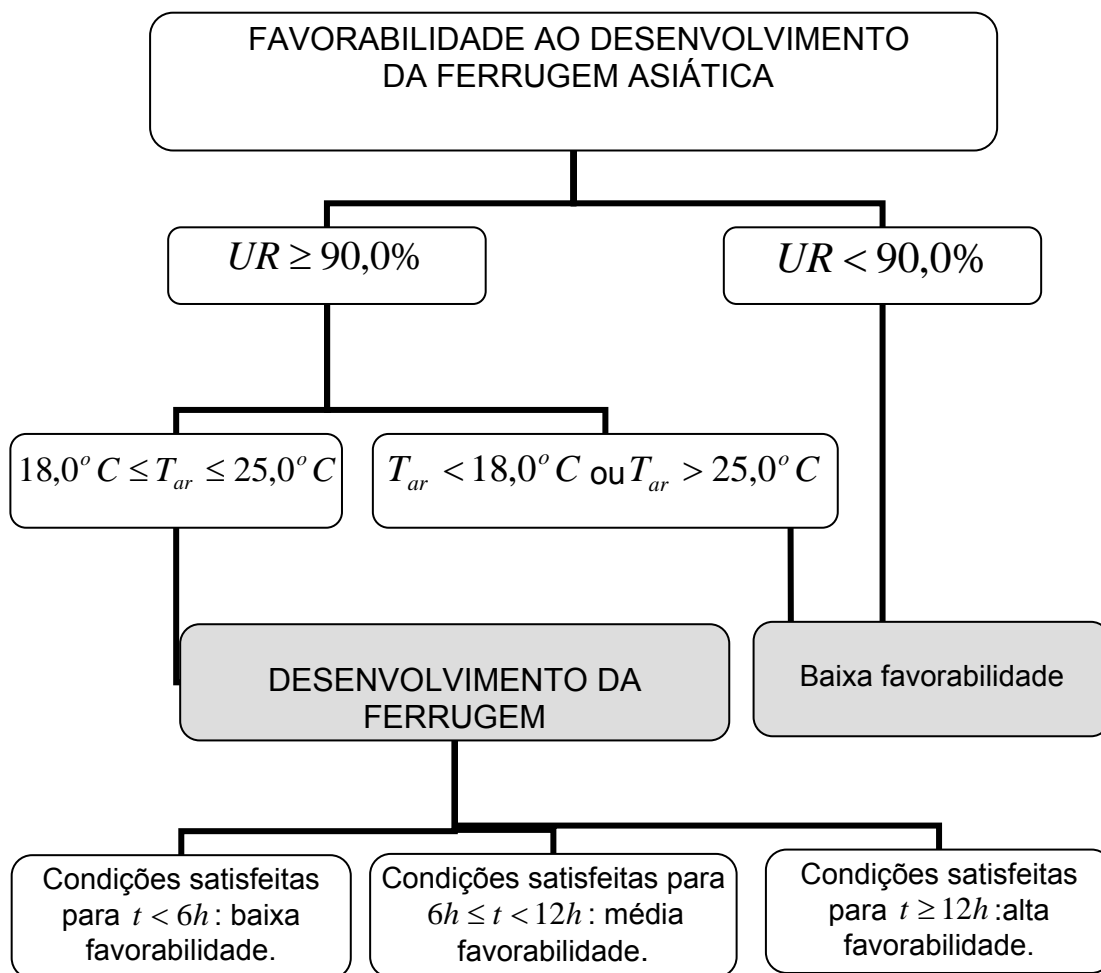


Figura 1 – Modelo para identificação dos períodos de favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja, com  $UR \geq 90,0\%$ .

Para identificar os períodos com as condições propostas nos dois modelos, desenvolveu-se um programa computacional na linguagem Java - JSE. Tal programa registrou a cada hora, se a condição era favorável ou desfavorável à ocorrência da doença, ou seja, a temperatura no intervalo entre  $18,0^\circ\text{C}$  e  $25,0^\circ\text{C}$  concomitantemente com  $UR \geq 90,0\%$  no modelo 1 e  $DPO < 2,0^\circ\text{C}$  no modelo 2. O número de ocorrências foi registrado como número de horas favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD), ao longo de cada dia e como o número de dias favoráveis ao desenvolvimento

da doença (NDFDD), ao longo do mês, que ocorriam quando o NHFDD contínuas eram maiores ou iguais a 6,0.

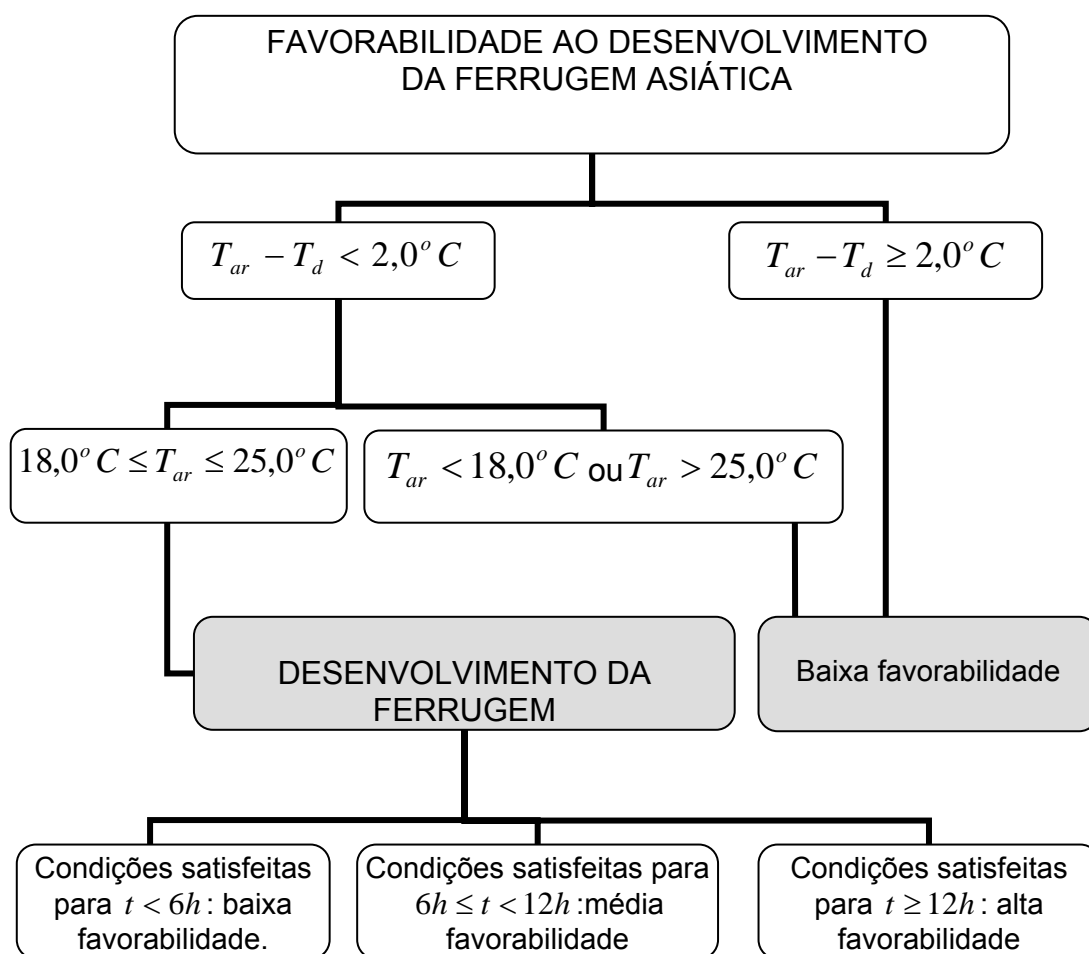


Figura 2 – Modelo para identificação dos períodos de favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja, com a  $DPO < 2,0^{\circ}C$ .

Após a identificação do número de horas favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD), com os dados das 14 estações do estudo, calculou-se o coeficiente de Pearson, comparando os resultados dos dois modelos. Os dados de NHFDD e NDFDD são apresentados em forma de gráficos e mapas. As informações dos gráficos e mapas mostram, nas realidades climáticas atuais, as condições mais propícias ao desenvolvimento da ferrugem.

### 2.3. Validação do modelo

Para análise e validação do modelo escolhido na identificação da favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja, foram realizados dois experimentos de campo, um no município de Uberlândia e o outro no município de Viçosa.

O experimento realizado no Campus da Universidade Federal de Uberlândia-MG ocorreu no ano agrícola de 2005/2006. Foi plantada a variedade “vencedora”, cujo ciclo é de 120 dias. O plantio foi realizado no dia 19 de dezembro de 2005 e a colheita no dia 19 de abril de 2006. Uma inoculação de esporos, à concentração de 10.000/ml foi realizada no dia 30 de janeiro. Não foi feito qualquer tratamento com fungicida na parcela em análise. Durante o experimento, foram feitas avaliações da severidade da ferrugem na cultura.

O experimento de Viçosa foi realizado em área experimental, no Campus da Universidade Federal de Viçosa, no ano de 2006, sendo o plantio realizado no final de julho de 2006 e a colheita no final de novembro do mesmo ano. Foi plantada a variedade “conquista”, cujo ciclo é de 150 dias, aproximadamente. Também neste experimento, a parcela considerada na análise, não recebeu qualquer tipo de aplicação de fungicida. Foram feitas avaliações de severidade ao longo do ciclo da cultura.

Utilizando-se o modelo da  $UR \geq 90,0\%$  e a temperatura na faixa entre 18,0°C e 25,0°C, foi quantificado o número de horas em que as condições eram favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem (NHFDD), durante o ano de 2006, nas localidades de Viçosa, Araxá, Honorópolis e Paracatu. A mesma quantificação foi feita em Uberlândia, nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril, período em que as medições foram realizadas no experimento desenvolvido na UFU. Além do NHFDD, foi quantificado também o número de dias com condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem (NDFDD), nas mesmas localidades e mesmos períodos. A partir desses resultados e das medidas de severidade nos experimentos desenvolvidos em Viçosa e Uberlândia, foram construídos gráficos com o objetivo de analisar a relação entre as observações nos experimentos com a

favorabilidade ao desenvolvimento da doença, identificados por NHFDD e NDFDD.

Foram calculados coeficientes de correlação de Pearson entre a evolução da severidade e o número de dias em condições favoráveis ao desenvolvimento da doença, nos experimentos de Viçosa e de Uberlândia. Neste último, o coeficiente de correlação foi calculado, comparando-se os valores das favorabilidades, identificadas por meio das medidas efetuadas em Uberlândia e a favorabilidade média regional, calculada pelo inverso do quadrado da distância, utilizando-se as ocorrências, observadas nas localidades de Araxá, Honorópolis e Paracatu.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise da favorabilidade

Nos anos de 2005 e 2006, o número de horas com as condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja (NHFDD) foi identificado nas quatorze localidades, com base nos modelos 1 e 2, por meio do programa desenvolvido. Feita uma correlação, pelo coeficiente de Pearson, entre os resultados dos dois modelos, encontrou-se o valor médio de 0,98. A partir dos dados do NHFDD, foi gerado o número de dias favoráveis ao desenvolvimento da doença (NDFDD), classificando-os em dias de baixa, média e alta favorabilidade, em períodos de tempo consecutivos menores que 6,0 HFDD, entre 6,0 e 12,0 HFDD e maiores que 12,0 HFDD, respectivamente. Além destes limites, foram considerados dias de baixa favorabilidade para a  $UR < 90,0\%$ , a  $DPO \geq 2,0^{\circ}\text{C}$  ou para temperaturas inferiores a  $15,0^{\circ}\text{C}$  ou superiores a  $18,0^{\circ}\text{C}$ .

A maior ocorrência de dias com médias e altas favorabilidade se observa no período de outubro a abril. No período de maio a setembro, destacam-se condições de baixa favorabilidade ao desenvolvimento do fungo. A Figura 3 apresenta os dias com baixa, média e alta favorabilidade ao desenvolvimento da doença, identificados por meio do modelo 1, ao longo do ano de 2006, na região de Viçosa.

Posteriormente, considerou-se que os dias com o NHFDD maiores ou iguais a 6,0 apresentavam condições favoráveis ao desenvolvimento do fungo (DFDD), enquanto aqueles com períodos menores que 6,0 HFDD e ainda, aqueles com  $UR < 90,0\%$ ; a  $DPO \geq 2,0^{\circ}\text{C}$  ou para a temperaturas inferiores a  $15^{\circ}\text{C}$  ou superiores a  $18^{\circ}\text{C}$  como dias com as condições desfavoráveis. Ao realizar nova correlação entre os dias favoráveis ao desenvolvimento da doença (NDFDD), entre os dois modelos, os valores dos coeficientes foram novamente elevados, com média superior a 0,99. O comportamento da favorabilidade, na região de Viçosa, em 2005 e 2006 é

apresentado na Figura 4. Observa-se que o período de outubro a abril é mais propício ao desenvolvimento da ferrugem, pois nesses meses o NDFDD é bem elevado. No período de junho a agosto, não ocorreu nenhum dia com média e alta favorabilidade.

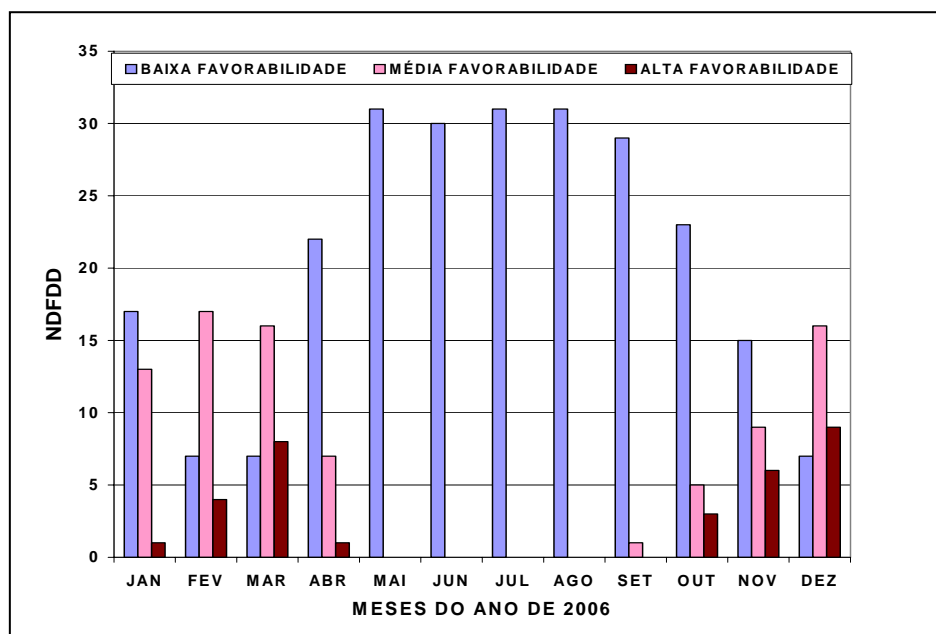


Figura 3 – Número de dias com condições de baixa, média e alta favorabilidade, na região de Viçosa, em 2006, conforme modelo 1.

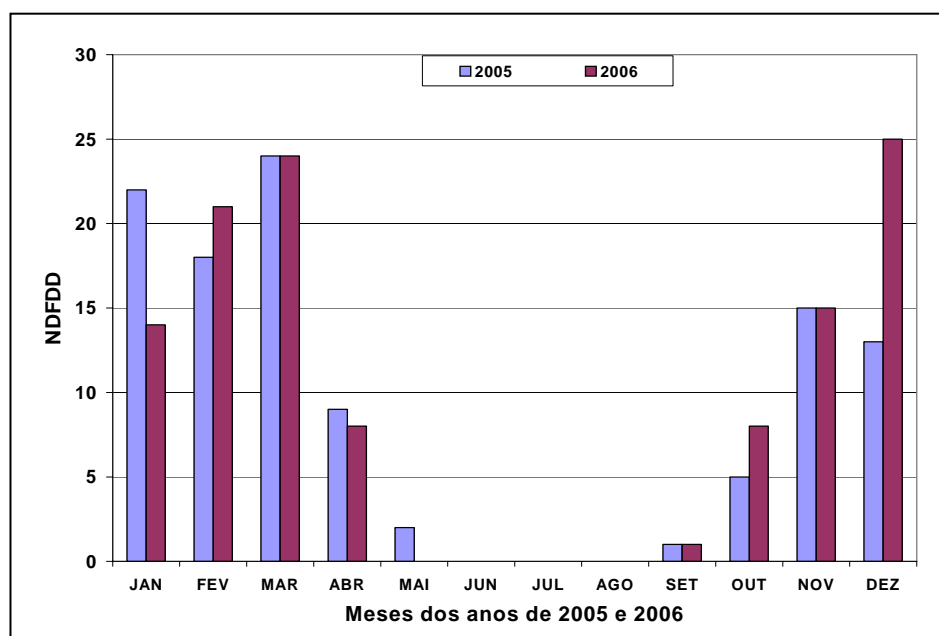


Figura 4 – Soma do NDFDD de média e alta favorabilidade, na região de Viçosa, durante os anos de 2005 e de 2006, conforme modelo 1.

Com a finalidade de identificar as regiões, que apresentam as melhores condições ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja, foi feita uma soma do NDFDD durante todo o ano de 2005 e de 2006, nas quatorze localidades. Percebe-se que o comportamento das condições, nesses dois anos, é bem semelhante (Figura 5). Nesta figura, as regiões dos municípios de Nanuque e Ipatinga destacam-se como as que apresentam maiores valores de DFDD. Por outro lado, aquelas com os menores valores de DFDD são, em ordem crescente, Honorópolis, Itajubá, Araxá e Viçosa.

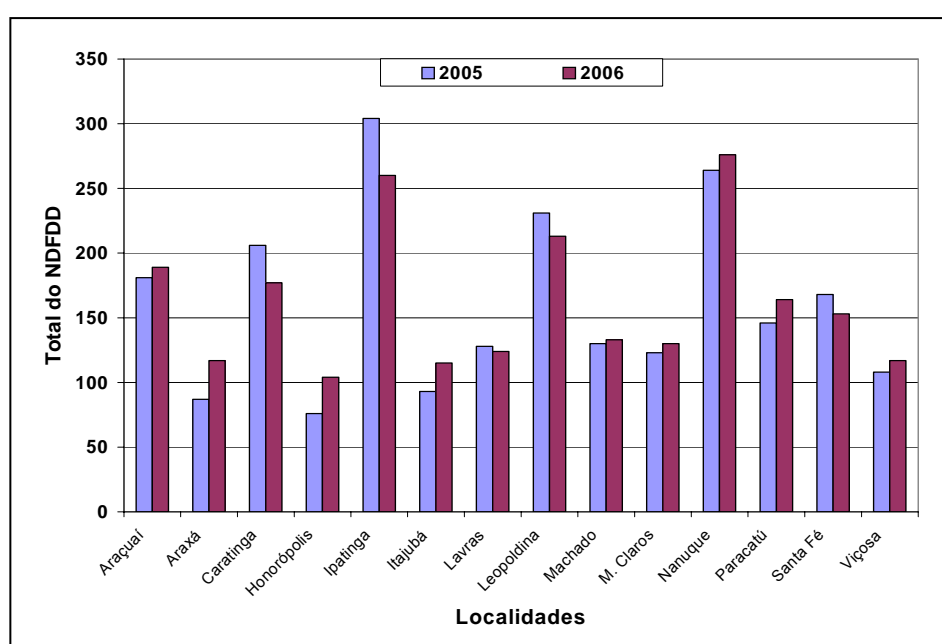


Figura 5 – Total de dias com as condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem, nas localidades em estudo, em 2005 e 2006.

A influência da temperatura sobre a favorabilidade do desenvolvimento da ferrugem é apresentada na Figura 6. Esta Figura ilustra a marcha da temperatura no ano de 2006, na região de Viçosa e de Nanuque, com os respectivos NDFDD. Nos meses mais quentes, tanto em Viçosa como em Nanuque, o NDFDD alcança valores mais elevados, sendo que, em Nanuque, onde a temperatura média mensal é maior, o NDFDD também é maior.

Na Figura 7, observa-se o NDFDD dos meses de julho e novembro em 2005 e 2006, nas quatorze localidades pesquisadas. No mês de novembro, em quase todas as localidades, tanto no ano de 2005 como de

2006, o NDFDD foi superior a 10,0. Isto revela que, neste mês, há grande possibilidade de o desenvolvimento da ferrugem no Estado de Minas Gerais ser favorecido. No mês de julho, destaca-se a localidade de Nanuque que, nos dois anos, apresentou as mesmas condições do mês de novembro. A região de Ipatinga também apresenta boas condições para o desenvolvimento da ferrugem, no mês de julho, mas com favorabilidade bem abaixo daquela de Nanuque. Nas outras localidades, nos dois anos, foram poucos os dias com condições favoráveis ao desenvolvimento da doença.

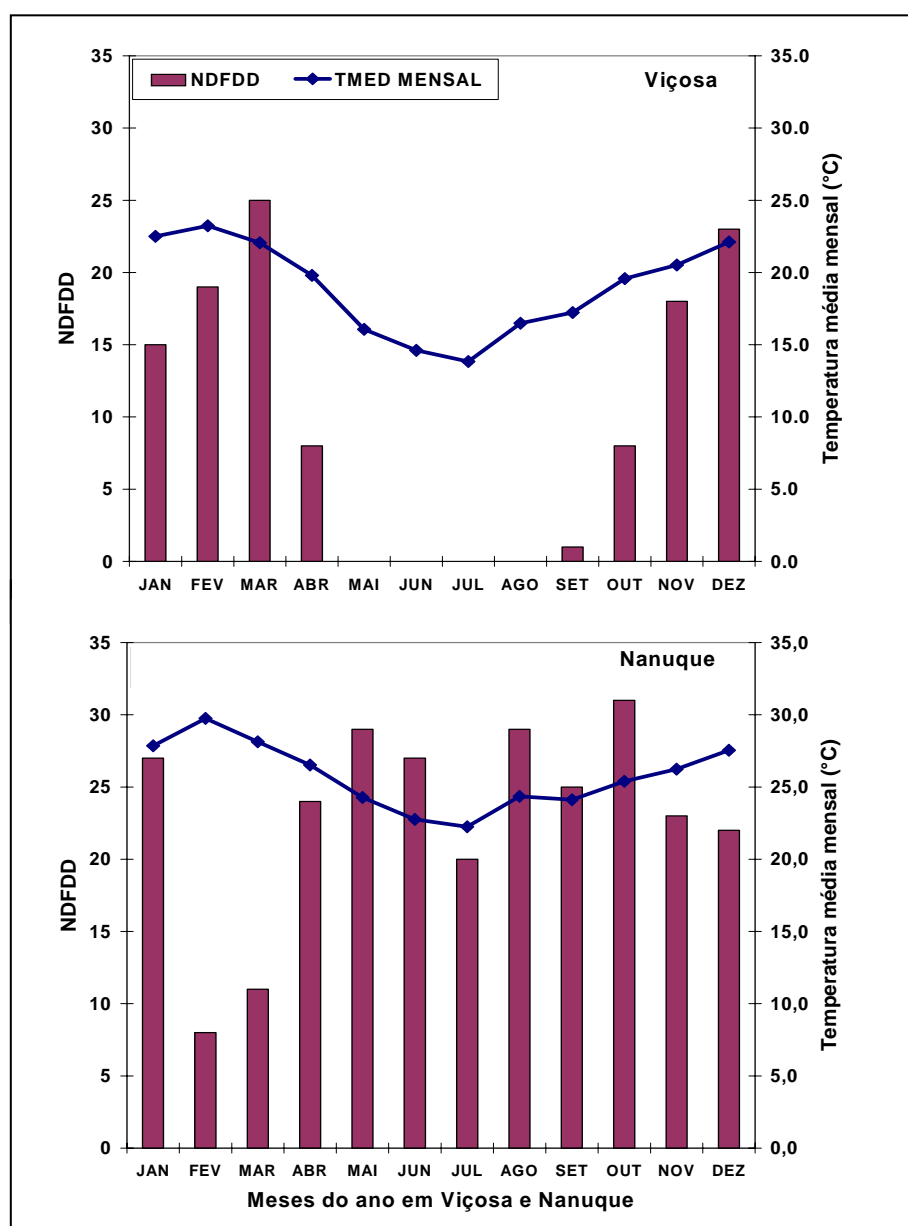


Figura 6 – Número de dias de favorabilidade e temperatura média mensal no ano de 2006, em Viçosa e em Nanuque.

Além das informações obtidas para cada localidade, é necessária uma visão panorâmica do Estado de Minas Gerais, em diferentes épocas do ano. Assim, fez-se uma representação da distribuição geográfica, neste Estado, a partir das estações estudadas, utilizando-se o programa Arcview. Na Figura 8, representa-se a favorabilidade nos meses de janeiro, março, agosto e novembro. No mês de janeiro, o número de dias com as condições favoráveis em todo o Estado é, pelo menos, igual a 4,0. No mês de março, as condições favoráveis são ainda mais elevadas. Na região de Nanuque, ocorreram condições menos favoráveis à ferrugem, mas com NDFDD próximo a 10,0. Nessa região, houve condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem asiática durante todo o ano de 2006, devido às umidades relativas e temperaturas elevadas.

