

**GEOESTATÍSTICA E SISTEMAS 'FUZZY' NA
PROTEÇÃO DE PLANTAS**

MARCELO DE CARVALHO ALVES

2006

MARCELO DE CARVALHO ALVES

**GEOESTATÍSTICA E SISTEMAS 'FUZZY' NA PROTEÇÃO DE
PLANTAS**

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

Orientador

Prof. Dr. Edson Ampélio Pozza

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL
2006

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Alves, Marcelo de Carvalho

Geoestatística e sistemas 'fuzzy' na proteção de plantas / Marcelo de Carvalho
Alves. -- Lavras : UFLA, 2006.

186 p. : il.

Orientador: Edson Ampélio Pozza.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Geoprocessamento. 2. Agricultura de Precisão. 3. Geociência. 4. Geotecnologia. 5. Geoinformática. 6. Epidemiologia. 7. Estatística. 8. Inteligência Artificial. 9. Ecologia. 10. Clima. 11. Grandes Culturas. 12. Semente. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-526.982
-621.3678

MARCELO DE CARVALHO ALVES

**GEOESTATÍSTICA E SISTEMAS ‘FUZZY’ NA PROTEÇÃO DE
PLANTAS**

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

APROVADA em 16 de novembro de 2006

Pesquisadora Dr ^a . Sara Maria Chalfoun de Souza	EPAMIG/CTSM
Prof. Dr. José da Cruz Machado	DFP/UFLA
Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira	DEX/UFLA
Prof. Dr. Ricardo Martins de Abreu e Silva	DCC/UFLA

Prof. Dr. Edson Ampélio Pozza
DFP/UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2006

Dedico aos meus pais, Ieda e Eurípedes, minha fonte de inspiração.

Há uma enorme diferença entre ver a escuridão
através da luz ou a luz através das sombras.

David Lindsay

O acaso favorece a mente preparada

Louis Pasteur

Oportunidade + Prontidão = Sorte

Deepak Chopra

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa, e à Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade de realização do curso.

Aos professores, Edson Ampélio Pozza e José da Cruz Machado, pela amizade, orientação e ensinamentos.

Aos professores, Marcelo Silva de Oliveira, Ricardo Martins de Abreu Silva, Fábio Moreira da Silva, Luiz Gonsaga de Carvalho, Eduardo Alves, Jair Campos de Moraes, Renato Mendes Guimarães, Maria das Graças Guimarães Carvalho, Janice Guedes de Carvalho, João Almir de Oliveira, Soraya Alvarenga Botelho, Moacir Pasqual, José Roberto Soares Scolforo, Luis Marcelo Tavares de Carvalho, Paulo Estevão de Souza, Adélia Alexandre Aziz Pozza, pela amizade, compreensão, orientação e sagrada colaboração.

Aos professores, Edson Ampélio Pozza e prof. Paulo Estevão de Souza, pela aquisição da imagem de satélite e realização das análises físico-químicas do experimento da faz. Cafua.

À pesquisadora Dr^a. Sara Maria Chalfoun de Souza, pela amizade, disponibilidade e colaboração na concretização deste trabalho.

Ao prof. Luiz Gonsaga de Carvalho, pelos dados climáticos de Minas Gerais, estados circunvizinhos e auxílio no glossário.

Ao prof. Luis Marcelo Tavares de Carvalho, pelo Modelo Digital de Elevação de Minas Gerais.

À Dr^a Jennifer Boehnert, coordenadora de GIS do ‘National Center for Atmospheric Research’, por acatar sugestão de adicionar uma projeção aos dados de mudanças climáticas e sempre auxiliar com presteza com os dados disponibilizados em seu programa.

À Viviane Talamini, Dejânia Vieira de Araújo e prof. Edson Ampélio Pozza, pelos dados de epidemiologia da antracnose e ramulose.

Aos amigos de epidemiologia, João de Cássia do Bonfim Costa, Josimar Batista Ferreira, Fátima Muniz, Carolina Deuner, Dejânia Vieira de Araújo, pelo auxílio no levantamento de dados sobre a ferrugem asiática da soja.

À minha querida mãe, prof^a. Ieda Carvalho Alves e prof. Paulo Roberto Ribeiro, pela revisão de Português.

À minha querida irmã, prof^a. Mônica C. A. Cappelle, pelos abstracts.

Aos acadêmicos de iniciação científica, Alexandre Arduini Silva Oliveira, Carlos Augusto Pereira de Figueiredo, Júlio César de Souza Silva, Jorge Chaves Barbosa, pela colaboração, amizade e dedicação nos trabalhos.

Aos amigos, Rodrigo Nani França, Thiago do Prado Ramos, José Sérgio de Araújo, Flávio Henrique Linhares Magalhães, Lilian Vilela Pinto, Luciano Teixeira de Oliveira, Reni e Regiane Médice, pela amizade e apoio.

Aos funcionários da UFLA, Eloísa A. G. Leite, Adauberto Ribeiro, Renata Kelly, Rute Emília, Neuzy Ap^a Silva Werner, Marli dos Santos Túlio, Ângela de Fátima C. Santos, Carlos Rogério R. Werner, José Maria dos Santos e Luiz Carlos de Miranda.

Ao proprietário da fazenda Cafua, Carlos Alberto de Carvalho e família, pela contribuição valiosa no experimento em sua propriedade.

E a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Marcelo de Carvalho Alves, filho de Eurípedes Alves Pereira e Ieda Carvalho Alves, nasceu em 18 de junho de 1977, em Lavras, MG.

Iniciou o curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) em agosto de 1997, graduando-se em julho de 2001.

Bolsista do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) de abril de 1998 a setembro de 2001 nos Departamentos de Agricultura e de Fitopatologia da UFLA - Laboratórios de Produção, Tecnologia e Patologia de Sementes.

Bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) iniciou em agosto de 2001 o curso de mestrado em Agronomia, área de concentração em Fitotecnia, nos Laboratórios de Epidemiologia e Manejo, Patologia de Sementes e Tecnologia de Sementes dos Departamentos de Fitopatologia e Agricultura da UFLA, sob orientação do professor Edson Ampélio Pozza, concluindo-o em agosto de 2003. Iniciou o doutorado em agosto de 2003 (Agronomia/Fitotecnia), concluindo-o em novembro de 2006 com a defesa da tese.

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1. Geoestatística e Sistemas ‘Fuzzy’ na Proteção de Plantas.....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	2
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20
CAPÍTULO 2. Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ para descrever o processo monocíclico da ferrugem asiática da soja.....	29
1 RESUMO.....	30
2 ABSTRACT.....	31
3 INTRODUÇÃO.....	32
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
6 CONCLUSÕES.....	60
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
CAPÍTULO 3. Modelagem ‘Neuro-Fuzzy’ do processo monocíclico da ferrugem do cafeeiro.....	67
1 RESUMO.....	68
2 ABSTRACT.....	69
3 INTRODUÇÃO.....	70
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	73
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
6 CONCLUSÕES.....	92
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
CAPÍTULO 4. Agricultura de Precisão para estudar a variabilidade espacial e a interação entre variáveis agrônômicas, pragas e doenças em lavoura cafeeira.....	100
1 RESUMO.....	101
2 ABSTRACT.....	102
3 INTRODUÇÃO.....	103
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	105
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	112
6 CONCLUSÕES.....	142
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
CAPÍTULO 5. SIG e Geoestatística aplicados ao estudo de aspectos ecológicos e epidemiológicos da antracnose e ramulose transmitidas por sementes.....	150

1 RESUMO.....	151
2 ABSTRACT.....	152
3 INTRODUÇÃO.....	153
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	155
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	160
6 CONCLUSÕES.....	170
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	174
9 GLOSSÁRIO.....	176

CAPÍTULO 1

GEOESTATÍSTICA E SISTEMAS 'FUZZY' NA PROTEÇÃO DE PLANTAS

1 INTRODUÇÃO GERAL

Com o crescimento da população mundial houve aumento da demanda por recursos naturais vitais. Para suprir essa demanda, em épocas passadas, o excesso da população podia migrar para áreas com menores contingentes populacionais ou era reduzido em detrimento de pragas ou guerras. Entretanto, essas ocorrências não são aceitáveis para a sociedade no início do século XXI. Ao mesmo tempo, a sociedade tornou-se mais organizada para suportar o aumento da complexidade social, padrões de comportamento econômico e a necessidade de preservação ambiental (Burrough & McDonnell, 1998; Cox, 2002).

Para preservar o ambiente e, conseqüentemente, manter a fertilidade do solo e suprimento de água, reduzir a ocorrência de pragas e de doenças, manter-se nos padrões de qualidade e de segurança alimentar, reduzir mudanças climáticas globais e manter o bem-estar e a segurança da população, a sociedade deve aperfeiçoar seu entendimento do mundo geobiofísico, além de desenvolver e aperfeiçoar ferramentas disponíveis para explorar esse mundo (Cox, 2002). Torna-se cada vez mais necessário utilizar metodologias que possam subsidiar no apoio à tomada de decisão para otimizar insumos e reduzir custos dos programas de controle de qualidade de empreendimentos rurais (Matthews et al., 1999). Nesse sentido, a Geoinformática e a Tecnologia da Informação podem auxiliar a representar geo-processos e estudar a superfície da Terra (Blaschke &

*Comitê Orientador: Edson Ampélio Pozza – UFLA (Orientador), José da Cruz Machado – UFLA (Co-orientador).

