

GREGORY VINÍCIUS CONOR FIGUEIREDO

**Modelo Probabilístico Bayesiano para Simular o Conhecimento de Especialistas no  
Controle da Ferrugem Asiática da Soja no Estado do Paraná**

PONTA GROSSA

2014

GREGORY VINÍCIUS CONOR FIGUEIREDO

**Modelo Probabilístico Bayesiano para Simular o Conhecimento de Especialistas no  
Controle da Ferrugem Asiática da Soja no Estado do Paraná**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, curso de Mestrado em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo Giovanetti Canteri

Co-orientação: Prof. Dr. José Carlos Ferreira da Rocha

PONTA GROSSA

2014

**Ficha Catalográfica**  
**Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG**

F475m Figueiredo, Gregory Vinícius Conor  
Modelo probabilístico Bayesiano para  
simular o conhecimento de especialistas no  
controle de ferrugem asiática da soja no  
Estado do Paraná/ Gregory Vinícius Conor  
Figueiredo. Ponta Grossa, 2014.  
65f.

Dissertação (Mestrado em Computação  
Aplicada - Área de Concentração:  
Computação para Tecnologias em  
Agricultura), Universidade Estadual de  
Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo  
Giovanetti Canteri.

Coorientador: Prof. Dr. José Carlos  
Ferreira da Rocha.

1.Ferrugem asiática. 2.Redes  
Bayesianas. 3.Engenharia de conhecimento.  
I.Canteri, Marcelo Giovanetti. II. Rocha,  
José Carlos Ferreira da. III. Universidade  
Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em  
Computação Aplicada. IV. T.

CDD: 630.2

## TERMO DE APROVAÇÃO

**Gregory Vinícius Conor Figueiredo**

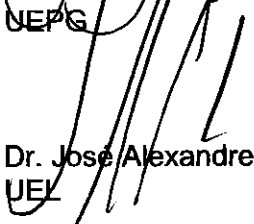
**"MODELO PROBABILÍSTICO BAYESIANO PARA SIMULAR O  
CONHECIMENTO DE ESPECIALISTAS NO CONTROLE DA FERRUGEM ASIÁTICA  
DA SOJA NO PARANÁ"**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora

Orientador:

  
Dr. Marcelo Giovanetti Canteri  
UEL

  
Dra. Alaine Margarete Guimarães  
NEPG

  
Dr. José Alexandre França  
UEL

Ponta Grossa, 08 de setembro de 2014.

Dedico este trabalho à minha esposa Bianca e aos meus pais, Cesar e Mara, pelo amor e apoio em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por guiar meus passos até aqui.

Aos meus pais, Cesar e Mara, pelo incentivo durante toda a vida.

À Bianca, minha esposa, por me apoiar durante todo o mestrado.

Aos orientadores desse projeto, professor Canteri e professor José Carlos, pelo longo tempo dedicado e prontidão para me atender sempre que preciso.

Ao professor David e ao Carlos André, que colaboraram nos testes do modelo.

## RESUMO

A ferrugem asiática é a principal patologia da cultura da soja, sendo alvo de aplicação de vários sistemas especialistas. Este trabalho teve como objetivo construir um modelo probabilístico para estimar a necessidade e número de aplicações de fungicida no controle da ferrugem asiática da soja no Paraná utilizando o formalismo de redes bayesianas e engenharia de conhecimento. A engenharia do modelo foi desenvolvida através de entrevistas com especialistas e também por meio da revisão da literatura, resultando em uma rede Bayesiana construída com o auxílio do software GeNIe 2.0, onde foram definidas as variáveis, a estrutura do grafo e as tabelas de probabilidade condicional de cada variável, determinando as influências entre elas. Os testes realizados para a validação do modelo foram acompanhados por dois especialistas entrevistados, que aprovaram o modelo a partir de casos de teste propostos. Os resultados apresentados mostraram que o modelo desenvolvido representa com rigor o conhecimento do especialista que acompanhou seu desenvolvimento, apresentando consenso comum entre os demais especialistas entrevistados para a primeira aplicação de fungicida, mas divergindo para aplicações adicionais.

Palavras-chave: Ferrugem asiática, Redes Bayesianas, Engenharia de Conhecimento.

## **ABSTRACT**

The Asian rust is the main pathology of soybean culture, what makes it the object of several expert systems. This work aimed to build a probabilistic model to estimate the need and number of fungicide applications to control soybean Asian rust in Paraná using the Bayesian network formalism and knowledge engineering. The model engineering was accomplished by interviews with experts and also by the literature review, what produced a Bayesian network built with the aid of software GeNIe 2.0, where the variables, graph structure and conditional probability table of each variable were defined, what determined the influences between them. The tests made to evaluate the model were accompanied by two interviewed experts, who approved the model through proposed test cases. The results presented showed that the developed model rigorously represent the knowledge of the expert who accompanied its development, presenting common consensus among the other interviewed experts for the first fungicide application but diverging for the extra ones.

Key-words: Asian Rust, Bayesian Networks, Knowledge Engineering.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Folha de soja com ferrugem asiática.....	14
Figura 2: Representação gráfica de um sistema especialista.....	18
Figura 3: Rede Bayesiana com tabelas de probabilidade condicional.....	20
Figura 4: Topologia serial, convergente e divergente para redes bayesianas .....	23
Figura 5: Modelo para estimar a aplicação de fungicidas.....	28
Figura 6: Sub-rede para a primeira aplicação de fungicida.....	31
Figura 7: Sub-rede de aplicações adicionais .....	42
Figura 8: Probabilidades de valores para a variável $A1$ , dadas evidências para as variáveis $C$ e $IP$ .....	49
Figura 9: Valor da variável $A2$ dadas as evidências fornecidas pelo Especialista I.....	50
Figura 10: Probabilidades de valores para a variável $A1$ dadas as evidências fornecidas pelo Especialista III .....	51
Figura 11: Modelo para estimar a perda decorrente da ferrugem asiática .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis do modelo de aplicação de fungicida.....	29
Tabela 2: TPC para o nó <i>PT</i> .....	34
Tabela 3: TPC para a variável <i>C</i> .....	34
Tabela 4: TPC para a variável <i>OLV</i> .....	35
Tabela 5: TPC para a variável <i>MV</i> .....	35
Tabela 6: TPC para a variável <i>ACE</i> .....	35
Tabela 7: TPC para o nó <i>EF</i> .....	35
Tabela 8: TPC para o nó <i>PA</i> .....	35
Tabela 9: TPC para a variável <i>ES</i> .....	35
Tabela 10: TPC para a variável <i>VS</i> .....	35
Tabela 11: TPC para a variável <i>SS</i> .....	35
Tabela 12: TPC para variável <i>CI</i> .....	35
Tabela 13: TPC para a variável <i>G</i> .....	35
Tabela 14: TPC para a variável <i>OP</i> .....	35
Tabela 15: TPC para a variável <i>CA</i> .....	36
Tabela 16: TPC para a variável <i>CC</i> .....	37
Tabela 17: TPC para a variável <i>IPV</i> .....	37
Tabela 18: TPC para a variável <i>IP</i> .....	38
Tabela 19: TPC para a variável <i>I</i> .....	39
Tabela 20: TPC para a variável <i>CPS</i> .....	39
Tabela 21: TPC para a variável <i>D</i> .....	40
Tabela 22: TPC para a variável <i>AI</i> .....	42
Tabela 23: TPC para a variável <i>TC</i> .....	43
Tabela 24: TPC para a variável <i>FA1</i> .....	44
Tabela 25: TPC para a variável <i>PAI</i> .....	45
Tabela 26: TPC para a variável <i>A2</i> .....	45
Tabela 27: TPC para a variável <i>EM</i> .....	46
Tabela 28: TPC para a variável <i>A3</i> .....	47

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. OBJETIVOS .....	11
1.2. JUSTIFICATIVA.....	11
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1. FERRUGEM ASIÁTICA.....	13
2.1.1. Ferrugem Asiática no Estado do Paraná .....	15
2.1.2. Redução das Perdas Causadas pela Ferrugem Asiática .....	16
2.2. SISTEMAS ESPECIALISTAS.....	17
2.3. REDES BAYESIANAS .....	19
2.4. ENGENHARIA DE CONHECIMENTO.....	21
2.5. ENGENHARIA DE CONHECIMENTO DE REDES BAYESIANAS .....	22
2.5.1. Modelos noisy-OR e noisy-MAX.....	23
2.5.2. Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas à Ferrugem Asiática .....	25
3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO .....	27
3.1. MODELO QUALITATIVO PARA APLICAÇÃO DE FUNGICIDA.....	27
3.1.1. Sub-rede para a primeira aplicação de fungicida.....	31
3.1.2. Sub-rede para as aplicações adicionais.....	33
3.2. MODELO QUANTITATIVO PARA APLICAÇÃO DE FUNGICIDA.....	34
3.2.1. Tabelas de probabilidade condicional da sub-rede da primeira aplicação.....	34
3.2.2. Tabelas de probabilidade condicional da sub-rede de aplicações adicionais.....	42
4. VALIDAÇÃO SOBRE O MODELO DE APLICAÇÃO DE FUNGICIDAS .....	48
4.1. VALIDAÇÃO UTILIZANDO CASOS DE TESTES .....	48
5. DISCUSSÃO.....	54
6. CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
APÊNDICE A – Questionário para entrevista .....	63
APÊNDICE B – Casos de teste gerados pelo GeNIe .....	64

## 1. INTRODUÇÃO

A ferrugem asiática, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, conhecida no Oriente desde 1914, é a doença mais devastadora da soja em regiões tropicais e subtropicais (KAWUKI *et al.*, 2004). No ocidente, a ferrugem foi reportada primeiramente em 1976, em Porto Rico, e segundo (ANDRADE & ANDRADE, 2002) chegou ao Brasil ainda na década de setenta, sendo identificada, a princípio, em soja perene (*Glycine wightii*) e feijão de lima (*Phaseolus lunatus*) e, posteriormente, em soja (*Glycine max*) em Lavras, MG, no ano de 1979.

A doença causa uma redução significativa na produção da soja. O seu progresso é influenciado por fatores bióticos e abióticos (ALVES *et al.*, 2011). Entre os fatores bióticos destacam-se: a interação agente patogênico-hospedeiro, a germinação de esporos, a penetração do agente no hospedeiro, a colonização (multiplicação e persistência do agente no hospedeiro) e a esporulação, que é o processo reprodutivo do fungo. Os principais fatores abióticos são: o meio ambiente, temperatura e umidade. Uma vez que o progresso da doença é influenciado por uma série de fatores, a previsão de sua ocorrência e desenvolvimento, usualmente exige a análise destes fatores por especialistas.

A fim de viabilizar e facilitar o trabalho dos profissionais, diversos autores têm proposto o desenvolvimento de sistemas especialistas para dar suporte na tomada de decisão quanto à detecção, diagnóstico e manejo da doença. Os sistemas especialistas codificam o conhecimento relativo ao domínio do problema em um modelo formal, chamado base de conhecimento. Uma vez implementado, este modelo pode ser usado para responder perguntas de instâncias do problema com o emprego de um procedimento de inferência. No que se refere à tarefa de estimar a necessidade de realização de uma ou mais aplicações de fungicida em uma lavoura de soja infectada com ferrugem asiática, o formalismo empregado na especificação da base de conhecimento deve ser capaz de representar e tratar conhecimento incerto.

Na construção de um modelo para estimar a aplicação de fungicidas no controle da ferrugem asiática, a incerteza pode surgir da existência de processos e fatores ainda desconhecidos, que contribuem ou impedem a infecção, ou de simplificações que são inerentes ao processo de elaboração do modelo. A teoria de probabilidades provê uma estratégia para o tratamento de conhecimento incerto e, neste contexto, o formalismo de redes bayesianas tem sido empregado no desenvolvimento de vários sistemas baseados em

conhecimento. Uma rede bayesiana é uma forma compacta de especificar uma distribuição conjunta de probabilidades e seus algoritmos de raciocínio automático, permitindo a realização de inferências com respeito ao estado de algumas variáveis dado um conjunto de evidências.

### 1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo probabilístico bayesiano para prever as aplicações de fungicidas necessárias para controle da ferrugem asiática, em plantações de soja no estado do Paraná. Para tanto, é proposto o desenvolvimento de um modelo que codifique o conhecimento do domínio explicitando as relações probabilísticas entre os fatores relevantes para a infestação usando técnicas de engenharia de conhecimento e o formalismo das redes bayesianas.

O os objetivos específicos deste trabalho são:

- Identificar o conhecimento necessário para a tarefa;
- Adquirir este conhecimento a partir de entrevistas com especialistas e estudo de referencial bibliográfico.
- Explicitar o conhecimento em um modelo formal.
- Validar o modelo através de casos de teste.

### 1.2. JUSTIFICATIVA

A cultura da soja representa uma das principais atividades econômicas mundiais, tendo o Brasil como seu segundo maior produtor, atrás apenas dos Estados Unidos (KREUTZ *et al.*, 2014). A ferrugem asiática é uma das doenças mais agressivas para essa cultura. O controle da doença é realizado através de uma ou mais aplicações de fungicidas ao longo do ciclo da cultura, o que é influenciado por fatores como: umidade, temperatura, previsão do tempo, corrente aérea, entre outros. Tais fatores podem aumentar ou diminuir a eficiência de controle de um fungicida, como também a favorabilidade para desenvolvimento da ferrugem asiática, ditando o número de aplicações.

O número de aplicações de fungicida em uma lavoura de soja varia de região para região, mas em geral os produtores superestimam a quantidade de aplicações a fim de diminuir o risco de perda de produção, por mais que esta prática não seja recomendada. Tendo em vista este cenário, o desenvolvimento deste trabalho é justificado tanto sob o ponto de

vista do produtor, quanto do pesquisador, pois realizando uma estimativa correta da real necessidade de aplicação do fungicida, o impacto de tais produtos na natureza será menor e também pode gerar economia para o produtor, pois gastará menos em aplicações de fungicidas e manterá a produção de soja sem perdas significativas causadas pela ferrugem asiática.

O desenvolvimento de modelo que apresenta a relação entre fatores que influenciam a ferrugem asiática e a aplicação de fungicidas com a possibilidade de atualização do conhecimento, se mostra interessante, pois especialistas podem visualizar a modelagem e sugerir melhorias. Para desenvolver o modelo foi escolhida a técnica de redes bayesianas devido ao fato deste formalismo permitir a representação do conhecimento incerto usando a abordagem probabilística.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para atingir os objetivos do trabalho. Inicialmente, a fitopatologia conhecida como ferrugem asiática da soja é abordada considerando aspectos como: infestação, custo, disseminação, danos e controle. Em seguida, é apresentada uma revisão sobre os sistemas especialistas, tratamento de incerteza e redes bayesianas.

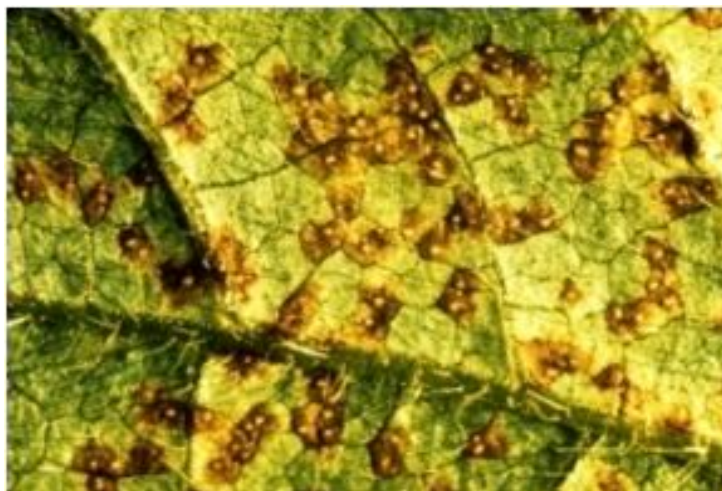
No que se refere ao formalismo de redes bayesianas, são abordados temas como: estrutura de dados, semântica probabilística, procedimentos de inferência e a regra da decisão bayesiana. Também é abordado o tema da engenharia de conhecimento e elaboração de modelos usando redes bayesianas. Finalmente, são apresentados trabalhos que usaram técnicas de inteligência artificial para construir sistemas especialistas aplicados à agricultura.

### 2.1. FERRUGEM ASIÁTICA

A ferrugem asiática, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, causa reduções significantes na produção de culturas da soja no hemisfério oriental, nos locais onde sua ocorrência é reportada (POSADA-BUITRAGO & FREDERICK, 2005). Apesar de ter origem no oriente, descobertas demonstraram que a doença se espalhou para novas regiões geográficas, como África e Américas. Em 2001, após a primeira infestação no Paraguai e no estado do Paraná, a ferrugem espalhou-se rapidamente pelo Brasil, disseminada exclusivamente pelo vento, o que tornou impossível sua contenção (YORINORI, 2004).