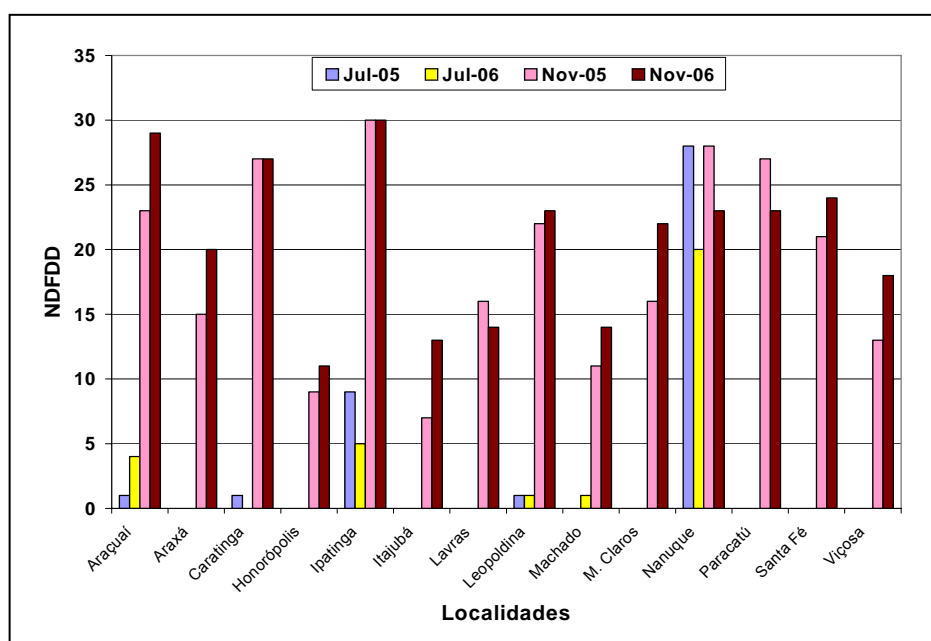


Figura 7 – Número de dias de favorabilidade para o desenvolvimento da doença (NDFDD), nos meses de julho e novembro de 2005 e 2006, nas localidades pesquisadas.

No mês de agosto, muitas regiões do Estado apresentaram as piores condições para o desenvolvimento da ferrugem. Na maioria das localidades, o NDFDD está abaixo de 4,0.

Os resultados mostram que os dois modelos propostos são equivalentes. Na identificação dos dias favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem, evidenciam-se as regiões mais propícias ao desenvolvimento da

doença, com uma visão panorâmica e sazonal. Em Minas Gerais, a safra principal da soja resulta do plantio nos meses de outubro e novembro. Exatamente a partir de outubro, as condições tornam-se mais propícias ao desenvolvimento da ferrugem. Sabe-se que, de acordo com o zoneamento climático, a soja não pode ser cultivada em todo o Estado. De acordo com os resultados apresentados na Figura 8, nos meses de janeiro, março, agosto e novembro respectivamente, observa-se que as regiões, para as quais o cultivo da soja é menos recomendado, são as que apresentam as melhores condições para o desenvolvimento da ferrugem.

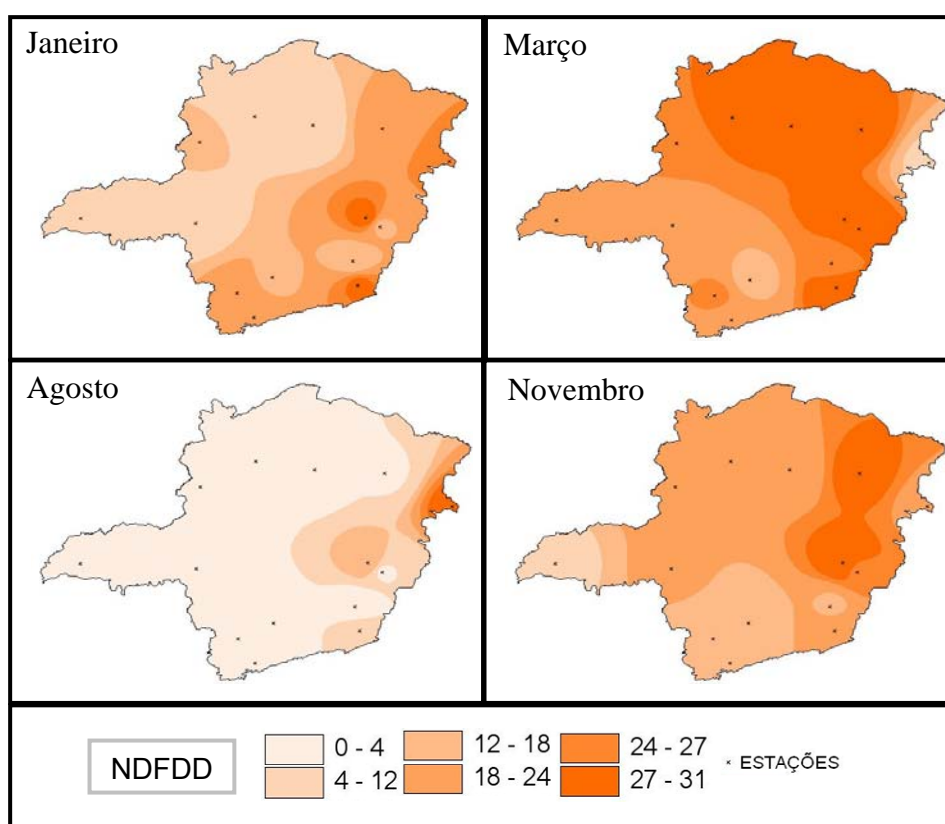


Figura 8 – Número de dias de favorabilidade ao desenvolvimento da doença nos meses de janeiro, março, agosto e novembro de 2006, identificado pelo modelo 1, no Estado de Minas Gerais.

## 3.2. O modelo e os resultados experimentais

### 3.2.1. Experimento conduzido em Uberlândia

A severidade na cultura começa a aparecer no 71º dia após o plantio (DAP), quando foi observado o final da floração, com um índice médio de 9,0%. No 83º DAP, a severidade aumentou para 64,0%, chegando a 79,0% no 91º DAP e 93,0% no 98º DAP (Figura 9).

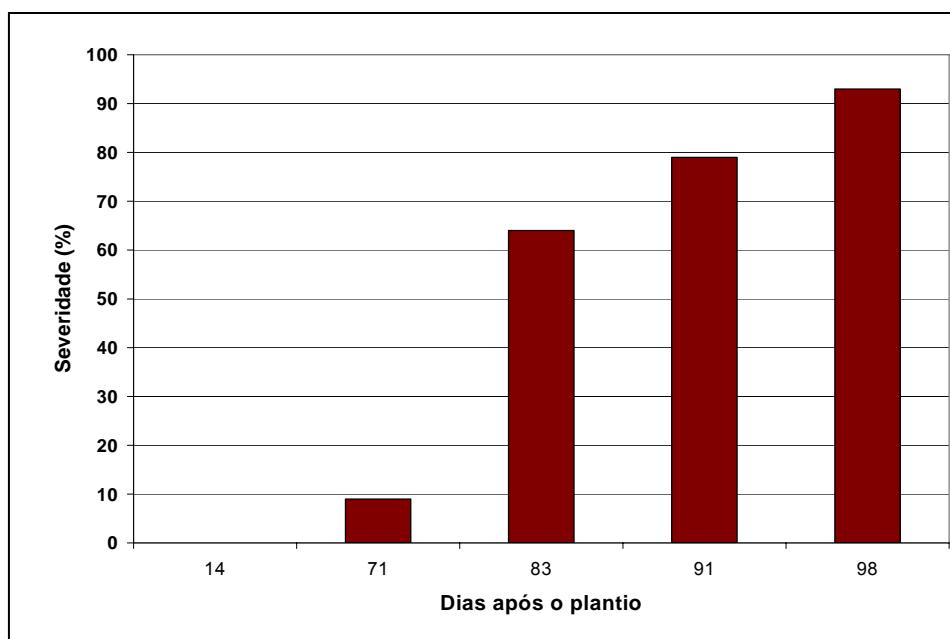


Figura 9 – Severidade na cultura da soja em experimento realizado no Campus da UFU, Uberlândia.

Há uma evolução da severidade da doença com a ocorrência do NHFDD na cultura da soja, no período que estende-se do 14º DAP, até o 106º DAP, quando é caracterizado o fim da severidade. Durante quase todo o período do experimento, o NHFDD esteve acima de 6 horas diárias, sendo que, em alguns dias, chegou a atingir 24,0 horas diárias. São poucos os dias em que as condições não são propícias ao desenvolvimento do fungo, conforme indicam as ocorrências acima da linha tracejada, no gráfico da Figura 10, que sistematiza estas informações.

As medições foram realizadas durante o período de 1º de janeiro a 15 de abril de 2006. Os meses de janeiro, fevereiro e março apresentaram muitos dias com condições favoráveis ao desenvolvimento da doença.

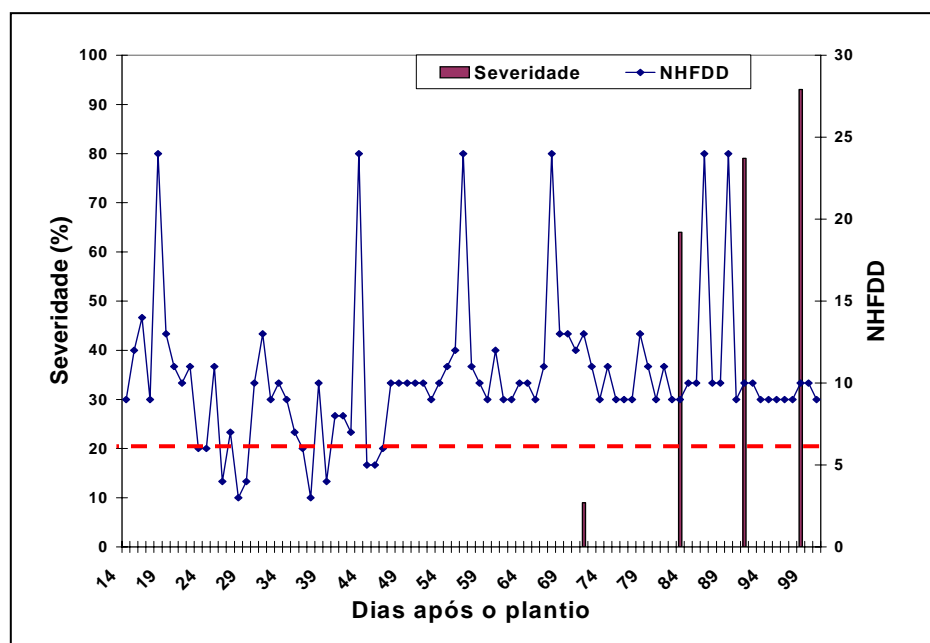


Figura 10 – Severidade e NDFDD para o período entre o 14º DAP e 106º DAP.

A soma dos dias com mais de 6,0 horas com condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem resulta no número de dias com favorabilidade à doença (NDFDD). A evolução da severidade com os NDFDD acumulados, obtidos a partir das medidas de temperatura e umidade relativa no local do experimento, pode ser visualizada na Figura 11. Este gráfico mostra também os NDFDD, calculados pelo método do inverso do quadrado da distância, entre os valores identificados pelos dados meteorológicos das estações de Araxá, Honorópolis e Paracatu. O NDFDD foi contabilizado, a partir do 14º DAP. No 71º DAP, o NDFDD em Uberlândia foi 51,0, enquanto na interpolação das três cidades encontraram-se 32,0 dias favoráveis ao desenvolvimento da doença. Os valores da interpolação foram, sempre, inferiores aos valores encontrados com as medidas do experimento. O total de dias favoráveis, obtido com as medições, foi de 78,0 e o valor interpolado com os resultados das três cidades foi de 54,0.

Os coeficientes de correlação de Pearson entre a severidade e o NDFDD foram calculados com os valores, identificados em Uberlândia e os valores médios da região. Foram encontrados os valores de 0.86 para Uberlândia e 0.89 para a média da região.

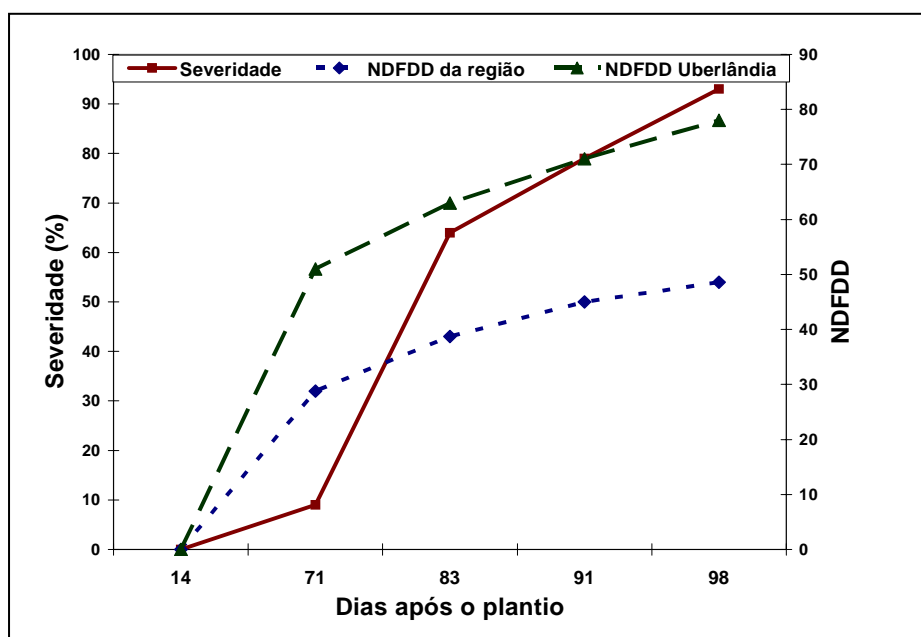


Figura 11 – Severidade da ferrugem asiática e NDFDD em Uberlândia e NDFDD médio da região.

O número de dias acumulados, durante o período experimental, aumentou com o aumento da severidade. O valor médio do NDFDD, cujo cálculo envolveu as localidades de Araxá, Paracatu e Honorópolis, embora menor do que os valores observados em Uberlândia, também mostrou que o aumento no número de dias com as condições favoráveis acompanha bem a evolução da severidade, podendo ser uma forma de estimativa da possibilidade de ocorrência da ferrugem, por interpolação de valores do número de dias com condições favoráveis de outras regiões.

Os meses de janeiro, fevereiro, março e abril apresentaram muitos dias com condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem. Esta ocorrência de favorabilidade no período foi coerente com o desenvolvimento da ferrugem.

### 3.2.2. Experimento conduzido em Viçosa

Na Figura 12, apresenta-se a ocorrência do NDFDD, obtido a partir das medidas de temperatura e umidade relativa na estação meteorológica de Viçosa, localizada próximo ao local do experimento. As medidas foram tomadas a partir do 27º até o 130º dias após a emergência (DAE), quando

foi caracterizado o fim da severidade. A primeira ocorrência de condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem foi observada aos 64° DAE e, posteriormente, a partir do 80° DAE, com um pico de 24,0 HFDD aos 91 DAE. A medição foi realizada durante período de 10 de outubro a 25 de novembro, em que não houve tantas ocorrências de dias com condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem, como ocorre nos meses de dezembro e janeiro.

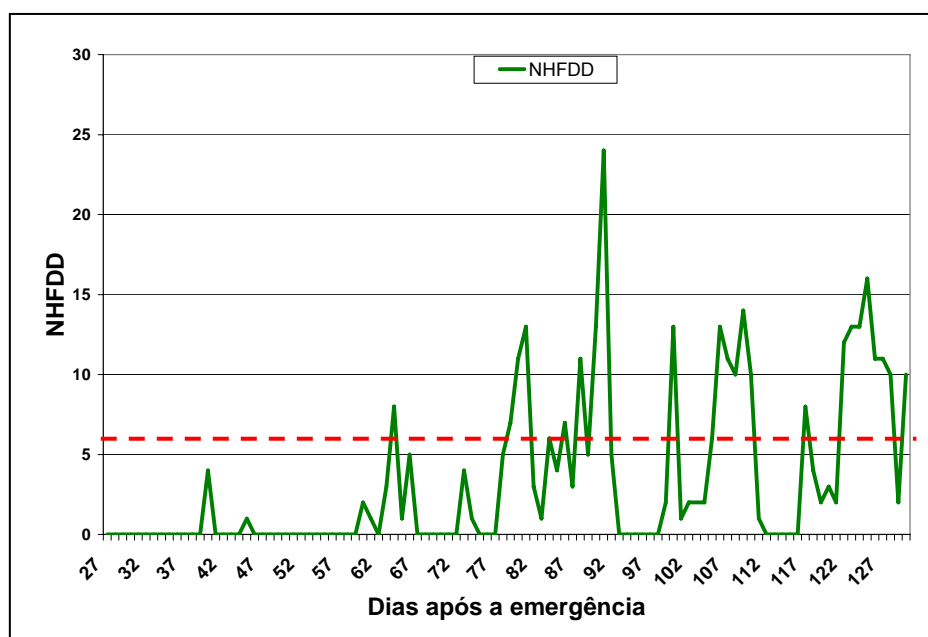


Figura 12 – NHFDD no período do 27° DAE ao 130° DAE, em Viçosa.

Na Figura 13, observa-se a evolução da severidade média da ferrugem na cultura. No 82° DAE, quando foram realizadas as primeiras quantificações de severidade, já havia ocorrido três dias com o número de horas favoráveis superior a 6,0 h, que foram os dias após a emergência iguais a 79, 80 e 81, nesse último, atingindo um NHFDD igual a 13,0. Logo a seguir, apareceram os sintomas da ferrugem, com 3,5% de severidade. A seguir, nos períodos entre os 88° DAE e 91° DAE, no 100° DAE e entre o 106° DAE e 110° DAE, ocorreram NHFDD superiores a 6,0, fazendo com que a severidade aumentasse em grandes proporções, ultrapassando 42,0% no 112° DAE e chegando a uma severidade final de 96,0%.

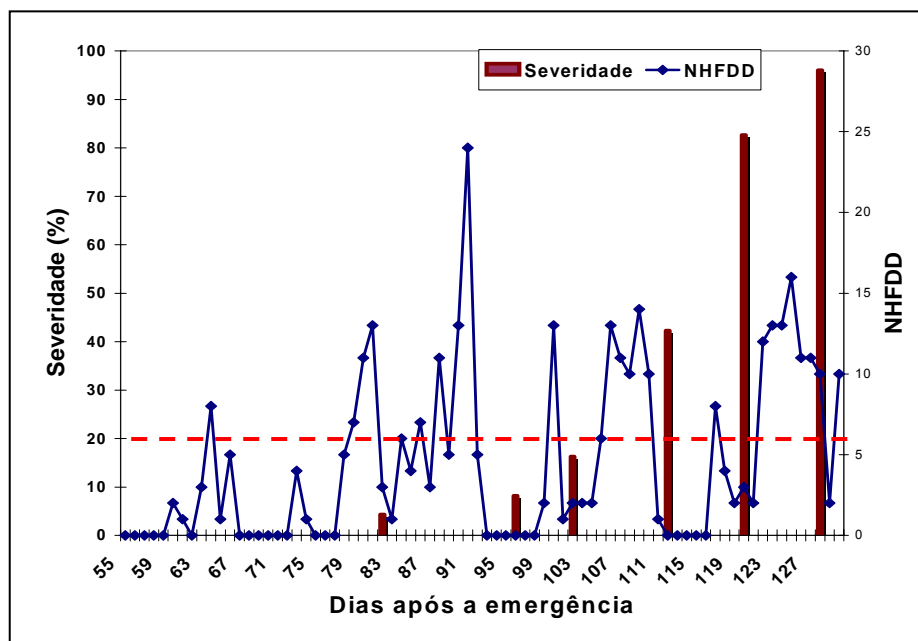


Figura 13 – Severidade da ferrugem asiática e NDFDD, durante o experimento em Viçosa.

A soma dos dias com mais de 6,0 horas, sob condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem, resulta no número de dias com as condições favoráveis (NDFDD). Na Figura 14, pode-se observar a evolução da severidade com o NDFDD acumulado. O NDFDD foi contabilizado desde o 74º dia após a emergência até o final do ciclo da cultura no 130º DAE. Nesse dia, o NDFDD acumulados foi 20,0, um valor bem abaixo ao obtido em Uberlândia, que totalizou 78,0 dias no ciclo da cultura, durante o período de janeiro a início de abril.

A Figura 14 permite, ainda, o levantamento de uma informação muito importante, referente à taxa de desenvolvimento da doença. Esta foi de 0,6% dia<sup>-1</sup>, no intervalo do 74º DAE ao 102º DAE, quando já ocorrera 8,0 dias de favorabilidade. Esta taxa subiu para 3,7% dia<sup>-1</sup>, durante o período de 102 DAE a 120 DAE, quando havia 20 dias de favorabilidade acumulados, desde o início do experimento.

Calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson entre a severidade e o NDFDD, sendo encontrado o valor de 0,92.

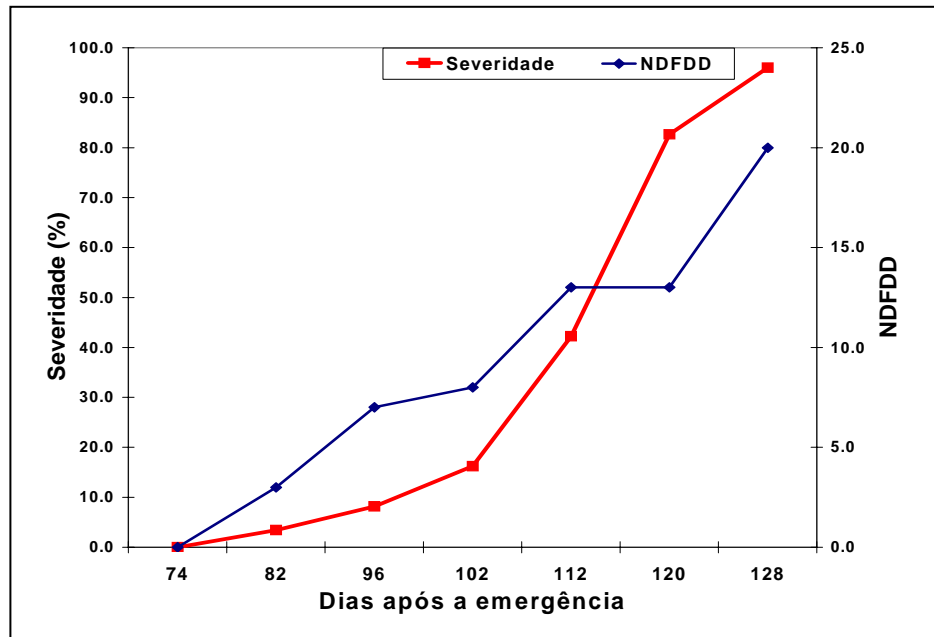


Figura 14 – Severidade da ferrugem asiática na cultura da soja e NDFDD acumulados, no ano de 2006 em Viçosa.

## **CAPÍTULO 2 – UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES FAVORÁVEIS AO DESENVOLVIMENTO DA FERRUGEM ASIÁTICA**

### **1. INTRODUÇÃO**

Em 2004, a produção de soja no Brasil atingiu 50 milhões de toneladas, valor correspondente a 25,0% da safra mundial. Este índice coloca o Brasil como o segundo maior produtor mundial, ficando abaixo apenas dos Estados Unidos que são primeiros. No ano de 2005, a produção chegou a 52 milhões de toneladas, o que representou 27,0% da safra mundial. No país, o principal Estado produtor é o Mato Grosso, em seguida, o Paraná. O crescimento da produção, bem como de seu custo vêm sendo afetados desde o ano de 2001, com o aparecimento da ferrugem asiática da soja (EMPRAPA SOJA, 2005). A produtividade média da soja nas últimas décadas tem aumentado, mas ela ainda está bem abaixo do potencial produtivo, que é de 3600 kg.ha<sup>-1</sup>. Dentre os fatores que limitam, atualmente, melhores rendimentos no Brasil, destacam-se as doenças incidentes na cultura, principalmente a ferrugem asiática (REIS, 2005).

Dentre os fatores climáticos que mais influenciam o desenvolvimento da ferrugem, destacam-se a temperatura e o período de molhamento foliar (PMF) (VALE *et al.*, 1990). A água, na forma líquida, sobre o tecido foliar tem papel importante em vários processos epidemiológicos, afetando, principalmente, a infecção e a esporulação (HUBER & GILLESPIE, 1992). A dependência do desenvolvimento da ferrugem em relação aos fatores climáticos é tão estreita para explicar a ocorrência da doença, que variáveis climáticas como umidade relativa, temperatura e período de molhamento foliar são utilizados em sistemas de previsão e manejo de epidemias (GHINI, 2005).

O momento da aplicação de fungicida tem sido definido com base nas informações que estabelecem os limites críticos das condições ambientais, a

partir dos quais as doenças terão plenas condições para um rápido desenvolvimento (GILLESPIE *et al.*, 1993).