Kux, 2005), otimizar o uso dos recursos naturais como a água e insumos agrícolas adaptados às necessidades do ambiente (Andriotti, 2003; Isaaks & Srivastava, 1989; Miranda, 2005; Silva, 2003; Zhang et al., 2002).

Quando a Geoinformática é aplicada no auxílio à tomada de decisão na Agricultura, utiliza-se o termo Agricultura de Precisão (Cox, 2002), relacionado ao uso de um conjunto de metodologias de análise de Sistema de Informações Geográficas, Geoestatística, Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagens Digitais e Estatística (Zhang et al., 2002), utilizados para equilibrar a aplicação de insumos e práticas agrícolas de acordo com a variabilidade espaço-temporal de atributos ecológicos, tais como, doenças de plantas (Jaime-Garcia et al., 2001; Nelson et al., 1999; Reis, 2004), pragas (Liebhold et al., 1993; Liebhold et al., 1991; Estrada-Peña, 1999), com o objetivo de maximizar os resultados econômicos, otimizar recursos naturais e preservar o meio ambiente (Lowenberg-DeBoer, 2000).

De forma semelhante à Agricultura de Precisão, aplicações da Inteligência Artificial e suas subáreas, tais como Robótica, Sistemas Especialistas, Redes Neurais, Lógica ‘Fuzzy’ e Algoritmos Genéticos, têm sido utilizadas para obter soluções mais apropriadas aos problemas agrícolas e ambientais, à medida que há redução dos custos do uso dessas tecnologias (Cox, 2002; Weick, 2001), bem como aumento da demanda de produtos e serviços com maior qualidade, eficácia, de acordo com as futuras necessidades de responsabilidade social e ambiental, atrelados a sistemas de certificação e rastreabilidade de produtos agrícolas (Cortez, 1999; Turban, 2003).

Como os sistemas agrícolas e ambientais apresentam natureza complexa, dinâmica e não-linear, objetivou-se com o uso de técnicas de Geociência e Inteligência Artificial, explorar e compreender fatores bióticos e abióticos do ambiente, de forma a auxiliar a tomada de decisão na resolução de problemas relacionados à Proteção de Plantas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Apesar dos recentes avanços na Agricultura, a taxa de aumento da produtividade das culturas tem diminuído, de modo que o progresso de áreas específicas tornou-se insuficiente para superar os desafios de aumento da demanda por alimentos, recursos energéticos e ambientais. Para atingir esse objetivo, aplicações de diferentes áreas devem ser integradas, em uma abordagem multidisciplinar, no intuito de obter soluções mais apropriadas para corresponder às necessidades ecológicas, sociais e econômicas no futuro (Cox, 2002; Tobler, 1970; Wollenweber et al., 2005). Como consequência, tem sido ressaltada cada vez mais a importância das ferramentas da Geoinformática para representar geo-processos, de forma integrada com a tendência geral da Tecnologia da Informação (Blaschke & Kux, 2005; Cox, 2002). Com o uso desses recursos tecnológicos, pode-se adquirir, registrar, produzir e disseminar informações (Turban, 2003) e estudar a superfície da Terra de forma adaptada às necessidades dos meios físicos, químicos e biológicos (Andriotti, 2003; Isaaks & Srivastava, 1989; Miranda, 2005; Silva, 2003), de acordo com a natureza complexa, dinâmica e não-linear dos sistemas agrícolas e ambientais (Weick, 2001). Sendo assim, à medida que os custos das ferramentas tecnológicas diminuem, catalisa-se maior número de trabalhos utilizando aplicações de Geoinformática, ‘Hardwares’, ‘Softwares’, modelagem matemática, uso de sensores, Sistema de Posicionamento Global, Sistema de Informações Georeferenciadas (SIG) e Biotecnologia na agricultura (Cox, 2002; Weick, 2001).

A informação geográfica pode ser representada por diferentes metodologias de Agricultura de Precisão (AP) e Inteligência Artificial (IA), apoiados em técnicas baseadas em SIG, Geoestatística, Estatística, Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagens Digitais, Lógica ‘Fuzzy’,

Redes Neurais, entre outros (Blaschke & Kux, 2005; Seelan et al., 2003; Yang et al., 2003; Zhang et al., 2002), sendo que a 'National Aeronautics and Space Administration' (NASA) considerou o uso dessas tecnologias essenciais para a tomada de decisão sobre questões sociais, ecológicas e econômicas (McCuiston & Birk, 2005).

De acordo com a tendência de multidisciplinariedade da ciência (Wollenweber et al., 2005), as subdivisões da Tecnologia da Informação, tais como a Agricultura de Precisão e Inteligência Artificial, estão sendo integradas, com diferentes propósitos e aplicações (Cox, 2002; Jagtap & Jones, 2002; Mavroulidou et al., 2004). Assim, a utilização em larga escala de técnicas de Geociência com suporte científico e tecnológico, numa abordagem de natureza agrônômica, tem merecido maior atenção dos usuários (Fernandes, 1997; Li et al., 1998).

Na agricultura, o SIG é uma ferramenta cada vez mais utilizada nos processos de planejamento econômico, territorial e ambiental, relacionados com vários campos tecnológicos em desenvolvimento que manipulam dados espaciais. Sua utilização permitiu realizar o zoneamento de áreas de forma mais eficiente e menos trabalhosa do que os métodos tradicionais de análise (Fernandes Filho, 1996; Lopes Assad, 1998; Matthews et al., 1999; McKenney et al., 1999). Assim, a modificação rápida do uso do meio físico, decorrente da intensificação e da modernização da agricultura brasileira, particularmente em áreas de expansão de fronteiras agrícolas, impõe a adoção de técnicas de avaliação e de diagnóstico que acompanham a dinâmica espaço-temporal do uso das terras (Fernandes Filho, 1996; Li et al., 1998; Matthews et al., 1999).

Um SIG apresenta inúmeras aplicações, e pode ser utilizado para fornecer informações sobre rotas, estudos de impactos ambientais, qualidade de água, cobrança de impostos, monitoramento e gerenciamento agrícola, modelagem e predição de clima e doenças, suporte à decisão na aplicação de

produtos fitossanitários e fertilizantes em taxa variável, manejo, planejamento e otimização da extração e replantio de florestas (Burrough & McDonnell, 1998; Longley et al., 2001; Silva, 2003).

Nesse contexto, Neves et al. (1998) utilizaram um SIG na análise espaço-temporal do uso de agrotóxicos no estado de São Paulo, para fins de estudo de impacto ambiental. Dados de receitas agronômicas foram utilizados para verificar o uso de cada produto nas culturas agrícolas, municípios e Estado, para posteriormente possibilitar descrever o mercado de agrotóxicos, assim como subsídios importantes para identificar e priorizar áreas que recebem as maiores cargas.

De forma semelhante, Lim & Engel (2003), também com o intuito de reduzir o impacto ambiental causado por agroecossistemas, desenvolveram um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) integrado com SIG, para auxiliar no planejamento e gerenciamento de recursos d'água e realizar análises de risco sobre a aplicação de agroquímicos nos Estados Unidos (EUA). Com o sistema, foi possível identificar taxas apropriadas de aplicação de nutrientes em microbacias ou áreas onde devem ser implementadas práticas de manejo. O sistema pode ser acessado via Internet e apresenta-se com interface amigável.

Com relação à cultura da soja, Jagtap & Jones (2002) desenvolveram e validaram nos EUA um modelo de previsão da variabilidade da produtividade regional de soja com SIG. Segundo os autores, com o modelo desenvolvido será possível simular o impacto de mudanças climáticas globais na produtividade de soja. Já no Brasil, Costa (2001) avaliou o potencial de expansão da soja na Amazônia legal utilizando o modelo de Von Thünen. Com os resultados em forma de mapas foi possível ilustrar o alcance econômico da soja, que sobrepostos com mapas de riqueza de biodiversidade ou de pólos consumidores dos produtos de soja, contribuíram para elaborar políticas públicas e estratégias comerciais de desenvolvimento sustentável da Amazônia, diante da necessidade

de reduzir o conflito potencial existente entre a intenção de produzir e desenvolver a Região Norte com a e de preservar a maior floresta tropical do mundo. Também com relação à necessidade de preservar áreas florestais, McKenney et al. (1999) desenvolveram uma ferramenta computadorizada ('Seedwhere'), que utiliza SIG para comparar dados climáticos e identificar locais com condições para regenerar florestas ou implementar atividades de recuperação ecológica. O sistema baseia-se na teoria de os padrões espaciais de clima coincidirem com a distribuição e abundância de espécies, fenologia de plantas e taxas de crescimento.

Nesse raciocínio, Silva & Assad (1998) utilizaram SIG para estudar a aptidão agrícola de terras com base em dados climáticos. Os autores realizaram análise espaço-temporal do potencial hídrico climático do estado de Goiás visando a otimizar as práticas agrícolas. Tal estudo permitiu delimitar períodos em que o impacto climático causado pela deficiência hídrica se constitui num fator limitante da produção, fornecendo subsídios para definir regiões ecologicamente adequadas ao desenvolvimento agrícola.