Apenas no ano de 2003, o custo estimado da doença para produtores no Brasil foi de aproximadamente 1,2 bilhões de dólares, sendo 500 milhões em perdas diretas da produção e 700 milhões resultantes do uso inapropriado de fungicidas.

Entre os sintomas mais comuns da ferrugem asiática da soja estão lesões de coloração palha a marrom avermelhada ou manchas com uma ou mais urédias, sendo os sintomas iniciais caracterizados por lesões pequenas que gradualmente aumentam de tamanho, podendo aparecer nos pecíolos, vagens, ramos e principalmente na superfície inferior das folhas (ANDRADE & ANDRADE, 2002), como pode ser observado na Figura 1.



**Figura 1: Folha de soja com ferrugem asiática**

**Fonte: Agrolink. Disponível em <http://www.agrolink.com.br/culturas/soja/ferrugem.aspx>. Acesso em: 05/07/2012**

Estudos demonstram que as epidemias mais severas da doença são observadas em áreas onde as temperaturas médias diárias são menores que 28°C, com longos períodos de molhamento foliar ou até mesmo precipitação ocorrendo por toda a safra. Condições secas ou temperaturas médias diárias menores que 15°C e maiores que 30°C são inibidoras para o desenvolvimento da doença. Temperaturas de 20 a 25°C somadas a disponibilidade de água livre na superfície da planta são condições ótimas para o desenvolvimento da ferrugem, possibilitando a infecção no período de seis horas após a deposição do esporo. O molhamento foliar influencia diretamente na ocorrência da doença, sendo que quanto maior o período de molhamento, maior a chance de estabelecimento da infecção (ANDRADE & ANDRADE, 2002).

A disseminação dos esporos da doença pode ocorrer tanto para lavouras vizinhas quanto para longas distâncias, através do vento. Não há evidências de que o fungo possa ser transmitido via sementes.

Dentre os danos causados pela doença, podem ser destacados:

- a) Destruição dos tecidos foliares, provocando a redução da atividade fotossintética.
- b) Queda prematura das folhas, evitando a plena formação dos grãos.
- c) Aborto e queda das vagens em casos de ataques mais severos.
- d) Redução do peso e do número de sementes e vagens.

Para controlar eficientemente a ferrugem asiática, é recomendada a utilização de fungicidas dos grupos dos triazóis, das estrobilurinas e carboxamida, com pulverizações



realizadas logo no início da infecção. Aplicações tardias, quando a doença já atingiu o terço superior da planta, se mostram ineficazes.

### **2.1.1. Ferrugem Asiática no Estado do Paraná**

O Paraná é o segundo maior produtor de soja do Brasil, sendo que as áreas de maior produção encontram-se nas regiões norte, oeste, sul, meio oeste, sudeste e nordeste. Por ser um grande produtor de soja, somado ao fato de apresentar condições favoráveis para o desenvolvimento do *Phakopsora pachyrhizi*, a ferrugem asiática representa uma doença de alto risco para o estado (JULIATTI, 2006).

A incidência da ferrugem asiática vem sendo observada no estado do Paraná, mais especificamente na região dos Campos Gerais, desde 1998, entretanto sem saber qual espécie estava ocorrendo. Em 2001, foi observada uma incidência severa da ferrugem asiática na soja de inverno, cultivar Conquista, na região de Foz do Iguaçu a Guairá.

Nos anos de 2001 e 2002, campos infectados foram observados em cerca de 60% da área de produção de soja no Brasil, especialmente nos estados das regiões sul e sudeste. No Paraná, a doença foi observada em campos de Ortigueira, Tamarana, Guarapuava e em alguns campos da região dos campos gerais. Estudos realizados em Tamarana e Ponta Grossa resultaram na criação de emergência dos primeiros fungicidas para o controle do *Phakopsora pachyrhizi*.

Na estação de 2002/2003, houve pouca incidência da ferrugem no Paraná. Nesta mesma estação, várias instituições de pesquisa agrícola iniciaram campanhas de alerta da doença, preparando *workshops* para sua identificação e estratégias de controle para a comunidade agrícola. De acordo com um estudo realizado, as perdas com a ferrugem asiática, incluindo perda de grãos, gastos com fungicidas e impostos, foram de aproximadamente \$1,29 bilhão.

Já na estação de 2003/2004, houve um aumento de 10,2% na área de soja plantada, mas com um declínio observado de 16% da produtividade. No Paraná, no início da estação, temperaturas médias somadas a chuvas frequentes favoreceram surtos mais cedo de ferrugem. Na região sul do estado, incidências expressivas da doença foram observadas causando perdas principalmente em campos que não estavam protegidos por fungicidas.

Nos anos de 2004 a 2005, um drástico período de seca afetou o potencial das fazendas do Paraná, estimando-se uma perda de 16%, equivalente a aproximadamente 1,5 milhão de toneladas. Com relação à ferrugem asiática, houve uma concentração de esforços

para estabelecer uma estratégia de monitoramento em todas as áreas de produção do Brasil, culminando em um encontro em Londrina, em outubro de 2004, com a criação do Consórcio Antiferrugem.

### **2.1.2. Redução das Perdas Causadas pela Ferrugem Asiática**

Existem duas espécies do fungo *Phakopsora* que causam a ferrugem da soja: a *P. meibomiae*, responsável pela ferrugem americana, que ocorre desde Porto Rico, no Caribe, até o sul do estado do Paraná, raramente causando perdas; e a *Phakopsora pachyrhizi*, responsável pela ferrugem asiática, que causa severas perdas em todas as regiões que apresentam condições favoráveis para seu desenvolvimento (YORINORI, 2004).

O patógeno *Phakopsora pachyrhizi* apresenta grande agressividade, sendo conhecido por possuir múltiplos genes virulentos, o que caracteriza uma complicação para a resistência à ferrugem. Como consequência, a tolerância tem sido focada em mecanismos como a resistência parcial, que ocorre em situações onde a taxa de desenvolvimento da doença é retardada em um genótipo particular, e a tolerância no próprio manejo da doença (OLOKA *et al.*, 2009).

No continente americano, principalmente no Brasil, que apresenta condições ambientais favoráveis para o desenvolvimento da epidemia, o impacto da ferrugem asiática é bastante relevante. No país, somente na estação de 2003/2004 as perdas econômicas ocasionadas pela doença foram estimadas em mais de \$2 bilhões por ano. Devido a isto, fungicidas passaram a ser aplicados rotineiramente em plantações de soja comerciais, com média de duas aplicações durante o período reprodutivo (SCHERM *et al.*, 2009).

A aplicação de fungicida mostra-se eficaz contra a ferrugem asiática, entretanto, seu uso entre produtores com poucos recursos é limitado pelo alto custo e também pela falta de conhecimento técnico (OLOKA *et al.*, 2009). Deste modo, faz-se necessário outro método para minimizar as perdas decorrentes da ferrugem asiática, como a tolerância à ferrugem, ou seja, a habilidade de rendimento da soja mesmo sob o stress causado pela doença. Tal técnica caracteriza-se como uma estratégia que seleciona linhagens com maior potencial de produção e menor perda com a ferrugem (KAWUKI *et al.*, 2004).

No Brasil, no ano de 2002, 452 cultivares foram testadas nas regiões sul e centro-sul do país, sendo que as cultivares: BRS-134, BRSMS-Bacuri, CS 201 (Esplendor) e FT-17 (Bandeirantes) mostraram-se resistentes, e as cultivares Campos Gerais, FT-2, FT-3, KI-S 601

e OCEAPAR 7 (Brilhante) mostraram moderadamente resistentes quando isolados com o *P. pachyrhizi* (YORINORI, 2004).

Além da tolerância de cultivares e aplicação de fungicidas, outras medidas podem ser elencadas para o controle da ferrugem (YORINORI, 2004):

- Semear cultivares no início da época recomendada para cada região a fim de escapar do período de maior potencial do inoculo do fungo.
- Evitar cultivos adensados, onde há espaçamento reduzido entre os cultivos.
- Realizar monitoramento da lavoura desde o início do crescimento da soja para tomada de providências logo aos primeiros sinais da doença.

Por se tratar de uma doença imprevisível, dependendo principalmente de condições climáticas e proximidade da fonte do inoculo, é fundamental que produtores e técnicos estejam sempre alertas, monitorando continuamente as lavouras para que a doença seja detectada logo nos primeiros sintomas.

## 2.2. SISTEMAS ESPECIALISTAS

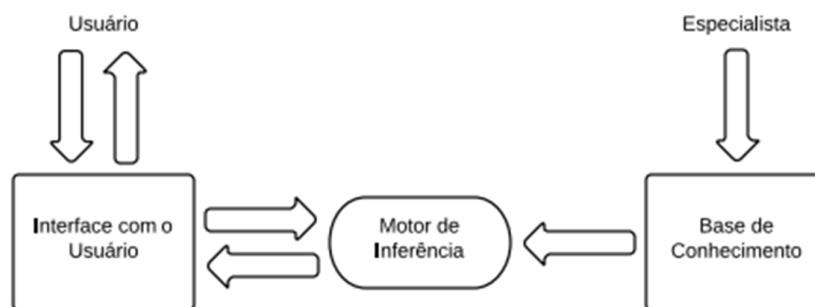
Um SE – Sistema Especialista – é um sistema computacional capaz de representar e raciocinar sobre o conhecimento de um domínio a fim de resolver problemas e fornecer informação (MONTAZER *et al.*, 2009). Os SE podem oferecer soluções computacionais para problemas de domínio específico que requerem habilidades e conhecimentos especializados e em situações em que nenhuma solução algorítmica é viável.

Sistemas especialistas têm sido utilizados em diversas áreas, incluindo aplicações nas quais estruturas são aprendidas a partir de dados e aplicações com estruturas construídas manualmente (NEAPOLITAN, 2003). Dentre as áreas de aplicação estão biologia (HIGUERA *et al.*, 2013), negócios e finanças (NEDOVIĆ & DVEDZIC, 2002), medicina (OSUAGWU & OKAFOR, 2010) e agricultura (DEVRAJ & JAIN, 2011).

Tais sistemas possuem as seguintes características (McKINION & LEMMON, 1985):

- Heurística: Aplicam raciocínio formal e crítico para a resolução de problemas.
- Transparência: Habilidade de explicar e justificar sua linha de raciocínio.
- Flexibilidade: Conhecimento do domínio específico separado dos procedimentos de inferência para que a atualização do conhecimento seja realizada de modo consideravelmente mais fácil do que a programação convencional.

A Figura 2 apresenta a arquitetura básica de um sistema especialista. Nela estão destacados os três principais componentes de um SE: a base de conhecimento, o motor de inferência e a interface com o usuário (DOLUSCHITZ & SCHMISSEUR, 1988). O primeiro componente, a base de conhecimento, contém um modelo formal que codifica de uma forma simbólica o conhecimento dos fatos, relacionamento e decisões. O segundo componente é o mecanismo de inferência, que utiliza procedimentos de raciocínio automático para a realização de deduções lógicas e interpreta o conhecimento contido na base de conhecimento, combinando-o com informações fornecidas pelo usuário, com o objetivo de resolver problemas. A interface com o usuário, terceiro componente, possibilita a interação do usuário com o sistema especialista através da entrada de dados e saída de conclusões.



**Figura 2: Representação gráfica de um sistema especialista**

Como mostra (DOLUSCHITZ & SCHMISSEUR, 1988), a agricultura tem sido foco de aplicação de sistemas especialistas já há algum tempo, onde a construção do sistema permite a possibilidade da junção do conhecimento de diferentes domínios, como o conhecimento de pesquisadores altamente qualificados com o de agricultores experientes.

O raciocínio realizado sobre um modelo, seja ele qual for, requer o uso de algumas simplificações, já que o mundo real é muito complexo para ser representado fielmente. Esta simplificação do mundo real, por omitir certas informações, gera incerteza.

Um dos modos de representação de modelos é a utilização de lógica de primeira ordem. Ao trabalhar com conhecimento incerto, a utilização da lógica de primeira ordem irá falhar por três razões principais: Preguiça, já que dará muito trabalho listar o conjunto completo de causa e consequência para garantir regras que não possuam exceção, além de as regras geradas se tornarem muito difíceis de serem usadas; Ignorância Teórica, pois a teoria para o domínio provavelmente será incompleta; e Ignorância Prática, pois mesmo sabendo todas as regras, pode existir incerteza para casos particulares, pois nem todos os testes foram ou podem ser realizados (RUSSELL & NORVIG, 2003).

Neste caso, os agentes do conhecimento podem proporcionar, no máximo, um grau de crença para sentenças relevantes, cuja principal ferramenta se baseará na teoria probabilística, a qual atribui um grau de crença entre 0 e 1 para cada sentença.

Os sistemas especialistas que se utilizam da probabilidade como medida para tratamento de incerteza, são conhecidos como sistemas especialistas probabilísticos, como os modelos de redes probabilísticas, onde se encontram as redes Bayesianas (CASTILLO *et al*, 1998).

### 2.3. REDES BAYESIANAS

As redes bayesianas são provenientes do teorema de Bayes, que diz o seguinte: considerando várias causas independentes  $C_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n_c$ ), as quais podem produzir um efeito  $E$ , assume-se que sabendo a probabilidade inicial das causas  $P(C_i)$  e a probabilidade condicional da  $i$ -ésima causa a produzir o efeito  $P(E|C_i)$ , a fórmula de Bayes é:

$$P(C_i|E) = \frac{P(E|C_i)P(C_i)}{\sum_{i=1}^{n_c} P(E|C_i)P(C_i)}$$

onde para um único evento observado (efeito), a probabilidade de isso ter acontecido devido a  $i$ -ésima causa é proporcional a probabilidade da causa vezes a probabilidade da causa para produzir o efeito (D'AGOSTINI, 1995).

Uma rede bayesiana é um grafo acíclico direcionado onde os nós representam as variáveis do problema e os arcos são as relações de dependência condicional entre os nós conectados. Assim, seja  $X = \{X_1 \dots X_n\}$  um conjunto de variáveis aleatórias categóricas e seja  $E$  um conjunto de asserções que indicam uma relação binária informando a dependência condicional direta entre pares de variáveis. Uma rede bayesiana é um grafo  $G=(X,E)$  em que cada elemento  $X$  é um nó da rede e cada arco  $(X_i, X_j)$  pertence a  $E$ . O conjunto de pais de  $X$  em  $G$  é denotado por  $pais(X)$  (RUSSELL & NORVIG, 2003).

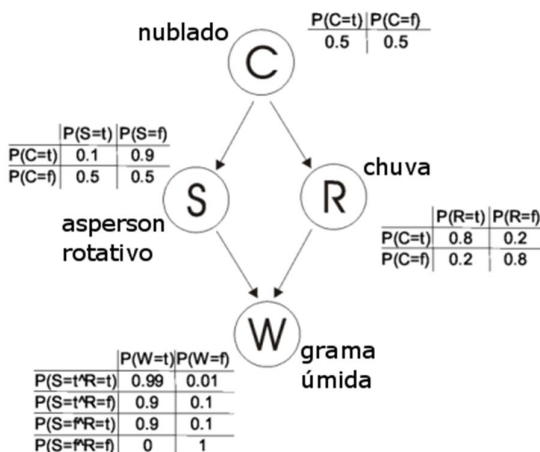
Em termos quantitativos, as relações de dependência são expressas por probabilidades condicionais. Para tanto, cada nó da rede armazena uma tabela de probabilidades condicionais (TPC) cujas entradas são da forma  $P(X_i = x_j | pais(X_j)_k)$ , em que  $x_j$  é um dos valores que podem ser assumidos por  $X_i$  e  $pais(X_j)_k$  é uma instanciação conjunta das variáveis em  $pais(X)$ . A TPC do nó armazena as probabilidades de cada valor da variável associada condicionado por cada configuração de estado de seus pais.

A estrutura do grafo representa as relações qualitativas entre as variáveis e assume uma semântica de independência que estabelece que toda variável é independente dos seus não descendentes não pais, dados os seus pais (COZMAN, 2000). Esta organização permite que a estrutura de uma rede bayesiana forneça uma descrição compacta para a distribuição das probabilidades conjuntas das variáveis em  $X$  (RUSSELL & NORVIG, 2003). Uma entrada genérica  $P(X_1 = x_1 \wedge X_2 = x_2 \wedge \dots \wedge X_n = x_n)$  da distribuição conjunta, que pode ser abreviada pela notação  $P(x_1, \dots, x_n)$ , pode ser computada pela expressão:

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \text{pais}(X_i)),$$

onde  $\text{pais}(X_i)$  denota os valores específicos das variáveis dos nós pais de  $X_i$ .