Na década de 1990, desenvolveu-se o primeiro modelo computacional para a simulação da ferrugem asiática da soja, o SOYRUST. Este modelo, que simula o desenvolvimento da doença em função da temperatura e do molhamento foliar, foi validado com experimentos de campo, demonstrando resultados satisfatórios de simulação do progresso da doença em diferentes épocas de plantio (YANG, 2006).

O programa SOYRUST foi integrado ao modelo SOYGRO, desenvolvido na Universidade da Flórida, para avaliar o progresso da doença e época de plantio da soja e as possíveis perdas nos Estados Unidos. Nesta simulação considerou que os esporos do fungo estavam disponíveis e as simulações mostraram grandes perdas, principalmente no Sul e no Leste dos Estados Unidos. Os resultados sugeriram que no verão com altas temperaturas, havia um retardamento da doença, enquanto que verão com temperaturas mais baixas, favoreciam seu desenvolvimento (PIVONIA & YANG, 2005).

Com objetivo de se fazer uma previsão das condições de desenvolvimento do fungo causador da ferrugem asiática da soja em diferentes regiões geográficas no mundo, Pivonia e Yang (2004) utilizaram o software CLIMEX, em conjunto com técnicas desenvolvidas por eles, para prever as possibilidades de sobrevivência do *Phakopsora pachyrhizi*. O modelo adotou as médias normais mensais para calcular o acúmulo de estresses impostos pela temperatura e déficit de umidade para o desenvolvimento de patógeno. Estresses de temperatura foram calculados usando o CLIMEX para prever regimes em que a temperatura restringe a sobrevivência do fungo ao longo do ano. O estudo possibilitou a determinação das regiões onde o inóculo não sobreviveria na entressafra e dependeria de fontes em locais distantes.

O programa SOYRUST evidencia a necessidade de se considerar o molhamento foliar, nas simulações de desenvolvimento da ferrugem da soja. Muitos modelos têm determinado o período de molhamento considerando que o início da condensação na superfície das folhas ocorre, quando a umidade relativa é maior ou igual a 90,0%, sendo, este o método empírico

mais comum para estimativa deste período. Estimativas do PMF, realizadas por meio de métodos mais simples, baseados na umidade relativa, têm uma acurácia tão satisfatória quanto às estimativas baseadas em modelos físicos mais complexos (PEDRO JUNIOR & GILLESPIE, 1982 a e b; RAO *et al.*, 1998; SENTELHAS, 2004; KIM *et al.*, 2005; SENTELHAS *et al.*, 2006).

A busca por novas alternativas, para se trabalhar com dados meteorológicos, tem levado alguns pesquisadores a lançarem mão de novas ferramentas. A utilização de inteligência artificial (IA) nas diversas áreas da pesquisa vem aumentando gradativamente. Dentre os ramos da IA, as redes neurais artificiais têm se destacado na procura de relações, que facilitem o entendimento do complexo sistema biológico. Particularmente na área de tratamentos de dados meteorológicos e, especificamente, em doenças de plantas são poucos os trabalhos desenvolvidos até o momento. As pesquisas com redes neurais artificiais (RNAs), utilizando dados meteorológicos, são relativamente novas. Dentre elas, encontram-se: a previsão da evapotranspiração de referência, utilizando dados de temperatura, radiação e umidade relativa (SILVA *et al.*, 2006); a produtividade em solos (BUCENE & RODRIGUES, 2004); a previsão de geadas (OVANDO *et al.*, 2005); e a determinação indireta da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), em várias localidades da Espanha, Estados Unidos e Suécia (LOPEZ *et al.*, 2001).

Quanto a estudos específicos sobre doenças, nos quais se utilizam redes neurais, sabe-se que alguns pesquisadores têm desenvolvido sistemas de determinação do período de molhamento foliar, utilizando-se diferentes parâmetros meteorológicos. Mathias *et al.* (2005) realizaram criteriosa investigação sobre um modelo para determinar o PMF na cultura do trigo, no Estado do Paraná, durante a safra de 2003. Nesse trabalho, os pesquisadores utilizaram 11 atributos, como variáveis de entrada: a) duração do período de molhamento foliar observado; b) pressão atmosférica do ar; c) umidade relativa média do ar; d) umidade relativa mínima; e) umidade relativa máxima; f) temperatura média do ar; g) temperatura mínima do ar; h) temperatura máxima do ar; i) velocidade média do vento; j) velocidade mínima do vento; e k) velocidade máxima do vento. Fizeram-se diversas combinações de parâmetros e de redes, bem como vários tipos de

treinamento. De acordo com os resultados, os autores concluíram que 5 variáveis climáticas tiveram mais influência na determinação da duração do molhamento foliar. São elas: umidade relativa média, umidade relativa máxima, temperatura média do ar, temperatura mínima do ar e velocidade média do vento.

Francl e Panigrahi (1997) desenvolveram um modelo para a determinação do período de molhamento foliar na cultura do trigo, em Dakota do Norte (USA), a partir de dados de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar e precipitação, empregando-se redes neurais. Como dados de entrada, foram ainda incluídas as medidas diretas do período de molhamento foliar por sensores, em diversas posições no dossel, mostrando melhores resultados, quando os sensores foram instalados acima do dossel da cultura. Estudos referentes às doenças em plantas, empregando as RNAs e dados meteorológicos, foram também conduzidos por Ferranti *et al.* (2005). Os autores desenvolveram um modelo de determinação da umidade relativa do ar, visando à prevenção da ferrugem asiática da soja.

Com dados da doença “vassoura de bruxa” do cacauzeiro, coletados em Altamira, no Pará, durante o período de janeiro de 1986 a dezembro de 1987, Pozza (1998) fez um estudo comparativo entre um sistema desenvolvido com redes neurais artificiais e análise de regressão. Estudaram-se a produção de basidiocarpos, a intensidade da doença e 16 variáveis climáticas, com o objetivo de descrever a epidemia da doença. Os resultados de previsão com as redes neurais foram melhores que aquelas das regressões. A melhor rede, dentre as 100 testadas, foi a que empregou 11 variáveis climáticas, na nona semana anterior à ocorrência da doença.

A ferrugem do cafeeiro foi, cuidadosamente, analisada por Pinto (2001) e Pinto *et al.* (2002), por meio de redes neuronais. As redes foram elaboradas com dados de incidência da ferrugem coletados em Lavras - MG, durante o período de 13/02/98 a 20/04/01. Nesse estudo, séries temporais de incidência da doença também foram utilizadas na elaboração das redes. Além das redes, também foram realizadas análises de regressão, as quais foram comparadas aos resultados gerados pelas redes e aos observados. Os dados de entrada na elaboração das redes e as análises de regressão

foram: os números de dias com e sem precipitação pluvial; umidade relativa média do ar; horas de insolação; temperaturas máxima, média e mínima; lâmina de água de irrigação; e produção. Testaram-se 59 redes e 26 modelos de regressão. As redes neuronais que forneceram os melhores resultados foram as que incluíram as variáveis temperatura mínima, umidade relativa do ar, produção e insolação, cujos dados foram coletados 30 dias antes da data de avaliação. As redes neuronais elaboradas, a partir de séries temporais, também foram adequadas para descrição da epidemia e têm grande possibilidade de emprego na descrição de outras epidemias.

O atrativo principal na solução de problemas através das redes neurais artificiais está na capacidade destas redes em aprenderem através de exemplos e de generalizarem as informações aprendidas. O potencial das RNAs vai muito além do que, simplesmente, mapear relações de entrada e saída, o que está associado à capacidade que elas têm de aprender através de um conjunto reduzido de exemplos e, posteriormente, dar respostas coerentes para dados desconhecidos (BRAGA *et al.*, 2000). A utilização de uma RNA na solução de uma tarefa passa, antes de tudo, por uma fase de aprendizagem, quando a rede extrai informações relevantes de padrões de informação, a ela apresentados, criando, assim, uma representação própria do problema (HAYKIN, 2001).

As redes neurais são modelos computacionais, inspirados na estrutura e funcionamento do cérebro humano e caracterizam-se pela reunião de uma grande quantidade de células (elementos ou unidades) de processamento, interligadas por um grande número de conexões, que processam, paralelamente, a informação. Seu funcionamento é semelhante a alguns procedimentos humanos, ou seja, aprendem pela experiência, generalizam exemplos através de outros e abstraem características. O neurônio que é a unidade básica do cérebro, isoladamente, pode ser considerado análogo a uma unidade de processamento, que aceita e combina estímulos de vários outros neurônios (muitas entradas), porém possui somente uma saída (BRAGA *et al.*, 2000; TATIBANA & KAETSU, 2007).

O primeiro modelo de neurônio artificial foi apresentado em 1943, aproximadamente, por McCulloch e Pitts (MCP). Esse modelo era,

simultaneamente, simples e eficiente. O modelo de neurônio artificial, proposto, é uma simplificação do neurônio biológico. Sua descrição matemática resultou um modelo com  $n$  terminais de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , e apenas um terminal de saída  $y$ . Os terminais de entrada do neurônio têm pesos acoplados  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , cujos valores podem ser positivos ou negativos. Os pesos determinam “em que grau” o neurônio deve considerar sinais de disparo que ocorrem naquela conexão. No neurônio biológico, o disparo ocorre quando a soma dos impulsos, que ele recebe, ultrapassa o limiar de excitação. Por outro lado, o corpo do neurônio é emulado por um mecanismo simples, que faz a soma dos valores  $x_i w_i$ , recebidos por ele (soma ponderada) e decide se o neurônio deve ou não disparar (saída 1 ou 0), comparando a soma ao limiar do neurônio. No modelo de MCP, a função de ativação é obtida pela função de limiar, descrita na Equação 1 (BRAGA *et al.*, 2000):

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i \geq \Theta \quad (1)$$

em que

$n$  = número de entradas do neurônio;

$x_i$  = entrada dos neurônios;

$w_i$  = peso associado à entrada  $x_i$ ; e

$\Theta$  = limiar do neurônio.

A Figura 1 apresenta o modelo do neurônio de McCulloch e Pitts, adaptado de BRAGA *et al.* (2000).

A partir do modelo de MCP, foram derivados vários modelos que permitem a geração de uma saída qualquer, não sendo necessariamente zero ou um e com diferentes funções de ativação, tais como a função linear, função rampa, função degrau e função sigmoideal.

As redes são organizadas de acordo com o número de camadas que compõem sua estrutura, que é caracterizada por um arranjo de elementos de processamento. Assim, existem tanto as redes neurais de camadas simples, constituídas por um grupo de neurônios arranjados em apenas uma camada, quanto as redes multicamadas, formadas pela combinação de várias redes de camada simples (BRAGA *et al.*, 2000; HAYKIN, 2001).

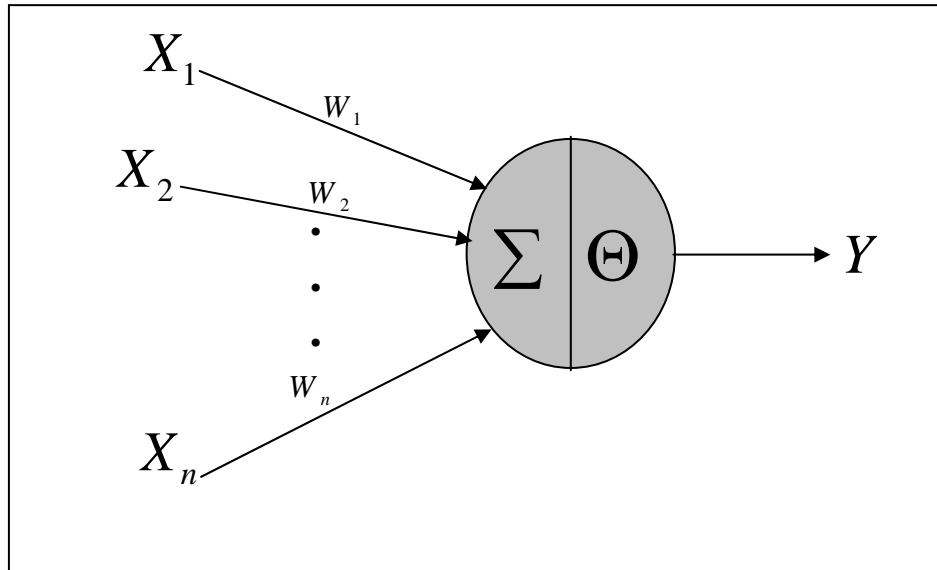


Figura 1 – Modelo do neurônio de McCulloch e Pitts (MCP), adaptado de Braga *et al.* (2000).

Na Figura 2, a RNA pode ser descrita como uma rede de três camadas totalmente conectadas, perfazendo  $[(3 \times 3) + (3 \times 1) = 12]$  conexões e contendo: uma camada de entrada com três elementos de processamento; uma camada oculta, também com três elementos de processamento; e uma camada de saída, com 1 elemento de processamento. Resumindo, as RNAs podem ser categorizadas, conforme sua topologia, isto é, pelo número de camadas, de elementos de processamento e de conexões, pelas características de seus elementos de processamento, e pelas leis de aprendizagem a que foram submetidas.

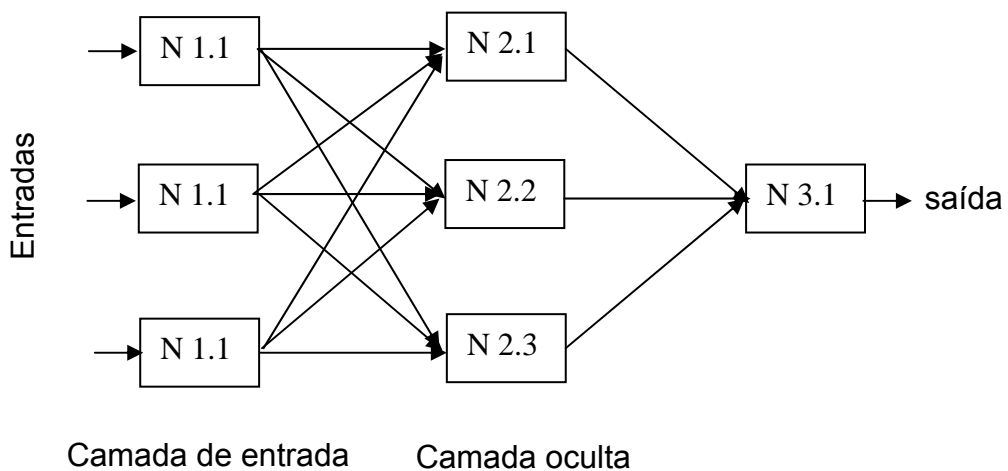


Figura 2 – Estrutura de uma RNA do tipo multicamada, adaptada de Haykin (2001).

Uma RNA pode ser classificada de acordo com a forma de aprendizagem, que pode ser supervisionada, não supervisionada e semi-supervisionada. No aprendizado supervisionado são, sucessivamente, apresentados à rede conjuntos de padrões de entrada e seus correspondentes padrões de saída. Durante este processo, a rede realiza um ajustamento dos pesos das conexões entre os elementos de processamento, segundo uma determinada lei de aprendizagem, até que o erro entre os padrões de saída, gerados pela rede, alcance um valor mínimo desejado. Por exemplo, a retropropagação é uma, dentre as dezenas de leis de aprendizagem supervisionada. Durante o treinamento com o algoritmo retropropagação, a rede opera em uma seqüência de dois passos. Primeiro, um padrão é apresentado à camada de entrada da rede. A atividade resultante flui através da rede, camada por camada, até que a resposta seja produzida pela camada de saída. No segundo passo, a saída obtida é comparada à saída desejada para esse padrão particular. Se esta não estiver correta, o erro é calculado. O erro é propagado a partir da camada de saída até a camada de entrada, sendo que os pesos das conexões das unidades das camadas internas vão sendo modificados, conforme o erro é retropropagado. Um outro tipo de aprendizagem similar à supervisionada é a aprendizagem por reforço. Nesta aprendizagem, ao invés de fornecer as saídas corretas para a rede, relativas a cada treinamento individual, a rede recebe somente um valor, que informa se a saída está correta ou não. No aprendizado não supervisionado, a rede “analisa” os conjuntos de dados que lhe são apresentados, determina algumas propriedades do conjunto de dados e “aprende” a refletir essas propriedades na sua saída. A rede utiliza padrões, regularidades e correlações para agrupar os conjuntos de dados em classes. As propriedades que a rede vai “aprender” sobre os dados podem variar em função do tipo de arquitetura utilizada e da lei de aprendizagem (BRAGA *et al.*, 2000; HAYKIN, 2001).

Com o auxílio das redes neurais, identificar-se-á o número de horas diárias com  $UR \geq 90,0\%$  e com temperaturas maiores que  $18,0^{\circ}\text{C}$  e menores que  $25,0^{\circ}\text{C}$ , que são as condições favoráveis para o fungo se desenvolver. Nesse expediente, serão utilizados dados de temperatura e umidade relativa de 14 estações meteorológicas, localizadas no Estado de Minas Gerais.

Ainda, com a utilização das redes neuronais, objetiva-se também, neste trabalho, estabelecer uma relação entre a temperatura, a umidade relativa média diária e as condições de favorabilidade. Este objetivo atende à necessidade de se prever, com antecedência, a ocorrência das condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem**

A favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja foi definida, de acordo com as seguintes condições: Umidade relativa horária  $\geq 90,0\%$ , concomitantemente à temperatura do ar entre  $18,0^{\circ}\text{C}$  e  $25,0^{\circ}\text{C}$ .

Os dados meteorológicos foram obtidos em 14 estações meteorológicas, na Plataforma de Coleta de Dados do CPTEC - INPE, no Estado de Minas Gerais. As estações estão localizadas nos seguintes municípios: Araçuaí, Araxá, Caratinga, Honorópolis, Ipatinga, Itajubá, Lavras, Leopoldina, Machado, Montes Claros, Nanuque, Paracatu, Santa Fé de Minas e Viçosa. Além dos dados provenientes dessas estações, utilizaram-se dados de temperatura e umidade relativa, medidas durante o período de janeiro a abril de 2006, num experimento de campo na cidade de Uberlândia-MG.

As condições de favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja foram identificadas nas 14 regiões, no ano de 2006, por meio de um programa computacional, desenvolvido na linguagem JAVA. A favorabilidade foi definida, conforme o número de horas diárias com condições favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD) e conforme o número de dias com condições favoráveis ao desenvolvimento da doença (NDFDD). Foi considerada a ocorrência de favorabilidade, quando o NHFDD contínuas era maior ou igual a 6,0.

### **2.2. Relação entre NHFDD e a temperatura e umidade relativa média diária**

A partir dos dados meteorológicos, foram calculadas as temperaturas e as umidades relativas médias diárias nas 14 estações. Foram elaboradas

tabelas com essas temperaturas e umidades relativas, com os NHFDD, para todos os dias do ano de 2006, em todas as localidades estudadas. Esses dados foram processados nos programas de RNAs, disponíveis no Toolbox de Redes Neurais do MATLAB, versão 2007, que utilizam o método de propagação retroativa do erro com minimização do erro quadrático médio. Os pesos sinápticos foram gerados, aleatoriamente, sendo a função de ativação, a sigmoideal.

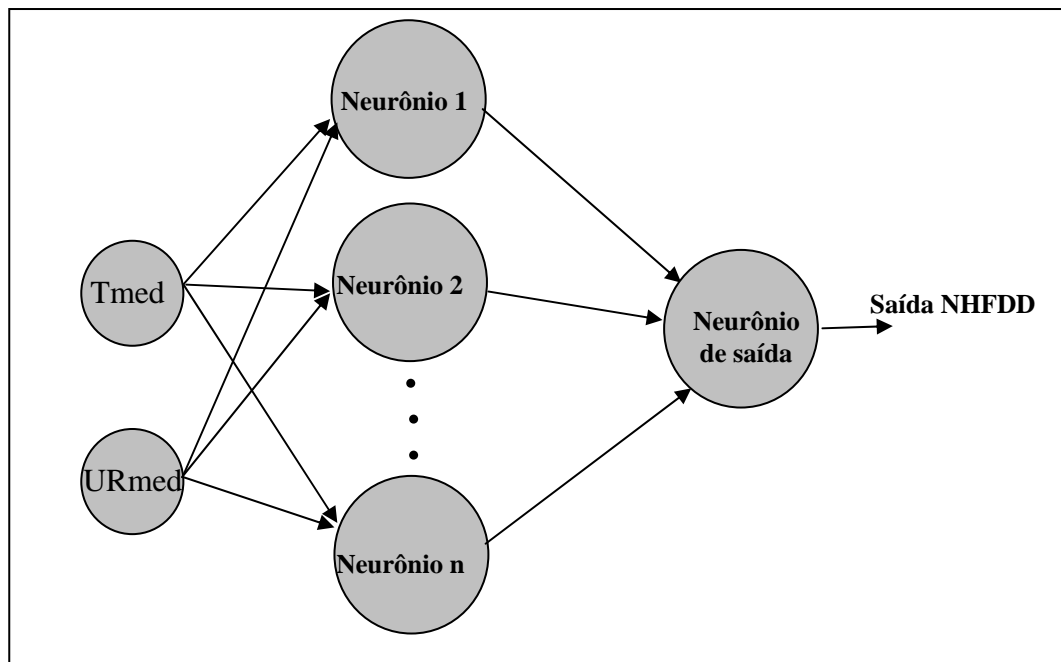


Figura 3 – Modelo da rede neural treinada, com número variável de neurônios.

A estrutura da rede neural, utilizada no processamento, é representada na Figura 3, sendo uma rede com três camadas e número variável de neurônios. Foram testados diversos números de neurônios, na procura daquele que melhor representasse os dados disponíveis e que tivesse o menor erro de previsão. Após diversas tentativas, optou-se por fazer a busca de relações com 5, 10 e 15 neurônios. Os treinamentos foram feitos entre NHFDD com temperatura média diária, com umidade relativa média diária, separadamente e o NHFDD com a temperatura e umidade relativa simultaneamente. Foram gerados gráficos bidimensionais nas relações de temperatura com o NHFDD e umidade relativa com o NHFDD e

gráficos tridimensionais, com o NHFDD em função das temperaturas e umidades relativas, nos treinamentos com os três níveis de neurônios.

Nos testes das redes, com o objetivo de verificar qual o número de neurônios apresentou melhor resposta e qual a variável climatológica, temperatura ou umidade relativa correlacionou melhor, foram calculados a raiz quadrada do erro médio (RSME) e o número de Willmott. O número de Willmott, também conhecido como índice  $d$  de concordância de Willmott, determina a exatidão do método e indica o grau de afastamento dos valores estimados e dos valores observados. Este índice varia de zero, quando não há nenhuma concordância, a 1 quando há uma concordância perfeita. Os dados de temperatura e umidade relativa, utilizados no teste das redes, foram obtidos por meio das medições realizadas em Uberlândia, que não entraram nos treinamentos das redes neurais.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas figuras 4, 5 e 6 são apresentados os gráficos, gerados pelas redes treinadas com 5, 10 e 15 neurônios, respectivamente, com o número de horas em condições favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD) em função da temperatura média diária. Os três gráficos têm comportamentos semelhantes, em relação ao NHFDD, aumentando com a temperatura. No gráfico com 5 neurônios, o NHFDD fica constante a partir de certa temperatura, enquanto, nos outros dois, ele diminui a partir de certo valor de temperatura, atingindo os pontos de máximos nas temperaturas, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores máximos de temperatura média diária e do número de horas favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD), nas RNAs com 5, 10 e 15 neurônios

Número de neurônios	Temperatura média diária (°C)	NHFDD
5	23,4	8,0
10	23,9	8,7
15	24,1	9,0

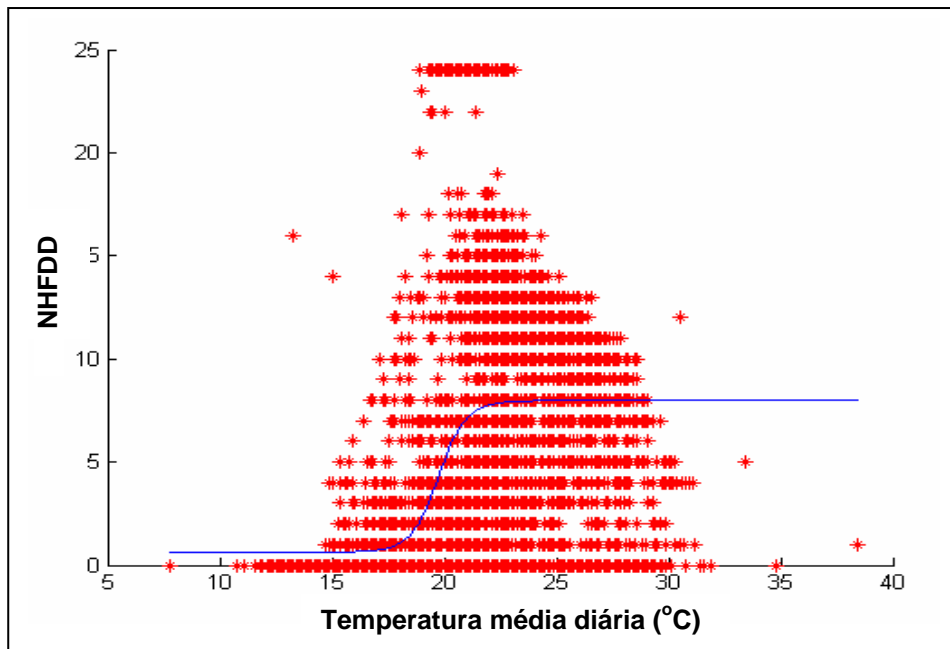


Figura 4 – NHFDD em função da temperatura média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 5 neurônios.