Já Ramankutty et al. (2002) utilizaram SIG para estimar áreas favoráveis ao cultivo agrícola na superfície terrestre, com base no clima e características de solo, sob influência de mudanças climáticas globais e a concentração do CO₂ atmosférico. Segundo os autores, observou-se grande reserva de agroecossistemas cultiváveis na América do Sul e África, entretanto, grande parte dessas áreas encontram-se sob florestas ou sob proteção, de forma que os solos tropicais apresentam-se com alto potencial de perda da fertilidade nessas áreas caso haja remoção das florestas. Como efeito de mudanças climáticas, haverá aumento de 16% da favorabilidade de cultivo áreas localizadas em altas latitudes do hemisfério norte e redução de áreas favoráveis nos trópicos, principalmente na África, nordeste da América do Sul, México, América Central e Oceania.

No âmbito da proteção de plantas, a ocorrência de doenças na América do Norte foi monitorada e documentada durante décadas em diferentes regiões geográficas. Assim, Yang & Feng (2001) estudaram a distribuição de soja na América do Norte, Leste de Rocky Mountains (EUA e Canadá). Esses autores identificaram a presença de padrões geográficos na diversidade e dispersão de doenças fúngicas da soja na América do Norte. A diversidade quantificada pelo número de doenças por amplitude latitudinal apresentou menor gradiente com o aumento da latitude. Doenças localizadas em latitudes mais altas ocorreram em grande extensão geográfica na direção norte-sul. A diversidade de doença quantificada pelo número de doença por amplitude longitudinal diminuiu na direção leste-oeste. Verificaram-se relacionamentos lineares significativos entre diversidade de doença e área cultivada. No agroecossistema localizado na região ao redor da área Delta (Aproximadamente 36 a 39 °N e 88 a 91°W), observaram-se maior diversidade de doenças, provavelmente pela proximidade da transição entre três regimes pluviométricos, bem como a confluência dos rios Mississipi, Missouri e Ohio.

Da mesma forma, Morales & Jones (2004) estudaram com SIG a ecologia e a epidemiologia da mosca branca (*Bemisia tabaci* Gennadius, 1889), transmissora de geminivirose em culturas tropicais da América Latina. Por meio de 304 pontos georeferenciados em localidades onde a mosca branca e as geminivirose causaram dano significativo, desenvolveu-se um modelo matemático incluindo duas variáveis climáticas, temperatura e precipitação, para mapear a probabilidade de ocorrerem áreas favoráveis à praga. Posteriormente, utilizando-se a classificação climática de Koeppen foi possível verificar que 55% das localidades afetadas por geminivirose estavam localizadas na região tropical úmido-seca, 22% nas regiões de clima úmido-seco tropicais, subtropicais e locais remanescentes de clima equatorial úmido, com ventos litorâneos frequentes. Segundo os autores, com base nesses resultados foi

possível compreender as epidemias da mosca branca e de geminivirose, de forma a auxiliar o manejo integrado de pragas e doenças sustentável nas regiões estudadas.

Tendo em vista a relação do clima e da localização geográfica com a ocorrência de doenças, atualmente, ‘softwares’, com bases em dados climáticos das regiões do globo terrestre, tal como o CLIMEX[®] (Sutherst & Maywald, 1985), estão sendo utilizados para determinar o risco de ocorrência de pragas e doenças (Schermer & Yang, 1995; Vera et al., 2002). Com isso, foi possível estudar o progresso potencial da ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi* H. Sydow & P. Sydow) em áreas tropicais e subtropicais da superfície terrestre (Pivonia & Yang, 2004; Pivonia & Yang, 2005) e *Pyrenophora seminiperda* Brittlebank & Adam na Europa e regiões temperadas da Ásia, África e América do Sul (Yonow et al., 2004).

Dessa forma, estudos compreendendo grandes extensões geográficas podem auxiliar no estudo de pragas quarentenárias e não-quarentenárias no comércio internacional de sementes, aplicações de biotecnologia (Teng & Yang, 1993), novas pragas emergentes na agricultura sustentável e/ou orgânica, uso de controle biológico (Hokkanen & Lynch, 1996; Teng & Yang, 1993), doenças associadas com mudanças climáticas globais (Manning & Tiedemann, 1995), monitoramento e planejamento de atividades agrícolas com a integração de dados de Sensoriamento Remoto (Bernardi, 2001).

Outra opção é o uso de imagens de Sensoriamento Remoto em nível terrestre para monitorar culturas no campo. Nesse contexto, Nicolas (2004) utilizou SR terrestre obtido na resolução espectral óptica (visível e infravermelho próximo) e termal para otimizar a aplicação de fungicidas na cultura do trigo infectada por *Septoria tritici* Blotch, em parcelas de campo experimental na França. Com a análise da relação entre a doença, a produtividade do trigo e a área foliar, observou-se relação negativa entre *S.*

tritici e o índice de vegetação (NDVI) e positiva entre o NDVI e a produtividade. A análise do NDVI foi mais efetiva do que a termal para obter o período mais adequado para a aplicação do fungicida.

A partir da integração de SIG com SR e dados censitários, Leff et al. (2004) desenvolveram cartas globais de variabilidade espacial de 18 principais culturas agrícolas, em resolução de 5 minutos, de forma a facilitar a compreensão sobre padrões dos sistemas agrícolas, análise de risco climático para seguridade agrícola e do impacto da intensidade de agroecossistemas no ambiente no período de 1850 a 1992. Já Ramankutty & Foley (1999) utilizaram dados de SR e de inventário para reconstituir o histórico dos agroecossistemas de 1700 a 1992 na superfície terrestre, de forma a quantificar o impacto do desenvolvimento socioeconômico da humanidade com o uso de SIG. De acordo com os autores, com base nos resultados obtidos, modelos climáticos e de ecossistemas podem ser utilizados para auxiliar na compreensão dos efeitos antrópicos no meio ambiente, no uso da terra, no clima, no ciclo de carbono e na água, de forma a contribuir para a reflexão sobre um futuro sustentável. Seelan et al. (2003) também relataram a integração de SIG com dados dos satélites AVHRR, MODIS, IKONOS, fotografias aéreas digitais ADAR 5500 e o GPS, para realizar experimentos apoiados por um consórcio entre empresários rurais, cientistas e fornecedores de dados, de forma a estabelecer zonas de manejo, verificar a eficácia de aplicação localizada de produtos fitossanitários, fertilizantes e monitorar danos físicos causados nas lavouras em função de variáveis climáticas.

Com o uso de SR orbital de baixa resolução espacial aplicado ao estudo de vegetação, Wallace et al. (2000) utilizaram a análise variográfica para compreender a estrutura espacial da vegetação do deserto de Mojave na Califórnia, com base em dados coletados por meio de 12 transectos de 100 m de extensão e 2 m de largura considerando o mapa de vegetação base da área.

Como os parâmetros de semivariograma ajustaram-se de forma diferenciada, de acordo com o tipo de vegetação, os autores sugeriram o uso desse método para complementar estudo de classificação de diferentes tipos de vegetação com base em imagens de satélite.

Com relação a estudos que utilizaram imagens de satélites orbitais de altíssima resolução espacial, detalhes de construções, árvores individuais e variação estrutural da vegetação podem ser detectadas, com grande potencial de aplicação em análise espacial. Assim, Colombo et al. (2003) utilizaram imagem do satélite 'IKONOS' para determinar o índice de vegetação (NDVI) de diferentes culturas e seu padrão espacial com o uso da Geoestatística. Com a análise dos semivariogramas relativos aos agroecossistemas estudados foi possível distinguir o padrão espacial de uma floresta plantada comparado aos de lavoura de milho.

Já Colombo et al. (2004) utilizaram informação espectral de Sensoriamento Remoto orbital, integrada com a Geoestatística para estudar parte de uma floresta tropical brasileira, com dados obtidos de imagens de satélite (Landsat TM, Resurs MSU, ERS ATSR) de resolução espacial distinta. Observou-se, com a análise dos semivariogramas, redução do alcance do modelo com o aumento da fragmentação da floresta. Já o efeito pepita aumentou sob condições de maior fragmentação florestal e sob menor resolução espacial das imagens. Segundo os autores, a redução da homogeneidade da cobertura florestal e a influência da menor resolução espacial na formação de agregados nas imagens acarretaram a redução da estrutura de correlação espacial. As maiores diferenças com relação à análise variográfica dos três sensores foram observadas mais na mudança da resolução média para baixa do que da alta para média. Assim, métodos de interpolação dos dados também podem ser utilizados para determinar valores desconhecidos ou não amostrados, de acordo com o ajuste de uma função matemática às observações, de forma a possibilitar

conhecer a estrutura e magnitude de dependência espacial dos dados e obter resultados razoáveis, principalmente quando a função comporta-se de maneira similar ao fenômeno estudado (Andriotti, 2003; Miranda, 2005).

Com relação à metodologia de análise Geoestatística, verificaram-se aplicações para analisar o padrão espacial e a dependência espacial de diferentes variáveis, em diferentes áreas do conhecimento. Ramasundaram et al. (2005) utilizaram a Geoestatística e técnicas científicas de visualização para desenvolver um laboratório virtual ambiental com aplicações nas áreas de Ciência da Terra e Ciência Ambiental. Segundo os autores, o objetivo no laboratório foi estudar propriedades e processos ambientais que estimulassem a capacidade cognitiva dos estudantes, conforme os seguintes critérios: acesso global, implementações baseadas na 'web', simulação de diferentes mecanismos de aprendizado, interatividade, compartimentalização em estrutura hierárquica, representação de objetos geográficos em 2 e 3 dimensões e processos dinâmicos dos ecossistemas. O sistema foi desenvolvido para uma área de 45 ha na Flórida com potencial de aumentar o número de cursos no câmpus e em cursos educacionais a distância.