A Figura 3 mostra uma Rede Bayesiana que consiste de quatro variáveis: Nublado ( $C$ ), Aspersor Rotativo ( $S$ ), Chuva ( $R$ ) e Grama úmida ( $W$ ), onde cada uma delas possui dois estados, *true* (verdadeiro) e *false* (falso). Assim, a Figura 3 possui as tabelas  $P(C)$ ,  $P(S/C)$ ,  $P(R/C)$ ,  $P(W/S,R)$ . A variável  $C$  é raiz na rede, portanto sua TPC não é influenciada por nenhuma outra variável. As variáveis  $S$  e  $R$  possuem como pai a variável  $C$ , portanto sua distribuição de valores depende do valor de  $C$ . Finalmente, a variável  $W$ , é descendente de  $S$  e  $R$ , fazendo com que sua distribuição de valores seja afetada pelos valores de seus pais. Como toda variável em uma rede bayesiana é independente de seus não descendentes não pais, dados os seus pais,  $W$  é independente de  $C$ , dados  $S$  e  $R$ .



**Figura 3: Rede Bayesiana com tabelas de probabilidade condicional**

Fonte: Adaptado de *University of Tübingen*. Disponível em <http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/software/JCell/tutorial/ch03s03.html>. Acessado em 03/07/2012

Dada uma variável  $X_i$ , o problema de descobrir o estado provável  $X_j$  quando o estado de um conjunto de variáveis  $Z$  é conhecido é um problema de inferência que envolve a

determinação da probabilidade a posteriori<sup>1</sup>  $P(x_i/\mathbf{Z})$ , para cada valor de  $X_j$ . O cômputo deste valor é chamado de atualização de crença e pode ser resolvido por algoritmos de inferência como o de eliminação de variáveis proposto por (ZHANG & POOLE, 1996).

O software utilizado neste estudo foi o GeNIe (*Graphical Network Interface*) na versão 2.0. O GeNIe é a interface gráfica do SMILE (*Structural Modelling, Interface and Learning Engine*), uma biblioteca de classes C++ que implementa métodos de decisão teórica, como redes bayesianas e diagramas de influência. O SMILE e o GeNIe disponibilizam algoritmos como o *clustering*, proposto por (LAURITZEN & SPIEGELHALTER, 1988); poli-árvore, descrito em (REBANE & PEARL, 2013); amostragem lógica probabilística, descrito em (HENRION, 1986) e amostragem de importância heurística, descrito em (SHACHTER & PEOT, 2013).

## 2.4. ENGENHARIA DE CONHECIMENTO

A engenharia de conhecimento consiste em investigar um domínio particular, aprender quais conceitos são importantes neste domínio e, por fim, criar uma representação formal dos objetos e relações no domínio (RUSSELL & NORVIG, 2003), cabendo ao engenheiro de conhecimento a execução destas tarefas. Um grande desafio para a representação do conhecimento é a combinação de conhecimento específico e explicações do usuário com raciocínio automático e informações incertas (THIRUMURUGANATHAN & HUBER, 2011).

O processo de engenharia de conhecimento varia, dependendo do projeto, em conteúdo, escopo e dificuldades, entretanto todos podem ser resumidos nas seguintes etapas (RUSSELL & NORVIG, 2003): (a) identificação da tarefa; (b) aquisição do conhecimento relevante e (c) codificação do conhecimento geral a respeito do domínio.

A identificação da tarefa consiste em realizar o delineamento da gama de questões que a base de conhecimento irá suportar e os tipos de fatos disponíveis para cada instância de problema específico. O processo de aquisição de conhecimento é onde o engenheiro de conhecimento deve trabalhar com verdadeiros especialistas e extrair deles o conhecimento. Finalmente, a codificação do conhecimento geral a respeito do domínio realiza a representação do conhecimento adquirido em um modelo formal.

---

<sup>1</sup> Probabilidade a posteriori é uma atualização da distribuição dos valores a partir de conhecimentos anteriores (DOS SANTOS *et al.*, 2005).

A construção de um sistema especialista significa construir um modelo com capacidade de resolução de problemas comparável ao especialista no domínio, criando um modelo que ofereça resultados similares na área de interesse. A aquisição de conhecimento deve ser capaz de construir e estruturar o conhecimento mesmo quando ele não é diretamente acessível, aquele que está escondido nas habilidades do especialista, ou seja, um conhecimento que, embora seja de posse do especialista, ele não consegue articular conscientemente.

Nesta abordagem, os sistemas especialistas possuem as seguintes características (RUSSELL & NORVIG, 2003):

- a) O modelo é apenas uma representação da realidade. O objetivo é fazer do modelo uma aproximação da realidade, o que resulta em uma atividade incessante.
- b) O processo é cíclico. Novas observações podem levar a refinamentos e modificações no modelo, o que leva a novas aquisições de conhecimento.
- c) A modelagem é dependente de interpretações subjetivas do engenheiro de conhecimento, o que resulta em falhas e exige uma revisão a cada etapa, realizando comparações com o mundo real a fim de construir um modelo adequado.

## 2.5. ENGENHARIA DE CONHECIMENTO DE REDES BAYESIANAS

Uma rede Bayesiana será uma representação correta do domínio somente se cada nó for condicionalmente independente de seus predecessores na ordenação de nós, dados seus pais. Consequentemente, para construir uma rede Bayesiana com a estrutura correta para o domínio, é necessário escolher pais para cada nó de tal forma que essa propriedade se mantenha (RUSSELL & NORVIG, 2003). Esta propriedade é representada pela equação:

$$P(X_i | X_{i-1}, \dots, X_1) = P(X_i | Pais(X_i)),$$

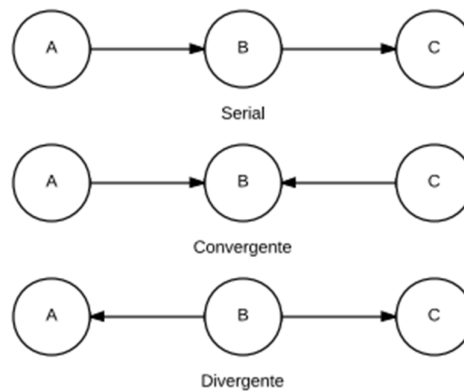
onde  $X_i$  é uma variável na rede e  $Pais(X_i) \subseteq \{X_{i-1}, \dots, X_1\}$ . Esta última condição é satisfeita identificando-se os nós em qualquer ordem consistente com a ordem parcial implícita na estrutura do grafo. A ideia é que o conjunto de pais do nó  $X_i$  devem conter todos os nós  $X_1, \dots, X_{i-1}$  que influenciam diretamente  $X_i$ .

A construção de redes bayesianas pode ser realizada utilizando a abordagem baseada no conhecimento de especialistas em determinado domínio. Existem duas etapas a ser cumpridas na engenharia de redes bayesianas: a construção do grafo (parte qualitativa da



rede) e a elicitção de valores das probabilidades condicionais (parte quantitativa da rede). As redes bayesianas mais efetivas são aquelas que combinam a estrutura qualitativa baseada no conhecimento de especialistas com a parte quantitativa identificada e revisada com dados concretos (NADKARNI & SHENOY, 2004).

O processo de construção do grafo deve ser realizado de modo a determinar qual evidência atualizará cada nó. A Figura 4 mostra três tipos de topologia identificados para redes bayesianas: serial, convergente e divergente.



**Figura 4: Topologia serial, convergente e divergente para redes bayesianas**

**Fonte: Adaptado de (NEIL *et al.*, 2000)**

Na topologia serial, o nó C é condicionalmente dependente de B e B é condicionalmente dependente de A. Fornecer uma evidência para o nó A ou C atualizará a distribuição de probabilidades de B. Entretanto, se for fornecida uma evidência para o nó B, tem-se que os nós A e C são condicionalmente independentes, dada a evidência em B. Na topologia convergente, o nó B é condicionalmente dependente dos nós A e C. Fornecer uma evidência para o nó A atualizará o nó B, mas não terá efeito sobre C. Fornecer uma evidência para o nó B e então fornecer uma evidência para A atualizará C. Neste caso, os nós A e B são condicionalmente dependentes, dada evidência em B. Na topologia divergente, os nós A e C são condicionalmente dependentes de B. Fornecer evidência para o nó B afetará A e C, mas entrar com uma evidência em A não afeta C, quando há evidência em B. Neste caso, os nós A e C são condicionalmente independentes dada evidência em B (NEIL *et al.*, 2000).

### 2.5.1. Modelos noisy-OR e noisy-MAX

Os modelos *noisy-OR* e *noisy-MAX* tem sido aplicados e se mostrado úteis em várias situações no mundo real. Estes modelos apresentam a grande vantagem de poder representar de modo suficiente a TPC, mesmo com um pequeno número de parâmetros, o que traz uma

redução significativa de esforços na elicitación de conhecimento de especialistas, melhora a qualidade das distribuições aprendidas a partir de dados e ainda reduz a complexidade espacial e temporal de algoritmos para redes Bayesianas (ZAGORECKI & DRUZDZEL, 2013).

O modelo *noisy-OR* permite representar situações em que o relacionamento entre variáveis proposicionais apresentam um mecanismo causal e cada variável possui apenas dois valores. Isto significa que a variável assume seu primeiro valor se a condição estiver presente e o segundo valor, caso contrário (NEAPOLITAN, 2003). Assim, a estrutura *noisy-OR* consiste em um modelo útil para captura de disjunções não determinísticas, sendo conveniente para descrever uma classe de relacionamentos incertos (SRINIVAS, 1993). É um tipo de interação disjuntiva que leva a uma regra de combinação amplamente aplicável. Estas interações ocorrem quando qualquer membro de um conjunto de condições é apto a causar certo evento e esta aptidão não diminui mesmo quando outras condições acontecem em simultâneo (PEARL, 1988).

Formalmente, o modelo *noisy-OR* representa interações disjuntivas de causas não determinísticas, ou seja, causas que interagem de maneira separada, independente sobre uma variável. Interações disjuntivas podem ser aproximadas em um modelo matemático baseado em duas hipóteses: responsabilidade e independência de exceção. A responsabilidade requer que um evento  $E$  seja presumido falso,  $P(E) = 0$ , caso todas as suas condições causa sejam falsas. A independência de exceção afirma que se um evento  $E$  é uma consequência típica de qualquer uma de duas condições causa  $c_1$  e  $c_2$ , o mecanismo que pode inibir a ocorrência de  $E$  dado  $c_1$  é independente do mecanismo que pode inibir  $E$  dado  $c_2$ . Somado a isso, cada exceção para um comportamento normal age como uma variável separada (ZHANG & POOLE, 1996).

O modelo *noisy-MAX* é uma generalização do modelo *noisy-OR* que permite representar nós com mais de duas condições como causa (DÍEZ, 1993). Formalmente, uma dada uma variável  $X$  com pais  $U_1, \dots, U_n$ , interage através de um modelo *noisy-MAX* quando:

$$P(X \leq x | u_1, \dots, u_n) = \prod P(X \leq x | U_i = u_i, U_j = 0 \ j \neq i),$$

que pode ser interpretada da seguinte forma: o grau alcançado por  $X$  é grau máximo produzido pelas causas agindo independentemente. Então o modelo reflete o fato de que  $X \leq x$  apenas quando cada causa alcançou  $X$  em um grau não maior que  $x$ .

### 2.5.2. Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas à Ferrugem Asiática

Esta seção apresenta estudos de inteligência artificial<sup>2</sup> que tem como foco a ferrugem asiática. O primeiro estudo traz a aplicação de redes Bayesianas no desenvolvimento de um sistema para diagnóstico de doenças de diferentes culturas, como a soja e o algodão (ZHU *et al.*, 2013). Assim como no grafo apresentado na Figura 3, as redes bayesianas são utilizadas para representar as relações entre os sintomas e as doenças. O sistema proposto possibilita um método de diagnóstico ativo, pois pode selecionar um subconjunto de sintomas que considera mais relevantes para o diagnóstico, e dinâmico, pois o modelo pode ser atualizado dinamicamente através de conhecimento adquirido através de novos dados. O método de diagnóstico ativo do modelo baseia-se no conceito de *Markov Blanket*, onde o *Markov Blanket* de uma variável  $T$ , denotada  $MB(T)$ , é o conjunto mínimo de variáveis condicionadas nas quais todas as demais variáveis são probabilisticamente independentes de  $T$ . Dada esta propriedade, o conhecimento apenas dos valores de  $MB(T)$  é suficiente para determinar a distribuição das probabilidades de  $T$ , tornando supérfluos os valores de todas as outras variáveis (TSAMARDINOS, 2003).

O modelo proposto por (ZHU *et al.*, 2013) permitiu aumentar significativamente o desempenho para o diagnóstico de doenças de diferentes culturas comparado a métodos de diagnóstico passivos e métodos que utilizam todos os sintomas para realizar o diagnóstico. O modelo apresentou uma precisão média superior a 80% para doenças da soja e superior a 90% para doenças do algodão.

ALVES *et al.* (2011) apresentam um protótipo que busca descrever a severidade do processo monocíclico da ferrugem asiática na soja sob os efeitos de três fatores: molhamento da folha, temperatura e período de dias percorridos após a inoculação do fungo usando modelos baseados na técnica *neuro-fuzzy*. Para tanto, dois sistemas híbridos de redes neurais foram desenvolvidos e treinados sobre uma base de dados de severidade de doença. A base de treinamento continha 270 casos relacionados aos efeitos da severidade da ferrugem asiática em três diferentes cultivares. Durante o treinamento foi empregado o algoritmo de aprendizagem híbrida para otimização dos parâmetros do sistema *fuzzy* utilizado para descrever a austeridade da ferrugem asiática considerando os três fatores escolhidos. Após o fim do treinamento das redes neurais, o valor do erro quadrático encontrado para o primeiro e

---

<sup>2</sup> Inteligência artificial pode ser definida sobre quatro abordagens: sistemas que pensam como humanos, que pensam racionalmente, que agem como humanos ou que agem racionalmente (RUSSELL & NORVIG, 2003).

segundo sistema, comparados com medições reais, foi de respectivamente 0,0659369 e 0,0578711.

O estudo concluiu que a abordagem *neuro-fuzzy* é capaz de descrever a severidade da ferrugem asiática na soja através dos fatores levantados e utilizados como entrada para o sistema. Devido às características das redes neurais, o sistema com 3000 etapas de treinamento obteve resultados mais precisos, podendo explicar 89,3%, 83,2% e 72,2% da severidade do processo monocíclico da ferrugem asiática para as cultivares Conquista, Savana e Suprema, respectivamente. O sistema treinado com 3 etapas apresentou resultados menos precisos, explicando 89,9%, 71,7% e 55,8% da severidade da doença para as três cultivares.

### 3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A construção do modelo apresentado nesta seção foi realizada através de entrevistas com três especialistas: o professor Dr. David Jaccoud Filho, do departamento de Fitotecnia e Fitossanidade da Universidade Estadual de Ponta Grossa, doravante chamado de Especialista I; o professor Dr. Marcelo Giovanetti Canteri, da Universidade Estadual de Londrina, doravante chamado Especialista II; e Carlos André Schipanski, coordenador de pesquisa em fitopatologia da Fundação ABC de Castro, doravante chamado Especialista III.

O modelo foi implementado em três etapas: inicialmente foram determinadas as variáveis mais relevantes para a previsão da ferrugem asiática, resultando em um modelo qualitativo para diagnóstico da ferrugem asiática desenvolvido com o apoio do Especialista I. A segunda etapa consistiu adaptação do modelo de diagnóstico para um modelo qualitativo com a função de estimar a necessidade e quantidade de aplicações de fungicidas. A última etapa foi a construção da parte quantitativa do modelo de aplicação de fungicidas. As duas últimas etapas foram realizadas através de entrevistas com o Especialista II. O Especialista II determinou os domínios que podem ser assumidos pelas variáveis do modelo, assim como as TPCs para cada uma delas.

A rede Bayesiana foi implementada utilizando o software GeNIe (DRUZDZEL, 1999), na versão 2.0.