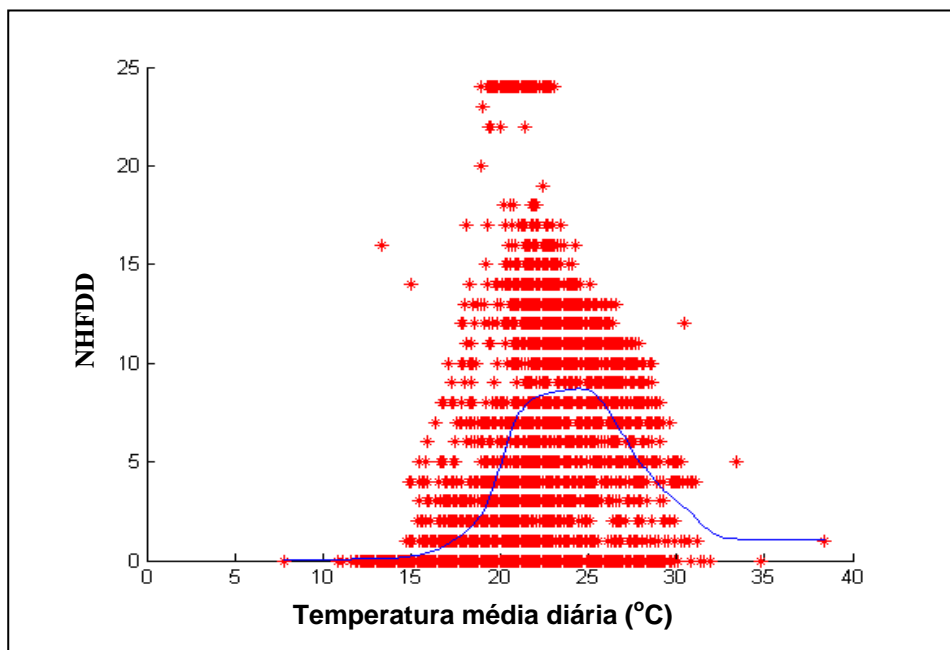


Figura 5 – NHFDD em função da temperatura média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 10 neurônios.

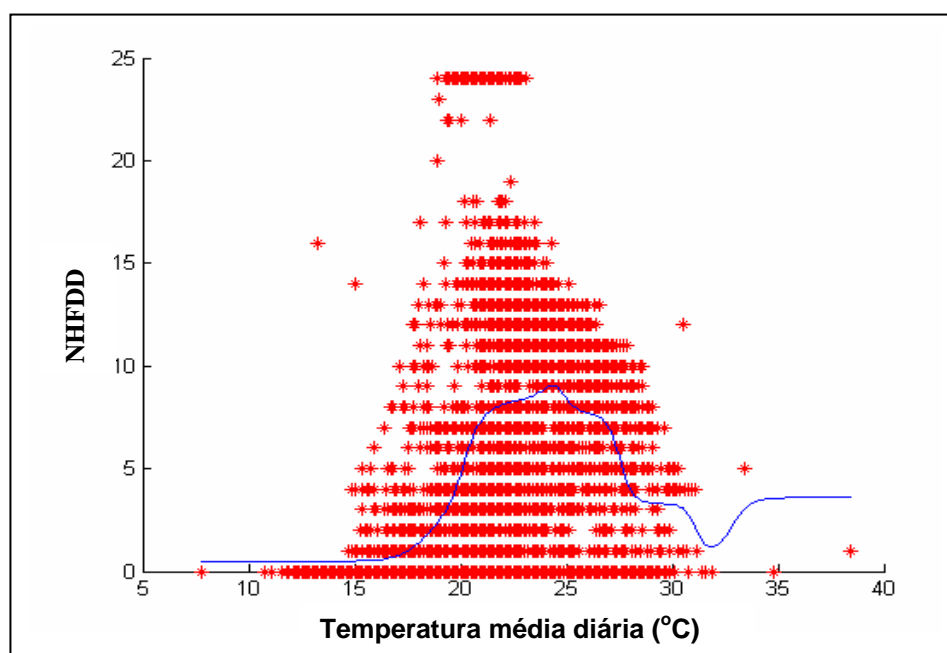


Figura 6 – NHFDD em função da temperatura média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 15 neurônios.

O número de horas com condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem asiática é maior ou igual a 6,0. Na rede neural com 5, 10 e 15 neurônios, chega-se a este valor com temperaturas médias diárias muito próximas, que são 20,4°C ou 20,5°C. Na rede com 5 neurônios, o NHFDD aumenta até à temperatura de 23,4°C, atingindo 8,0 HFDD e permanecendo constante a partir desse ponto. Na rede com 10 neurônios, o máximo é atingido a 23,9°C, com 8,7 HFDD e, a partir daí, diminui com a temperatura, chegando a 6,0 HFDD na temperatura de 27,2°C. O mesmo acontece na rede com 15 neurônios, cujo valor máximo de 9,0 horas é atingido a 24,1°C, diminuindo, também, a partir desse valor e chegando a 6,0 HFDD na temperatura de 27,3°C. Essas variações podem ser observadas nos gráficos das figuras 4, 5 e 6. Os valores máximos de NHFDD com a temperatura são apresentados na Tabela 1. Portanto, não há grande diferença entre os resultados alcançados nas três simulações, exceto na rede com 5 neurônios, que não apresenta uma faixa de temperatura definida de condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem.

Nas figuras 7, 8 e 9, observam-se os gráficos gerados nas redes treinadas com 5, 10 e 15 neurônios, respectivamente, com o número de horas em condições favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD) em função da umidade relativa média diária. Os três gráficos apresentam comportamentos semelhantes com relação ao NHFDD, crescendo sempre com a umidade relativa, atingindo os valores máximos, conforme se observa na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores máximos de umidade relativa média diária e do número de horas favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD), nas RNAs com 5, 10 e 15 neurônios.

Número de neurônios	UR média diária (%)	NHFDD
5	100	17,4
10	100	16,5
15	100	17,4

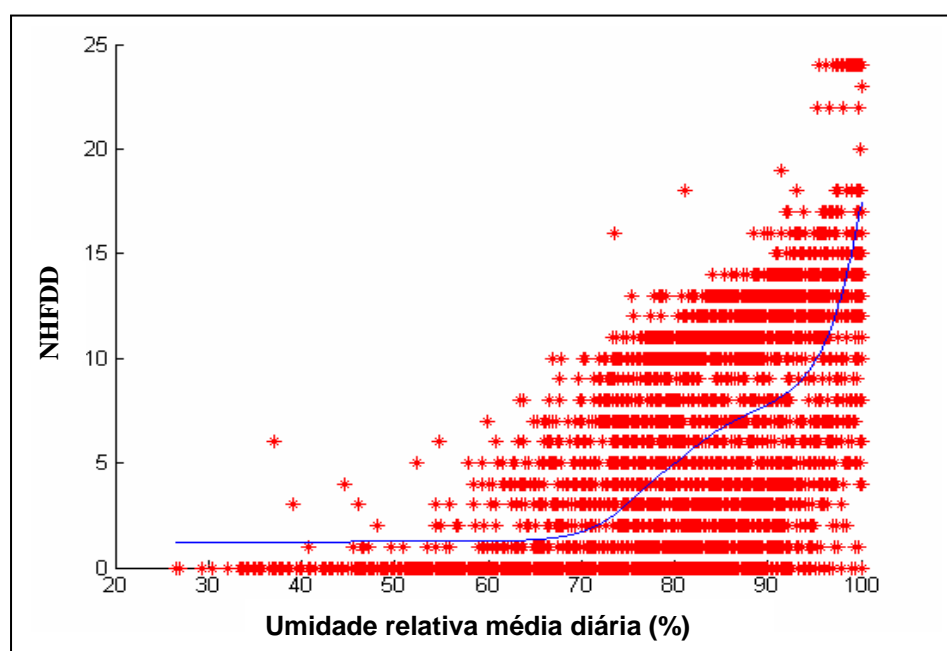


Figura 7 – NHFDD em função da umidade relativa média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 5 neurônios.

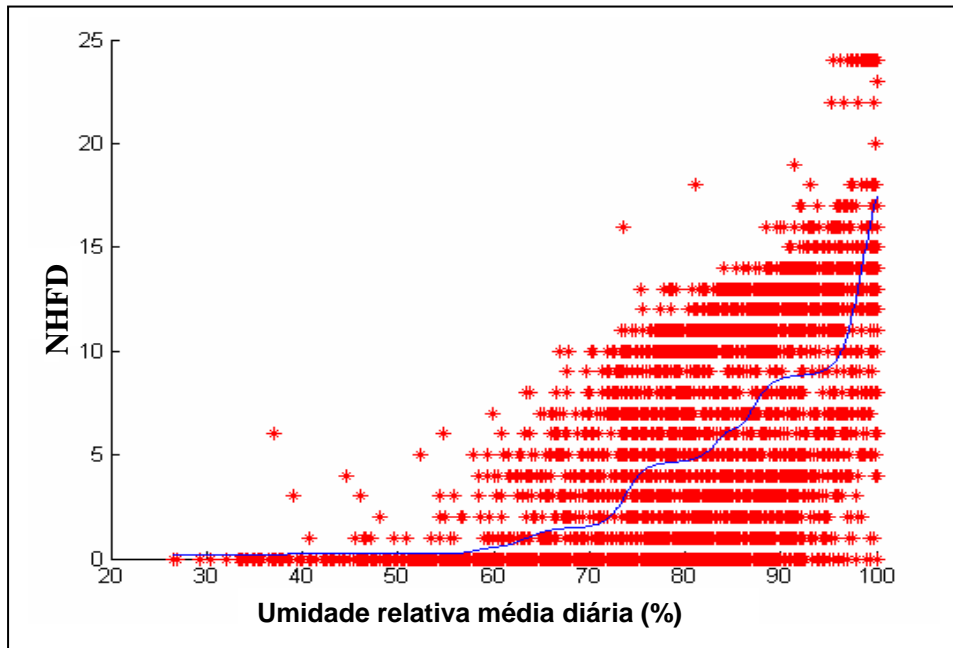


Figura 8 – NHFDD em função da umidade relativa média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 10 neurônios.

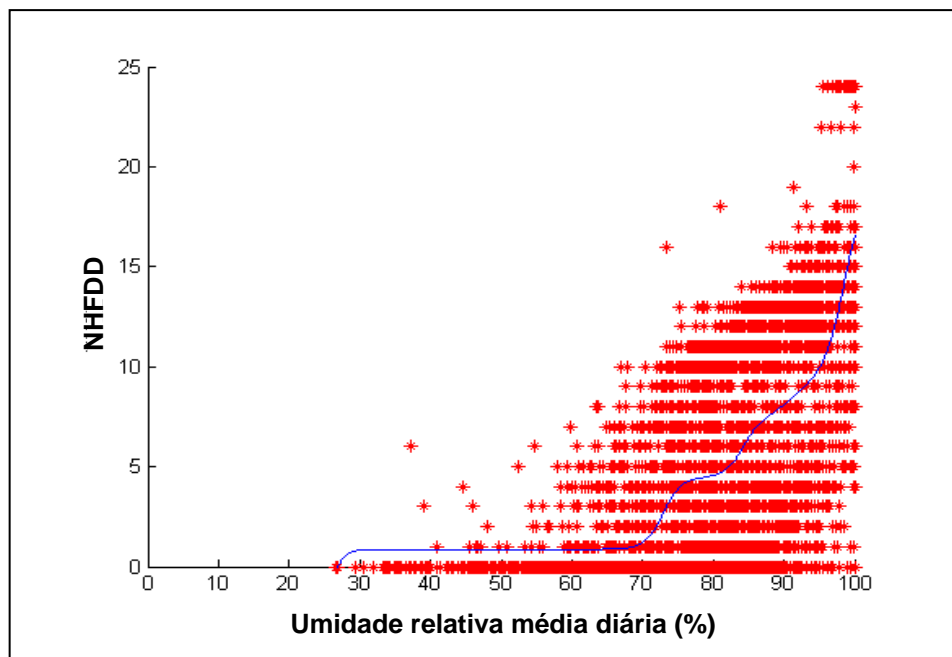


Figura 9 – NHFDD em função da umidade relativa média diária em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 15 neurônios.

Quando simulado pela rede, para a umidade relativa média diária, o NHFDD atinge valores bem superiores, sendo os valores máximos apresentados Tabela 2. Para a rede com 5 neurônios, o valor de 6,0 HFDD ocorre a uma umidade relativa igual a 82,4%, naquela com 10 neurônios, a 84,2%; e naquela com 15 neurônios, a 84,0%. Nas três simulações, o NHFDD aumenta sempre, sendo que os valores máximos de 17,4, 16,5 e 17,4 horas ocorrem à umidade relativa de 100,0%. Tais variações podem ser observadas nos gráficos das figuras 7, 8 e 9. O NHFDD, em função da temperatura média diária, é bem menor que o da umidade relativa média diária, conforme Tabela 1.

As figuras 10, 11 e 12 apresentam os gráficos, gerados pelas redes treinadas com 5, 10 e 15 neurônios, respectivamente, cujo número de horas com as condições favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD) foi obtido, em função da temperatura média diária e da umidade relativa média diária. Os três gráficos têm comportamentos semelhantes para a variação do NHFDD com a combinação das duas variáveis, temperatura média diária e da umidade relativa média diária, atingindo os pontos de máximos, que são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores máximos de temperatura média diária, umidade relativa média diária e do número de horas favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD), nas RNAs com 5, 10 e 15 neurônios.

Número de neurônios	Temperatura média diária (°C)	UR média diária (%)	NHFDD
5	24,2	99,8	21,3
10	21,8	99,8	15,6
15	21,0	99,8	19,4

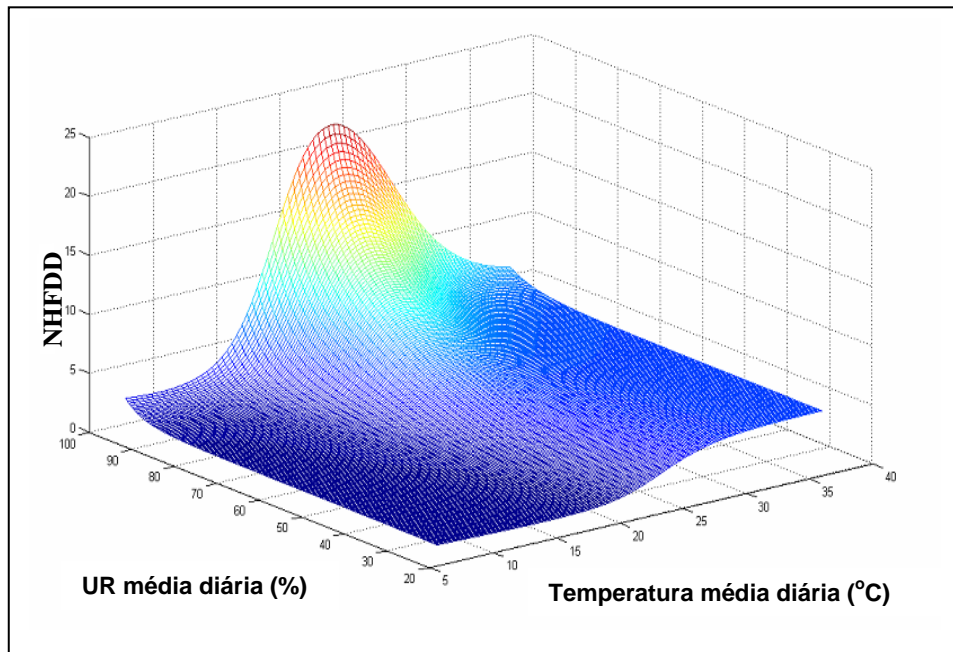


Figura 10 – NHFDD em função da temperatura e umidade relativa, médias diárias em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 5 neurônios.

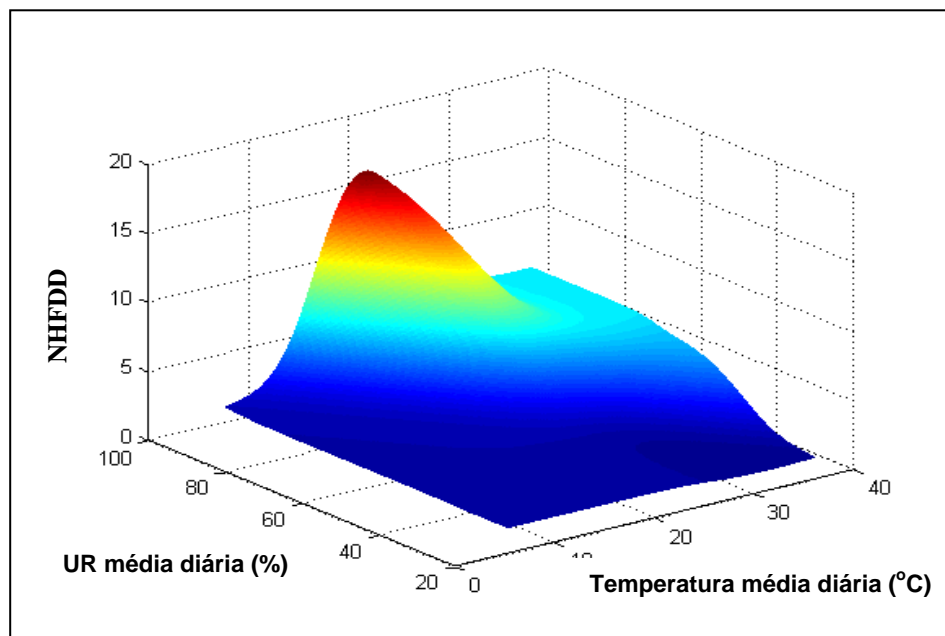


Figura 11 – NHFDD em função da temperatura e umidade relativa, médias diárias em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 10 neurônios.

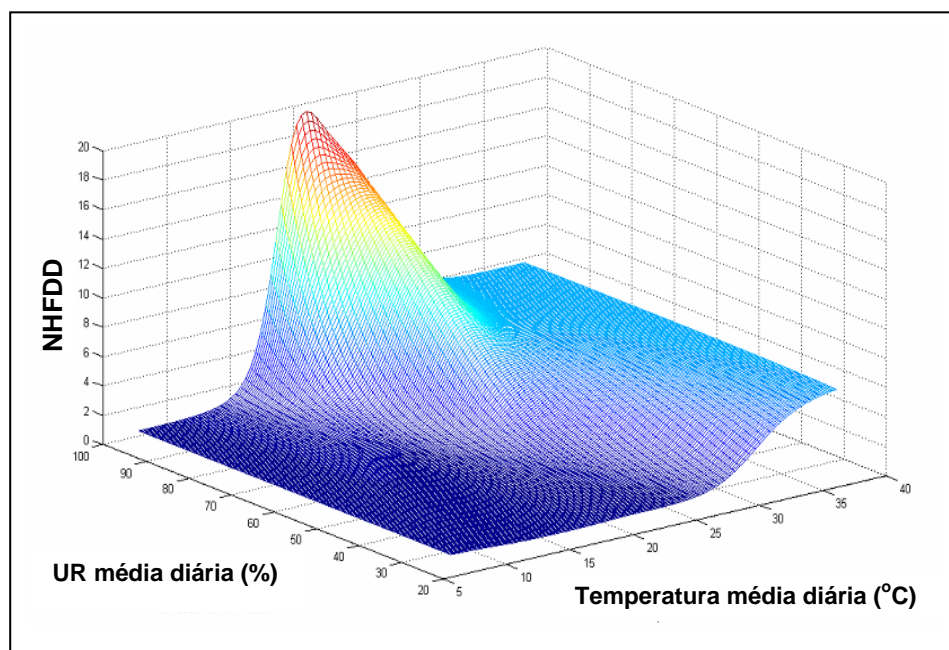


Figura 12 – NHFDD em função da temperatura e umidade relativa, médias diárias em Minas Gerais, gerado por uma RNA com 15 neurônios.

Nas simulações do NHFDD, em função da temperatura média diária e da umidade relativa média diária, simultaneamente, a temperatura do ponto máximo aumenta de 23,4°C para 24,2°C na rede com 5 neurônios; diminui de 23,9°C para 21,8°C na rede com 10 neurônios e, também, diminui de 24,1°C para 21,0°C na rede com 15 neurônios, quando comparadas com as simulações do NHFDD com a temperatura somente (Tabelas 1 e 3). Nos três casos, a umidade relativa dos pontos máximos teve sempre o mesmo valor de 99,8% (Tabela 3). Os valores do NHFDD são maiores, em comparação com aqueles obtidos somente em função da temperatura, mas são bem próximos daqueles obtidos em função, apenas, da umidade relativa. Estes resultados revelam que o NHFDD tende a ser maior, quando gerado em função da umidade relativa média diária, mostrando uma maior influência desta nas melhores condições de favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem.

Os gráficos das figuras 13 e 14 apresentam a variação no número de horas com as condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem, em função da temperatura média diária e da umidade relativa média diária, respectivamente, gerados pelas redes neurais treinadas com 5, 10 e 15. No primeiro, o NHFDD aumenta atingindo valores máximos, que permanecem

praticamente constantes, com valores muito próximos entre eles, o que está de acordo com a Tabela 1. No gráfico da Figura 14, o NHFDD aumenta até atingir valores máximos na umidade relativa de 100,0%, sendo esses valores maiores que aqueles determinados em função da temperatura média. Esta tendência de o NHFDD ser maior quando a umidade relativa está envolvida, é confirmada também nos gráficos tridimensionais (Figuras 10, 11 e 12).

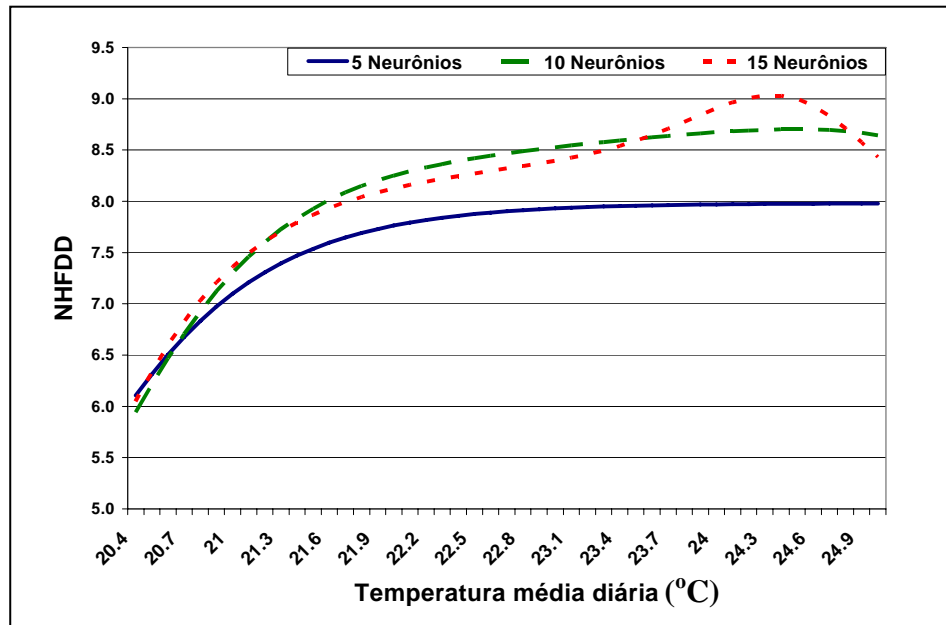


Figura 13 – NHFDD gerado pelas redes de 5, 10 e 15 neurônios, em função da temperatura média diária.

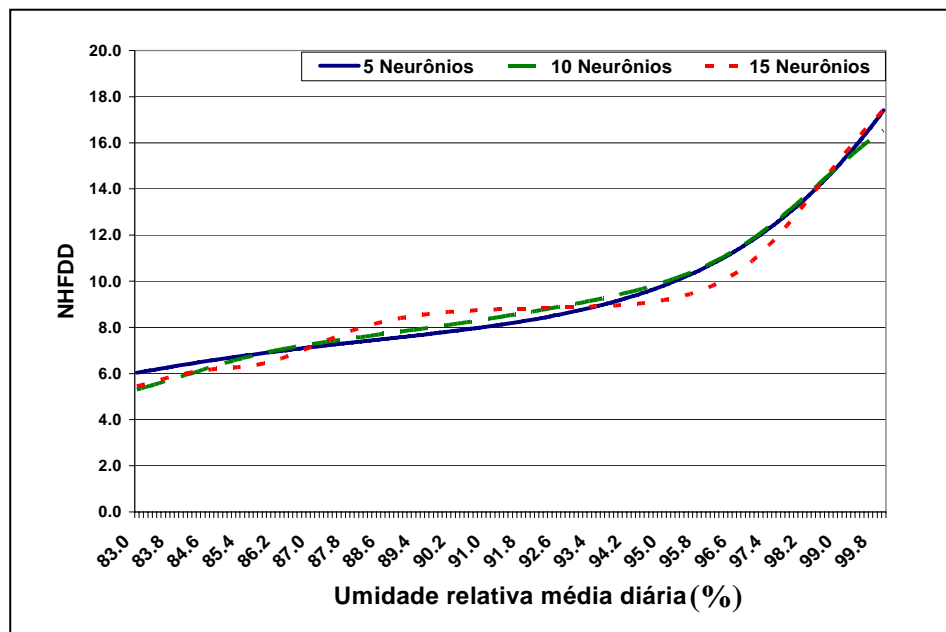


Figura 14 – NHFDD gerado pelas redes de 5, 10 e 15 neurônios, em função da umidade relativa média diária.