Outro enfoque de estudo utilizando Geoestatística e SIG foi empregado no estudo de Cerri et al. (2004). Os autores utilizaram Geoestatística para estudar a variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de solos na Região Amazônica brasileira. Com base em 985 amostras georeferenciadas, dos resultados de análise de semivariogramas e de mapas de krigagem em blocos, foi possível segmentar a área em zonas homogêneas com o uso de critérios restritivos em SIG. De acordo com os autores, após conhecer a condição natural das zonas, tornou-se possível utilizar diferentes tratamentos passíveis com aplicação potencial em projetos relacionados ao seqüestro de carbono nos solos da região, segundo o escopo do protocolo de Kyoto e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo.

Ainda na área de solos, Dawson & Baise (2005) estudaram o derretimento de materiais de duas áreas durante o terremoto de 1994, localizadas no aluvial de 'San Fernando Valley'. Os autores aplicaram uma transformação indicadora aos dados e, em seguida, utilizaram a krigagem para calcular a probabilidade de derretimento das áreas. Verificou-se, com os resultados, boa predição dos volumes de solo derretido com krigagem quando comparado a outros resultados de pesquisa utilizando outras interpretações e mapas geológicos, recomendando-se o uso da técnica como suplemento a estudos geológicos e de derretimento potencial.

Booltink et al. (2001) também utilizaram a Geoestatística para otimizar zonas de manejo na agricultura, propondo uma tecnologia de baixo custo para cultivo de banana sob sistema 'plantation', na Costa Rica. Com os mapas de krigagem representando a variabilidade espaço-temporal da produtividade e do tipo de solo foi possível determinar taxas ótimas de aplicação de fertilizantes e identificar áreas com problemas ou limitações com relação aos custos.

Na fitopatologia e na epidemiologia moderna, a metodologia de análise Geoestatística também está sendo aplicada de forma integrada ao SIG, para analisar padrões espaciais e gerar hipóteses sobre aspectos ecológicos e epidemiológicos de doenças de plantas, impossíveis ou difíceis de serem estudados no passado (Agrios, 2004; Nelson et al., 1999). Assim, no estudo de doenças da batata e do tomate, Jaime-Garcia et al. (2001) caracterizaram a variabilidade espaço-temporal de genótipos de *Phytophthora infestans* Mont. de Bary no Vale 'Del Fuerte', por meio da Geoestatística e SIG. Com o uso dessas Geotecnologias, pôde-se concluir que mudanças de estação, direção de ventos, hospedeiros e padrões genotípicos influenciaram as diferentes estruturas espaciais em diferentes safras, entretanto, observou-se que os tubérculos de batata infectados foram possivelmente a principal fonte de inóculo primário da requeima.

Já Collins et al. (2003) aplicaram a Geoestatística em um estudo da variação espaço-temporal de populações de um agente de biocontrole (*Bacillus subtilis* Ehrenberg 1835 Cohn 1872) da mancha de cercosporiose da batata-doce em escala foliar. Com os mapas de krigagem de severidade da doença sobrepostos nas folhas com lesões, foi possível constatar que as populações de *B. subtilis* sem β -glucan apresentaram-se mais agregadas do que com o nutriente adicionado ao substrato. Da mesma forma, não houve correlação entre densidade de *B. subtilis* e cercosporiose, indicando que nem a antibiose, nem o parasitismo foram mecanismos importantes para controlar a doença.

Com relação ao míldio da videira (*Plasmopara viticola* Berk. & Curtis Berl. & de Toni), Cicogna et al. (2005) utilizaram a técnica da krigagem para espacializar dados de precipitação relacionados com o progresso da doença em 'Friuli-Venezia', na Itália, e comparar esses dados com medidas de radar meteorológicos correspondentes à estimativa de precipitação e com a ocorrência de molhamento foliar. Segundo os autores, houve alta correlação dos dados de duração de chuva com os de molhamento foliar, considerando-se 83.474 localidades. Posteriormente, com base nos dados de molhamento foliar, simulou-se a ocorrência de infecções de *P. viticola* com o modelo epidemiológico de Goidanich, gerando grid de dados de infecção para validar o método utilizado.

Franklin & Mills (2003) também utilizaram a técnica da Geoestatística no estudo de microrganismos de solo em campos de cultivo de trigo, ao leste da Virgínia (EUA). Por meio de 200 amostras de solo coletadas em distâncias entre 2,5 cm a 11 m, foi possível analisar o padrão espacial de comunidades microbianas. Para isso, o DNA de cada comunidade encontrada em cada amostra foi determinado com a técnica de AFLP. Em seguida, com a análise dos semivariogramas, observou-se autocorrelação espacial das populações com alcance entre 30 cm até mais de 6 m, dependendo da escala espacial considerada. Posteriormente utilizou-se a krigagem para gerar mapas que

representassem o padrão espacial das comunidades ao longo da parcela. Com isso, observou-se que o comportamento das bactérias pode ser bastante estruturado mesmo em habitats relativamente homogêneos. Segundo os autores, diferentes conjuntos de comunidades de microrganismos distribuíram-se de forma diferenciada ao longo da parcela devido à resposta diferenciada das populações associada à heterogeneidade do solo.

Rossi et al. (1992) também relataram o potencial da Geoestatística como ferramenta para interpretar padrão espacial de microrganismos, com ênfase no uso do semivariograma e semivariograma cruzado para facilitar a compreensão de relações ecológicas e caracterizar dependência espacial de variáveis ambientais.

Com técnicas de Inteligência Artificial também tem sido possível obter avanços na atividade agrícola, por ser uma área do conhecimento multidisciplinar e interdisciplinar e por permitir desenvolver processos que simulam o ser humano na tarefa de aprender, efetuar julgamentos ou tomar decisões (Turban & Aronson, 1998). Dessa forma, SIG integrado com Sistema Especialista (SE) também foi utilizado como suporte à decisão ao manejo integrado de pragas agrícolas, florestais e manejo ambiental (Coulson, 1992). De forma semelhante, Li et al. (1998) utilizaram SIG e SE para disseminar conhecimento e fornecer suporte à produção agrícola sustentável e manejo integrado de pragas em macroescalas. Variáveis climáticas, atributos do solo e a distribuição de inimigos naturais foram utilizados para gerar modelos de apoio à decisão.

Informações centralizadas pela 'Internet' e tecnologias recentemente disponíveis estão mudando as aplicações de SE, disponibilizando-os pela Internet (Grove, 2000). Da mesma forma, Power (2000) argumentou que os rápidos avanços na tecnologia da 'Internet' abriu novas oportunidades para aprimorar SE e SAD. Com isso, a tecnologia da 'Internet' pode mudar a forma

como os SE são desenvolvidos e distribuídos, já que o conhecimento sobre qualquer assunto pode ser diretamente disponibilizado aos usuários em sistemas desenvolvidos para Internet (Duan, 2004). Assim, após o surgimento da 'Internet', tornou-se mais barato e fácil desenvolver sistemas de Inteligência Artificial multifuncionais, apesar de muitos usuários desse setor ignorarem essa alternativa e seus potenciais benefícios (Athappilly, 2000). Da mesma forma, a comunidade empresarial não está bem informada sobre o valor potencial dessa tecnologia para tornar determinado empreendimento mais eficiente e competitivo.

No estudo de insetos, Lavine et al. (2003) utilizaram algoritmos genéticos para decifrar a complexidade de códigos químicos e sensoriais de formigas. Com base na análise de cromatografia de gás de perfis de hidrocarbono extraídos da cutícula e glândula posfaringeal de 400 espécimes de *Cataglyphis niger*, foi possível reconhecer padrões para identificar fatores que influenciam no odor das colônias. Pesos foram atribuídos de forma diferenciada entre as amostras ou classes classificadas corretamente e as de difícil classificação, de forma similar a uma rede neuronal. Segundo os autores, com o uso do algoritmo genético, foi possível integrar aspectos de inteligência artificial e computação evolutiva para selecionar e reconhecer padrões sobre a espécie estudada.

Redes neurais também já foram aplicadas para reconhecer padrões em géis de eletroforese, na área de Biotecnologia, de forma a auxiliar na classificação de variedades de sementes de cereais. O treinamento da rede neuronal foi conduzido com 30 imagens, cada uma contendo 15 bandas, sendo possível reconhecer 98% das imagens avaliadas (Jedra et al., 1999).

Outra técnica de Inteligência Artificial usualmente aplicada em Medicina e na Agricultura é a Lógica 'Fuzzy'. Em epidemiologia médica, Massad et al. (2003) utilizaram essa técnica para resolver problemas de apoio à

decisão na descrição da epidemia de AIDS. Nesse caso, o operador de implicação de Mamdani foi utilizado para caracterizar a relação entre a atividade do vírus de acordo com o tratamento clínico. Com o uso dessa mesma técnica, porém na Proteção de Plantas, Vargens et al. (2003) desenvolveram um sistema para auxiliar empresários rurais a estimar a produção de cacau de acordo com a distribuição de chuva, incidência de mato, adubação e correção do solo, incidência de pragas, doenças e plantas daninhas e variação da produção. Segundo os autores, o sistema foi avaliado por especialistas e o próximo passo será testá-lo em condições de campo, para proporcionar avaliar alternativas de investimentos mais rentáveis como apoio à decisão para o produtor de cacau.