#### 3.1. MODELO QUALITATIVO PARA APLICAÇÃO DE FUNGICIDA

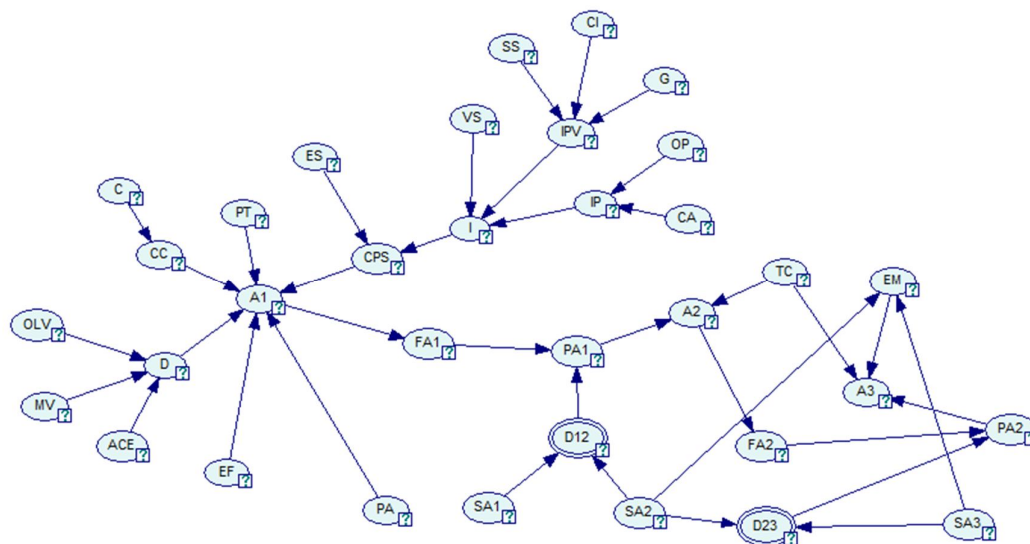
O modelo descrito nesta seção permite a avaliação quanto à aplicação de fungicidas no combate à ferrugem asiática da soja. O desenvolvimento deste modelo foi realizado através de entrevistas com os Especialistas I e II.

As primeiras entrevistas, realizadas com o Especialista I, trataram de perguntas constantes no APÊNDICE A e tiveram o objetivo de definir o escopo da tarefa a ser realizada pelo sistema, formalizar seus objetivos e identificar as variáveis e objetos do domínio. As entrevistas realizadas com o Especialista I foram gravadas com a permissão do mesmo.

A análise dos resultados das primeiras entrevistas permitiu a elaboração de descrição do escopo e das funcionalidades do sistema especialista, resultando em um grafo de uma rede bayesiana para diagnóstico da ferrugem asiática. Este grafo foi apresentado ao Especialista II que colaborou para adaptação e extensão do mesmo para um modelo para aplicação de fungicida.

O processo foi iterativo, de forma que à medida que as entrevistas ocorriam, o modelo era alterado com a inserção e remoção de variáveis e relacionamentos em acordo com o julgamento do especialista.

O modelo qualitativo obtido através das entrevistas com o Especialista II é apresentado na rede bayesiana da Figura 5. A Tabela 1 mostra a lista completa das variáveis do modelo, contendo os nomes das variáveis e suas respectivas descrições.



**Figura 5: Modelo para estimar a aplicação de fungicidas**

Tabela 1: Variáveis do modelo de aplicação de fungicida

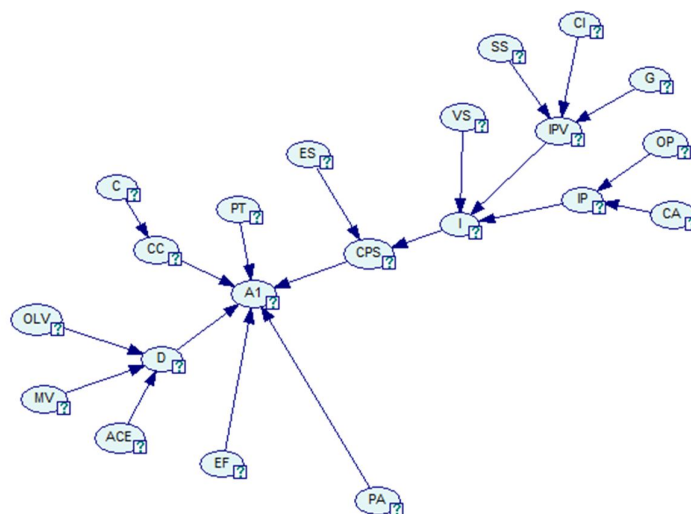
Sigla	Nome	Descrição	Valores
A1	Primeira aplicação de fungicida	Decisão quanto a realização da aplicação	<i>nao, sim</i>
A2	Segunda aplicação de fungicida		
A3	Terceira aplicação de fungicida		
ACE	Armadilha de coleta de esporos	Diz se foram encontrados esporos na armadilha	<i>ausente, presente</i>
C	Chuva	Incidência de chuva na região	<i>pouca, normal, muita</i>
CA	Corrente aérea de oeste para leste	Corrente aérea do Paraguai para o Paraná	<i>nao, sim</i>
CC	Condições climáticas	Condições favoráveis para a ferrugem asiática	<i>desf, fav</i>
CI	Chuva de inverno	Chuva no período de entressafra	<i>seco, normal, chuvoso</i>
CPS	Condições pré-semeadura	Condições favoráveis antes do início da semeadura	<i>desf, fav</i>
D	Detecção	Métodos de detecção da ferrugem asiática	<i>ausente, presente</i>
D12	Diferença entre a primeira e a segunda aplicação	Diferença em dias entre as aplicações	<i>menos14Dias, entre14E21Dias, mais21Dias</i>
D23	Diferença entre a segunda e a terceira aplicação		
EF	Estádio fenológico	Verifica os estádios fenológicos iniciais da soja	<i>antesFlores, aPartirFlores</i>
EM	Estádio de maturação	Verifica os estádios fenológicos finais da soja	<i>ateR6, aPartirR6</i>
ES	Época de semeadura	Verifica se a semeadura foi realizada no período recomendado	<i>precoce, normal, tardia</i>
FA1	Fungicida utilizado na primeira aplicação	Grupo químico do fungicida utilizado na aplicação	<i>triazolEstrob, carbEstrob</i>
FA2	Fungicida utilizado na segunda aplicação		
G	Geada	Incidência de geada na entressafra	<i>pouca, muita</i>
I	Inóculo	Presença de inóculo antes da semeadura	<i>baixo, alto</i>
IP	Inóculo vindo do Paraguai	Evidência de inóculo vindo do Paraguai	<i>ausente, presente</i>
IPV	Inóculo em plantas voluntárias	Presença do inóculo em plantas voluntárias na entressafra	<i>baixo, alto</i>
MV	Monitoramento visual na área	Método mais comum de identificação da ferrugem em uma lavoura	<i>negativo, positivo</i>
OLV	Ocorrência em lavouras vizinhas	Evidência de ferrugem asiática em lavouras vizinhas	<i>nao, sim</i>
OP	Ocorrência no Paraguai	Evidência de inóculo no Paraguai	<i>nao, sim</i>

<i>PA</i>	Perfil do agricultor	Perfil do produtor de soja (inovador ou conservador)	<i>conservador, inovador</i>
<i>PA1</i>	Período residual do produto utilizado na primeira aplicação	Período em que o fungicida estará fazendo efeito	<i>dentroPeriodo, acimaPeriodo</i>
<i>PA2</i>	Período residual do produto utilizado na segunda aplicação		
<i>PT</i>	Previsão do tempo para os próximos cinco dias	Previsão de condições favoráveis nos próximos 5 dias	
<i>SA1</i>	Semana da primeira aplicação	Semana do ciclo em que foi realizada a aplicação	<i>1 .. 17</i>
<i>SA2</i>	Semana da segunda aplicação		
<i>SA3</i>	Semana da terceira aplicação		
<i>SS</i>	Soja safrinha	Soja na entressafra	<i>nao, sim</i>
<i>TC</i>	Tolerância da cultivar	Diz se a cultivar já é geneticamente tolerante à ferrugem asiática	<i>susceptivel, tolerante</i>
<i>VS</i>	Vazio sanitário na região	Presença de vazio sanitário no período de entressafra	<i>nao, sim</i>



### 3.1.1. Sub-rede para a primeira aplicação de fungicida

Para fins de descrição, o modelo pode ser particionado em duas sub-redes. A primeira sub-rede trata da decisão quanto à primeira aplicação de fungicida e a segunda da decisão de aplicações adicionais. A Figura 6 mostra a sub-rede referente à primeira aplicação, onde a variável de interesse é representada pelo nó *AI* (primeira aplicação). Esta variável é influenciada diretamente pelas variáveis: *PT*, *EF*, *PA*, *CC*, *D* e *CPS*.



**Figura 6: Sub-rede para a primeira aplicação de fungicida**

A variável *PT* (previsão do tempo) representa um fator relevante para a primeira aplicação de fungicida, pois prevê condições de temperatura e umidade favoráveis para o desenvolvimento da doença (ANDRADE & ANDRADE, 2002). A variável *EF* (estádio fenológico) representa a fase de desenvolvimento da soja. Esta variável também influencia diretamente a primeira aplicação, pois a mesma não é recomendada em estádios iniciais de desenvolvimento da soja, pois a soja não chegou nem ao florescimento (EMBRAPA, 2013).

A variável *PA* representa o perfil do agricultor com relação às aplicações de fungicida. Quando o mesmo for conservador, preferirá aplicar o fungicida como garantia de preservação da colheita, sem considerar demais fatores. Quando for inovador, tende a considerar outros fatores antes da aplicação do fungicida, já que além de a aplicação ter seu custo, traz prejuízos ao meio ambiente.

A variável *CC* representa as condições climáticas favoráveis para o desenvolvimento da ferrugem asiática. Tais condições são relacionadas a temperatura e umidade, entretanto, a variável *CC* é influenciada apenas pela variável *C* (chuva), que tem o intuito de representar o nível de precipitação no período. Isto acontece pois o modelo foi desenvolvido pensando em

plantações de soja no estado do Paraná, onde a temperatura média tende a ficar abaixo do regime de temperaturas mais favorável para o desenvolvimento da doença, que tem uma média de 24°C (GODOY *et al.*, 2012).

A variável *D* (detecção) tem o intuito de informar se a ferrugem asiática foi detectada na lavoura de soja no período avaliado. A variável é influenciada pelas variáveis:

- a) *OLV* (ocorrência em lavouras vizinhas), que tem a função de informar se há identificação da doença em lavouras vizinhas. Caso exista tal confirmação, tem-se uma forma de detecção, pois os esporos são facilmente disseminados pelo vento por lavouras próximas, ou até mesmo a longas distâncias (YORINORI, 2003).
- b) *MV*, que representa o monitoramento visual realizado através de visitas semanais à lavoura, que tem o propósito de detectar a doença ainda no início de sua evolução (ANDRADE & ANDRADE, 2002).
- c) *ACE* (armadilha de coleta de esporos), que representa a identificação de esporos coletados na armadilha coletora de esporos, que tem a função de coletar propágulos de fungos presentes no ar (LIMA, 2011).

A variável *CPS* (condições pré-semeadura) simboliza uma série de elementos que caracterizam condições favoráveis para o desenvolvimento da ferrugem asiática antes do início do processo de semeadura. A variável *CPS* é influenciada diretamente por dois nós: *ES* e *I*.

O nó *ES* (época de semeadura) é um nó raiz no modelo, podendo sua evidência ser fornecida diretamente. A época de semeadura favorece a ferrugem asiática quando realizada tardiamente (ANDRADE & ANDRADE, 2002). Atuando concorrentemente com a época de semeadura sobre as condições pré-semeadura, está a presença de inóculo do fungo *phakopsora pachyrhizi*, representada pelo nó *I* (inóculo). Este possui três pais, sendo que dois deles também possuem pais e o outro não.

O primeiro pai da variável *I* é o *VS* (vazio sanitário), um nó raiz que representa um período de 60 a 90 dias de ausência de plantas vivas de soja no período de entressafra (GODOY, 2009). O vazio desfavorece o desenvolvimento da ferrugem, já que o inóculo não tem onde se desenvolver.

O segundo pai da variável *I* é o *IPV* (inóculo em plantas voluntárias), que diz respeito a presença de inóculo em outras plantas, que não a soja, no período de entressafra. Este é influenciado pela presença de soja safrinha, chuva de inverno e geada, os três pais desta variável, representados pelas variáveis *SS*, *CI* e *G*, respectivamente.

A variável *SS* (soja safrinha), diz respeito à plantação de soja no período de entressafra, ou safrinha, para um maior rendimento econômico no período, em virtude dos preços baixos obtidos na comercialização das culturas de inverno (BRACCINI *et al.*, 2003). Apesar dos benefícios econômicos, a soja safrinha serve como hospedeira do inóculo da ferrugem para a safra de soja realizada no período normal. A variável *CI* (chuva de inverno) funciona de maneira semelhante a variável *C* (chuva), já que presença de umidade é favorável para a evolução da ferrugem asiática, mesmo que a época seja diferente. Finalmente, a geada, representada pela variável *G*, causa danos nas plantas de soja principalmente em seus estádios iniciais de desenvolvimento (NETO *et al.*, 1998). Ao causar dano para a planta, também afeta o inóculo da ferrugem asiática.

O terceiro e último pai da variável *I* é a variável *IP* (inóculo paraguai), que representa a presença de inóculo vindo do Paraguai. Ela é influenciada pelas variáveis *OP* (ocorrência no Paraguai) e *CA* (corrente aérea oeste-leste). Estas variáveis também são raízes na rede e representam respectivamente a identificação do inóculo no Paraguai e corrente aérea favorável para trazer o inóculo de lá para as lavouras de soja do Paraná.

Todas as variáveis relatadas anteriormente influenciam direta ou indiretamente a variável *AI* (primeira aplicação). Até o momento, todos os nós não raízes, ou seja, os nós que possuem um ou mais pais, são nós probabilísticos, sendo influenciados sempre pela combinação dos valores de seus pais, que nunca atuam sobre seus filhos de maneira independente.

### 3.1.2. Sub-rede para as aplicações adicionais

A variável *AI* dá início à sub-rede das aplicações adicionais. Esta parte do modelo contém dois nós alvos: *A2* (segunda aplicação) e *A3* (terceira aplicação).

A segunda aplicação de fungicida é influenciada pelos nós: *TC* e *PAI*. O nó *TC* é um nó raiz que representa a tolerância da cultivar à ferrugem asiática. Por ser uma forma de controle da doença, se a cultivar for tolerante à ferrugem asiática, dispensa-se a realização da segunda aplicação. O nó *PAI* representa o período residual do fungicida utilizado na primeira aplicação. Caso o fungicida aplicado ainda esteja em seu período residual, a segunda aplicação não é necessária. O nó *PAI* é influenciado pelos nós *FAI*, que se refere ao grupo do produto utilizado na primeira aplicação, e *D12*, um nó determinístico que calcula a diferença entre as semanas da primeira e da segunda aplicação, representados pelos nós *SAI* e *SA2*.

O nó *FAI* contém como valores dois grupos de produtos que podem ser utilizados como fungicidas que possuem diferentes períodos residuais, o que influencia a variável *PAI*. O valor do nó *DI2*, combinado com o fungicida utilizado na primeira aplicação, determina se o período residual já expirou ou não.

A terceira aplicação de fungicida é influenciada pelos nós: *TC*, *PA2* e *EM*. As influências para os nós *TC* e *PA2* acontecem de forma análoga a da segunda aplicação.

O nó *EM* representa o estágio de maturação da soja, ou seja, em qual estágio fenológico a mesma se encontra na semana em que se pretende aplicar o fungicida. Caso a soja esteja no fim de seu ciclo de desenvolvimento, a aplicação torna-se desnecessária. Este nó é um *noisy-MAX* influenciado pelas variáveis referentes às semanas da segunda e terceira aplicação. A escolha do nó *noisy-MAX* se deu pois as variáveis *SA2* e *SA3* atuam de forma independente sobre o nó *EM*, podendo tanto a primeira quanto a segunda determinar o valor deste nó.

### 3.2. MODELO QUANTITATIVO PARA APLICAÇÃO DE FUNGICIDA

Como foi exposto anteriormente, o modelo está dividido em duas sub-redes. A primeira sub-rede trata da primeira aplicação de fungicida e a segunda sub-rede trata das aplicações adicionais.

#### 3.2.1. Tabelas de probabilidade condicional da sub-rede da primeira aplicação

Os nós raízes da sub-rede da primeira aplicação de fungicida são os seguintes: *PT* (previsão do tempo), *C* (chuva), *OLV* (ocorrência em lavouras vizinhas), *MV* (monitoramento visual), *ACE* (armadilha de coleta de esporos), *EF* (estádio fenológico), *PA* (perfil do agricultor), *ES* (época de semeadura), *VS* (vazio sanitário), *SS* (soja safrinha), *CI* (chuva de inverno), *G* (geada), *OP* (ocorrência do Paraguai) e *CA* (corrente aérea oeste-leste). As distribuições de probabilidades condicionais destes nós estão representados nas tabelas 2 a 15.