Na Tabela 4, são apresentados os resultados da raiz quadrada do erro médio (RSME) e do número de Willmott ( $d$ ) entre os NHFDD identificados pelo modelo e os NHFDD gerados pelas RNAs com 5, 10 e 15 neurônios. Os melhores resultados da comparação, tanto do erro como do número de Willmott, foram obtidos pelas redes, que relacionaram o NHFDD à umidade relativa. Quando se comparam os resultados da raiz quadrada do erro médio e o número de Willmott entre as redes com 5, 10 e 15 neurônios, considerando-se as variáveis temperatura e umidade relativa separadas, os valores são bem próximos.

Entretanto, quando se comparam o número de dias com as condições favoráveis para o desenvolvimento da doença, durante os meses de janeiro, fevereiro, março e abril, há uma melhoria significativa em todos os valores da RSME e no número de Willmott (Tabela 5). Estes resultados mostram que não há diferença entre os dados gerados pelas RNAs de temperatura média e de umidade relativa média, quando comparados àqueles do modelo.

Tabela 4 – Raiz quadrada do erro médio (RSME) e número de Willmott entre os NHFDD identificados pelo modelo, no experimento em Uberlândia, em comparação com os NHFDD, gerados pelas RNAs de temperaturas e umidades relativas médias diárias, com 5, 10 e 15 neurônios

Número de neurônios	RSME		Número de Willmott ( $d$ )	
	$T_{med}$	UR	$T_{med}$	UR
5	5,01	2,96	0,35	0,85
10	4,92	3,02	0,32	0,83
15	4,92	2,90	0,32	0,85

O número de horas é uma informação muito importante para a verificação da ocorrência de uma situação, que oferece condições para o fungo se desenvolver. O conhecimento do número de dias, cujas condições são favoráveis à ocorrência da ferrugem, é igualmente importante, pois, pode contribuir para uma melhor programação do número de aplicações de fungicidas.

Tabela 5 – Raiz quadrada do erro médio (RSME) e número de Willmott entre os NDFDD identificados pelo modelo, no experimento em Uberlândia, em comparação com os NDFDD, gerados pelas RNAs de temperaturas e umidades relativas médias diárias, com 5, 10 e 15 neurônios

Número de neurônios	RSME		Número de Willmott (d)	
	T <sub>med</sub>	UR	T <sub>med</sub>	UR
5	0,61	0,54	0,86	0,88
10	0,67	0,54	0,81	0,88
15	0,61	0,54	0,86	0,88

No gráfico da Figura 15 observam-se as variações do NHFDD, identificados pelo modelo e aqueles gerados pelas RNAs de temperatura média diária e umidade média diária, com 10 neurônios, nos meses de janeiro a abril, com os dados medidos em Uberlândia. Este gráfico evidencia a tendência para uma melhor correlação entre os NHFDD identificados no modelo com os gerados nas RNAs de umidade relativa, conforme apresentado na Tabela 4. As duas curvas seguem as mesmas oscilações, o que não ocorre com a curva da temperatura média.

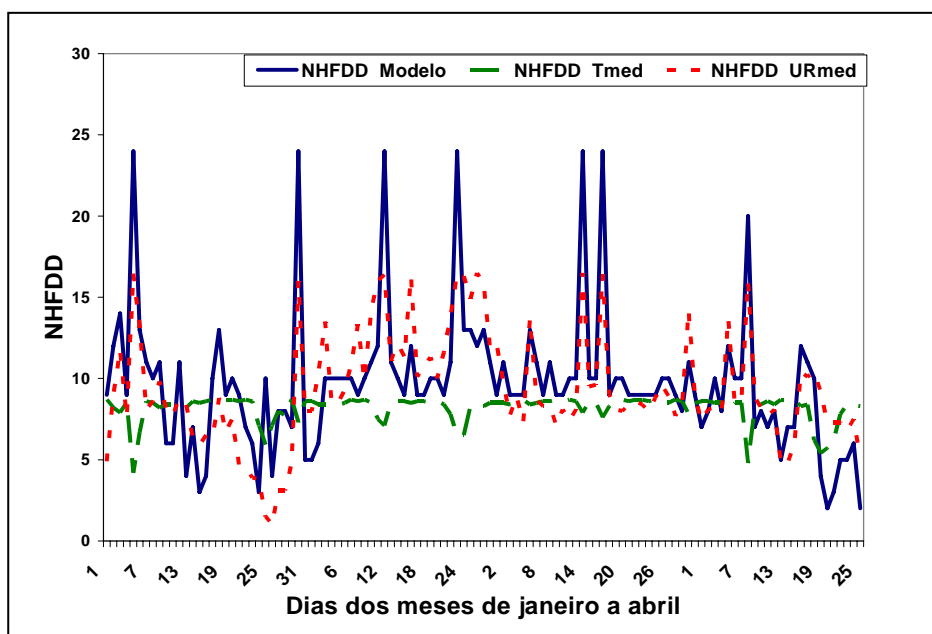


Figura 15 – Comparação entre os NHFDD, identificados pelo modelo e aqueles gerados nas RNAs de temperatura média e umidade relativa média, ambas com 10 neurônios, no período de janeiro a abril, em Uberlândia.

As figuras 16 e 17 apresentam o número de dias com favorabilidade ao desenvolvimento da doença (NDFDD) nos meses de janeiro a abril, quando o comportamento das três curvas (Figura 16) é muito semelhante. O NDFDD identificado pelo modelo da UR média é sempre menor ou, no máximo, igual ao do modelo da temperatura média, ficando ambos próximos ao modelo de identificação do NDFDD, O que também se evidencia na Figura 17.

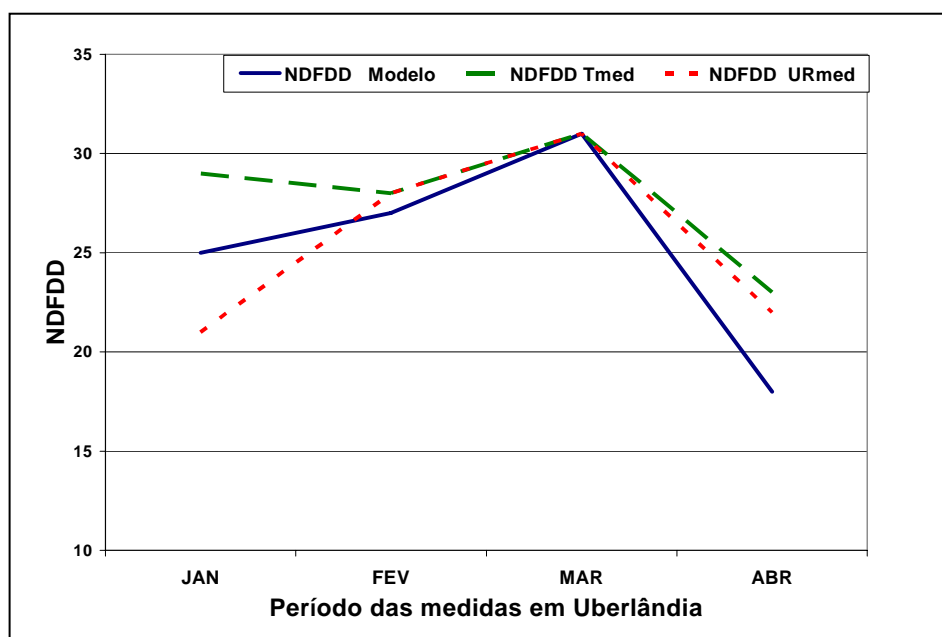


Figura 16 – Comparação entre os NDFDD, identificados pelo modelo e aqueles gerados nas RNAs de temperatura média e umidade relativa média, ambas com 10 neurônios, no período de janeiro a abril, em Uberlândia.

Na análise estatística dos resultados, calcularam-se a raiz quadrada do erro médio e o número de Willmott. Quando se comparam os NDFDD, identificados pelo modelo, com aqueles gerados pelas RNAs, com os dados obtidos no experimento na UFU-MG, nota-se, novamente, que a umidade relativa apresenta melhores resultados. Entretanto, quando se considera o NDFDD, essa diferença deixa praticamente, de existir, inclusive com valores de RSME bem baixos e valores do número de Willmott mais próximos de 1 (Tabela 5).

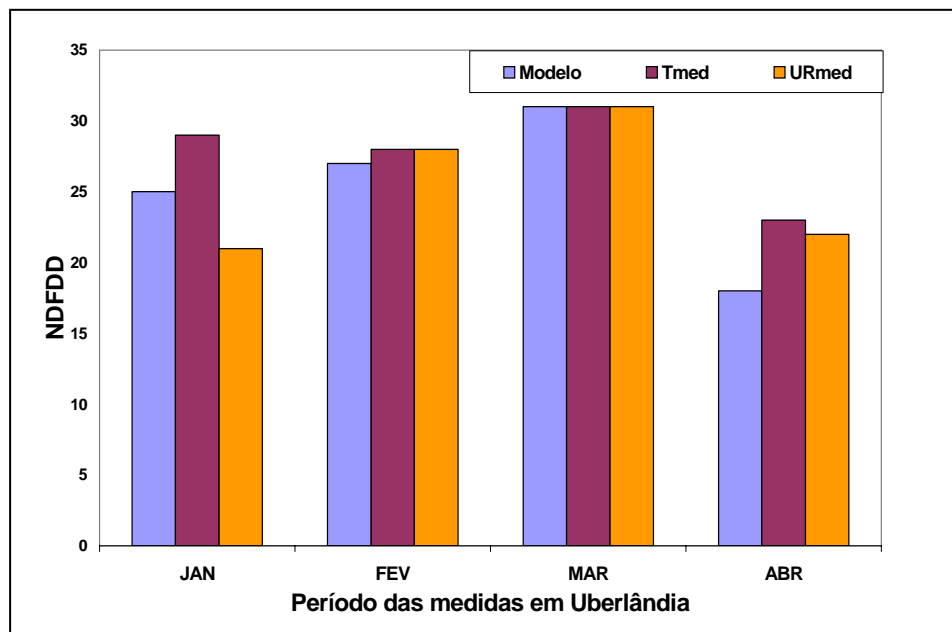


Figura 17 – Comparação entre os NDFDD identificados pelo modelo e aqueles gerados nas RNAs de temperatura média e umidade relativa média, ambas com 10 neurônios, no período de janeiro a abril, em Uberlândia.

Com relação ao número de neurônios utilizados no treinamento das redes, as RNAs com 10 e 15 neurônios foram as mais satisfatórias, principalmente, por mostrarem uma melhor variação do NDFDD da rede com a temperatura média, pois, em ambas, o NDFDD aumentou, atingindo o máximo, mas diminuiu, a partir de certa temperatura, o que mais condiz com a realidade.

## **CAPÍTULO 3 – PROJEÇÕES FUTURAS DAS CONDIÇÕES FAVORÁVEIS AO DESENVOLVIMENTO DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA**

### **1. INTRODUÇÃO**

Os cenários do IPCC representam uma visão possível do desenvolvimento futuro de emissões de substâncias, que têm um efeito radiativo potencial (gases de efeito estufa, aerossóis). Estes cenários são produtos de sistemas dinâmicos complexos, determinados por forças motrizes, tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócioeconômico e mudança tecnológica, assim como suas interações, cujas evoluções possuem alto nível de incerteza (IPCC, 2001). Em 1990, o IPCC apresentou um conjunto de cenários de emissões, usados como bases para as projeções climáticas, publicados em 1996. As projeções das mudanças climáticas, devido a causas antropogênicas, dependem das considerações referentes às futuras emissões de gases de efeito estufa e aerossóis e da proporção de emissões remanescentes na atmosfera entre outros. Estes cenários são identificados como IS92 (Cenários de emissão de gases de efeito estufa). No IPCC, os novos cenários (SRES) foram publicados em 2000, sendo que alguns foram usados como base para as projeções climáticas do Terceiro Relatório de Avaliação até 2100. Os cenários SRES mostram diferentes possibilidades futuras de mudanças climáticas, denominados A1, A2, B1 e B2. Esses cenários apresentam características (IPCC, 2001), as quais são descritas a seguir:

Cenário A1 – É o cenário que descreve um mundo futuro, onde a globalização é dominante. Neste cenário, o crescimento econômico é rápido e o crescimento populacional é pequeno com um desenvolvimento rápido de tecnologias mais eficientes. Dentre os temas subjacentes principais, destacam-se a convergência econômica e cultural, com uma redução significativa tanto em diferenças regionais como em renda per capita. Neste contexto, os indivíduos procuram riqueza pessoal em lugar de qualidade

ambiental. Há três cenários: A1B – cenário de estabilização; A1F – máximo uso de combustível fóssil; e A1T – mínimo uso de combustível fóssil.

Cenário A2 – Descreve um mundo heterogêneo. Autonomia nacional e preservação de identidades locais. Os padrões de fertilidade entre as regiões se convergem lentamente, resultando um aumento contínuo da população global. O desenvolvimento econômico é, primordialmente, orientado para o bloco regional, sendo o crescimento econômico per capita e a mudança tecnológica mais fragmentados e lentos do que em outras previsões futuras.

Cenário B1 – Este cenário considera um mundo convergente. A população global atinge o ápice na metade do século e diminui em seguida, mas com rápidas mudanças nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e de informação, com desmaterialização da produção e a introdução de tecnologia limpa e eficiente, em termos de utilização de recursos. Ênfase em soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, incluindo aumento de equidade, mas sem iniciativas adicionais para enfrentar mudanças climáticas.

Cenário B2 – É um cenário que enfatiza soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. Considera o crescimento contínuo da população global, a uma taxa de crescimento menor que na família A2, com níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudança tecnológica mais lenta e diversificada que nas histórias de futuro B1 e A1. Embora o cenário também seja orientado para a proteção ambiental e equidade social, seu foco é local e regional.

Os cenários A1 e A2 são mais voltados para a visão econômica, enquanto os cenários B1 e B2 têm a preocupação ambiental. Os cenários A1 e B1 são globais, enquanto A2 e B2 são regionais. As famílias A1 e B1 exploram, explicitamente, caminhos alternativos nos quais se reduzem as diferenças relativas de renda entre regiões. Os cenários cobrem, virtualmente, todas as direções de possíveis mudanças, desde grande

participação de combustíveis fósseis, petróleo, gás ou carvão até grande participação de energias não fósseis. Não existe um único cenário mais provável, "central" ou com maiores chances de ocorrência. Probabilidades ou níveis de viabilidade não são atribuídos a nenhum cenário.

Vários trabalhos têm sido publicados sobre os modelos de circulação global e regional, levando-se em consideração os quatro cenários principais do IPCC. Os relatórios do IPCC, baseados nesses cenários, têm mostrado tendências ao aumento de temperatura, precipitação, aumento do nível do mar e eventos extremos para as diversas localidades da terra (IPCC, 2007a e b).

O impacto das mudanças climáticas globais nos sistemas naturais e humanos já pode ser sentido, principalmente, pela ocorrência de eventos extremos, tais como temperaturas máximas e mínimas, grandes tempestades, inundações, secas, furacões, tornados e nevascas. Alguns já estão ocorrendo no Brasil, como as enchentes e secas em diversas regiões, sendo a seca da Amazônia a mais recente, em 2005. Todos esses fenômenos terão, obviamente, influência direta na produção agrícola, na intensidade de pragas e doenças na agricultura, afetando seriamente a produção e, conseqüentemente, a vida humana em muitos aspectos.

A principal causa do aumento da temperatura é a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Desde 1750, nos primórdios da Revolução Industrial, a concentração atmosférica de carbono – gás que impede que o calor do Sol se dissipe nas camadas mais altas da atmosfera, perdendo-se no espaço – aumentou 31,0%. Registre-se que mais da metade desse aumento ocorreu nos últimos cinquenta anos. Durante os primeiros séculos da Revolução Industrial, período de 1760 a 1960, os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico aumentaram de 277ppm para 317ppm, um aumento de 40ppm. Durante as recentes quatro décadas, de 1960 a 2001, as concentrações de CO<sub>2</sub> aumentaram de 317ppm para 371ppm, um acréscimo de 54ppm (IPCC-2007a e b).

Os gases de efeito estufa absorvem parte da energia do Sol, emitida pela superfície do planeta e a redistribuem em forma de calor, através das circulações atmosféricas e oceânicas. Parte da energia é irradiada, novamente, ao espaço. Qualquer fator que altere este processo afeta o clima

global. Segundo Marengo (2006), com o aumento das emissões dos gases de efeito estufa, observado principalmente nos últimos 150 anos, mais calor passou a ficar retido. Amostras, retiradas das geleiras da Antártica, revelam que as concentrações atuais de carbono são as mais altas dos últimos 420.000 anos e, provavelmente, dos últimos 20 milhões de anos. O aumento de quase 0,7°C durante o século passado é pequeno, comparativamente às projeções de aquecimento para o próximo século. Segundo projeções feitas pelo IPCC, o aquecimento poderá situar-se entre os limites de 1,4 a 6,4 °C, no ano 2100.

A agricultura é o setor da economia que apresenta maior dependência das condições ambientais, especialmente climáticas. No Brasil, são poucos os trabalhos concernentes aos impactos das mudanças climáticas na agricultura, especialmente no que diz respeito a pragas e doenças. A partir das previsões de aumento de temperatura, geradas por diversos Modelos de Circulação Geral (AOGCMs), Orsini (2005) fez um estudo na distribuição de nematóides e do bicho mineiro do cafeeiro, que são importantes problemas fitossanitários da cafeicultura. Todos os modelos utilizados para as previsões indicaram tendência de aumento da temperatura, proporcionando um possível aumento nas infestações pelo bicho mineiro do café, quando se compara com a situação climática atual (média dos últimos 30 anos). Estes resultados apontam para que sejam tomadas ações no sentido de prevenir o setor frente a esta tendência; caso contrário, certamente haverá queda da produtividade da cafeicultura.

Assad *et al.* (2004) estudaram o impacto das mudanças climáticas sobre o zoneamento do café nos Estados de Goiás, Minas Gerais, Paraná e São Paulo, considerando aumentos na temperatura média de 1,0°C, 3,0°C, e 5,8°C, bem como um aumento de 15,0% na precipitação. Esses estudos mostraram uma redução superior a 95,0% nas áreas aptas para a cultura nos Estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo, mas de 75,0% no Paraná, quando o aumento na temperatura for de 5,8°C. Entretanto, nesse trabalho, foram consideradas as condições genéticas atuais dos cultivares de café plantados nesses Estados.

Valadares Júnior *et al.* (2007), utilizando técnicas de geoprocessamento, fizeram uma avaliação do efeito potencial das mudanças

climáticas globais sobre a distribuição espacial do fungo *Mycosphaerella fijiensis*, causador da sigatoka negra na bananeira no mundo. Foram feitas projeções para os anos de 2020, 2050 e 2080, para os cenários A2 e B2. Os autores consideraram a metodologia eficiente para o mapeamento de áreas propensas ao ataque do patógeno.

Muitos modelos matemáticos têm sido utilizados para a previsão de doenças em plantas. O enfoque tem sido dado quanto à avaliação ou à previsão de risco. Yang (2006) propõe a terminologia “avaliação de risco” para as situações em que a doença já está presente e a avaliação é feita para um período maior de tempo. Este tipo de avaliação considera os estudos do comportamento de tendências de uma doença para as próximas safras, utilizando-se de dados de tendências climáticas ou de séries históricas de climas. Este tipo de metodologia tem sido utilizado na busca de informações para decisões em nível de programas a serem desenvolvidos como prevenção. Busca-se a estimativa de favorabilidade climática para a ocorrência da doença, ou mesmo de danos potenciais em determinadas regiões. Este mesmo autor ainda enfatiza que a existência de condições adequadas ao desenvolvimento da doença não significa que ela ocorrerá, pois há necessidade da presença do inóculo causador da mesma.

Outra terminologia empregada é a “previsão de risco”, que é a determinação do risco em tempo real. Os modelos empregados nesta situação são denominados modelos de previsão (YANG, 2006).

Os modelos desenvolvidos na avaliação ou previsão de riscos têm utilizado as variadas ferramentas matemáticas e computacionais, tais como regressões lineares, simulações mecánísticas, redes neurais e dinâmicas de populações, com diferentes variáveis de entrada para prever a severidade e o progresso da doença (DEL PONTE *et al.*, 2006).

Os modelos para previsão dos impactos de mudanças climáticas nos problemas fitossanitários, apesar de inúmeras dificuldades, constituem uma importante ferramenta, sendo que maiores esforços devem ser-lhes dispensados, o que pode resultar significativa economia de tempo e recursos (GHINI, 2005). Segundo Seem (2004), citado por Hamada *et al.* (2006), a mais prática aproximação nesses casos é relacionar um modelo de pragas/doenças a um modelo de estimativa de mudança climática. É

importante que os modelos que avaliam o potencial de crescimento das culturas integrem informações observadas devido ao efeito das doenças. A taxa de crescimento de sementes, que depende diretamente da área fotossintética é uma variável que caracteriza esta integração (YANG, 1991).

Muitos modelos têm utilizado a temperatura e umidade relativa como variáveis climáticas na determinação da favorabilidade da ferrugem asiática. Del Ponte *et al.* (2006) fizeram um estudo utilizando a quantidade e distribuição de chuvas na previsão de severidade dessa doença. Esse estudo foi desenvolvido em 21 localidades de 9 Estados brasileiros, nas safras de 2002 a 2005 e a pesquisa mostrou uma grande relação entre a quantidade e a distribuição de chuva com a severidade final da ferrugem. Os pesquisadores observaram ainda que a temperatura correlacionou-se pouco com a severidade da ferrugem asiática.

Yang (2006), considerando a avaliação de riscos de ocorrência de determinada doença, afirma que as mudanças climáticas poderão resultar no aparecimento de novas doenças bem como a expansão de doenças para regiões produtoras onde ainda não era uma preocupação.

Se as mudanças na composição atmosférica e no clima global se apresentarem futuramente, conforme previsto, haverá realocação das culturas e de suas doenças, cujos impactos serão sentidos em termos econômicos com consideráveis perdas na produção. Essas mudanças, além de alterarem a distribuição geográfica das culturas, também modificarão o espectro das doenças, diminuindo a importância de algumas e contribuindo para o surgimento de outras (GHINI, 2005). As mudanças climáticas têm sido analisadas de maneira global. Torna-se necessária a avaliação sobre doenças específicas de uma unidade espacial mais ecologicamente relevante, a fim de considerar o clima com outras mudanças associadas ao uso da terra e à cobertura vegetal, entre outras variáveis.

Segundo Goudriam e Zadoks (1994), quando a cultura é deslocada de uma região para outra e se adapta bem às novas condições climáticas, as pragas e doenças que a têm como hospedeira também se adaptarão às novas condições. A adaptabilidade de organismos de pragas e de doenças e também as ervas daninhas são enormes, e as suas variabilidades

genéticas, ao contrário do que se faz em relação às culturas têm sido pouco exploradas.

As mudanças na temperatura e precipitação devido a alteração na concentração de determinados componentes da atmosfera podem causar diversos efeitos sobre as plantas, suas doenças e pragas. Dentre esses efeitos, podem-se citar as alterações na morfologia e na fisiologia da planta hospedeira, devido ao aumento no teor de CO<sub>2</sub>, que pode afetar a interceptação da luz e da precipitação, modificar a estrutura da parte aérea da planta e, conseqüentemente, o microclima, influenciando os componentes epidemiológicos das doenças. Algumas doenças podem reduzir o desenvolvimento das plantas de forma mais acentuada, em ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub>, conforme relatado para o oídio em cevada (HIBBERD *et al.*, 1996). O crescimento de plantas doentes é, freqüentemente, reduzido mesmo sendo a severidade da doença reduzida com o aumento de CO<sub>2</sub> (CHAKRABORTY *et al.*, 2000a). O O<sub>3</sub> pode predispor as plantas a danos maiores que aqueles ocasionados por fitopatógenos, enquanto os efeitos do UV-B ainda são inconsistentes (MANNING & TIEDEMANN, 1995).

Muitas modificações na fisiologia da planta podem alterar os mecanismos de resistência de cultivares. Além disso, algumas formas de resistência da planta podem ser mais afetadas do que outras (HIBBERD *et al.*, 1996; CHAKRABORTY *et al.*, 2000a). Entretanto, a maior ameaça à resistência genética é a aceleração do ciclo dos patógenos que, com aumento do CO<sub>2</sub>, podem sofrer alterações em todas as fases de vida. Em algumas pesquisas, verificou-se que, apesar da ocorrência de atraso no desenvolvimento inicial e redução na penetração do patógeno no hospedeiro, as infecções estabelecidas se desenvolveram com maior velocidade e com aumento na multiplicação do patógeno nos tecidos afetados (CHAKRABORTY *et al.*, 2000a). A multiplicação mais intensa do patógeno, devido ao maior desenvolvimento do dossel e manutenção de um microclima propício, favorece a ocorrência de epidemias (GHINI, 2005).