Ainda com relação à previsão de epidemias de plantas, Kim et al. (2005) desenvolveram um sistema com base em Lógica 'Fuzzy' para estimar a taxa de infecção aparente de severidade da ferrugem asiática da soja com base em resultados de 73 experimentos de campo em Taiwan. Variáveis meteorológicas foram combinadas com critérios biológicos relativos à severidade da doença para desenvolver e validar o modelo com base em dados de experimentos das cultivares TK 5 e G8587. Com o modelo, foi possível simular a severidade da doença baseado em sua dinâmica populacional, de modo a explicar 85% do progresso da severidade, principalmente nos estádios iniciais da epidemia. Já Yang et al. (2003) utilizaram Lógica 'Fuzzy' e Redes Neurais para desenvolver um sistema de aplicação de herbicida de precisão na cultura do milho. Há no sistema, mecanismos para adquirir informações de forma instantânea a partir de uma câmera digital e em seguida processar informações de modo a identificar e mapear a densidade de plantas daninhas por um sistema de classificação de pixels via redes neurais. O mapa de infestação é utilizado como entrada para o Sistema de Lógica 'Fuzzy' adaptado a um controle de pulverização, de forma a proporcionar o manejo localizado das plantas daninhas.

Com relação a variáveis climáticas, Castañeda-Miranda (2006) desenvolveram um Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ para controlar o ambiente dentro de casa-de-vegetação. Nesse caso, dados meteorológicos de temperatura, umidade relativa, radiação global, velocidade do vento, são utilizados como variáveis de entrada, de forma a inicializar o controle das condições ambientais no interior da casa de vegetação, de acordo com as regras e conjuntos ‘fuzzy’ previamente definidos. Com base nas variáveis meteorológicas coletadas, foi possível executar simulações para validar e implementar o sistema por meio de um circuito eletrônico.

No tocante ao estudo de classificação de imagens orbitais Quickbird® de altíssima resolução espacial, Pinheiro et al. (2005) testaram duas técnicas de classificação por conjuntos ‘fuzzy’ e método do vizinho mais próximo, de modo a identificar na imagem áreas de floresta, campo, área antropizada, reflorestamento, sombra e água. O classificador por conjuntos ‘fuzzy’ apresentou os piores resultados, pois, nesse caso, não foram adquiridas amostras para classificar a imagem. Entretanto, de acordo com informações da empresa responsável pelo desenvolvimento do programa de processamento das imagens, esse problema já foi resolvido na nova versão do ‘software’ de classificação. Como a imagem permite visualizar detalhes da superfície, em função de sua altíssima resolução espacial, a interpretação visual da imagem, apesar da subjetividade, ainda foi a melhor opção para mapear a área, sendo o mapa obtido de excelente qualidade.

Na área de sementes, Ureña et al. (2001) desenvolveram um sistema de visão artificial para avaliar a qualidade de sementes germinadas com base na Lógica ‘Fuzzy’. Adaptou-se uma câmera CCD colorida para captura de imagens a um sistema especialista para identificar plântulas e área foliar por meio de um Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ de classificação com operador de implicação de Mamdani. Realizaram-se testes com sementes de alface, couve-flor e tomate, de

forma a evidenciar o potencial de economia de tempo de análise de forma comparativa com técnicos, bem como auxiliar no apoio à decisão na produção industrial de sementes.

De acordo com o exposto, pôde-se constatar que as metodologias de análise das áreas de Geociência e Inteligência Artificial apresentam enorme potencial de utilização em um país de dimensões continentais como o Brasil, onde existe carência de informações para auxiliar o processo de tomada de decisão acerca de questões relacionadas com Ecologia (Rossi et al., 1992), Agricultura, Proteção de Plantas (Agrios, 2004; Nelson et al., 1999) e Manejo Ambiental (Burrough & McDonnell, 1998; Isaaks & Srivastava, 1989; Jensen, 2000; Longley et al., 2001).

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. 5. ed. San Diego: Academic Press, 2004. 952 p.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo, RS: Unisinos, 2003. 165 p.

ATHAPPILLY, K. A dynamic web-based knowledge system for prototype development for extended enterprise. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PRACTICAL APPLICATIONS OF KNOWLEDGE MANAGEMENT, 3., 2000, Manchester. **Proceedings...** Manchester: PAKEM 2000, 2000.

BERNARDI, M. Linkages between FAO agroclimatic data resources and the development of GIS models for control of vector-borne diseases. **Acta Tropica**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 21-34, Apr. 2001.

BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados: métodos inovadores**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 286 p.

BOOLTINK, H. W. G.; VAN ALPHEN, B. J.; BATCHELOR, W. D.; PAZ, J. O.; STOOBROGEL, J. J.; VARGAS, R. Tools for optimizing management of spatially variable fields. **Agricultural Systems**, Oxford, v. 70, n. 2/3, p. 445-476, Nov./Dec. 2001.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CASTAÑEDA-MIRANDA, R.; VENTURA-RAMOS jr., E.; PENICHE-VERA, R. R.; HERRERA-RUIZ, G. Fuzzy Greenhouse Climate Control System based on a Field Programmable Gate Array. **Biosystems Engineering**, San Diego, v. 94, n. 2, p. 165-177, June 2006.

CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CHAPLOT, V.; VOLKOFF, B.; VICTORIA, R. L.; MELILLO, J. M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p. 51-68, Nov. 2004.

CICOGNA, A.; DIETRICH, S.; GANI, M.; GIOVANARDI, R.; SANDRA, M. Use of meteorological radar to estimate leaf wetness as data input for application of territorial epidemiological model (downy mildew—*Plasmopara viticola*). **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 30, n. 1/3, p. 201-207, 2005.

COLLINS, D. P.; JACOBSEN, B. J.; MAXWELL, B. Spatial and temporal population dynamics of a phyllosphere colonizing *Bacillus subtilis* biological control agent of sugar beet cercospora leaf spot. **Biological Control**, San Diego, v. 26, n. 3, p. 224-232, Mar. 2003.

COLOMBO, R.; BELLINGERI, D.; FASOLINI, D.; MARINO, C. M. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 86, n. 1, p. 120-131, June 2003.

COLOMBO, S.; CHICA-OLMO, M.; ABARCA, F.; EVA, H. Variographic analysis of tropical forest cover from multi-scale remotely sensed imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, Amsterdam, v. 58, n. 5/6, p. 330- 341, July 2004.

CORTEZ, E. M. Research, education, and economics information system: An engine for strategic planning and information policy development at the U. S. Department of Agriculture. **Journal of Government Information**, Oxford, v. 26, n. 2, p. 119-129, Mar. 1999.

COSTA, F. G. **Avaliacao do potencial de expansao da soja na Amazonia Legal: uma aplicacao do modelo de Von Thunen**. 2001. 159 p. Dissertacao de (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

COULSON, R. N. Intelligent geographic information systems and integrated pest management. **Crop Protection**, Oxford, Volume 11, v. 6, p. 507-516, Dec. 1992.

COX, S. Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 36, n. 2/3, p. 93-111, Nov. 2002.

DAWSON, K. M.; BAISE, L. G. Three-dimensional liquefaction potential analysis using geostatistical interpolation. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, Oxford, v. 25, n. 5, p. 369-381, July 2005.

DUAN, Y.; EDWARDS, J. S.; XU, M. X. Web-based expert systems: benefits and challenges. **Information & Management**, Amsterdam, v. 42, n. 6, p. 799-811, Sept. 2005.

ESTRADA-PEÑA, A. Geostatistics and remote sensing using NOAA-AVHRR satellite imagery as predictive tools in tick distribution and habitat suitability estimations for *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) in South America. **Veterinary Parasitology**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 73-82, Feb. 1999.

FERNANDES, E. N. **Sistema inteligente de apoio ao processo de avaliação de impactos ambientais de atividades agropecuárias**. 1997. 122 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FERNANDES FILHO, E. I. **Utilização de sistemas de informações geográficas e sistemas especialistas na determinação da aptidão agrícola das terras**. 1996. 69 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FRANKLIN, R. B.; MILLS, A. L. Multi-scale variation in spatial heterogeneity for microbial community structure in an eastern Virginia agricultural field. **FEMS Microbiology Ecology**, Amsterdam, v. 44, n. 3, p. 335-346, June 2003.

GROVE, R. F. Design and development of knowledge-based systems on the web. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENCE SYSTEMS: ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS FOR THE NEW MILLENNIUM, 9., 2000, Louisville, KY, USA. **Proceedings...** Louisville, KY: International Society of Computer Applications, 2000. p. 147-150.

HOKKANEN, H. M.; LYNCH, J. M. **Biological control - benefits and risk**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JAGTAP, S. S.; JONES, J. W. Adaptation and evaluation of the CROPGRO-soybean model to predict regional yield and production. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 93, n. 1-3, p. 73-85, Dec. 2002.