**Tabela 2: TPC para o nó *PT***

<i>Desf</i>	<i>fav</i>
0,5	0,5

**Tabela 3: TPC para a variável *C***

<i>abaixoNormal</i>	<i>Normal</i>	<i>acimaNormal</i>
0,333333	0,333333	0,333333

**Tabela 4: TPC para a variável *OLV***

<i>Não</i>	<i>sim</i>
0,5	0,5

**Tabela 5: TPC para a variável *MV***

<i>negativo</i>	<i>positivo</i>
0,5	0,5

**Tabela 6: TPC para a variável *ACE***

<i>ausente</i>	<i>presente</i>
0,5	0,5

**Tabela 7: TPC para o nó *EF***

<i>antesFlores</i>	<i>aPartirFlores</i>
0,5	0,5

**Tabela 8: TPC para o nó *PA***

<i>conservador</i>	<i>Inovador</i>
0,5	0,5

**Tabela 9: TPC para a variável *ES***

<i>precoce</i>	<i>normal</i>	<i>tardia</i>
0,333333333	0,333333333	0,333333333

**Tabela 10: TPC para a variável *VS***

<i>nao</i>	<i>Sim</i>
0,5	0,5

**Tabela 11: TPC para a variável *SS***

<i>nao</i>	<i>Sim</i>
0,5	0,5

**Tabela 12: TPC para variável *CI***

<i>seco</i>	<i>normal</i>	<i>chuvoso</i>
0,333333333	0,333333333	0,333333333

**Tabela 13: TPC para a variável *G***

<i>pouca</i>	<i>muita</i>
0,5	0,5

**Tabela 14: TPC para a variável *OP***

<i>nao</i>	<i>Sim</i>
0,5	0,5

**Tabela 15: TPC para a variável CA**

<i>nao</i>	<i>sim</i>
0,5	0,5

As distribuições a priori<sup>3</sup> destas variáveis foram assumidas como distribuições uniformes, pois o protótipo não foi desenvolvido para aplicação em um local ou data específicos. Contudo, deve ser observado que o uso efetivo do sistema pode exigir o ajuste destes parâmetros a fim de descrever adequadamente a situação sob análise. Portanto, mesmo que o modelo tenha sido desenvolvido para o estado do Paraná, tais variáveis podem ter suas distribuições condicionais ajustadas para refletir condições ou situações locais que favoreçam ou desfavoreçam a primeira aplicação de fungicida. Estas informações podem ser inseridas diretamente na rede alterando-se as probabilidades definidas a priori dos nós ou podem ser informadas como evidências virtuais<sup>4</sup> (PAN *et al.*, 2006).

A partir das tabelas de probabilidades condicionais das variáveis raízes e suas respectivas influências na rede bayesiana, foram construídas as TPCs das demais variáveis presentes na sub-rede da primeira aplicação. Esta sub-rede pode ainda ser subdividida em outras três: condições climáticas, condições pré-semeadura e detecção.

A variável *CC* (condições climáticas) é influenciada pela variável *C* (chuva), que possui três valores: *abaixoNormal*, *normal* e *acimaNormal*. Como existe a influência da variável *C*, as probabilidades para este nó não são distribuídas uniformemente, como nas TPCs das variáveis raízes. Caso exista a evidência de pouca chuva, as condições climáticas tendem a ser desfavoráveis para o desenvolvimento da ferrugem. Caso a quantidade de chuvas seja normal, então as condições podem tanto ser favoráveis, como desfavoráveis para a ferrugem. Finalmente, caso exista a evidência de muita chuva, as condições climáticas serão muito favoráveis para a ferrugem.

Considerando o exposto, o Especialista II ajustou o modelo de forma a refletir o comportamento da variável *CC*. Isto é, para chuva abaixo do normal decidiu-se atribuir valores que garantissem que:

$$P(CC = desf | C = abaixoNormal) > P(CC = fav | C = abaixoNormal),$$

$$P(CC = desf | C = normal) = P(CC = fav | C = normal) \text{ e}$$

$$P(CC = desf | C = acimaNormal) < P(CC = fav | C = acimaNormal).$$

<sup>3</sup> Distribuição a priori expressa o conhecimento prévio sobre a distribuição de valores da variável (DOS SANTOS *et al.*, 2005).

<sup>4</sup> Evidência virtual associa os estados da variável com medidas de verossimilhança (DA ROCHA *et al.*, 2011).

A Tabela 16 apresenta os valores elicitados do Especialista II durante as entrevistas e descrevem sua expectativa a partir de suas experiências.

**Tabela 16: TPC para a variável CC**

<i>C</i>	<i>abaixoNormal</i>	<i>normal</i>	<i>acimaNormal</i>
<i>desf</i>	0,8	0,5	0,0
<i>fav</i>	0,2	0,5	1,0

As condições para desenvolvimento da ferrugem asiática em uma lavoura de soja já começam na pré-semeadura. Para representar estas condições está presente no modelo a variável *CPS* (condições pré-semeadura), que é influenciada pelos seguintes nós não raízes da rede: *IPV*, *IP* e *I*.

A variável *IPV* (inóculo em plantas voluntárias) é influenciada por três variáveis raízes da rede: *SS*, *CI* e *G*. A variável *SS* (soja safrinha) possui dois valores: *nao* e *sim*, que representam a ausência ou presença da soja safrinha no período de entressafra. A variável *CI* (chuva de inverno) possui três valores: *seco*, *normal* e *chuvoso*. A variável *G* (geada) conta com dois valores: *pouca* e *muita*, representando qual foi a incidência de geada no inverno naquela região.

A variável *IPV* possui os valores: *baixo*, para quando as evidências das variáveis que a influenciam apontam para uma baixa quantidade de inóculo, e *alto* para quando apontam para uma alta quantidade. A TPC da variável não foi construída com distribuições uniformes, já que recebe a influência das variáveis *G*, *CI* e *SS*, sendo responsável por apontar, a partir destas três influências, qual a quantidade de inóculo vindo de plantas voluntárias.

As distribuições dos valores da TPC da variável *IPV* foram definidas de modo a garantir que:

$$P(IPV = baixo | S = nao \wedge CI = seco \wedge G = muita) = 1.0 \text{ e}$$

$$P(IPV = alto | SS = sim \wedge CI = chuvoso \wedge G = pouca) = 1.0.$$

Para diferentes combinações de valores, o Especialista II apontou probabilidades intermediárias para os valores da variável. A Tabela 17 apresenta os valores elicitados pelo Especialista II durante as entrevistas.

**Tabela 17: TPC para a variável IPV**

<i>SS</i>	<i>nao</i>						<i>sim</i>					
	<i>seco</i>		<i>normal</i>		<i>chuvoso</i>		<i>seco</i>		<i>normal</i>		<i>chuvoso</i>	
<i>CI</i>	<i>pouca</i>	<i>muita</i>	<i>pouca</i>	<i>muita</i>	<i>pouca</i>	<i>muita</i>	<i>pouca</i>	<i>muita</i>	<i>pouca</i>	<i>muita</i>	<i>pouca</i>	<i>muita</i>
<i>G</i>												
<i>baixo</i>	0,8	1	0,9	0,95	0,6	0,9	0,7	0,9	0,5	0,85	0	0,8
<i>alto</i>	0,2	0	0,1	0,05	0,4	0,1	0,3	0,1	0,5	0,15	1	0,2

A variável *IP* (inóculo Paraguai) é influenciada por duas variáveis raízes da rede: *OP* (ocorrência no Paraguai) e *CA* (corrente aérea oeste-leste). Ambas as variáveis possuem os valores *nao* e *sim*, que denotam a identificação negativa ou positiva de ocorrência de ferrugem asiática no Paraguai e corrente aérea de oeste para leste, respectivamente.

O nó *IP* possui os valores: *ausente*, para quando não existir evidência de inóculo vindo do Paraguai, e *presente*, para quando existir. As distribuições de sua TPC foram construídas de modo a garantir que:

$$P(IP = \textit{ausente} | CA = \textit{nao}) = 1,0 \text{ e}$$

$$P(IP = \textit{presente} | CA = \textit{sim} \wedge OP = \textit{sim}) > P(IP = \textit{presente} | CA = \textit{sim} \wedge OP = \textit{nao}).$$

A Tabela 18 apresenta os valores elicitados pelo Especialista II para TPC da variável *IP*.

**Tabela 18: TPC para a variável *IP***

<i>OP</i>	<i>nao</i>		<i>sim</i>	
<i>CA</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>
<i>ausente</i>	1	0,8	1	0,2
<i>presente</i>	0	0,2	0	0,8

A variável *I* (inóculo) é influenciada por três variáveis: *VS*, *IPV* e *IP*. A variável *VS* (vazio sanitário) é um nó raiz da rede, que possui os valores *nao* e *sim*, que denotam a ausência ou presença de vazio sanitário na região. As variáveis *IPV* e *IP* tiveram seus valores apresentados anteriormente.

A variável *I* possui dois valores: *baixo* a *alto*, que apontam para baixa quantidade ou alta quantidade de inóculo na lavoura. As distribuições da TPC da variável foram construídas de modo a mostrar que:

$$P(I = \textit{alto} | IPV = \textit{alto} \wedge VS = \textit{nao} \wedge IP = \textit{sim}) > P(I = \textit{alto} | IPV = \textit{baixo} \wedge VS = \textit{sim} \wedge IP = \textit{nao}).$$

As probabilidades apresentadas representam as condições mais favoráveis e mais desfavoráveis, respectivamente, para a alta quantidade de inóculo da ferrugem asiática.

Entre as condições mais favoráveis e as condições mais desfavoráveis, existem as condições intermediárias, que possuem probabilidades também intermediárias no que se refere a presença do inóculo. A Tabela 19 apresenta os valores elicitados pelo Especialista II para a variável *I*.



Tabela 19: TPC para a variável *I*

<i>IPV</i>	<i>baixo</i>				<i>alto</i>			
	<i>nao</i>		<i>sim</i>		<i>nao</i>		<i>sim</i>	
<i>VS</i>	<i>baixo</i>	<i>alto</i>	<i>baixo</i>	<i>alto</i>	<i>baixo</i>	<i>alto</i>	<i>baixo</i>	<i>alto</i>
<i>baixo</i>	0,4	0,3	0,8	0,4	0,2	0	0,3	0,3
<i>alto</i>	0,6	0,7	0,2	0,6	0,8	1	0,7	0,7

A variável *CPS* (condições pré-semeadura) é influenciada diretamente pelas variáveis *ES* e *I*. A variável *ES* (época de semeadura) é um nós raiz da rede que possui três valores: *precoce*, para quando a semeadura é realizada antes da época recomendada, que acontece por volta de outubro; *normal*, para quando a semeadura é realizada na época recomendada; e *tardia*, para quando a semeadura é realizada após a época recomendada.

O nó *CPS* possui dois valores: *desf* e *fav*, que representam condições desfavoráveis ou favoráveis para o desenvolvimento da ferrugem asiática. As distribuições da TPC da variável foram construídas de modo a mostrar que:

$$P(CPS = fav | ES = tardia \wedge I = alto) > P(CPS = fav | ES = precoce \wedge I = baixo).$$

Tais probabilidades representam as condições pré-semeadura mais favoráveis e desfavoráveis, respetivamente, para a ferrugem asiática.

Entre as condições mais favoráveis e mais desfavoráveis, existem probabilidades intermediárias conseguidas através de diferentes combinações de valores. A Tabela 20 apresenta os valores elicitados pelo Especialista II através das entrevistas para a variável *CPS*.

Tabela 20: TPC para a variável *CPS*

<i>ES</i>	<i>precoce</i>		<i>normal</i>		<i>tardia</i>	
	<i>baixo</i>	<i>alto</i>	<i>baixo</i>	<i>alto</i>	<i>baixo</i>	<i>alto</i>
<i>desf</i>	1	0,6	0,4	0,3	0,2	0
<i>fav</i>	0	0,4	0,6	0,7	0,8	1

A detecção da ferrugem asiática, representada pela variável *D*, é influenciada por três variáveis raízes da rede bayesiana: *MV*, *ACE* e *OLV*. A variável *MV* (monitoramento visual) possui dois valores: *negativo*, quando não foi observado nenhum sintoma relacionado à ferrugem, e *positivo*, quando pelo menos algum sintoma foi observado. A variável *ACE* (armadilha de coleta de esporos) possui os valores: *ausente*, quando não há identificação de presença de esporos, e *presente*, quando há a presença de esporos. Finalmente, a variável *OLV* (ocorrência em lavouras vizinhas) possui os valores: *nao*, no caso de a ferrugem asiática não ter ocorrido em lavouras vizinhas, e *sim*, caso contrário.

A variável  $D$  possui os valores *ausente*, quando não há evidência de detecção da ferrugem, e *presente* – quando há evidência de detecção. A TPC para a variável, observada na Tabela 21, foi montada de acordo com os valores das três variáveis que a influenciam. A distribuição de valores da variável  $D$  foi construída de modo a mostrar que:

$$P(D = \textit{positivo} | MV = \textit{positivo}) = 1,0 \text{ e}$$

$$P(D = \textit{positivo} | ACE = \textit{presente} \wedge OLV = \textit{sim}) > P(D = \textit{positivo} | ACE = \textit{ausente} \wedge OLV = \textit{nao}).$$

A Tabela 21 apresenta os valores elicitados pelo Especialistas II para a variável  $D$  durante as entrevistas.

**Tabela 21: TPC para a variável  $D$**

<i>MV</i>	<i>Negativo</i>				<i>positivo</i>			
	<i>ausente</i>		<i>presente</i>		<i>ausente</i>		<i>presente</i>	
<i>ACE</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>
<i>OLV</i>								
<i>ausente</i>	0,8	0,2	0,4	0,2	0	0	0	0
<i>presente</i>	0,2	0,8	0,6	0,8	1	1	1	1

Observando a Tabela 21, é possível notar que a forma mais eficiente para a detecção da ferrugem asiática é o monitoramento visual que, quando positivo, já é suficiente para detectar a doença com probabilidade de 1,0. Devido a esta característica, o nó de detecção quase pode ser um *noisy-OR*, já que a variável  $MV$  trabalha independentemente das demais. Isto só não foi possível porque as outras variáveis que influenciam a detecção não funcionam da mesma maneira, produzindo diferentes resultados dependendo da combinação de seus valores.

Todas as variáveis levantadas até o momento, direta ou indiretamente influenciam a variável  $AI$ , que representa a primeira aplicação de fungicida a ser realizada na lavoura de soja no período a que se refere o modelo. As variáveis que possuem influência direta sobre a variável são:  $CC$ ,  $D$ ,  $EF$ ,  $PA$ ,  $CPS$  e  $PT$ .

A variável  $AI$  (primeira aplicação) possui dois valores: *nao* e *sim*, que representam a necessidade de realização da primeira aplicação ou não. O fator com maior prioridade para análise da primeira aplicação de fungicida é a detecção da ferrugem asiática, representada pela variável  $D$ . Caso exista evidência positiva de detecção, a primeira aplicação será realizada, independentemente dos demais fatores. Com isto, tem-se que:

$$P(AI = \textit{sim} | D = \textit{presente}) = 1,0.$$

Caso o valor da variável  $D$  seja *ausente*, o próximo fator a ser considerado é o estágio fenológico, representado pela variável  $EF$ , que possui dois valores: *antesFlores* e *aPartirFlores*, que representam se a soja está em um estágio anterior ao florescimento ou a partir dele. Se a soja ainda estiver em um estágio de desenvolvimento anterior ao florescimento, não há a necessidade de realizar a aplicação de fungicida, já que a planta ainda está no muito no início de seu estágio de desenvolvimento. Com isto, tem-se que:

$$P(A1 = nao|D = ausente \wedge EF = antesflores) = 1,0.$$

Caso a detecção seja negativa e a planta já esteja em um estágio a partir do florescimento, o próximo fator a ser analisado é o perfil do agricultor, representado pela variável  $PA$ , que possui os valores *conservador* e *inovador*. Caso o produtor de soja seja conservador, realizará a primeira aplicação sem considerar os demais fatores, já que não quer correr o risco perder sua produção. Com isto, tem-se que:

$$P(A1 = sim|D = ausente \wedge EF = aPartirFlores \wedge PA = conservador) = 1,0.$$

Finalmente, para o caso de a detecção ser negativa, o estágio de desenvolvimento estar a partir do florescimento e o produtor de soja ser inovador, são analisadas as variáveis:  $CC$  (condições climáticas),  $PT$  (previsão do tempo) e  $CPS$  (condições pré-semeadura). A variável  $PT$  possui os valores *desf* e *fav*, que representam a previsão de condições desfavoráveis ou favoráveis para o desenvolvimento da ferrugem asiática. Os valores das outras duas variáveis foram apresentados anteriormente.