Segundo Vale *et al.* (2004), os fatores biosféricos, tanto com os componentes físicos como biológicos, afetam o patógeno, o hospedeiro e as interações entre eles, direta ou indiretamente. Os autores relatam, por exemplo, que o efeito direto do ozônio sobre fungos micorrízicos resulta

efeito indireto sobre o hospedeiro. Do mesmo modo, os fatores ambientais, que influenciam as atividades dos insetos ou a competição de plantas invasoras, apresentam efeito indireto sobre o hospedeiro e, portanto, sobre a interação patógeno-hospedeiro. Essas interações entre patógeno-hospedeiro também podem ser afetadas pelo aumento na concentração do CO<sub>2</sub>, pois, ao aumentar o desenvolvimento do hospedeiro, também propiciam o desenvolvimento de plantas invasoras. Outro ponto importante é que aumento na temperatura aumentará a evapotranspiração, podendo causar estresse hídrico na planta.

Manning e Tiedemann (1995) verificaram, numa revisão de literatura, que há uma tendência ao aumento de doenças de plantas com a elevação da concentração do CO<sub>2</sub>. O aumento na produção de biomassa das plantas, isto é, o aumento de brotações, folhas, flores e frutos representa maior quantidade de tecido a ser infectado pelos patógenos. O aumento na densidade das copas e nos tamanhos das plantas pode facilitar o crescimento, a esporulação e disseminação de fungos foliares, tais como as ferrugens que requerem alta umidade do ar para se desenvolverem.

O desenvolvimento de doenças nas plantas depende das condições climáticas favoráveis. Dentre os elementos climáticos, que mais influenciam a instalação e desenvolvimento das doenças em plantas, os principais são a temperatura e a umidade, em forma de chuva, irrigação ou condensação nas diversas partes das plantas, principalmente nas folhas.

A duração do período de molhamento foliar (PMF) é uma variável muito importante para o desenvolvimento de doenças, pois, a maioria dos patógenos requer a presença de água líquida sobre as plantas, para a germinação dos esporos e conseqüente infecção do tecido (VALE *et al.*, 2004; SENTELHAS, 2004; SENTELHAS *et al.*, 2006). A determinação do PMF é, portanto, fundamental para se conhecer as condições ideais para o desenvolvimento da doença em uma cultura, assim como para a tomada de decisão em sistemas de controle. Outra variável climática importante para o desenvolvimento das doenças, em plantas, é a temperatura.

Dentre as doenças, que têm causado grandes perdas na agricultura, destaca-se a ferrugem asiática da soja que, desde sua constatação em 2001

no continente Americano, no sul do Paraguai, tem causado grandes perdas em lavouras de soja (YORINORI *et al.*, 2005).

A determinação do PMF pode ser realizada de diversas maneiras, conforme relatado por Sentelhas (2004), desde medidas diretas por meio de sensores mecânicos ou automáticos, ou por meio de estimativas baseadas em relações empíricas, normalmente com o número de horas com umidade relativa acima de 90,0%, até modelos mais complexos, envolvendo o balanço de energia (PEDRO & GILLESPIE, 1982a e b; KIM *et al.*, 2005).

Vários estudos têm sido conduzidos, no sentido de determinar o período de molhamento foliar a partir de variáveis climáticas tais como a temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima, velocidade do vento, radiação, dentre outros, utilizando as redes neurais artificiais (FRANCL & PANIGRAHI, 1997; POZZA, 1998; FERRANTI *et al.*, 2005; GONÇALVES *et al.*, 2005; MATHIAS *et al.*, 2005).

Considerando a limitação da modelagem matemática tradicional para fornecer respostas em sistemas biológicos e, ainda, a limitação na informação da previsão de erro, Batchelor *et al.* (1997), na procura de novas técnicas de modelagem, desenvolveram um modelo de previsão da ferrugem asiática da soja por meio de redes neurais artificiais. Os dados utilizados no desenvolvimento das redes foram quantificados em experimentos feitos em Taiwan, nos anos de 1980 e 1981. Fizeram-se plantios de soja, semanalmente, nos dois anos totalizando 73 parcelas de cultura, onde quantificou-se o desenvolvimento da doença. Em estação meteorológica instalada no campo, fizeram-se medidas de temperatura máxima, média e mínima, de precipitação e de umidade relativa. Sete variáveis foram utilizadas como entrada na rede, tais como data de plantio, dia da observação da primeira ocorrência da doença, dias acumulados com umidade relativa acima de 90,0% e graus dias para a cultura e patógeno. As variáveis foram combinadas em vários grupos, sendo que no final da geração das redes, apenas três combinações foram consideradas. A variável de saída foi a severidade medida em cada parcela durante os dois anos do experimento. As redes foram treinadas, testadas e validadas com os dados dos dois experimentos de duas maneiras diferentes, considerando inicialmente os dados dos dois anos e, posteriormente, o treinamento com

os dados do ano de 1980 e o teste e validação com os resultados dos experimentos do ano de 1981. Os pesquisadores concluíram que os resultados obtidos com esta metodologia foram melhores que os obtidos com outras metodologias empregadas anteriormente, tais como a análise de regressão múltipla, com estes mesmos dados experimentais.

O atrativo principal para a solução de problemas por meio de redes neurais artificiais está na capacidade destas em aprenderem através de exemplos e generalizar as informações aprendidas. A generalização, que está associada à capacidade de uma rede em aprender através de um conjunto reduzido de exemplos e, posteriormente, dar respostas coerentes para dados desconhecidos, é uma demonstração de que a capacidade das RNAs vai muito além do que simplesmente mapear relações de entrada e saída (BRAGA *et al.*, 2000). RNAs são modelos computacionais, inspirados no sistema nervoso biológico, cujo funcionamento é semelhante a alguns procedimentos humanos, ou seja, aprendem pela experiência, generalizam exemplos através de outros e abstraem características. A utilização de uma RNA na solução de uma tarefa passa, antes de tudo, por uma fase de aprendizagem, quando a rede extrai informações relevantes de padrões de informação a ela apresentados, criando, assim, uma representação própria para o problema (HAYKIN, 2001).

Considerando a importância de se conhecer as condições favoráveis ao desenvolvimento de doenças, a partir de uma projeção de variáveis climáticas geradas por modelos climáticos, este trabalho foi conduzido com o objetivo de identificar as condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja, utilizando dados de temperatura e umidade relativas atuais, bem como avaliar a tendência de desenvolvimento da ferrugem nas condições climáticas, projetadas pelo modelo de circulação geral da atmosfera (HadCM3), desenvolvido no Hadley Centre, para os anos de 2020, 2050 e 2080, para o cenário A2, no Estado de Minas Gerais.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. A doença e o modelo**

Considerando o impacto da ferrugem asiática na produção de soja, no Brasil, fez-se um levantamento das condições favoráveis ao desenvolvimento do fungo causador desta doença. Neste trabalho, consideram-se, como condições favoráveis ao desenvolvimento do patógeno a temperatura na faixa de 18,0°C a 25,0°C, concomitantemente, com a umidade relativa do ar maior ou igual a 90,0%.

### **2.2. A região em estudo e os dados utilizados**

As regiões contempladas no estudo encontram-se no Estado de Minas Gerais e foram consideradas em função da disponibilidade de dados das estações meteorológicas, bem como sua distribuição geográfica.

Utilizaram-se os dados de temperatura e umidade relativa das estações meteorológicas da Plataforma de Coleta de Dados do CPTEC - INPE. As estações estão localizadas nos municípios: Araçuaí, Araxá, Caratinga, Honorópolis, Ipatinga, Itajubá, Lavras, Leopoldina, Machado, Montes Claros, Nanuque, Paracatu, Santa Fé de Minas e Viçosa. Foram consideradas as temperaturas médias e mínimas diárias, projetadas pelo modelo de circulação geral da atmosfera (HadCM3), desenvolvido no Hadley Centre, para os anos de 2020, 2050 e 2080, para o cenário A2. Com os dados de temperaturas médias e mínimas diárias, calcularam-se as umidades relativas do ar diárias, por meio das equações 1 e 2, definidas a seguir. Delgado (2007), em um estudo comparativo de diversas metodologias para o cálculo de umidade relativa, constatou que esta apresentou os melhores resultados, em comparação com as medidas realizadas em estações convencionais e automáticas.

$$UR = 100 \frac{e(T_d)}{e(T_{med})} \quad (1)$$

em que

$e(T_d)$  = pressão de vapor do ponto de orvalho; e

$e(T_{med})$  = pressão de saturação de vapor da temperatura média.

No método proposto, a temperatura do ponto de orvalho é calculada, pela equação

$$T_d = \frac{186,4905 - 237,31 \log e(T_{min})}{\log e(T_m) - 8,2859} \quad (2)$$

em que

$e(T_{min})$  = pressão parcial de vapor (hPa), para a temperatura mínima.

### 2.3. Condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem

Por meio do modelo proposto, ou seja, temperatura na faixa de 18,0°C a 25,0°C e a umidade relativa maior ou igual a 90,0%, foram analisados os dados de temperatura e umidade relativa de 14 estações meteorológicas, no ano de 2006. O número de horas com as condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem asiática foi identificado, por meio de um programa computacional, desenvolvido na linguagem JAVA. A partir do número de horas diárias com condições favoráveis ao desenvolvimento da doença (NHFDD), determinou-se o número de dias com as condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem (NDFDD), para cada dia dos 12 meses do ano de 2006, nas 14 estações, considerando-se um NHFDD maior ou igual a 6,0.

### 2.4. Relação entre O NHFDD e a temperatura e umidade relativas médias diárias

A partir dos dados meteorológicos, foram calculadas as temperaturas e as umidades relativas médias diárias nas 14 localidades em estudo. Foram elaboradas tabelas com essas temperaturas e umidades com os NHFDD em todos os dias do ano de 2006, nessas localidades. Esses foram submetidos ao processamento, por meio de um programa de RNAs, disponível no

Toolbox de Redes Neurais do MATLAB, versão 2007, que utiliza o método de propagação retroativa do erro com minimização do erro quadrático médio. Os pesos sinápticos foram gerados, aleatoriamente, e a função de ativação foi a sigmoideal.

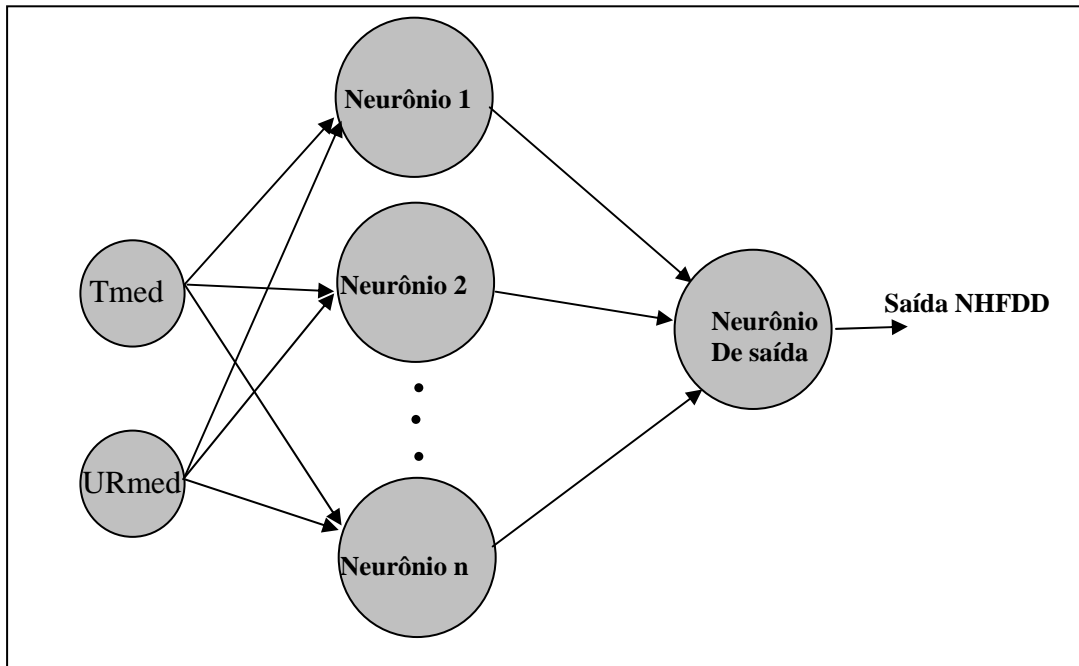


Figura 1 – Modelo da rede neural treinada, com número variável de neurônios.

A configuração da rede neuronal, utilizada no processamento, é apresentada na Figura 1, que mostra uma rede com três camadas e número variável de neurônios. Foram testados diversos números de neurônios, na procura daquele que melhor representasse os dados disponíveis e que tivesse o menor erro de previsão. Após diversas tentativas, optou-se por simulações com 10 neurônios na camada intermediária. Os treinamentos das redes foram feitos com os valores do NHFDD, identificados de acordo com as condições de favorabilidade, a temperatura média diária, a umidade relativa média diária, separadamente, e o NHFDD com as duas variáveis (a temperatura e umidade relativa) simultaneamente.

## 2.5. Análise dos dados

Após o treinamento e validação da rede, gerou-se o NDFDD pela rede treinada, no ano de 2006 e compararam-se esses resultados com os gerados pelo modelo nas 14 localidades em estudo. Foram feitas análises dos dados de NHFDD, gerados nas redes que tiveram como dados de entrada a temperatura média diária, a umidade relativa média diária e as duas, simultaneamente, sendo os valores do NHFDD identificados pelo modelo. Na comparação, utilizaram-se o número de Willmott, a raiz quadrada do erro médio (RSME) e o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ). O número de Willmott, também conhecido como índice  $d$  de concordância de Willmott, determina a exatidão do método e indica o grau de afastamento dos valores estimados e dos valores observados.

Após a análise dos dados de temperatura do HadCM3, segundo o cenário A2 e das condições de favorabilidade geradas pelas RNAs, foram traçados gráficos, tabelas e elaborados mapas temáticos com o objetivo de analisar a projeção das condições futuras para o desenvolvimento da ferrugem da soja.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise dos dados do Modelo de Circulação Geral-HadCM3

A variação das temperaturas médias diárias, nos meses de janeiro e julho, previstas pelo modelo de circulação geral (HadCM3), nos anos de 2020, 2050 e 2080, comparadas com as temperaturas médias diárias e calculadas nas 14 localidades, no ano de 2006, é apresentada no gráfico da Figura 2.

Na maioria das localidades, a temperatura média, no mês de janeiro de 2006, supera as temperaturas médias previstas para os anos de 2020 e 2050, de acordo com o HadCM3. Para o ano de 2080, as temperaturas são maiores que a dos outros anos, na maioria das localidades. O modelo de circulação geral não mostra uma tendência definida de elevação da temperatura no mês de janeiro, nem no mês de julho. Neste modelo há também uma predominância da temperatura das localidades no ano de 2006 superior às geradas pelo HadCM3 nos 3 anos projetados.

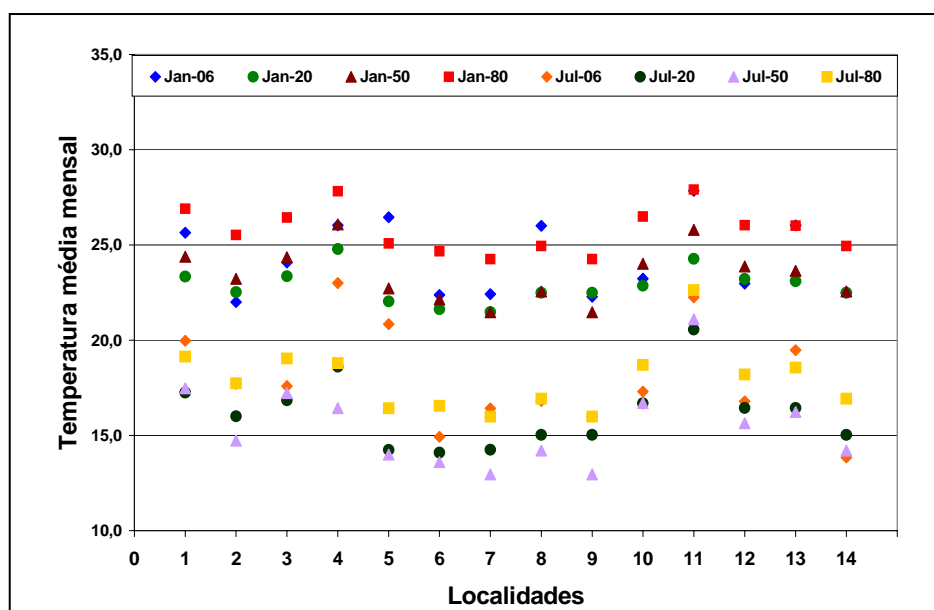


Figura 2 – Temperatura média mensal nos meses de janeiro e julho, medida para 2006 e projetada, pelo HadCM3, para os anos de 2020, 2050 e 2080, nas 14 localidades.

Nas figuras 3 e 4, são apresentadas, para fins de comparação, as temperaturas médias mensais, calculadas a partir das medidas das estações meteorológicas de Viçosa e de Machado, respectivamente, no ano de 2006, e as projetadas pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080, nessas duas localidades. Nestes dois casos, as temperaturas do ano de 2006 são, aproximadamente, iguais às de 2020 para Viçosa, mas, inferiores nos anos de 2050 e 2080, mostrando uma tendência de elevação, que alcança até 7,1°C no mês de novembro, no ano de 2080 em relação ao ano de 2006. Para Machado, a temperatura média mensal mostrou sempre uma tendência de aumento ao longo dos anos, chegando à maior elevação da temperatura de 7,4°C de 2006 a 2080 no mês de novembro.

A mesma comparação pode ser realizada para a umidade relativa média mensal, nas 14 localidades, em janeiro e julho, no ano de 2006, sendo as umidades relativas calculadas pelas temperaturas médias e mínimas diárias do HadCM3, nos anos de 2020, 2050 e 2080 (Figuras 5 e 6).

No mês de janeiro, há uma tendência para aumento da UR com o tempo, na maioria das localidades do Estado. Estes resultados mostram condições propícias ao desenvolvimento do fungo. Considerando-se apenas a variável UR, essas condições estariam aumentando com o tempo, o que também pode ser observado para a temperatura média mensal, em algumas localidades (Figura 2). Para o mês de julho, em algumas regiões, a umidade relativa tende a aumentar, enquanto em outras, há uma tendência de queda. Nas regiões onde a umidade diminui nos anos de 2020 e 2050, nota-se que ela volta a aumentar em 2080. No caso de Viçosa, a queda na umidade relativa no mês de julho coincide com a tendência de aumento da temperatura. Este aumento de temperatura é crítico a partir 2080, quando a temperatura se aproxima da ideal para o fungo se desenvolver. Isto pode ser visto nas figuras 3 e 7, que apresentam a variação da temperatura e da umidade relativa ao longo dos anos analisados. Na Figura 8, observa-se a marcha anual da UR para Araxá, nos anos de 2006, 2020, 2050 e 2080, não caracterizando grandes variações nas projeções futuras. Para a região de Araxá, o comportamento é semelhante ao de Viçosa, ou seja, UR aumenta

em janeiro e diminui nos outros meses mais quentes. Vale ainda destacar que, em Araxá, no período de julho a setembro, a UR tende a aumentar com o tempo, mas a temperatura não apresenta esta tendência, tendo inclusive uma tendência de queda, o que não aumentaria a favorabilidade para a ferrugem se desenvolver.

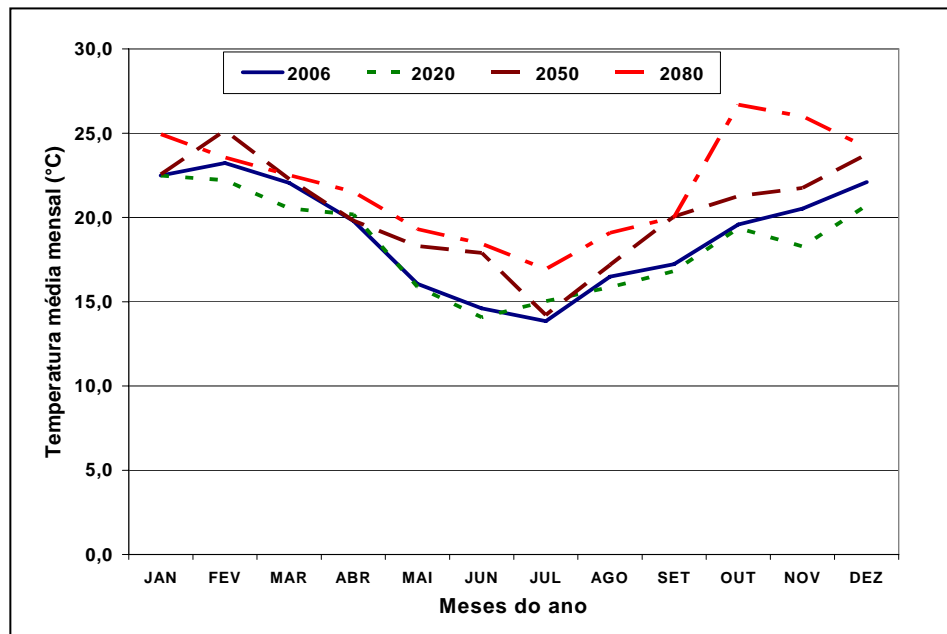


Figura 3 – Temperatura média mensal em Viçosa, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.

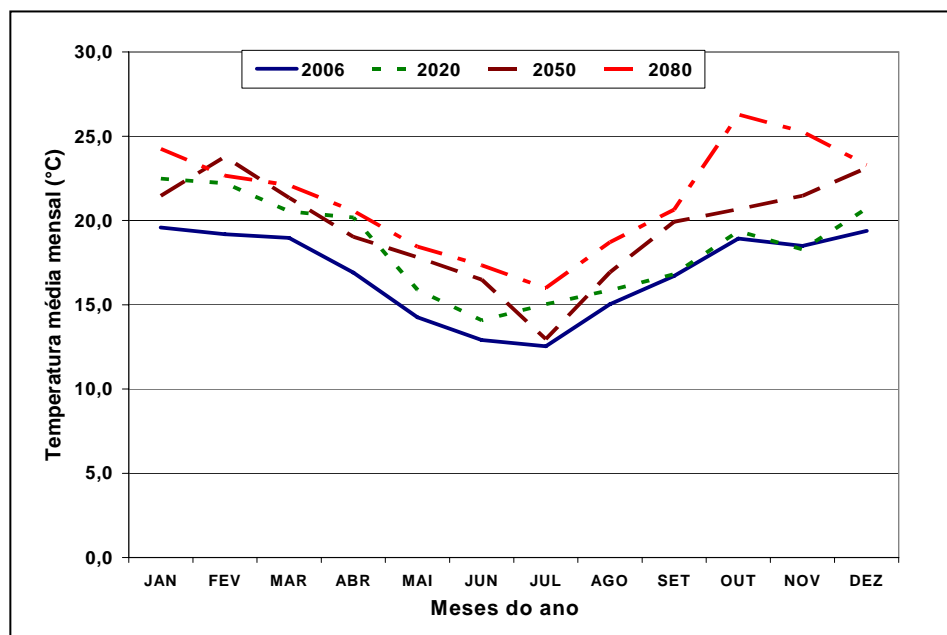


Figura 4 – Temperatura média mensal em Machado, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.

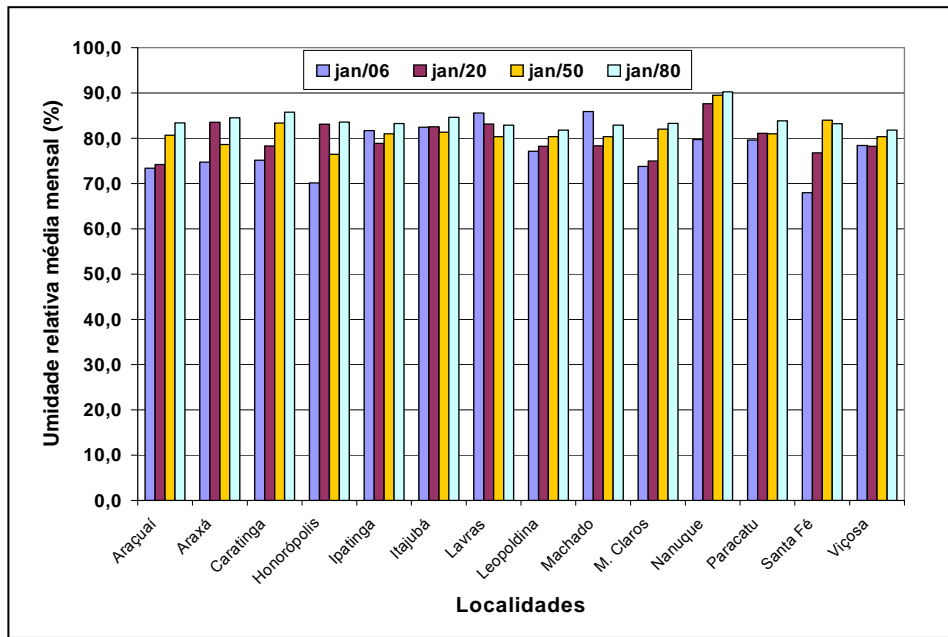


Figura 5 – Umidade relativa média mensal, no mês de janeiro, nas localidades em estudo, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.