JAIME-GARCIA, R.; ORUM, T. V.; FELIX-GASTELUM, R.; TRINIDAD-CORREA, R.; VANETTEN, H. D.; NELSON, M. R. Spatial Analysis of *Phytophthora infestans* Genotypes and Late Blight Severity on Tomato and

Potato in the Del Fuerte Valley Using Geostatistics and Geographic Information Systems. **Phytopathology**, St Paul, v. 91, n. 12, p. 1156-1165, Dec. 2001.

JEDRA, M.; EL KHATTABI, N.; LIMOURI, M.; ESSAID, A. Recognition of seed varieties using a time-delay neural network: analysis of eletrophoretic images. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 22, n. 1, p. 1-10, Feb. 1999.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective**. New Jersey: Upper Saddle River, 2000. 544 p. (Prentice Hall Series in Geographic Information Science).

KIM, K. S.; WANG, T. C.; YANG, X. B. Simulation of apparent infection rate to predict severity of soybean rust using a fuzzy logic system. **Phytopathology**, St Paul, v. 95, n. 10, p. 1122-1131, Oct. 2005.

LAVINE, B. K.; DAVIDSON, C.; MEER, R. K. V.; LAHAV, S.; SOROKER, V.; HEFETZ, A. Genetic algorithms for deciphering the complex chemosensory code of social insects. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, Amsterdam, v. 66, n. 1, p. 51-62, Apr. 2003.

LEFF, B.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A. Geographic distribution of major crops across the world. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 18, n. GB1009, Jan. 2004.

LI, Z. H.; SHEN, Z. R.; YANG, M. H.; ZHENG, J. Q.; LI, J. Computer-aided technology for regional pest management: Towards agricultural sustainability. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 11, n. 1/4, p. 37-43, Oct. 1998.

LIEBHOLD, A. M. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. **Annual Review Entomology**, Palo Alto, v. 38, p. 303-327, 1993.

LIEBHOLD, A. M.; ZHANG, X.; HOHN, M. E.; ELKINTON, J. S.; TICEHURST, M., et al. Geostatistical analysis of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) egg mass populations. **Environmental Entomology**, Lanhan, v. 20, n. 5, p. 1407-1417, Oct. 1991.

LIM, K. J.; ENGEL, B. A. Extension and enhancement of national agricultural pesticide risk analysis (NAPRA) WWW decision support system to include nutrients. **Computers and Electronics in Agriculture**, West Lafayette, v. 38, n. 3, p. 227-236, Mar. 2003.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Systems and Science**. John Wiley and Sons, 27 de julho de 2001. 453 p.

LOPES ASSAD, M. L. Sistemas de informações geográficas na avaliação da aptidão agrícola das terras. In: ASSAD, E. D., SANO, E. E. (Ed.). **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília, DF: EMBRAPA/CPAC, 1998. p. 173-199.

LOWENBERG-DeBOER, J. Economic analysis of precision farming. IN: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M.; MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R.; VALLE, F. X. R.; GOMIDE, R. L. **Agricultura de Precisão**, 2000. p. 147-180.

MANNING, W. J.; TIEDEMANN, A. V. Climate change: Potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 88, n. 2, p. 219-245, 1995.

MASSAD, E.; ORTEGA, N. R. S.; STRUCHINER, C. J.; BURATTINI, M. N. Fuzzy epidemics. **Artificial Intelligence in Medicine**, Amsterdam, v. 29, n. 3, p. 241-259, Nov. 2003.

MATTHEWS, K. B.; SIBBALD, A. R.; CRAW, S. Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: integrating geographic information system and environmental models with search and optimisation algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 23, n. 1, p. 9-26, June 1999.

MAVROULIDOU, M.; HUGHES, S. J.; HELLAWELL, E. E. A qualitative tool combining an interaction matrix and a GIS to map vulnerability to traffic induced air pollution. **Journal of Environmental Management**, London, v. 70, n. 4, p. 283-289, Apr. 2004.

McCUISTION, J. D.; BIRK, R. From observations to decision support: the newparadigm for satellite data. **Acta Astronáutica**, Oxford, v. 56, n. 1-2, p. 5-8, Jan. 2005.

McKENNEY, D. W.; MACKKEY, B. G.; JOYCE, D. Seedwhere: a computer tool to support seed transfer and ecological restoration decisions. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 14, n. 6, p. 589-595, 1999.

- MIRANDA, J. I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2005. 425 p.
- MORALES, F. J.; JONES, P. G. The ecology and epidemiology of whitefly-transmitted viruses in Latin America. **Virus Research**, Amsterdam, v. 100, n. 1, p. 57-65, Mar. 2004.
- NELSON, M. R.; ORUM, T. V.; JAIME-GARCIA, R.; NADEEM, A. Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management. **Plant Disease**, St. Paul, v. 83, n. 4, p. 308-319, Apr. 1999.
- NEVES, M. C.; SPADOTTO, C. A.; LUIZ, A. J. B.; QUIRINO, T. R. Caracterização espaço-temporal do uso de agrotóxicos para o estado de São Paulo. In: ASSAD, E. D. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. 2. ed. Brasília: Embrapa-SPI/ Embrapa-CPAC, 1998. 434 p.
- NICOLAS, H. Using remote sensing to determine of the date of a fungicide application on winter wheat. **Crop Protection**, Oxford, v. 23, n. 9, p. 853-863, Sept. 2004.
- PINHEIRO, E. S.; KUX, H. J. H. Imagens Quickbird aplicadas ao mapeamento do uso e cobertura da terra do centro de pesquisas e conservação da natureza Pró-Mata. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados: métodos inovadores**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 286 p.
- PIVONIA, S.; YANG, X. B. Assessment of epidemic potential of soybean rust in the United States. **Plant Disease**, St Paul, v. 89, n. 6, p. 678-682, June 2005.
- PIVONIA, S.; YANG, X. B. Assessment of the potential year-round establishment of soybean rust throughout the world. **Plant Disease**, St Paul, v. 88, n. 5, p. 523-529, May 2004.
- POWER, D. J. Web-based and model-driven decision support systems: concepts and issues. In: AMERICAS CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS - AMCIS 2000, 2000, Long Beach, CA. **Proceedings...** Long Beach, CA., 2000.
- RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. Estimating Historical Changes in Global Land Cover: Croplands from 1700 to 1992, **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 13, n. 4, p. 997-1028, Dec. 1999.

RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A.; NORMAN, J.; McSWEENEY, K. The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. **Global Ecology & Biogeography**, Washington, v. 11, n. 5, p. 377-392, Sept. 2002.

RAMASUNDARAM, V.; GRUNWALD, S.; MANGEOT, A.; COMERFORD, N. B.; BLISS, C. M. Development of an environmental virtual field laboratory. **Computers & Education**, Oxford, v. 45, n. 1, p. 21-34, Aug. 2005.

REIS, E. M. **Previsão de doenças de plantas**. Passo Fundo, RS: Universidade de Passo Fundo - Editora Universitária, 2004. 316 p.

ROSSI, R. E.; MULLA, D. J.; JOURNEL, A. G.; FRANZ, E. H. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. **Ecological Monographs**, Washington, v. 62, n. 2, p. 277-314, June 1992.

SCHERM, H.; YANG, X. B. Interannual variations in wheat rust development in China and the United States in relation to the El Niño/southern oscillation. **Phytopathology**, St Paul, v. 85, n. 9, p. 970-976, Sept. 1995.

SEELAN, S. K.; LAGUETTE, S.; CASADY, G. M.; SEIELSTAD, G. A. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 88, n. 1/, p. 157-169, Nov. 2003.

SILVA, A. B. **Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003. 236 p.

SILVA, F. A. M.; ASSAD, E. D. Análise espaço-temporal do potencial hídrico climático do estado de Goiás. In: ASSAD, E. D. **Sistema de informações geográficas: Aplicações na agricultura**. 2. Ed. Brasília: Embrapa-SPI/ Embrapa-CPAC, 1998. 434 p.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F. A computerized system for matching climates in ecology. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 13, n. 3/4, p. 281-299, 1985.

TENG, P. S.; YANG, X. B. Biological impact assessment and risk analysis in plant pathology. **Annual Review Phytopathology**, Palo Alto, v. 31, p. 495-521, 1993.

TOBLER, W. R. A computer model simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**, Worcester, v. 46, n. 2, p. 234-240, 1970.

TURBAN, E.; ARONSON, J. **Decision support systems and intelligent systems**. New Jersey, 1998. 889 p.

TURBAN, E.; RAINER Jr., R. K.; POTTER, R. E. **Administração da tecnologia da informação: teoria e pratica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003. 598 p.

UREÑA, R.; RODRÍGUEZ, F.; BERENGUEL, M. A machine vision system for seeds germination quality evaluation using fuzzy logic. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 32, n. 1, p. 1-20, July 2001.

VARGENS, J. M.; TANSCHKEIT, R.; VELLASCO, M. M. B. R. Previsão de produção agrícola baseada em regras lingüísticas e lógica fuzzy. **Revista Brasileira de Controle & Automação**, Campinas, v. 2, n. 14, p. 114-120, 2003.

VERA, M. T.; RODRIGUEZ, R.; SEGURA, D. F.; CLADERA, J. L. SUTHERST, R. W. Potential geographical distribution of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitus capitata* (Diptera: Tephritidae), with emphasis on Argentina and Australia. **Environmental Entomology**, Lanhan, v. 31, n. 6, p. 1009-1022, Dec. 2002.