A partir deste ponto, as distribuições da TPC para a primeira aplicação de fungicida foram construídas de modo a representar que:

$$P(A1 = sim|D = ausente \wedge EF = aPartirFlores \wedge PA = inovador \wedge CC = fav \wedge PT = fav \wedge CPS = fav) > P(A1 = sim|D = ausente \wedge EF = aPartirFlores \wedge PA = inovador \wedge CC = desf \wedge PT = desf \wedge CPS = desf).$$

Estas probabilidades apresentam respectivamente as situações mais favoráveis e desfavoráveis para a realização da primeira aplicação de fungicida.

Quando existe a combinação dos valores das três variáveis em questão, chega-se às probabilidades intermediárias definidas pelo Especialista II. A Tabela 22 apresenta os valores elicitados pelo especialista para a variável  $AI$ .

Tabela 22: TPC para a variável *A1*

<i>D</i>	<i>ausente</i>										<i>presente</i>	
<i>EF</i>	<i>antesFlores</i>	<i>aPartirFlores</i>										...
<i>PA</i>	...	<i>conservador</i>	<i>inovador</i>									...
<i>CC</i>	...	...	<i>desf</i>					<i>fav</i>				...
<i>PT</i>	...	...	<i>desf</i>	<i>fav</i>	<i>desf</i>	<i>fav</i>	<i>desf</i>	<i>fav</i>	<i>desf</i>	<i>fav</i>	...	
<i>CPS</i>	...	...	<i>desf</i>	<i>fav</i>	<i>desf</i>	<i>fav</i>	<i>desf</i>	<i>fav</i>	<i>desf</i>	<i>fav</i>	...	
<i>nao</i>	1	0	1	0,8	0,3	0,2	0,7	0,5	0,3	0	0	
<i>sim</i>	0	1	0	0,2	0,7	0,8	0,3	0,5	0,7	1	1	

### 3.2.2. Tabelas de probabilidade condicional da sub-rede de aplicações adicionais

Após a realização da primeira aplicação de fungicida, é necessário analisar a necessidade de aplicações adicionais, que podem acontecer até o final do ciclo. Tais aplicações vão depender de fatores como período residual do fungicida, tolerância da cultivar e estágio de maturação. A Figura 7 mostra a sub-rede que evidencia as influências para as variáveis de aplicações adicionais.

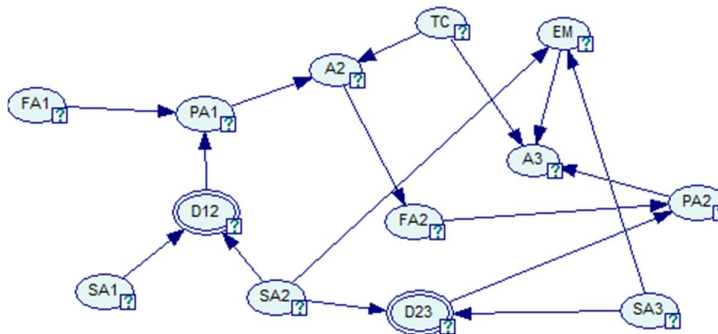


Figura 7: Sub-rede de aplicações adicionais

A sub-rede de aplicações adicionais possui os seguintes nós raízes da rede: *TC*, *SA1*, *SA2*, *SA3*. O nó *TC* (tolerância cultivar) é um nó probabilístico cuja TPC está representada na Tabela 23. Os nós referentes às semanas de aplicação são nós determinísticos, onde simplesmente deve ser informada a semana em que ocorreu a aplicação, deste modo, não há TPC para estes nós. Os valores para estes nós foram definidos pensando em ciclos de 120 dias, ou seja, 17 semanas.

**Tabela 23: TPC para a variável TC**

<i>susceptível</i>	<i>tolerante</i>
0,5	0,5

A variável *TC* possui os valores *susceptível* e *tolerante*, que representam cultivares susceptíveis ou tolerantes à ferrugem asiática. A priori a TPC da variável foi construída com uma distribuição uniforme, pois o protótipo não foi desenvolvido para trabalhar com cultivares específicas. Contudo, deve ser observado que o uso efetivo do sistema pode exigir o ajuste destes parâmetros a fim de descrever adequadamente a situação sob análise. Portanto, tal variável pode ter sua distribuição condicional ajustada para refletir situações em que a cultivar tende a ser ou não ser tolerante a ferrugem. Estas informações podem ser inseridas diretamente na rede alterando-se as probabilidades definidas a priori do nó ou podem ser informadas como evidências virtuais.

A sub-rede de aplicações adicionais pode ser subdividida em duas partes referentes a seus nós alvo: segunda aplicação e terceira aplicação, representados pelos nós *A2* e *A3*. A variável *A2* sofre a influência dos seguintes nós não raízes da rede: *FA1*, *PA1* e *DI2*.

O nó *FA1* (fungicida utilizado na primeira aplicação) é influenciado pelo nó *A1*. Os grupos presentes no modelo como valores da variável são: *triazolEstrob*, que representa produtos com a mistura de triazol com estrobilurina; *carbEstrob*, que representa produtos com a mistura de carboxamida com estrobilurina; e *nenhum*, caso nenhum produto tenha sido aplicado.

Caso a primeira aplicação de fungicida não tenha sido realizada, nenhum produto terá sido aplicado. Neste caso:

$$P(FA1 = nenhum|A1 = nao) = 1,0.$$

Entretanto, caso a aplicação tenha acontecido, a distribuição remete a uma escolha do produtor. Neste caso optou-se por uma distribuição uniforme, ou seja:

$$P(FA1 = triazolEstrub|A1 = sim) = P(FA1 = carbEstrub|A1 = sim) = 0,5.$$

A Tabela 24 representa a TPC para a variável *FA1*.

Tabela 24: TPC para a variável FA1

<i>A1</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>
<i>nenhum</i>	1	0
<i>triazolEstrob</i>	0	0,5
<i>carbEstrob</i>	0	0,5

O nó *FA1* influencia o nó *PA1* (período residual da primeira aplicação), que ainda é influenciado pelo nó *D12* – um nó determinístico responsável por determinar a diferença entre a semana da primeira aplicação e a semana “atual do ciclo”, representadas pelas variáveis *SA1* (semana da primeira aplicação) e *SA2* (semana da segunda aplicação).

Por ser um nó determinístico, o nó *D12* não possui TPC. A partir da definição da diferença entre as semanas de aplicação de fungicida, o nó dá como resultado um valor significativo considerando o período residual do produto aplicado. Segue a lógica para a determinação do valor da variável *D12*:

```

Se (SA2 - SA1 < 2) Então
  D12 = "menos14Dias"
Senão
  Se (SA2 - SA1 < 3) Então
    D12 = "entre14e21Dias"
  Senão
    D12 = "mais21Dias"
  Fim_Se
Fim_Se

```

Esta lógica para a definição dos valores de *D12* foi desenvolvida devido às características do software GeNIe 2.0, onde o modelo foi construído, já que o programa não oferece a possibilidade de realizar de fato a operação matemática com o nó determinístico.

Com a definição dos nós *D12* e *FA1* é possível definir a variável *PA1*, influenciada por esses dois nós. A variável *PA1* apresenta dois valores: *dentroPeriodo* e *acimaPeriodo*, que definem respectivamente se o produto aplicado ainda está no seu período residual ou se esse período já expirou. A distribuição de valores para esta variável foi construída de modo a mostrar que:

$$P(PA1 = dentroPeriodo | FA1 = nenhum) = 1,0,$$

$$P(PA1 = dentroPeriodo | FA1 = triazolEstrub \wedge D12 = menos14Dias) = 1,0 \text{ e}$$

$$P(PA1 = dentroPeriodo | FA1 = carbEstrub \wedge D12 \neq mais21Dias) = 1,0.$$

Para as demais combinações de valores, o valor da variável *PA1* será definido como *acimaPeriodo* com uma probabilidade de 1,0.

Com base no exposto, a Tabela 25 mostra elicitação dos valores da variável realizada pelo Especialista II para a variável *PA1*.

**Tabela 25: TPC para a variável *PA1***

<i>FA1</i>	<i>nenhum</i>			<i>triazolEstrub</i>			<i>carbEstrub</i>		
	<i>menos14Dias</i>	<i>entre14e21Dias</i>	<i>mais21Dias</i>	<i>menos14Dias</i>	<i>entre14e21Dias</i>	<i>mais21Dias</i>	<i>menos14Dias</i>	<i>entre14e21Dias</i>	<i>mais21Dias</i>
<i>dentroPeriodo</i>	1	1	1	1	0	0	1	1	0
<i>acimaPeriodo</i>	0	0	0	0	1	1	0	0	1

A variável *A2* (segunda aplicação) é influenciada diretamente pelas variáveis *TC* (tolerância da cultivar) e *PA1*, cujos valores estão apresentados acima. A variável *A2* possui dois valores: *nao* e *sim*, que representam a necessidade da realização da segunda aplicação ou não. A distribuição de valores para a variável foi construída de modo a mostrar que:

$$P(A2 = \textit{nao} | TC = \textit{tolerante}) = 1,0,$$

$$P(A2 = \textit{nao} | TC = \textit{susceptivel} \wedge PA1 = \textit{dentroPeriodo}) = 1,0 \text{ e}$$

$$P(A2 = \textit{sim} | TC = \textit{susceptivel} \wedge PA1 = \textit{acimaPeriodo}) = 1,0.$$

A Tabela 26 apresenta a elicitação dos valores para a variável *A2* realizada pelo Especialista II.

**Tabela 26: TPC para a variável *A2***

<i>TC</i>	<i>susceptível</i>		<i>tolerante</i>	
	<i>dentroPeriodo</i>	<i>acimaPeriodo</i>	<i>dentroPeriodo</i>	<i>acimaPeriodo</i>
<i>nao</i>	1	0	1	1
<i>sim</i>	0	1	0	0

Após definida a segunda aplicação de fungicida, é possível explicar o restante da rede, que diz respeito à última aplicação adicional possível durante o ciclo, no caso, a terceira aplicação.

A seção da rede bayesiana correspondente à Terceira Aplicação de Fungicida, por ser também uma aplicação adicional, é semelhante à seção da segunda aplicação de fungicida, com a adição do nó *EM* (estádio de maturação), que corresponde ao estágio fenológico da soja no momento da aplicação.

Assim como acontece com a primeira aplicação adicional, o primeiro nó analisado é o nó *A2*, cuja TPC está representada na Tabela 26. Após a realização da segunda aplicação de fungicida, o produto aplicado é informado na variável *FA2* (fungicida utilizado na segunda aplicação). A partir daí, as influências para a terceira aplicação de fungicida acontecem de modo bastante semelhante ao que foi construído para a segunda aplicação.

A construção da tabela de probabilidades condicionais para a variável *FA2* ocorre da mesma maneira que a variável *FA1*. O mesmo acontece com a variável *PA2* (período residual da segunda aplicação).

A variável *D23* também funciona de modo semelhante à variável *DI2*, com a diferença de determinar a diferença entre a semana da segunda aplicação, representada pela variável *SA2*, e a semana da terceira aplicação, representada pela variável *SA3*.

Antes de comentar a variável correspondente à terceira aplicação de fungicida, ainda existem duas variáveis que tem influência sobre ela: *TC* e *EM*. A primeira é a mesma variável que influencia a segunda aplicação, sua TPC está representada na Tabela 23. Já a segunda, está sendo utilizada pela primeira vez, correspondendo ao estágio de maturação da planta quando realizada a terceira aplicação.

O nó *EM* é um *noisy-MAX* que tem como pais as variáveis *SA2* e *SA3*. A distribuição de valores para a variável foi realizada baseada no grau de granação da soja. Até antes do estágio R6, o grão ainda está em formação, podendo estar no estágio R5.5 – o último antes de R6 – com uma granação entre 76% e 100% de desenvolvimento. No estágio R6 o grão já estará completo (EMBRAPA, 2013).

O tipo *noisy-MAX* foi escolhido pois as condições são disjuntas. O estágio fenológico R6 é atingido na penúltima semana do ciclo, portanto caso isso aconteça na segunda ou terceira aplicação, já se sabe que o estágio de maturação é posterior a R6. Assim sendo, a distribuição de valores foi construída de modo a mostrar que:

$$P(EM = ateR6|SA2 \leq 15) = 1,0;$$

$$P(EM = ateR6|SA3 \leq 15) = 1,0;$$

$$P(EM = aPartirR6|SA2 > 15) = 1,0 \text{ e}$$

$$P(EM = aPartirR6|SA3 > 15) = 1,0.$$

O valor *LEAK* mostrado na tabela representa a probabilidade de se chegar ao estágio R6 mesmo sem a presença de todas as evidências (ZAGORECKI & DRUZDZEL, 2004).

A Tabela 27 apresenta os valores elicitados, desta vez pelo Especialista I, para a variável *EM*, representado suas expectativas através de suas experiências.

**Tabela 27: TPC para a variável *EM***

	SA2			SA3			LEAK
	1 .. 15	16	17	1 .. 15	16	17	
<i>ateR6</i>	1	0	0	1	0	0	0.7
<i>aPartirR6</i>	0	1	1	0	1	1	0,3



Finalmente, a variável  $A3$ , que representa a terceira aplicação de fungicida, é influenciada diretamente por três variáveis:  $TC$ ,  $EM$  e  $PA2$ . A variável  $A3$  possui dois valores:  $nao$  e  $sim$ , que representam a necessidade da realização ou não da terceira aplicação.

A distribuição dos valores para a variável  $A3$  foi construída de modo a mostrar que:

$$P(A3 = nao | TC = tolerante) = 1,0,$$

$$P(A3 = nao | TC = susceptivel \wedge EM = aPartirR6) = 1,0,$$

$$P(A3 = nao | TC = susceptivel \wedge EM = ateR6 \wedge PA2 = dentroPeriodo) = 1,0 \text{ e}$$

$$P(A3 = nao | TC = susceptivel \wedge EM = ateR6 \wedge PA2 = acimaPeriodo) = 0,0.$$

A Tabela 28 apresenta os valores elicitados pelo Especialista II durante as entrevistas para a variável  $A3$ .

**Tabela 28: TPC para a variável  $A3$**

$TC$	$susceptivel$				$tolerante$			
	$ateR6$		$aPartirR6$		$ateR6$		$aPartirR6$	
$EM$	$dentroPeriodo$	$acimaPeriodo$	$dentroPeriodo$	$acimaPeriodo$	$dentroPeriodo$	$acimaPeriodo$	$dentroPeriodo$	$acimaPeriodo$
$PA2$								
$nao$	1	0	1	1	1	1	1	1
$sim$	0	1	0	0	0	0	0	0

#### 4. VALIDAÇÃO SOBRE O MODELO DE APLICAÇÃO DE FUNGICIDAS

A rede Bayesiana para definição de aplicação de fungicida contra ferrugem asiática foi testada e validada em casos de teste propostos pelos especialistas e gerados a partir do GeNIe 2.0. Primeiramente, os casos de testes diziam respeito a situações já enfrentadas pelos especialistas. As informações sobre tais casos foram inseridas na rede implementada no software GeNIe 2.0, onde para cada caso foi assumido que o resultado proposto pelo modelo era a hipótese com máxima probabilidade posterior para as variáveis de interesse: *A1* (primeira aplicação), *A2* (segunda aplicação) e *A3* (terceira aplicação), dependendo do caso. Em seguida, os resultados do sistema foram comparados com as decisões indicadas pelos Especialistas I e III.

Na sequência, os casos de teste foram gerados pelo próprio software GeNIe 2.0. Para isso, foram escolhidas as variáveis de entrada e saída, cabendo ao sistema realizar diferentes combinações de valores. Cada caso de teste foi mostrado ao Especialista II para verificar se suas respostas estavam de acordo com aquelas geradas pelo sistema.

Após realizados os testes, os especialistas puderam relatar todas as suas considerações com relação ao modelo apresentado, concordando ou discordando com as respostas fornecidas pela rede.

##### 4.1. VALIDAÇÃO UTILIZANDO CASOS DE TESTES

O roteiro de validação dos casos teste foi o seguinte: Inicialmente, o objetivo do sistema foi descrito a cada um dos especialistas. Em seguida, a implementação do modelo foi apresentada. Na sequência, foram realizados testes para tomada de decisão quanto a cada uma das possíveis aplicações. Se necessário e quando do interesse do Especialista, as TPCs das variáveis da rede foram exibidas a fim de informar o analista sobre o quão forte eram as influências entre as variáveis.