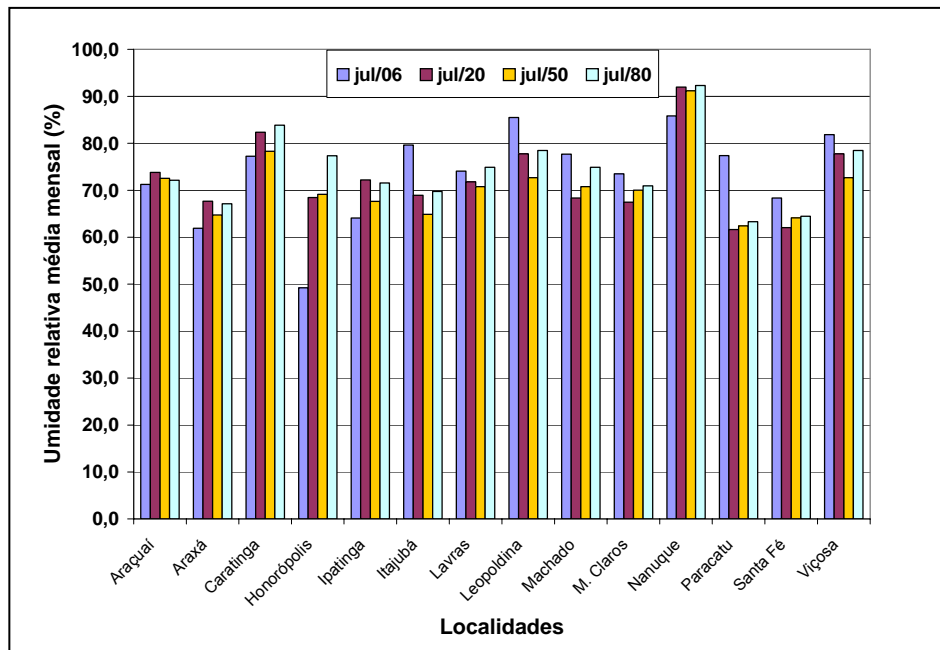


Figura 6 – Umidade relativa média mensal, no mês de julho, nas localidades em estudo, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.

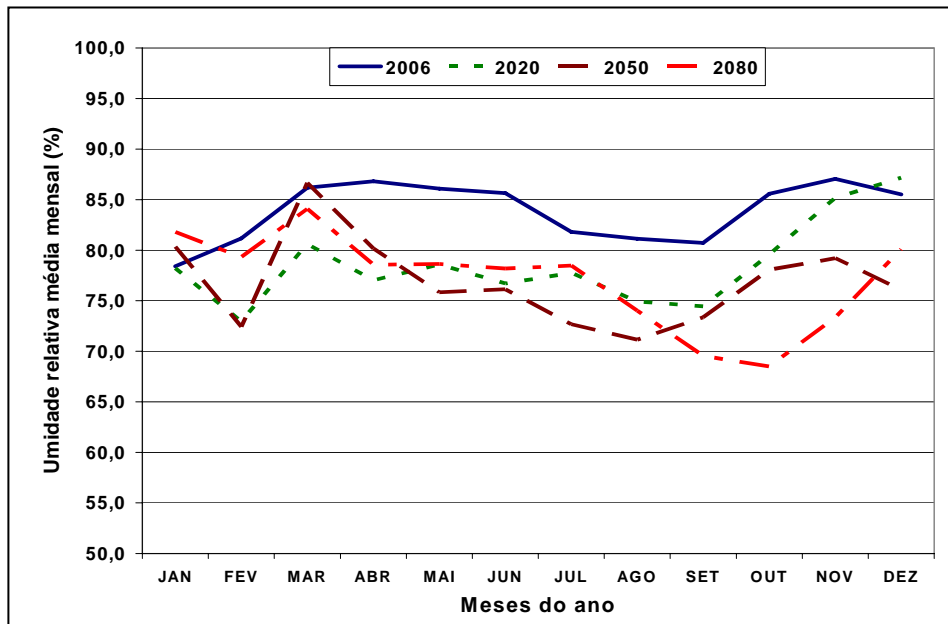


Figura 7 – Umidade relativa média mensal para Viçosa, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.

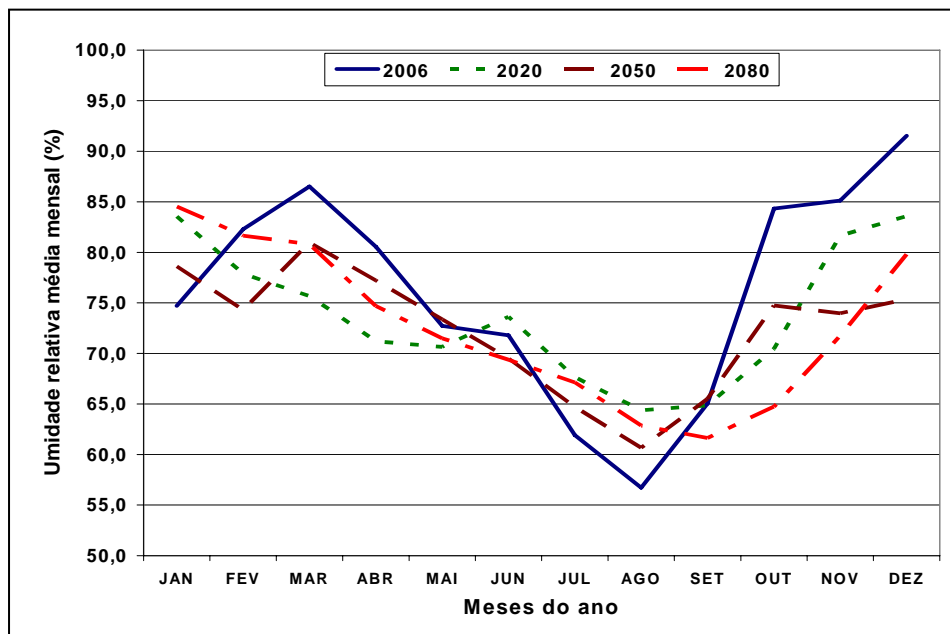


Figura 8 – Umidade relativa média mensal para Araxá, medida em 2006 e projetada pelo HadCM3 para os anos de 2020, 2050 e 2080.

### 3.2. Análise dos NDFDD identificados pelo modelo e gerados pelas RNAs

O NDFDD foi identificado no ano de 2006, de acordo com o modelo proposto, ou seja, temperatura na faixa de 18,0°C a 25,0°C e umidade relativa maior ou igual a 90,0%, com os valores das temperaturas e umidades medidas nas estações meteorológicas. A partir das temperaturas projetadas pelo HadCM3 no ano de 2006, foram gerados os NDFDD, pelas redes neurais, de temperatura, de umidade relativa e de temperatura e umidade relativa juntas. Fez-se uma análise desses resultados, comparando os valores identificados pelo modelo com os gerados pelas RNAs, calculando-se o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), a raiz quadrada do erro médio (RSME) e o número de Willmot ( $d$ ) (tabela 1).

Tabela 1 – Comparação dos NDFDD no ano de 2006, identificados pelo modelo, com dados das estações e gerados pelas RNAs com as projeções do HadCM3

RNA	RSME	$d$	$r$
Temperatura média diária	1,93	0,73	0,78
Umidade relativa média diária	2,02	0,26	0,61
Temperatura e umidade relativa média diária	1,61	0,56	0,72

A comparação das três redes neurais com o modelo, no ano de 2006, mostra que a rede neural, que foi treinada com a temperatura média diária, correlacionou-se melhor com os resultados do modelo. O coeficiente de correlação de Pearson e o número de Willmott para esta rede foram os mais altos. A raiz quadrada do erro médio (RSME) para a rede de temperatura média teve valor intermediário, em relação às outras redes. O melhor desempenho da rede neural com a variável temperatura justifica sua utilização na geração de NDFDD, nos anos de 2020, 2050 e 2080.

Nos gráficos das figuras 9, 10 e 11, pode-se observar o NDFDD, nos meses de janeiro, abril e agosto, em todas as localidades, identificados pelo

modelo para o ano de 2006 e os gerados pelas RNAs de temperatura, projetada pelo modelo HadCM3 para o cenário A2.

Para o mês de janeiro, há uma clara tendência de aumento da favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem, principalmente nos anos de 2020 e 2050 (Figura 9). Observando a variação da temperatura nas regiões em estudo, não há aumento bem definido em todas elas (Figura 2). Por outro lado, mesmo a temperatura não aumentando, ela se manterá na faixa ideal para o desenvolvimento do fungo. Possivelmente, o aumento do NHFDD nos anos de 2050 e 2080, é devido ao aumento da umidade relativa, em quase todas as regiões nesses anos, o que pode ser observado na Figura 5. É interessante que, na região do município de Honorópolis, localidade 4 (destacada com a cor verde), o NHFDD foi pequeno em janeiro de 2006, aumentando muito em 2020 e 2050 e decrescendo em 2080. Isso pode ser entendido, analisando-se a variação da temperatura nesses anos. A temperatura média em janeiro foi 26,0°C em 2006, caindo para 24,8°C em 2020, aumentando para 26,1°C em 2050 e chegando a 27,8°C em 2080. Esta temperatura média em 2080 diminui a favorabilidade à ocorrência da ferrugem. Quanto à umidade relativa, aumentou ao longo dos anos. Isso pode explicar o aumento da favorabilidade, em 2020 e 2050. Em 2080, mesmo a umidade relativa sendo elevada, a temperatura ultrapassa a faixa superior de favorabilidade, fazendo com que esta decresça.

No mês de abril, ainda ocorrem temperaturas ideais ao desenvolvimento da ferrugem asiática. A favorabilidade tende a aumentar, gradualmente, chegando a um número maior de dias favoráveis em 2080, devido ao aumento tanto na temperatura quanto na umidade relativa (Figura 10). No mês de agosto que, atualmente não é, um período com grande favorabilidade, ocorre um aumento desta no ano de 2080. Nota-se que, em várias regiões onde não havia favorabilidade em agosto, mesmo em 2020, ela aparece nos anos de 2050 e 2080. Nesse caso, há uma elevação de temperatura nessas regiões. Este contraste pode ser observado na Figura 11, em que a temperatura sobe e o NDFDD aumenta.

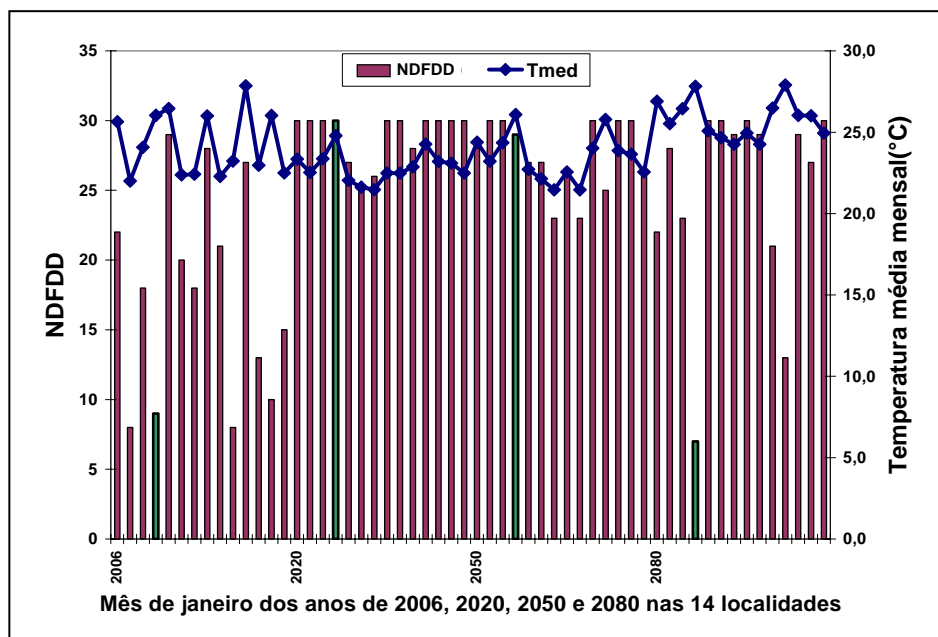


Figura 09 – NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, nas 14 localidades, no mês de janeiro.

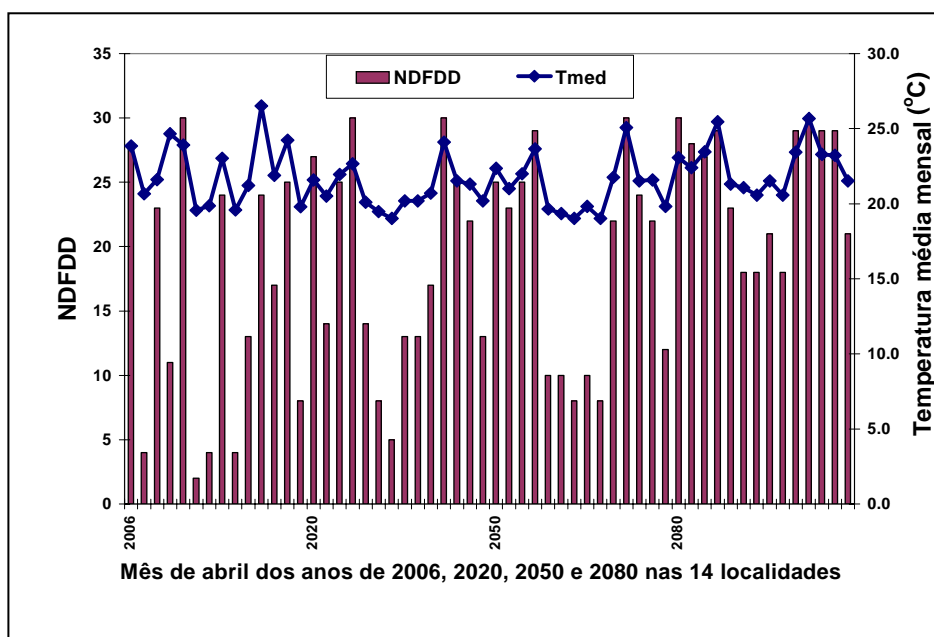


Figura 10 – NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, nas 14 localidades, no mês de abril.

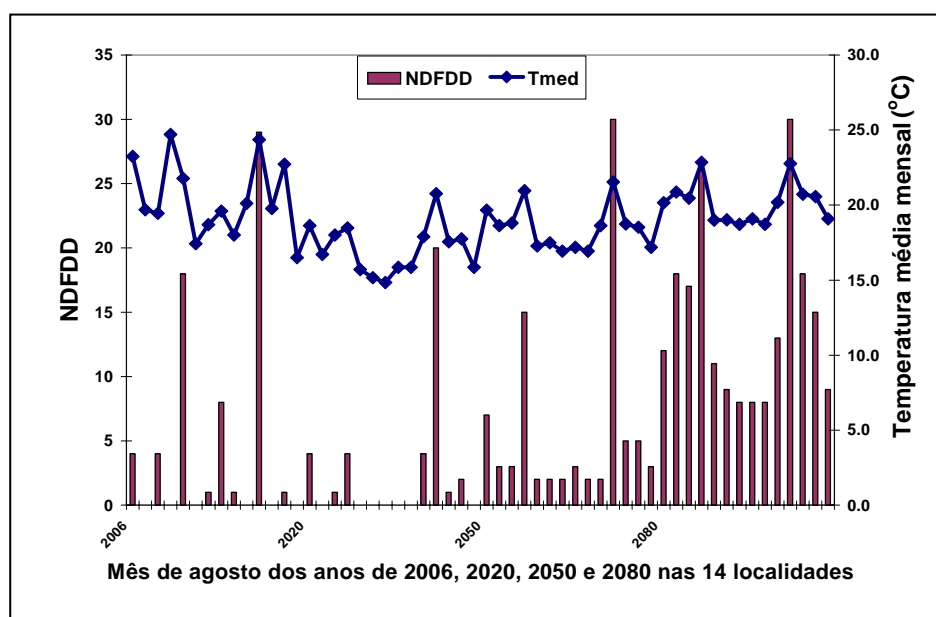


Figura 11 – NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, nas 14 localidades, no mês de agosto.

As figuras 12 e 13 apresentam a favorabilidade para as regiões de Viçosa e Araxá, nos anos de 2006, 2020, 2050 e 2080. Evidencia-se uma tendência de aumento da favorabilidade, nas duas regiões, em quase todos os meses do ano. Mesmo em alguns meses (maio, junho, julho e agosto), quando não havia sequer um dia com favorabilidade em 2006, esta aparece em 2050 e 2080. Estas variações podem melhor ser compreendidas, analisando-se os gráficos das figuras 14 e 15. Nestes gráficos, observa-se, para as mesmas regiões, o NDFDD ao longo dos anos de 2006, 2020, 2050 e 2080, simultaneamente com a temperatura média mensal. Nos picos de ocorrência das maiores temperaturas, observa-se também o maior NDFDD. Na Figura 15, observa-se que, no mês de julho, a temperatura média mensal em 2080 ainda não é suficientemente elevada para criar as condições de favorabilidade. Estes resultados evidenciam que o plantio da soja, no meio do ano, tende a inviável, pois, há uma tendência nítida para aumento da favorabilidade, a partir de agosto, em todas as regiões.

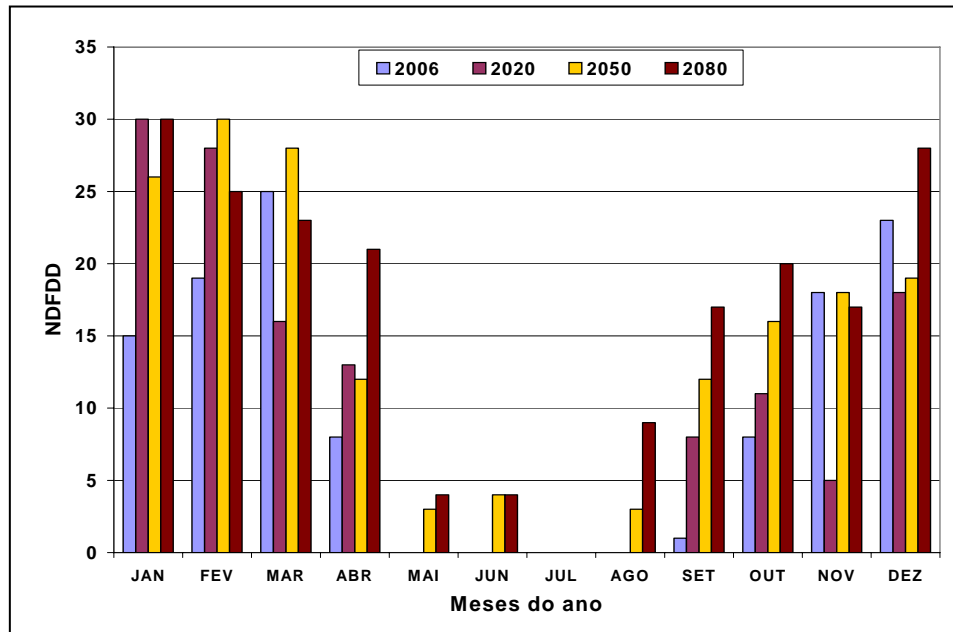


Figura 12 – NDFDD em Viçosa no ano 2006, identificado pelo modelo e, nos anos de 2020, 2050 e 2080, gerado pela RNA.

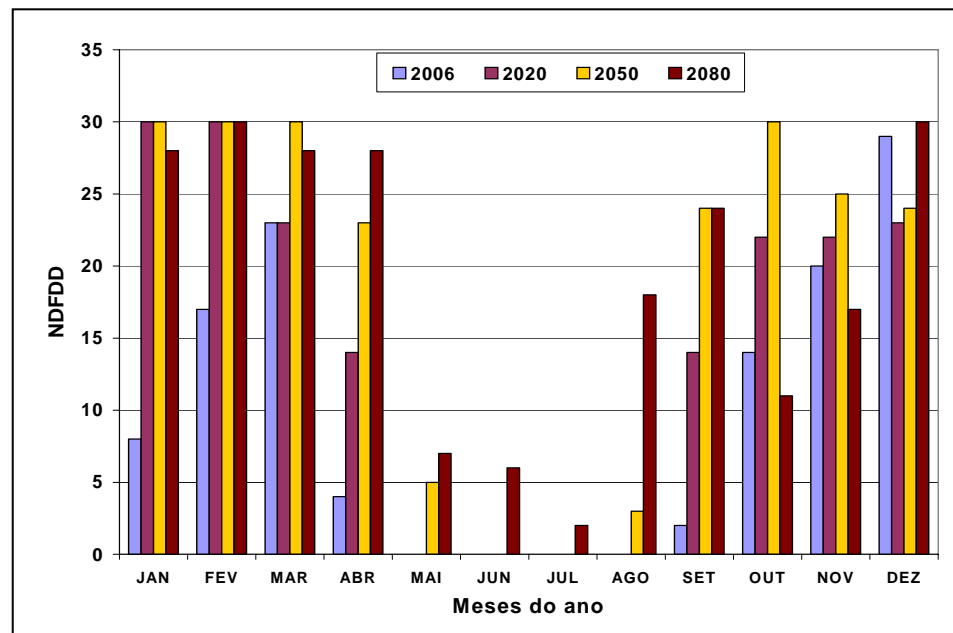


Figura 13 – NDFDD em Araxá no ano de 2006, identificado pelo modelo e, nos anos de 2020, 2050 e 2080, gerado pela RNA.

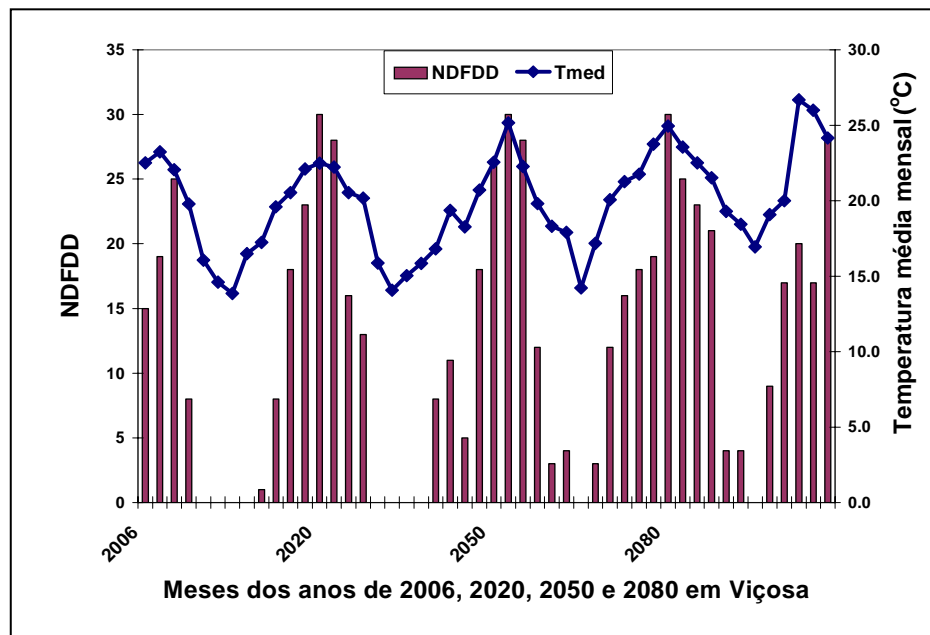


Figura 14 – NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, em Viçosa.

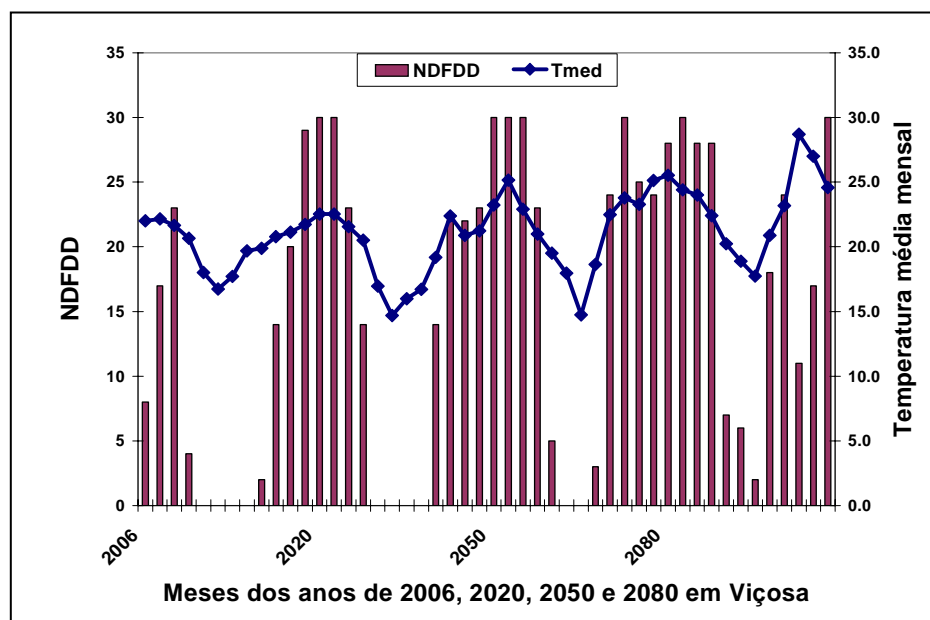


Figura 15 – NDFDD identificado pelo modelo em 2006 e gerado pela RNA para 2020, 2050 e 2080 e a temperatura média mensal, em Araxá.