WALLACE, C. S. A.; WATTS, J. M.; YOOL, S. R. Characterizing the spatial structure of vegetation communities in the Mojave Desert using geostatistical techniques. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 397-410, May 2000.

WEICK, C. W. Agribusiness technology in 2010: directions and challenges. **Technology in Society**, New York, v. 23, n. 1, p. 59-72, 2001.

WOLLENWEBER, B.; PORTER, J. R.; LÜBBERSTEDT, T. Need for multidisciplinary research towards a second green revolution. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 8, n. 3, p. 337-341, June 2005.

YANG, C. C.; PRASHER, S. O.; LANDRYA, J. A. RAMASWAMY, H. S. Development of a herbicide application map using artificial neural networks and fuzzy logic. **Agricultural Systems**, Oxford, v. 76, n. 2, p. 561-574, May 2003.

YANG, X. B.; FENG, F. Ranges and diversity of soybean fungal diseases in North America. **Phytopathology**, St Paul, v. 91, n. 8, p. 769-775, Aug. 2001.

YONOW, T.; KRITICOS, D. J.; MEDD, R. W. The potential geographic range of *Pyrenophora semeniperda*. **Phytopathology**, St Paul, v. 94, n. 8, p. 805-812, Aug. 2004.

ZHANG, N. Q.; WANG, M. H.; WANG, N. Precision agriculture - a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 36, n. 2/3, p. 113-132, Nov. 2002.

CAPÍTULO 2

SISTEMA DE LÓGICA 'FUZZY' PARA DESCREVER O PROCESSO MONOCÍCLICO DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA.

1 RESUMO

ALVES, Marcelo de C. **Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ para descrever o processo monocíclico da ferrugem asiática da soja.** 2006. 186 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, MG.*

A Ferrugem Asiática (*Phakopsora pachyrhizi* H. Sydow & P. Sydow), relatada em diversas regiões do globo terrestre de climas tropicais e subtropicais, causa redução significativa na produtividade da soja (*Glycine max* L. Merr.). Fatores bióticos, como interação patógeno/hospedeiro, e abióticos influenciam o progresso da doença. Assim, objetivou-se neste trabalho estudar os efeitos do binômio temperatura e duração de molhamento foliar no processo monocíclico da ferrugem asiática nas cultivares Conquista, Savana e Suprema com base em um Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ (SLF) e modelos de regressão não-linear desenvolvidos com base resultados experimentais. Para o desenvolvimento e validação do sistema, foi conduzido um experimento no Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras, em câmaras de crescimento vegetal nas temperaturas de 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C e períodos de molhamento foliar de 0, 6, 12, 18 e 24 horas. A inoculação foi realizada pulverizando-se as plantas com suspensão de 10^4 uredósporos de *P. pachyrhizi*.mL⁻¹ de água. De posse dos dados, calculou-se a área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD), utilizada como variável dependente para desenvolver e validar os modelos de regressão não-linear e SLF. Assim, pôde-se verificar melhor ou igual performance do SLF quando comparado aos modelos de regressão não-linear, para estimar a intensidade da ferrugem, à exceção da variável severidade para a cultivar Suprema. O sistema foi implementado com o uso de Sistema de Informações Geográficas e Geoestatística, sendo possível observar áreas favoráveis à doença, bem como a relação da intensidade da ferrugem com a evapotranspiração potencial e com o índice de umidade de Thornthwaite calculados em Minas Gerais.

*Comitê Orientador: Edson Ampélio Pozza – UFLA (Orientador), José da Cruz Machado – UFLA (Co-orientador).

2 ABSTRACT

ALVES, Marcelo de C. **Fuzzy Logic System modeling asian soybean rust monocyclic process.** 2006. 186 p. Tesis (Doctorate in Crop Science) – Federal University of Lavras, MG.*

The asian rust (*Phakopsora pachyrhizi* H. Sydow & P. Sydow) which has been reported in areas of tropical and subtropical climates around the world, causes significant soybean (*Glycine max* L. Merr.) productivity reduction. The disease progress is influenced by biotic factors, as pathogen/host interaction, and abiotic factors of the environment. Thus, the objective of this work was to study the effects of temperature and leaf wetness period in the asian rust monocyclic process on the Conquista, Savana and Suprema cultivars using Fuzzy Logic System (FLS) and non-linear regression models based on experimental data. For the system development and evaluation, an experiment was conducted at the Department of Plant Pathology at Federal University of Lavras, in growth chamber at temperatures of 15°, 20°, 25° and 30 °C and leaf wetness periods of 0, 6, 12, 18 and 24 hours. The plants were inoculated by spraying an inoculum suspension of *P. pachyrhizi* at concentration of 10^4 uredinospore.mL⁻¹. With the obtained disease progress data, the area under disease progress curves (AUDPC) was calculated and used as dependent variable to develop and validate the disease progress using non-linear regression and the FLS. As a result, it was verified the better or equal FLS performance when compared to non-linear regression models to estimate the soybean rust intensity, except to the Suprema cultivar severity variable. The system was implemented using Geographical Information Systems and Geostatistics. Thus, it was possible to map favorable areas to the disease progress and to observe the disease intensity relationship with the potential evapotranspiration and humidity Thoirnthwaite index calculated in Minas Gerais.

*Advising Committee: Edson Ampélio Pozza – UFLA (Adviser), José da Cruz Machado – UFLA (Co-Adviser).

3 INTRODUÇÃO

A ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi* H. Sydow & P. Sydow) da soja (*Glycine max* L. Merrill) foi relatada em diversas regiões tropicais e subtropicais, causando reduções significativas de produtividade e redução da qualidade de sementes (Bromfield, 1984; Hartman et al., 2005; Kawuki et al., 2004; McGee, 1992; Medina et al., 2006; Sinclair & Backman, 1989; Vale, 1985; Yang et al., 1990; Yang et al., 1991; Yorinori & Lazzarotto, 2004), com perdas de até 70% na produção (Bromfield, 1976). A ferrugem ocorre em quase todas as áreas produtoras de soja do Brasil. Os estados mais atingidos na safra 2003/04 foram Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e São Paulo. Na safra 2002/03, no Brasil, a Ferrugem Asiática causou perdas estimadas em 4,011 milhões de megagramas ou o equivalente a US\$ 884,25 milhões, enquanto em 2004, considerando perda de grãos, custo de controle e queda de arrecadação, os prejuízos foram da ordem de US\$ 2,28 bilhões (Yorinori & Lazzarotto, 2004).

O sucesso da infecção do patógeno depende da seqüência de eventos determinada pela germinação de esporos, formação de apressório e penetração. Cada um desses eventos, a subsequente colonização e esporulação, são influenciadas por fatores bióticos como interação patógeno/hospedeiro e fatores abióticos do ambiente. Entre os fatores abióticos, a temperatura e o molhamento foliar exercem papel fundamental, principalmente nos processos monocíclicos de germinação, infecção e colonização de *P. pachyrhizi* em soja. Assim, diversos trabalhos foram realizados para modelar o efeito de temperatura e da umidade no progresso da doença em cultivares brasileiras (Vale, 1984; Vale et al., 1990) e cultivares adaptadas a outros países (Batchelor et al., 1997; Kim et al., 2005; Marchetti et al., 1975; Melching et al., 1989; Pivonia & Yang, 2004; Reis et al., 2004). Segundo Sinclair & Backman (1989), a faixa de temperatura

ótima para a infecção é de 20 °C a 25 °C. Nessas condições, havendo disponibilidade de água livre sobre a superfície da planta, a infecção inicia-se após 6 horas da deposição do esporo (Marchetti et al., 1975; Melching et al., 1989; Vale et al., 1990). Entretanto, a partir de 12 horas (Marchetti et al., 1975; Melching et al., 1989) até 24 horas de molhamento foliar (Vale et al., 1990) houve maiores chances de sucesso no estabelecimento da infecção (Sinclair & Backman, 1989). Sendo assim, tais estudos são importantes para estimar a ocorrência potencial e formular estratégias de controle da doença em regiões geográficas ainda não relatadas (Pivonia & Yang, 2005), além de verificar o potencial de disseminação nas principais regiões produtoras ao longo dos meses do ano (Alves et al., 2006; Pivonia & Yang, 2004).

Para modelar a influência de variáveis abióticas no progresso da doença, podem-se utilizar abordagens por regressão linear (Vale et al., 1990), regressão não-linear (Reis et al., 2004), técnicas de Inteligência Artificial, tais como Redes Neurais (Batchelor et al., 1997; Pinto et al., 2002) e Lógica ‘Fuzzy’ (Kim et al., 2005). No entanto, no caso do uso de regressão e Redes Neurais há necessidade de levantamento de dados para realizar o melhor ajuste de modelos (Reis et al., 2004) e treinamento da rede (Batchelor et al., 1997). Por outro lado, com a técnica de modelagem por Lógica ‘Fuzzy’, medidas quantitativas deixam de ser extremamente necessárias para desenvolver um modelo (Kim et al., 2005), apesar da opção de essas observações serem utilizadas no processo de modelagem (Mouzouris & Mendel, 1997). Nesse contexto, a Lógica ‘Fuzzy’ foi aplicada na modelagem de processos físicos, químicos e biológicos de natureza incerta e ambígua (Kim et al., 2005; Massad et al., 2003; Scherm, 2000; Urenã et al., 2001).