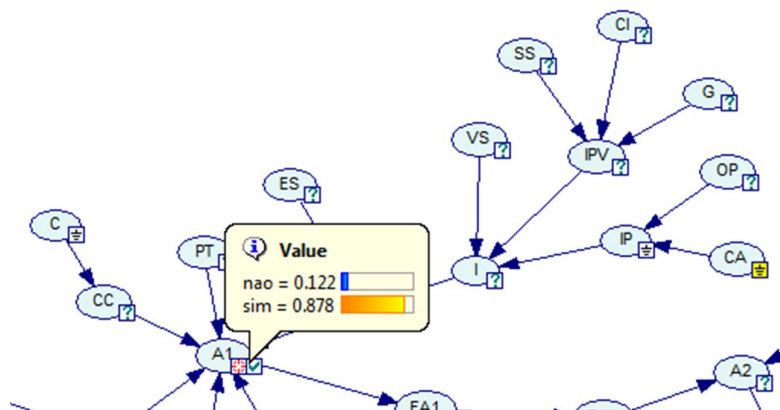
O teste do sistema se deu através da realização de casos de testes inicialmente propostos pelo Especialistas I e pelo Especialista III.

O primeiro caso de teste proposto pelo Especialista I tinha por objetivo decidir a primeira aplicação de fungicida. Para tanto, o especialista informou o seguinte conjunto de evidências:

- a) *C: normal*;

b) *IP: presente.*

Dadas as evidências fornecidas, o resultado apresentado pelo sistema na variável *AI* foi *sim*, com uma probabilidade de 0,878, e *nao*, com uma probabilidade de 0,122, como pode ser observado na Figura 8.



**Figura 8: Probabilidades de valores para a variável *AI*, dadas evidências para as variáveis *C* e *IP***

Assumindo a regra de decisão bayesiana de máxima probabilidade posterior, a decisão reportada pelo sistema apontou para a realização da primeira aplicação de fungicida, a qual concordava com a escolha do especialista. A justificativa para tanto pode ser fornecida pela combinação das evidências fornecidas para chuva e inóculo vindo do Paraguai.

Com um período normal de chuvas, ou seja, sem seca e nem chuva em excesso, as condições podem ser igualmente favoráveis ou desfavoráveis para o desenvolvimento da ferrugem asiática. Para a evidência de inóculo vindo do Paraguai, a quantidade de inóculo de *phakopsora pachyrhizi* nas lavouras do Paraná tende a aumentar e conseqüentemente deixar as condições mais favoráveis para a ferrugem asiática. Como as evidências apontam para condições favoráveis para o desenvolvimento da ferrugem asiática, recomenda-se a realização da aplicação de fungicida.

Após visualizar o resultado de seu primeiro caso de teste para a primeira aplicação de fungicida, o Especialista I propôs o segundo caso de teste, que tinha por objetivo ainda decidir sobre a primeira aplicação de fungicida. Para tanto, o especialista informou o seguinte conjunto de evidências:

- a) *IP: ausente;*
- b) *C: muita.*

Para este caso de teste, resolveu-se observar qual seria o resultado do sistema ao fornecer as evidências separadamente. Dada a evidências fornecida para a variável *IP*, o resultado apresentado pelo sistema na variável *AI* foi *sim*, com uma probabilidade de 0,877, e

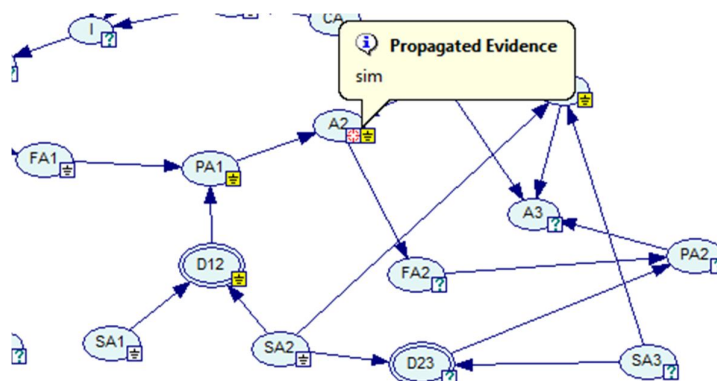
*nao*, com uma probabilidade de 0,123. Com a evidência de ausência de inóculo proveniente do Paraguai, a probabilidade de condições pré-semeadura favoráveis para o desenvolvimento da ferrugem asiática diminui e, conseqüentemente, a probabilidade de realização da primeira aplicação de fungicida também. Entretanto, a alteração é praticamente irrelevante, de apenas 0,01, o que mostra que o impacto do inóculo proveniente do Paraguai, quando analisado isoladamente, é muito pequeno.

Com a adição da evidência de muita chuva, o resultado apresentado pelo sistema na variável *A1* foi *sim*, com uma probabilidade de 0,882, e *nao*, com uma probabilidade de 0,118. Com esta evidência, observou-se uma mudança de 0,877 para 0,882 para a realização da primeira aplicação de fungicida. Apesar de não proporcionar uma alteração significativa para a probabilidade da primeira aplicação, é possível notar que o impacto de chuva na primeira aplicação de fungicida é maior que o impacto causado pelo inóculo do Paraguai. O Especialista I concordou com os resultados da rede, pois com as evidências apresentadas, a primeira aplicação ainda é recomendada.

Depois de realizados os testes para a primeira aplicação de fungicida, o Especialista I propôs seu terceiro caso de teste, que tinha como objetivo decidir a segunda aplicação. Para tanto, informou as seguintes evidências:

- a) *FA1*: *triazolEstrob*;
- b) *SA1*: 6;
- c) *SA2*: 8;
- d) *TC*: *susceptivel*.

O resultado apresentado pelo sistema na variável *A2* foi *sim* com uma probabilidade de 1,0, como pode ser observado na Figura 9.



**Figura 9: Valor da variável A2 dadas as evidências fornecidas pelo Especialista I**

A decisão reportada pelo sistema apontou para a realização da segunda aplicação de fungicida, a qual concordava com a escolha do especialista. A realização da aplicação de fungicida é justificada pelo fato de que, além de a cultivar ser susceptível a ferrugem asiática, os demais fatores mostram que o período residual do produto utilizado na primeira aplicação já expirou, o que requer a realização de aplicação adicional.

O último caso de teste proposto pelo Especialista I teve como objetivo decidir sobre a terceira aplicação de fungicida. Para tanto, decidiu manter as evidências fornecidas para a segunda aplicação e adicionar as seguintes:

- a) *FA3: carbEstrob*;
- b) *SA3: 10*.

O resultado apresentado pelo sistema para a variável *A3* foi *nao* com uma probabilidade de 1,0. A decisão reportada pelo sistema apontou para a não realização da terceira aplicação de fungicida, a qual concordava com a escolha do especialista. A partir dos valores fornecidos, tem-se que, apesar da cultivar ser susceptível à ferrugem asiática, o produto utilizado na segunda aplicação ainda está dentro de seu período residual, dispensando por hora a realização de outra aplicação adicional.

Após o teste do sistema realizado através dos casos propostos pelo Especialista I, deu-se início aos testes propostos pelo Especialista III. O primeiro caso de teste proposto pelo especialista informou as seguintes evidências:

- a) *SS: sim*;
- b) *G: pouca*;
- c) *C: muita*.

O resultado apresentado pelo sistema para a variável *A1* foi *sim*, com uma probabilidade de 0,883, e *nao*, com uma probabilidade de 0,117, como mostra a Figura 10.

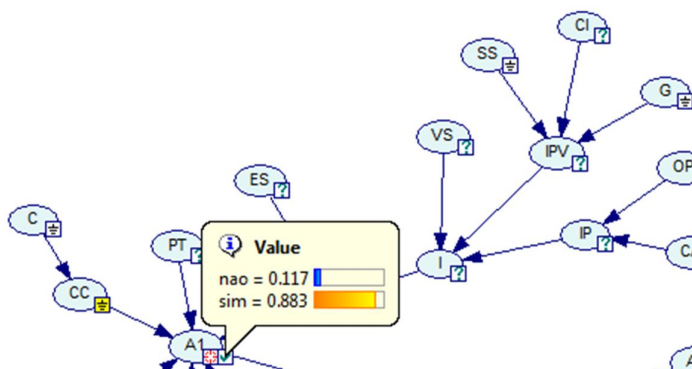


Figura 10: Probabilidades de valores para a variável *A1* dadas as evidências fornecidas pelo Especialista III

A decisão reportada pelo sistema apontou para a realização da primeira aplicação de fungicida, a qual concordava com a escolha do especialista. A justificativa para tanto se dá pela combinação das evidências fornecidas.

Para as evidências de presença de soja safrinha e pouca geada, tem-se a atualização do valor da variável *I* para *alto*, com uma probabilidade de 0,65, e *baixo*, com uma probabilidade de 0,35. Como a variável *I* influencia a variável *CPS*, o valor da mesma foi atualizado para *fav*, com uma probabilidade de 0,618, e *desf*, com uma probabilidade de 0,382.

A presença de soja safrinha combinada com pouca geada favorece o desenvolvimento do inóculo, já que o mesmo tem onde se desenvolver e com condições adequadas. Somado a isso, a evidência de muita chuva favorece o desenvolvimento da ferrugem asiática, o que requer a realização da primeira aplicação.

O segundo caso de teste proposto pelo Especialista III ainda teve como objetivo decidir a primeira aplicação de fungicida. Para tanto, informou as seguintes evidências:

- a) *SS: nao*;
- b) *G: muita*;
- c) *C: pouca*.

Para as novas evidências, o resultado apresentado pelo sistema para a variável *AI* foi *sim*, como uma probabilidade de 0,874, e *nao*, com uma probabilidade de 0,126. Como era esperado, a probabilidade para a realização da primeira aplicação diminuiu, já que as evidências fornecidas tendem a diminuir a favorabilidade de condições para a ferrugem asiática, entretanto a diferença é de apenas pouco mais de 0,04, o que é praticamente irrelevante.

Como pode ser percebido, a decisão do sistema ainda aponta para a realização da primeira aplicação do fungicida, concordando com a escolha do especialista. A justificativa para tal se deve ao fato de que foram poucas as evidências fornecidas, e sendo os demais fatores que influenciam a primeira aplicação desconhecidos, ainda é recomendável a realização da primeira aplicação.

O terceiro caso de testes propostos pelo Especialista III, que tinha o objetivo de decidir sobre a segunda aplicação, deu-se de modo idêntico ao proposto pelo Especialista I, produzindo os mesmos resultados, concordados pelo especialista.

O quarto caso de teste teve com objetivo decidir sobre a realização da terceira aplicação de fungicida. Para tanto, as influências informadas foram:

- a) *FA3: triazolEstrob*;

- b) SA2: 14;
- c) SA3: 16;
- d) TC: *susceptível*.

O resultado apresentado pelo sistema para a variável A3 foi *nao*, com uma probabilidade de 1,0. A decisão reportada pelo sistema apontou para a não realização da terceira aplicação de fungicida, a qual concordava com a escolha do especialista. A partir dos valores fornecidos, tem-se que, apesar de a cultivar ser susceptível à ferrugem asiática e o produto utilizado na segunda aplicação já estar com seu período residual expirado, a soja já se encontra em um estágio de maturação a partir de R6, determinado pelo nó *noisy-MAX EM*. Ao estar em um estágio de maturação a partir de R6, dispensa-se a realização da aplicação adicional.

A fim de aprimorar a validação do sistema, casos de teste com diferentes combinações de variáveis de entrada foram gerados pelo software GeNIe 2.0. As saídas geradas para cada caso de teste, que tinham como alvo as variáveis A1, A2 e A3, foram ponderadas pelo Especialista I. Os casos de teste gerados pelo sistema com a respectiva avaliação do especialista encontram-se no APÊNDICE B.

Tendo como alvo a primeira aplicação de fungicida, foram gerados 18 casos de teste, que se distinguiam entre si tanto pelas variáveis de entrada quanto pelos valores destas variáveis. Destes 18 casos de teste, o especialista concordou com 18, ou seja, 100% de concordância para os casos gerados pelo sistema em relação à primeira aplicação de fungicida.

Tendo como alvo as aplicações adicionais, o sistema gerou 10 casos de teste: 5 para a segunda aplicação e 5 para a terceira aplicação. Deste 10 casos de testes gerados pelo sistema, o especialista concordou com 7, sendo 3 para a segunda aplicação e 4 para a terceira, totalizando 70% de concordância com a resposta do modelo para as aplicações adicionais.

No total, o GeNIe gerou 28 casos de teste. O especialista concordou com a resposta fornecida pelo modelo para 25 destes casos, mostrando uma precisão de 89,3% do modelo com relação às expectativas do especialista.

## 5. DISCUSSÃO

A construção do modelo probabilístico proposto neste trabalho, tanto na sua parte qualitativa quanto na quantitativa, foi realizada utilizando uma abordagem baseada em conhecimento, onde a estrutura do grafo e a elicitacão dos valores da distribuição de probabilidades foi alcançada com base no conhecimento de especialistas.

O modelo construído foi apresentado e testado por diferentes especialistas. A avaliação do sistema foi positiva, pois no geral, os resultados apresentados estavam em acordo com a opinião dos especialistas, entretanto foram feitas ressalvas. O Especialista I alegou que a primeira aplicação raramente será realizada antes do primeiro mês, pois a planta ainda está em um estágio de desenvolvimento muito inicial, sugerindo que o período de aplicações começasse a ser considerado a partir daí. Esta ressalva foi ao encontro do que disse o Especialista III, que fez as seguintes considerações:

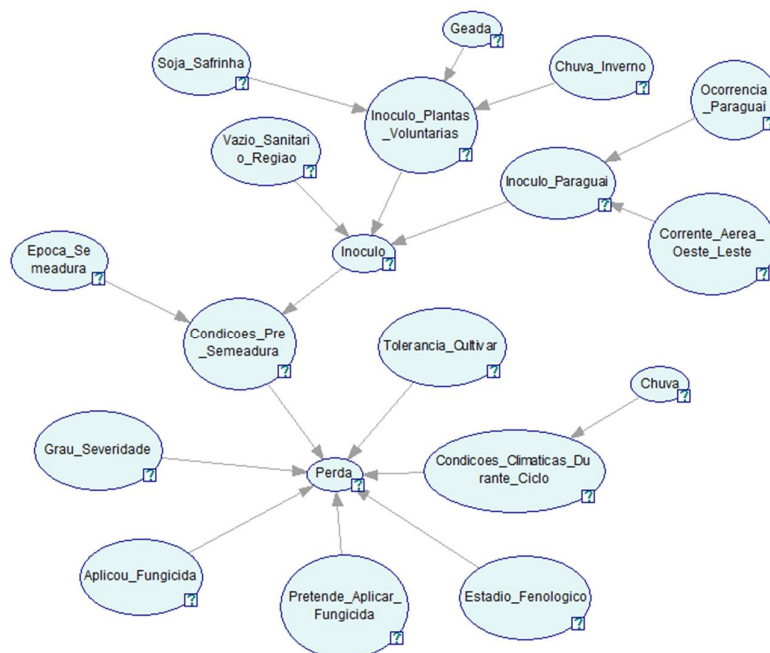
- a) A tolerância da cultivar pode não ser relevante ao modelo, já que cultivares tolerantes tendem a produzir menos, fazendo com que os produtores evitem este tipo de cultivar.
- b) As condições climáticas também são relevantes para as aplicações adicionais, pois podem alterar o período residual do fungicida aplicado, diminuindo quando há muita chuva ou até mesmo aumentando quando o tempo está seco.
- c) O estágio de maturação deve ser considerado para todas as aplicações adicionais, não apenas para a terceira.
- d) Como existem diferenças de ciclos entre as cultivares de soja, seria interessante informar este ciclo, já que para cultivares com ciclos maiores talvez sejam necessárias mais de três aplicações.

A primeira destas considerações, apesar de realmente ser realizada na prática, tende a não ser implementada no modelo, pois o mesmo possui um caráter científico, o que não permite desconsiderar a tolerância da cultivar. As demais considerações mostram-se interessantes para o aperfeiçoamento do modelo, podendo ser implementadas em versões futuras.

Somado a isso, o desenvolvimento de um sistema especialista que utiliza o SMILE e guia o usuário no fornecimento das informações mais relevantes, também é proposto. Tal sistema deve contar com uma interface web que possibilite uma validação com testes realizados por mais especialistas.



Ainda sobre trabalhos futuros, sugere-se um modelo que estime a perda decorrente da ferrugem asiática, como o proposto na Figura 11, pois se trata de um tema relevante, aplicável e ainda inédito no que compete a aplicação de técnicas de inteligência artificial.