Para se ter uma visão panorâmica e temporal da favorabilidade, mapas do Estado de Minas Gerais foram elaborados, a partir das condições favoráveis para o desenvolvimento da ferrugem, identificadas pelo modelo no ano de 2006 e, nas condições projetadas nos anos de 2020, 2050 e 2080 pelo HadCM3. Os mapas foram gerados para os meses de janeiro, março, agosto e novembro destes mesmos anos (Figuras 16 e 17).

No mês de janeiro, a favorabilidade aumenta em 2020, em todas as regiões do Estado. Em 2050, há ligeira redução na região Sul. Em 2080, há uma queda na favorabilidade, principalmente, no Triângulo Mineiro, influenciada pelo aumento de temperatura nessa região, o que dificultará o desenvolvimento do fungo causador da ferrugem. Essa análise foi realizada, quando foram discutidos resultados para Honorópolis, município localizado no Triângulo Mineiro. No mês de março, a favorabilidade diminui na Zona da Mata e no sul de Minas em 2020, voltando a aumentar em 2050, tendo nova queda em 2080, provavelmente, devido ao aumento da temperatura neste ano. No mês de agosto, a favorabilidade aumenta em todas as regiões ao longo dos anos. É um aumento mais lento, mas constante. Em novembro, ocorre uma tendência de diminuição da favorabilidade. Entretanto, esta queda não contribui para a melhoria das condições de cultivo da soja, pois, o número de dias favoráveis ainda é elevado, com 12,0 dias no mínimo, na maioria das regiões (Figura 17). Vale destacar que o NDFDD é menor em 2080, exatamente, na região do Triângulo, que é o maior produtor de soja no Estado

A ocorrência de doenças em plantas depende de uma série de fatores e a avaliação das condições de favorabilidade ao seu desenvolvimento é o primeiro fator a ser observado, pois, caso as condições não sejam favoráveis, ou melhor, o clima seja inapto ao desenvolvimento de uma doença, não há necessidade de se avaliar outros fatores.

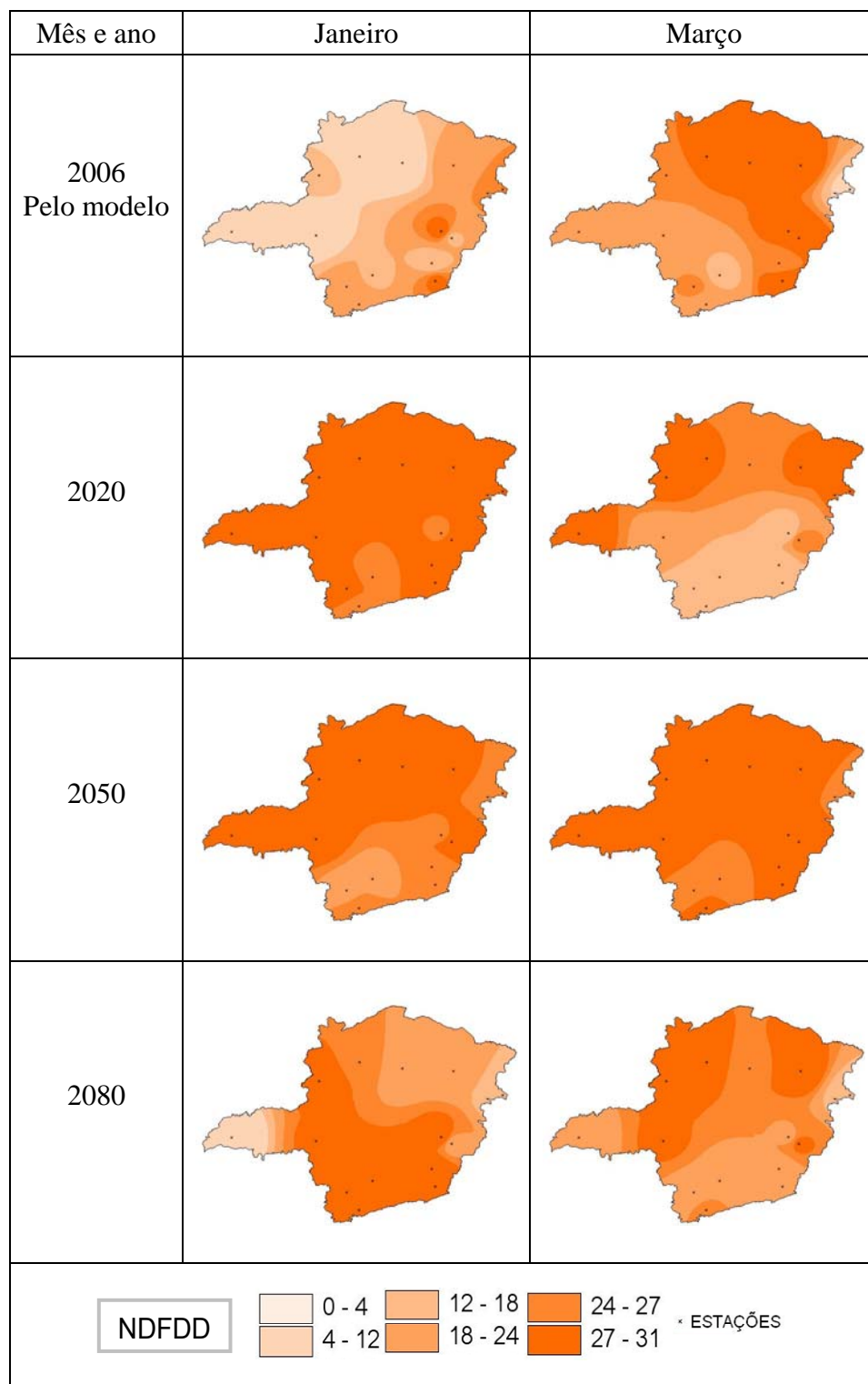


Figura 16 – NDFDD nos meses de janeiro e março de 2006, identificado pelo modelo e as projeções pelas temperaturas do HadCM3 nos anos de 2020, 2050 e 2080.

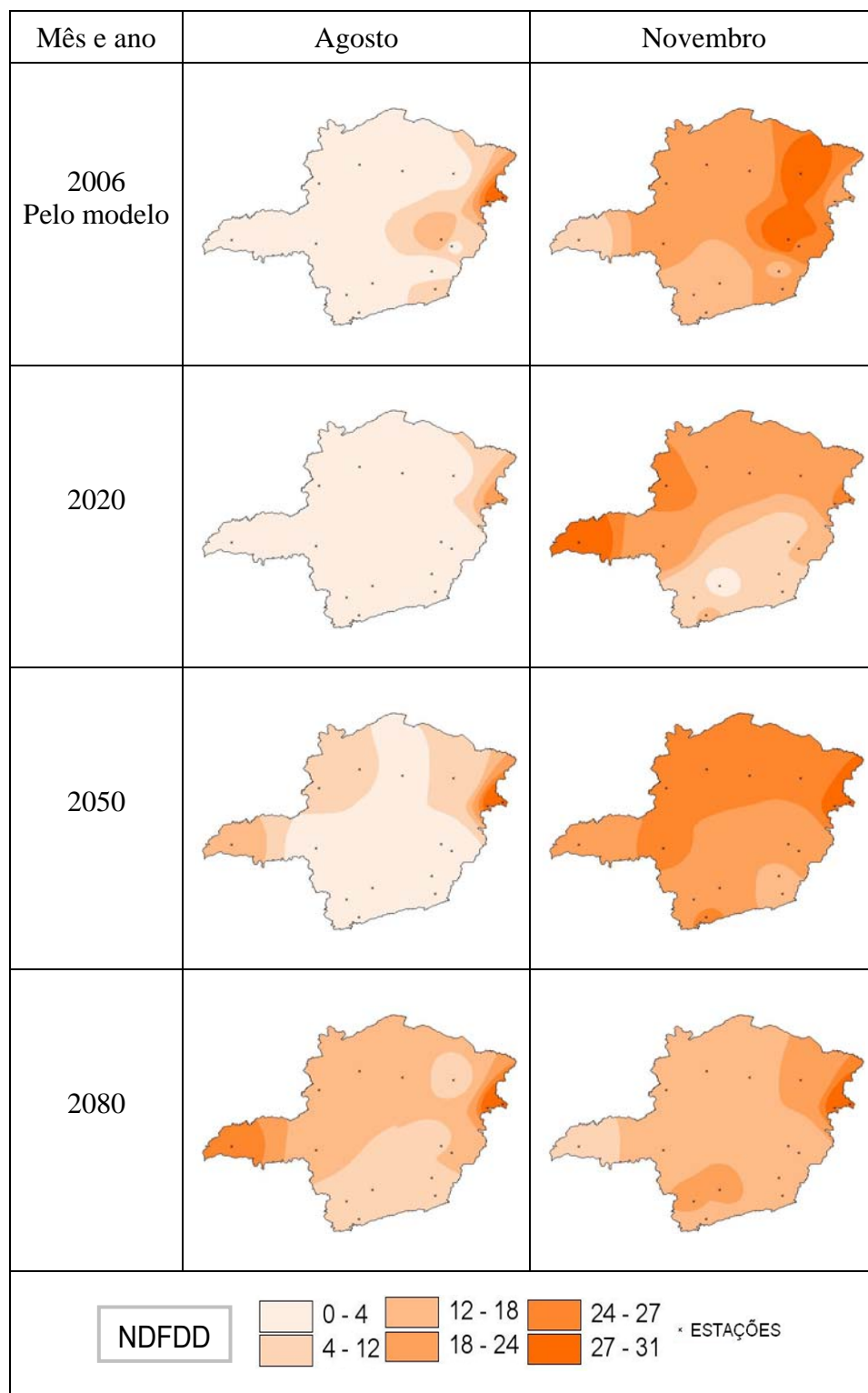


Figura 17 – NDFDD nos meses de agosto e novembro de 2006, identificado pelo modelo e as projeções pelas temperaturas do HadCM3 nos anos de 2020, 2050 e 2080.

## CONCLUSÕES GERAIS

- Em todas as regiões do Estado de Minas Gerais, os meses de julho e agosto são os que apresentaram as piores condições ao desenvolvimento da ferrugem, devido às baixas temperaturas. O período que apresentou as condições mais favoráveis à doença, devido às altas temperaturas e umidades relativas, estende-se de outubro a abril, com maior ou menor intensidade, em todo o Estado.
- O modelo que definiu uma faixa de temperatura ideal ao desenvolvimento da ferrugem asiática da soja pode ser empregado em estudos de outras doenças. Portanto, trata-se de um modelo útil também ao estudo de outros patógenos e culturas.
- O modelo de identificação das condições favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem asiática respondeu bem aos experimentos de campo, evidenciando o início da doença, tanto no experimento realizado em Uberlândia quanto em Viçosa.
- As redes neurais artificiais mostraram-se uma boa opção para a investigação das condições de favorabilidade ao desenvolvimento de doenças em plantas.
- A variação na temperatura e na umidade relativa do ar possibilita inferir que há uma tendência de mudança na favorabilidade ao desenvolvimento da ferrugem asiática, em algumas regiões do Estado de Minas Gerais. Inicialmente haverá um aumento da favorabilidade nos anos de 2020 e 2050, ocorrendo queda em algumas regiões em 2080, principalmente pela elevação da temperatura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARVAL, P. K.; KALRA, N.; CHANDER, S.; PATHAK, H. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. **Agricultural Systems**, v.89, p.1-25, 2006.

ANUÁRIO BRASILEIRO DA SOJA 2000. **Brazilian Soybean Yearbook**. Passo Fundo: Palloti, 2000, p.8.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JR.; ÁVILA, A. M. H. de. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.11, p.1057-1064, 2004.

BATCHELOR, W. D.; YANG, X. B.; TSCHANZ, A. T. Development of a neural network for soybean rust epidemics. **American Society of Agricultural Engineers**, v.40, p.247-252, 1997.

BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L. **Doenças de Plantas tropicais: Epidemiologia e controle econômico**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1996.

BRAGA, A. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 262p.

BUCENE, L. C.; RODRIGUES, L. H. A. Utilização de redes neurais artificiais para avaliação de produtividade do solo, visando classificação de terras para irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p.1-6, 2004.

CHAKRABORTY, S.; TIEDEMANN, A. V.; TENG, P. S. Climate change: potential impact on plant diseases. **Environmental Pollution**, v.108, p.317-326, 2000a.

CHAKRABORTY, S.; PANGGA, I. B.; LUPTON, A.; HART, L.; ROOM, P. M.; YATES, D. Production and dispersal of *Colletotrichum gloeosporioides* spores on *Stylosanthes scabra* under elevated CO<sub>2</sub>. **Environmental Pollution**, v.108, p.381-38, 2000b.

COAKLEY, S. M.; SCHERM, H. Plant disease in changing global environment. **Aspects of Applied Biology**, v.45, p.277-238, 1996.

CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F.; FERNADES, J. M. C.; DEL PONTE, E.; PASINATO, A. **Construindo a necessária capacidade de lidar com as mudanças climáticas globais e respectivos impactos em agricultura e na alimentação**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. 6 p. Disponível em: <[http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p\\_do35.htm](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do35.htm)>. Acesso em 11 de dez. 2006.

DEL PONTE, E. M.; GODOY, C.V.; CANTERI, M.G.; REIS, E. M.; YANG, X. B. Models and applications for risk assessment and prediction of Asian soybean rust epidemics. **Fitopatologia Brasileira**, v. 31, p.533-544, 2006.

DEL PONTE, E. M.; GODOY, C.V.; LI, X.; YANG, X. B. Predicting severity of Asian soybean rust epidemics with empirical rainfall models. **Phytopathology**, v. 96, p.797-803, 2006.

DELGADO, R. C. **Avaliação de modelos físico-matemáticos para estimativa da umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor a partir de dados de temperatura do ar**. 2007. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2007.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de Produção de Soja, Região Central do Brasil, 2007**. Londrina, 2006. 225 p. Disponível em: <[www.cnpso.embrapa.br](http://www.cnpso.embrapa.br)>. Acesso em: 11 set. 2007.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de Produção de Soja, Paraná, 2007. Londrina, 2006**. 220p. Disponível em: <[www.cnpso.embrapa.br](http://www.cnpso.embrapa.br)>. Acesso em: 11 set. 2007.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de Produção de Soja, Região Central do Brasil, 2005**. Londrina, 2005. 220 p. Disponível em: <[www.cnpso.embrapa.br](http://www.cnpso.embrapa.br)>. Acesso em: 11 dez. 2006.

FERRANTI, J. S.; CHAVES, A. P.; FREITAS, A. A. C. Estimativa da umidade relativa do ar por meio da seleção de variáveis e redes neurais artificiais visando prevenir a ocorrência da ferrugem asiática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 5., 2005, Londrina. **Anais eletrônicos**... Disponível em: <<http://www.uel.br/eventos/agroinformatica>>. Acesso em 22/08/2007.

FRANCL, L. J.; PANIGRAHI, S. Artificial neural network models of wheat leaf wetness. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.88, p.57-65, 1997.

GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 2005. 104p.

GILLESPIE, T.J.; KIDD, G. E. Sising duration of leaf moisture retention using electrical impedance grids. **Canadian Journal Plant Science**, v.58, p.289-295, 1984.

GILLESPIE, T. J.; SRIVASTAVA, B.; PITBLADO, R. E. Using operational weather data to schedule fungicide sprays on tomatoes in southern Ontario, Canada. **Journal of Applied Meteorology**, v.32, p.567-573, 1993.

GODOY, C. V.; KOGA, L. J.; CANTERI, M. G. Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. **Fitopatologia Brasileira**, v.31, p.63-68, 2006.

GONÇALVES, D. L.; DUCHINSKI, M. V.; MATHIAS, I. V.; GUIMARAES, A. M.; DIAS, A. H.; TSUKAHARA, R. Y. Sistema inteligente para tratamento de dados de molhamento foliar por orvalho na cultura do trigo - PMNEURAL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 5., 2005, Londrina. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.uel.br/eventos/agroinformatica>>. Acesso em 22 ago. 2007.

GOUDRIAM, J.; ZADOKS, J. C. Global climate change: Modelling the potential responses of agro-ecosystems with special reference to crop protection. **Environmental Pollution**, v.87, p.215-224, 1994.

HAMADA, E.; GHINI, R.; GONÇALVES, R. R. V. Efeito da mudança climática sobre problemas fitossanitários de plantas: metodologia de elaboração de mapas. **Engenharia Ambiental**, v.3, n.2, p.73-85, 2006.

HAYKIN, S. **Redes Neurais – Princípios e Prática**. Tradução: Paulo Martins Engel. 2 ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2001. 900p.

HIBBERD, J. M.; WHITBREAD, R.; FARRAR, J. F. Effect of 700  $\mu\text{mol mol}^{-1}$   $\text{CO}_2$  and infection with powdery mildew on the growth and carbon partitioning of barley. **New Phytologist**, v.134, p.309-315, 1996.

HUBER, L.; GILLESPIE, T. J. Modelling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. **Annual Review of Phytopathology**, v.30, p.553-557, 1992.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): **Climate Change 2001: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press: Cambridge, 21 p, 2001.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press: Cambridge, 18 p, 2007a.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge University Press: Cambridge, 23 p, 2007b.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements**. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990. n.70. 332p.

KIM, K. S.; TAYLOR, S. E.; GLEASON, M. L.; VILLALOBOS, R.; ARAUZ, L. F. Estimation of leaf wetness duration using empirical models in northwestern Costa Rica. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.129, p. 53-67, 2005.

KIM, K. S.; GLEASON, M. L.; TAYLOR, S. E. Forecasting Site-Specific Leaf Wetness Duration for Input to Disease-Warning Systems. **Plant Disease**, v.90, p.650-656, 2006.

LELIS, V. P. **Molhamento foliar - Uma investigação para a cultura do café**. 1986. 87f. Tese (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.

LOPEZ, G.; RUBIO, M. A.; MART'YNEZ, M.; BATLLES, F. J. Estimation of hourly global photosynthetically active radiation using artificial neural network models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, p.279-291, 2001.

LUO, Q.; BELLOTTI, W.; WILLIAMS, M.; BRYAN, B. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.132, p.273-285, 2005.

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

MADEIRA, A.; KIM, K.S.; TAYLOR, S. E.; GLEASON, M. L. A simple cloud-based energy balance model to estimate dew. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.111, p.55-63, 2002.

MANNING, W. J.; TIEDEMANN, A. V. Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), ozone(O<sub>3</sub>), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. **Environmental Pollution**, v.88, p.219-245, 1995.

MARCHETTI, M. A.; MELCHING, J. S.; BROMFIELD, K. R. The effects of temperature and dew period on germination and infection by uredospores of *Phakopsora pachyrhizi*. **Phytopathology**, v.66, p.461-463, 1975.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos Sobre a Biodiversidade**. Brasília: Versão Digital. 2006. 201 p.

MATHIAS, I. M.; GUIMARÃES, A. M.; DIAS, A. H.; CATÂNEO, A.; YOTI TSUKAHARA, R. Avaliação de redes neurais artificiais na estimativa da duração do período de molhamento foliar por orvalho na cultura do trigo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 5., 2005, Londrina. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.uel.br/eventos/agroinformatica>>. Acesso em 22 ago. 2007.

MONTEITH, J. L.; BUTLER, D. R. Dew end thermal lag: a model for cocoa pods. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.105, p.207-215, 1979.

OLIVEIRA, A. C. B.; GODOY, C. V.; MARTINS, M. C. Avaliação da tolerância de cultivares de soja à ferrugem asiática no Oeste da Bahia. **Fitopatologia Brasileira**, v. 30. p. 658-662, 2005.

ORSINI, J.M. **Use of regional climate models in impacts assessments and adaptations studies from continental to regional and local scale: The CREAS initiative in South America.** Disponível em: < [www.iaa.usp.br/artigos](http://www.iaa.usp.br/artigos)>. Acesso em 24 de ago. 2007.

OVANDO, G.; BOCCO, M.; SAYAGO, S. Redes Neuronales para modelar predicción de heladas. **Agricultura Técnica**, v.65. n.1, p. 65-73, 2005.

PAVAN, W. **Técnicas de engenharia de software aplicadas à modelagem e simulação de doenças de plantas.** 2007. 140 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2007.

PEDRO JÚNIOR, M. J.; GILLESPIE, T. J. Estimating dew duration. I-Utilizing micrometeorological data. **Agricultural Meteorology**, v.25, p.283-296, 1982a.

PEDRO JÚNIOR, M.; GILLESPIE, T. J. Estimating dew duration. II- Utilizing standard weather station data. **Agricultural Meteorology**, v.25, p.297-310, 1982b.

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 neuronais. **Fitopatologia Brasileira**, v.27, p.517-524, 2002.

PINTO, A. C. S. **Sistemas Especialistas para diagnose e manejo de problemas fitossanitários e redes neuronais para descreverem epidemias da ferrugem do café.** 2001. 91 f. Tese (Doutorado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

PIVONIA, S.; YANG, X. B. Assessment of the potencial year-round establishment of soybean rust throughout the world. **Plant Disease**, v.88, p.523-529, 2004.

PIVONIA, S.; YANG, X. B. Assessment of epidemic potential of soybean rust in the United States. **Plant Disease**, v.89, p.678-682, 2005.

POZZA, E. A. **Desenvolvimento de sistemas especialistas e redes neuronais e suas aplicações em fitopatologia.** 1998. 139 f. Tese (Doutorado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

RAO, P. S.; GILLESPIE, T. J.; SCHAAF SMA, A. W. Estimating wetness duration on maize ears from meteorological observations. **Canadian Journal Plant Science**. v.78, p.149-154, 1998.

REIS, E. F. **Controle químico da ferrugem asiática na região sul do Paraná**. 2005. 53 f. Tese (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SCHERM, H.; SUTHERST. R. W.; HARRINGTON, R.; INGRAN, J. S. I. Global networking for assessment of impacts of global change on plant pests. **Environmental Pollution**, v.108, p.333-341, 2002.

SEEM, R. C.; MAGAREY, R. D.; ZACK, J. W.; RUSSO, J. M. Estimating disease risk at the whole plant level with General Circulation Models **Environmental Pollution**, v. 108, p. 389- 395, 2000.

SENTELHAS, P. C. **Duração do Período de molhamento foliar: Aspectos operacionais da sua medida, variabilidade espacial em diferentes culturas e sua estimativa a partir do modelo de Penman Monteith**. 2004. 161 f. Tese. (Livre Docência em Agrometeorologia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; MONTEIRO, J. E. B. M.; ROWLANDSON, T. Estimating leaf wetness duration on a cotton crop from meteorological data. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.12, n.2, p.235-245, 2004.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; GLEASON, M. L.; MONTEIRO, J. E. B. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDRO JR., M. J. Evaluation of a Penman–Monteith approach to provide “reference” and crop canopy leaf wetness duration estimates. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.141, p.105–117, 2006.

SILVA, A. F.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. Previsão da evapotranspiração de referência utilizando redes neurais artificiais. **Engenharia na Agricultura**, v.14, p.93-99, 2006.

TATIBANA, C.Y.; KAETSU, D. Y. Uma introdução às redes Neurais. **Home page de redes neurais**. Disponível em:<[http:// www.din.uem.br/ia/neurais](http://www.din.uem.br/ia/neurais)>. Acesso em 15 set. 2007.

VALADARES JUNIOR, R.; JESUS JUNIOR, W. C.; CECÍLIO, R. A. Influência das mudanças climáticas na distribuição espacial da *Mycosphaerella fijiensis* no mundo. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 443-447.

VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, L.; CHAVES, G. M. Efeito do binômio temperatura-duração do molhamento foliar sobre a infecção por *Phakopsora pachyrhizi* em soja. **Fitopatologia Brasileira**. v.15, p.200-203, 1990.

VALE, F. X. R. **Aspectos epidemiológicos da ferrugem (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow) da soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. 1985. 104 f. Tese (Doutorado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1985.

VALE, F. X. R.; JESUS JUNIOR, W. C.; ZAMBOLIM, L. **Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas**. Belo Horizonte: Perfil Editora, 2004. 532p.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1991. 449 p.

YANG, X. B.; TSCHANZ, A. T.; DOWLER, W. M.; WANG, T. C. Development of yield loss models in relation to reductions of components of soybean infected with *Phakopsora pachyrhizi*. **Phytopathology**, v.81, p.1420–1426, 1991.

YANG, X. B. Framework development in plant disease risk assessment and its application. **European Journal of Plant Pathology**, v. 115, p. 25-34, 2006.

YORINORI, J. T.; PAIVA, W. M; FREDERICK, R.D; FERNANDEZ, P.F.T. Ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi*) no Brasil e no Paraguai, nas safras 2000/01 e 2001/02. **Anais**, Congresso Brasileiro de Soja, Foz do Iguaçu, p. 94, 2002.

YORINORI, J. T.; PAIVA, M. W.; FREDERICK, R. D.; COSTAMILAN, L. M.; BERTAGNOLLI, P. F.; GODOY, C.V.; NUNES JUNIOR, J. Epidemics of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003. **Plant Disease**, v. 89, p.675-677, 2005.