**Figura 11: Modelo para estimar a perda decorrente da ferrugem asiática**

## 6. CONCLUSÃO

Este estudo mostrou que a utilização do formalismo de redes bayesianas na construção de um sistema especialista para prever a necessidade e quantidade de aplicações de fungicida no controle da ferrugem asiática da soja é eficaz. As entrevistas realizadas com especialistas possibilitaram a engenharia de conhecimento que culminou na construção de um modelo formal avaliado de maneira positiva através de validação realizada com casos de teste. Os testes realizados mostraram que o modelo é capaz de simular com precisão a primeira aplicação de fungicida, mas ainda apresenta resultados divergentes no que se refere a aplicações adicionais de acordo com a visão de especialistas. Mesmo assim, as respostas do modelo estão de acordo com a opinião dos especialistas em sua maioria.

A engenharia de conhecimento realizada para o modelo conseguiu representar com rigorosidade o pensamento do Especialista II a respeito das aplicações de fungicidas no controle da ferrugem asiática da soja no estado do Paraná. Os resultados divergentes apresentados nos testes realizadas para aplicações adicionais mostram que o Especialista I possui uma visão diferente do Especialista II para tais aplicações, mostrando uma visão mais conservadora. Neste caso, não existe uma falha do modelo, mas uma representação de conhecimento que indica uma tomada de decisão que não é consenso comum.

Pelo que foi exposto, conclui-se que o modelo construído permite auxiliar na tomada de decisão quanto à necessidade de realização de aplicações de fungicida, o que tende a diminuir a quantidade destas. Considerando que a quantidade das aplicações de fungicida geralmente é superestimada, o sistema pode levar a uma redução dos prejuízos causados ao meio ambiente pelo uso abusivo dos fungicidas e ainda gerar economia aos produtores com a eliminação de aplicações desnecessárias.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Agrolink.** Disponível em: <<http://www.agrolink.com.br/culturas/soja/ferrugem.aspx>>. Acesso em: 5 jul. 2012.

ALVES, M C; POZZA, E A; COSTA, J C B; CARVALHO, L G; Alves, L S. **Adaptive neuro-fuzzy inference systems for epidemiological analysis of soybean rust.** *Environmental Modelling & Software*. v. 26, n. 9, Set 2011.

ANDRADE, P J M; ANDRADE, D F A A. **Ferrugem Asiática: Uma Ameaça à Sojicultura Brasileira.** Dourados, RS: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2002. (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Circular Técnica, 11).

BRACCINI, Alessandro de Lucca *et al.* **Semeadura da soja no período de safrinha: potencial fisiológico e sanidade das sementes.** *Revista Brasileira de Sementes*, v. 25, n. 1, 2003.

CASTILLO, E; GUTIÉRREZ, J M; HADI A S. **Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas.** Madrid: Academia Española de Ingeniería, 1998.

COZMAN, F G. **Credal Networks**, *Artificial Intelligence*, n. 120, 2000.

DA ROCHA, José Carlos Ferreira; GUIMARÃES, Alaine Margarete; DE CAMPOS, Cassio Polpo. **Integração de evidências em redes credais ea regra de Jeffrey.** *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, v. 18, n. 2, 2011.

D'AGOSTINI, Giulio. **A multidimensional unfolding method based on Bayes' theorem.** *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, v. 362, n. 2, 1995.

DEVRAJ; JAIN, R. **PulsExpert: An expert system for the diagnosis and control of diseases in pulse crops,** *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 9, Set 2011.

DÍEZ, F J. **Parameter adjustment in bayes networks. the generalized noisy or-gate.** *In: Proceedings of the Ninth international conference on Uncertainty in artificial intelligence.* Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993.

DOLUSCHITZ, R.; SCHMISSEUR, W.E. **Expert systems: Applications to agriculture and farm management,** *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 2, n. 3, Fev 1988.

DOS SANTOS, Alexandre E.; RODRIGUES, Alexandre L.; LOPES, Danilo L. **Aplicações de Estimadores Bayesianos Empíricos para Análise Espacial de Taxas de Mortalidade.** *In: GeoInfo.* 2005.

DRUZDZEL, Marek J. **GeNIe: A development environment for graphical decision-analytic models.** *In: Proceedings of the AMIA Symposium.* American Medical Informatics Association, 1999.

EMBRAPA, Soja. **Tecnologias de produção de soja - Região Central do Brasil 2014.** Embrapa Soja, 2013.

GODOY, Cláudia V. *et al.* **Eficiência do controle da ferrugem asiática da soja em função do momento de aplicação sob condições de epidemia em Londrina, PR.** *Tropical Plant Pathology*, v. 34, n. 1, 2009.

GODOY, CLÁUDIA V.; BARROS, DAIANE CM; XAVIER, SHEILA A. **Avaliação de Regimes de Temperatura no Desenvolvimento da Ferrugem-Asiática da Soja.** *In: Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE).* *In: Workshop sobre Mudanças Climáticas e Problemas Fitossanitários*, 2012, Jaguariúna. Anais... Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012.

HENRION, Max. **Propagating uncertainty in bayesian networks by probabilistic logic sampling.** *In: UAI.* 1986.

HIGUERA, C; PAJARES, G; TAMAMES, J; MORÁN, F. **Expert system for clustering prokaryotic species by their metabolic features,** *Expert Systems with Applications*, v. 40, n. 15, Nov. 2013.

JULIATTI, F C. **Soybean Asian Rust: Etiology, Epidemiology and Management**. 1. ed. Edufu: Uberlândia, 2006.

KAWUKI, R. S.; TUKAMUHABWA P.; ADIPALA, E. **Soybean Rust Severity, Rate Of Rust Development, And Tolerance As Influenced By Maturity Period And Season**. *Crop Protection*, v. 23, n. 5, Maio 2004.

KREUTZ, Marcos Rogério *et al.* **O cultivo da soja ea supressão da vegetação durante a década de 1970: um estudo sobre minifúndios do Vale do Taquari, Rio Grande do Sul**. *Desenvolvimento em Questão*, v. 12, v. 26, 2014.

LAURITZEN, Steffen L.; SPIEGELHALTER, David J. **Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems**. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1988.

LIMA, Marcello Arrais. **Dinâmica temporal de urediniósporos e controle da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) da soja (*Glycine max*)**. 2011. 145 f. Tese (Doutorado em Fitopatologia) – Departamento de Fitopatologia, Universidade de Brasília, Brasília. 2011.

McKINION, J. M.; LEMMON, H.E. **Expert systems for agriculture**, *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 1, n. 1, Out 1985.

MONTAZER, G A; SAREMI, H Q; RAMEZANI, M. **Design a new mixed expert decision aiding system using fuzzy ELECTRE III method for vendor selection**, *Expert Systems with Applications*, v. 36, n. 8, Out 2009.

NADKARNI, Sucheta; SHENOY, Prakash P. **A causal mapping approach to constructing Bayesian networks**. *Decision Support Systems*, v. 38, n. 2, 2004.

NEAPOLITAN, R E. **Learning Bayesian Networks**. Prentice Hall, 2003.

NEDOVIĆ, L; DEVEDŽIĆ, V. **Expert systems in finance—a cross-section of the field**, *Expert Systems with Applications*, v. 23, Jul 2002.

NEIL, Martin; FENTON, Norman; NIELSON, Lars. **Building large-scale Bayesian networks.** *The Knowledge Engineering Review*, v. 15, n. 03, 2000.

NETO, JB França; KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos; DA COSTA, Nilton Pereira. **O teste de tetrazólio em sementes de soja.** Embrapa-CNPSO, 1998.

OLOKA, H K; TUKAMUHABWA, P; SENGOOBA, T; ADIPALA, E; KABAYI, P. **Potential for soybean rust tolerance among elite soybean lines in Uganda.** *Crop Protection*, v. 28, n. 12, Dez 2009.

OSUAGWU, C C. OKAFOR, E C. **Framework for eliciting knowledge for a medical laboratory diagnostic expert system,** *Expert Systems with Applications*, Volume 37, n. 7, Jul 2010.

PAN, Rong; PENG, Yun; DING, Zhongli. **Belief update in Bayesian networks using uncertain evidence.** *In: Tools with Artificial Intelligence*, 2006. ICTAI'06. 18th IEEE International Conference on. IEEE, 2006.

PEARL, Judea. **Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference.** Morgan Kaufmann, 1988.

POSADA-BUITRAGO, M, L.; FREDERICK, R. D. **Expressed sequence tag analysis of the soybean rust pathogen *Phakopsora pachyrhizi*.** *Fungal Genetics and Biology*, Volume 42, n. 12, Dez 2005.

REBANE, George; PEARL, Judea. **The recovery of causal poly-trees from statistical data.** arXiv preprint arXiv:1304.2736, 2013.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach.** 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2003.

SCHERM, H; CHRISTIANO, R S C; ESKER, P D; DEL PONTE, E M; GODOY, C V. **Quantitative review of fungicide efficacy trials for managing soybean rust in Brazil.** *Crop Protection*, v. 28, n. 9, Set 2009.

SHACHTER, Ross D.; PEOT, Mark Alan. **Simulation approaches to general probabilistic inference on belief networks**. arXiv preprint arXiv:1304.1526, 2013.

SRINIVAS, S. **A generalization of the noisy-or model**. In: **Proceedings of the Ninth international conference on Uncertainty in artificial intelligence**. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993.

THIRUMURUGANATHAN, S; HUBER, M. **Building Bayesian Network based expert systems from rules**. *Proc. IEEE Conf. Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2011)*, IEEE Press, Oct 2011.

TSAMARDINOS, Ioannis *et al.* **Algorithms for Large Scale Markov Blanket Discovery**. In: FLAIRS Conference. 2003.

WSI Computer Science Dept. **University of Tübingen**. Disponível em: < <http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/software/JCell/tutorial/ch03s03.html> >. Acesso em: 3 jul, 2012.

YORINORI, J T *et al.* **Ferrugem da soja (Phakopsora pachyrhizi): Identificação e controle**. *Informações Agronômicas*, n. 104, 2003.

YORINORI, J. T.; LAZZAROTTO, J. J. **Situação da ferrugem asiática da soja no Brasil e na América do Sul**. *Embrapa Soja. Documentos*, v. 236, 2004.

ZAGORECKI, A; DRUZDZEL, M J. **An Empirical Study of Probability Elicitation Under Noisy-OR Assumption**. In: FLAIRS Conference. 2004.

ZAGORECKI, A; DRUZDZEL, M J. **Knowledge Engineering for Bayesian Networks: How Common Are Noisy-MAX Distributions in Practice?**, *Systems, Man, and Cybernetics: Systems, IEEE Transactions on* , v. 43, n. 1, Jan 2013.

ZHANG, N. L.; POOLE, D. **Exploiting causal independence in bayesian network inference**. *Journal of Artificial Intelligence Research*, v. 5, 1996.

ZHU, Y.; LIU, D.; CHEN, G.; JIA, H.; YU, H. **Mathematical modeling for active and dynamic diagnosis of crop diseases based on Bayesian networks and incremental learning.** *Mathematical and Computer Modelling*, 2013.



## APÊNDICE A – Questionário para entrevista

Questionário utilizado na entrevista com o Prof. Dr. David Jaccoud Filho, do departamento de Fitotecnia e Fitossanidade da Universidade Estadual de Ponta Grossa:

1. Quais os fatores de risco para a ocorrência da ferrugem asiática?
2. É possível atribuir alguma escala ou medida para estes fatores?
3. Existem fatores que concorrem de maneira mutuamente exclusiva?
4. Como os fatores podem ser observados?
5. Quais são os fatores que afetam os fatores de risco, influenciando indiretamente a doença?
6. Existem testes químicos que possam ser utilizados para avaliar a doença ou até mesmo os fatores de risco?
7. Como se dá a evolução da doença?
8. Quais são as formas de controle da doença?
9. Como o comportamento do clima pode afetar a doença?

## APÊNDICE B – Casos de teste gerados pelo GeNIe

Primeiro conjunto de casos de teste gerados tendo como alvo a variável *A1*:

<i>OLV</i>	<i>OP</i>	<i>PA</i>	<i>PT</i>	<i>SS</i>	<i>VS</i>	<i>A1</i>	Especialista I
<i>sim</i>	<i>nao</i>	<i>conservador</i>	<i>desf</i>	<i>nao</i>	<i>nao</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>conservador</i>	<i>fav</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>sim</i>	<i>nao</i>	<i>conservador</i>	<i>desf</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>nao</i>	<i>nao</i>	<i>conservador</i>	<i>fav</i>	<i>nao</i>	<i>nao</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>nao</i>	<i>sim</i>	<i>conservador</i>	<i>fav</i>	<i>nao</i>	<i>nao</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>conservador</i>	<i>desf</i>	<i>sim</i>	<i>nao</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>nao</i>	<i>nao</i>	<i>inovador</i>	<i>desf</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>nao</i>	<i>sim</i>	<i>conservador</i>	<i>desf</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>	<b><i>nao</i></b>	Concordou
<i>nao</i>	<i>nao</i>	<i>inovador</i>	<i>desf</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>nao</i>	<i>sim</i>	<i>inovador</i>	<i>desf</i>	<i>nao</i>	<i>sim</i>	<b><i>nao</i></b>	Concordou

Segundo conjunto de casos de teste gerados tendo como alvo a variável *A1*:

<i>EF</i>	<i>I</i>	<i>MV</i>	<i>OLV</i>	<i>PA</i>	<i>PT</i>	<i>A1</i>	Especialista I
<i>antesFlores</i>	<i>alto</i>	<i>positivo</i>	<i>sim</i>	<i>inovador</i>	<i>fav</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>antesFlores</i>	<i>alto</i>	<i>negativo</i>	<i>nao</i>	<i>conservador</i>	<i>fav</i>	<b><i>nao</i></b>	Concordou
<i>aPartirFlores</i>	<i>alto</i>	<i>negativo</i>	<i>nao</i>	<i>conservador</i>	<i>fav</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>aPartirFlores</i>	<i>alto</i>	<i>negativo</i>	<i>sim</i>	<i>conservador</i>	<i>desf</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou

Terceiro conjunto de casos de teste gerados tendo como alvo a variável *A1*:

<i>C</i>	<i>D</i>	<i>ES</i>	<i>EF</i>	<i>I</i>	<i>PA</i>	<i>PT</i>	<i>A1</i>	Especialista I
<i>normal</i>	<i>presente</i>	<i>normal</i>	<i>antesFlores</i>	<i>baixo</i>	<i>inovador</i>	<i>desf</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>pouca</i>	<i>ausente</i>	<i>normal</i>	<i>antesFlores</i>	<i>alto</i>	<i>inovador</i>	<i>desf</i>	<b><i>nao</i></b>	Concordou
<i>pouca</i>	<i>presente</i>	<i>tardia</i>	<i>aPartirFlores</i>	<i>baixo</i>	<i>inovador</i>	<i>desf</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>normal</i>	<i>presente</i>	<i>tardia</i>	<i>aPartirFlores</i>	<i>alto</i>	<i>conservador</i>	<i>fav</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou

Casos de teste gerados tendo como alvo a variável *A2*:

<i>FA1</i>	<i>D12</i>	<i>TC</i>	<i>A2</i>	Especialista I
<i>triazolEstrob</i>	<i>entre14e21Dias</i>	<i>susceptivel</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>carbEstrob</i>	<i>mais21Dias</i>	<i>susceptivel</i>	<b><i>sim</i></b>	Concordou
<i>triazolEstrob</i>	<i>menos14Dias</i>	<i>tolerante</i>	<b><i>nao</i></b>	Concordou
<i>triazolEstrob</i>	<i>mais21Dias</i>	<i>tolerante</i>	<b><i>nao</i></b>	Discordou
<i>triazolEstrob</i>	<i>menos14Dias</i>	<i>susceptivel</i>	<b><i>nao</i></b>	Discordou

Casos de teste gerados tendo como alvo a variável A3:

<b>FA2</b>	<b>D23</b>	<b>EM</b>	<b>TC</b>	<b>A3</b>	<b>Especialista I</b>
<i>carbEstrob</i>	<i>menos14Dias</i>	<i>ateR6</i>	<i>susceptivel</i>	<b>nao</b>	Concordou
<i>triazolEstrob</i>	<i>mais21Dias</i>	<i>ateR6</i>	<i>susceptivel</i>	<b>sim</b>	Concordou
<i>triazolEstrob</i>	<i>menos14Dias</i>	<i>ateR6</i>	<i>susceptivel</i>	<b>nao</b>	Discordou
<i>carbEstrob</i>	<i>mais21Dias</i>	<i>ateR6</i>	<i>susceptivel</i>	<b>sim</b>	Concordou
<i>triazolEstrob</i>	<i>entre14e21Dias</i>	<i>aPartirR6</i>	<i>susceptivel</i>	<b>nao</b>	Concordou