Outras características que justificam a aplicação de um Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ (SLF) estão relacionadas com a flexibilidade de técnica, facilidade de compreensão de conceitos, possibilidade de modelar funções não-

lineares complexas, possibilidade de desenvolvimento com base na experiência de especialistas, integração com outras técnicas de automatização e por se embasar na linguagem natural utilizada por seres humanos (Cox, 1994; Tanaka, 1997).

Da mesma forma, não há medidas precisas sobre a influência de outras variáveis, tais como fertilidade do solo, cultivares resistentes, variáveis climáticas, práticas de manejo no progresso da doença, sendo necessário criar uma medida subjetiva para avaliar o progresso potencial da doença.

Considerando-se a importância da cultura da soja para o Brasil, bem como o risco representado pela ferrugem asiática e as perdas devidas a essa doença, faz-se necessário conhecer aspectos epidemiológicos da doença em cultivares brasileiras de forma a possibilitar prever a doença. Portanto, objetivou-se neste trabalho, estudar o efeito do binômio temperatura-molhamento foliar no processo monocíclico da ferrugem asiática da soja, nas cultivares Conquista, Savana e Suprema, com base em um Sistema de Lógica 'Fuzzy' e modelos de regressão não-linear.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para desenvolver o Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ (SLF) proposto, foram utilizadas as fases de seleção do problema, desenvolvimento, avaliação e implementação.

Seleção do problema

Consideraram-se como critérios para estudar a aplicação de um SLF para estimar a ferrugem asiática da soja, a seleção do problema, a ocorrência sazonal, a existência de especialistas e a literatura na área, a importância da cultura e a facilidade de adquirir informações.

Na fase de desenvolvimento do protótipo, informações da literatura sobre a epidemiologia da doença e especialistas na área foram consultadas (Batchelor et al., 1997; Bromfield, 1984; Kim et al., 2005; Marchetti et al., 1975; Melching et al., 1989; Pivonia & Yang, 2004; Reis et al., 2004; Vale, 1984; Vale et al., 1990) e alguns aspectos importantes foram considerados no projeto, tais como, simplicidade para facilitar sua posterior implementação, ser baseado no conhecimento e experiência de especialistas de modo a produzir resultados precisos e flexibilidade suficiente para permitir incorporar novas variáveis (Von Altrock, 1995; Klir, 1995; Zadeh, 1965).

Desenvolvimento

No início da fase de desenvolvimento definiram-se as funções de pertinência em cinco categorias relacionadas às variáveis temperatura, molhamento foliar e área abaixo da curva de progresso da incidência da doença,

classificadas como muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, de forma a constituir os conjuntos ‘fuzzy’. Posteriormente especificou-se um conjunto de regras ‘if-then’, para relacionar as variáveis de forma a constituir o mecanismo de inferência (Tanaka, 1997). O sistema utilizou o operador de implicação “Min de Mamdani” por ser intuitivo, amplamente aceito e por traduzir melhor a experiência humana (Driankov et al., 1993), bem como o método de composição da soma limitada (Cox, 1994), escolhido devido à natureza das regras, já que cada uma define um incremento ou decréscimo na ocorrência da ferrugem (Vargens et al., 2003). Quando comparado ao operador ‘max’, que considera apenas o valor de pertinência máximo, o método da soma limitada foi mais adequado, de forma semelhante à verificada no estudo de Vargens et al. (2003). Ao final da fase de desenvolvimento do sistema foram realizadas correções para confirmar a lógica interna e seu pleno funcionamento baseado no conhecimento de especialistas, referências na área e pleno funcionamento dos processos de fuzzificação, inferência e defuzzificação (Figura 1).

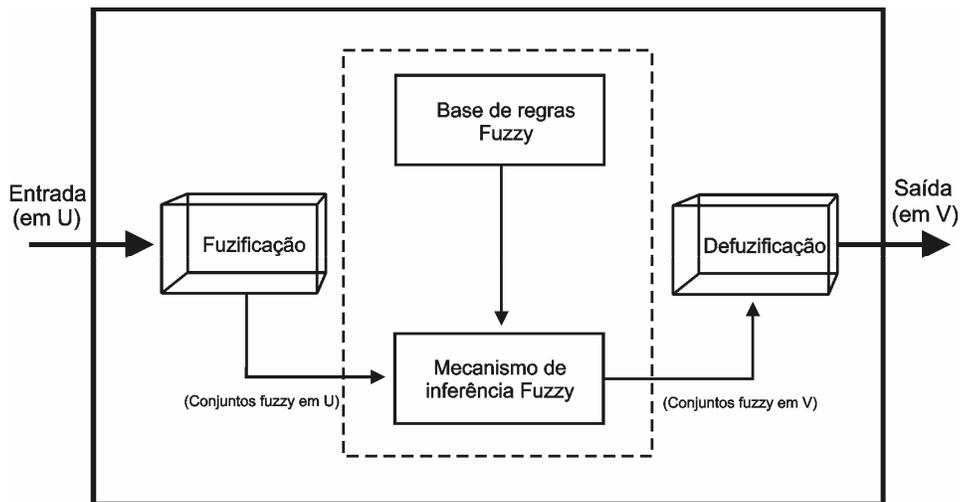


FIGURA 1 Estrutura de um Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ (Adaptado de Mouzouris & Mendel, 1997). UFLA, Lavras, MG, 2006.

Validação

A obtenção dos dados para a validação do sistema foi obtida por meio de experimento realizado em câmaras de crescimento do Laboratório de Epidemiologia e Manejo do Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA). O delineamento utilizado foi em blocos, ao acaso, em esquema de tratamentos fatorial 4 x 5 com 3 repetições, sendo 4 temperaturas (15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C) e 5 períodos de molhamento foliar (0, 6, 12, 18 e 24 horas). Após projetar o delineamento, sementes de soja cultivares Conquista, Savana e Suprema foram plantadas em vaso contendo 5kg da mistura solo, areia e matéria orgânica (esterco bovino) na proporção 2:1:0,5. Foi realizado desbaste 15 dias após o plantio deixando duas plantas por vaso, sendo essa a parcela experimental. As plantas foram mantidas em casa-de-vegetação até o estágio vegetativo V₃ de acordo com a Escala Fenológica da Soja proposta por Ritchie et al. (1982). O inóculo do fungo foi obtido mediante a coleta de uredósporos de *P. pachyrhizi* diretamente de plantas doentes, cultivar Conquista, em casa de vegetação, no câmpus experimental da UFLA, e armazenado em nitrogênio líquido (-180 °C). Foi realizado teste para verificar a viabilidade do inóculo antes da inoculação, o qual apresentou 89% de germinação.

A inoculação foi realizada pulverizando-se todas as folhas das plantas com suspensão na concentração de 10⁴ uredósporos de *P. pachyrhizi*.mL⁻¹ até o escoamento da suspensão. Para obter os diferentes períodos de molhamento foliar, as plantas recém-pulverizadas com a suspensão de uredósporos foram mantidas em câmara úmida pelo período de cada tratamento, envolvidas por sacos plásticos transparentes. No tratamento de zero hora de molhamento, as plantas foram levadas sem câmara úmida para as câmaras de crescimento vegetal, permitindo-se a secagem rápida da suspensão pulverizada. Durante a condução do experimento, irrigações foram realizadas depositando água

diretamente no colo das plantas. A partir do 6º dia após a inoculação, realizaram-se quatro avaliações de severidade (% de área foliar com lesões) e de incidência (% de folíolos centrais de todos os trifólios das plantas) a cada três dias, em função do aparecimento dos primeiros sinais na cultivar Conquista. A severidade e a incidência de ferrugem foram contabilizadas no folíolo central de todos os trifólios de cada planta. A severidade foi obtida utilizando-se a escala de notas de Bromfield (1984): nota 0 = 0%, nota 1 = 0,15%, nota 2 = 1,0%, nota 3 = 2,5%, nota 4 = 8,0%, nota 5 = 13,0%. De posse dos dados de intensidade da doença, calculou-se a área abaixo da curva de progresso da incidência da doença (AACPI) e da severidade (AACPS), de acordo com Campbell & Madden (1990) para cada combinação de temperatura e molhamento dentro de cada cultivar suscetível à doença (Zambenedetti, 2005).

Após a obtenção dos dados, procedeu-se à análise de variância para AACPI e AACPS de acordo com um esquema fatorial entre temperatura e molhamento foliar. As variáveis significativas no teste F foram submetidas à análise de regressão não-linear de forma a obter uma equação para representar os efeitos da interação da temperatura com duração do molhamento foliar sobre a intensidade da ferrugem. Nesse caso, houve interação significativa da temperatura e molhamento foliar para AACPI nas cultivares avaliadas ($p < 0,01$), bem como para AACPS, nas cultivares Conquista ($p < 0,05$), Savana e Suprema ($p < 0,01$). Com ajuste dos modelos de regressão não-linear para os dados de AACPI e AACPS, observou-se maior intensidade da doença nas cultivares Conquista, Savana e Suprema, sob períodos de molhamento foliar acima de 12 horas e temperaturas próximas a 20 °C. Temperaturas acima de 28 e abaixo de 15 °C, bem como períodos de molhamento foliar abaixo de 6 horas resultaram em menor AACPI e AACPS. No entanto, sob períodos de molhamento foliar próximos a 24 h e temperaturas próximas a 30 °C e 15 °C observou-se ocorrência da doença, porém em baixa intensidade (Figura 2).

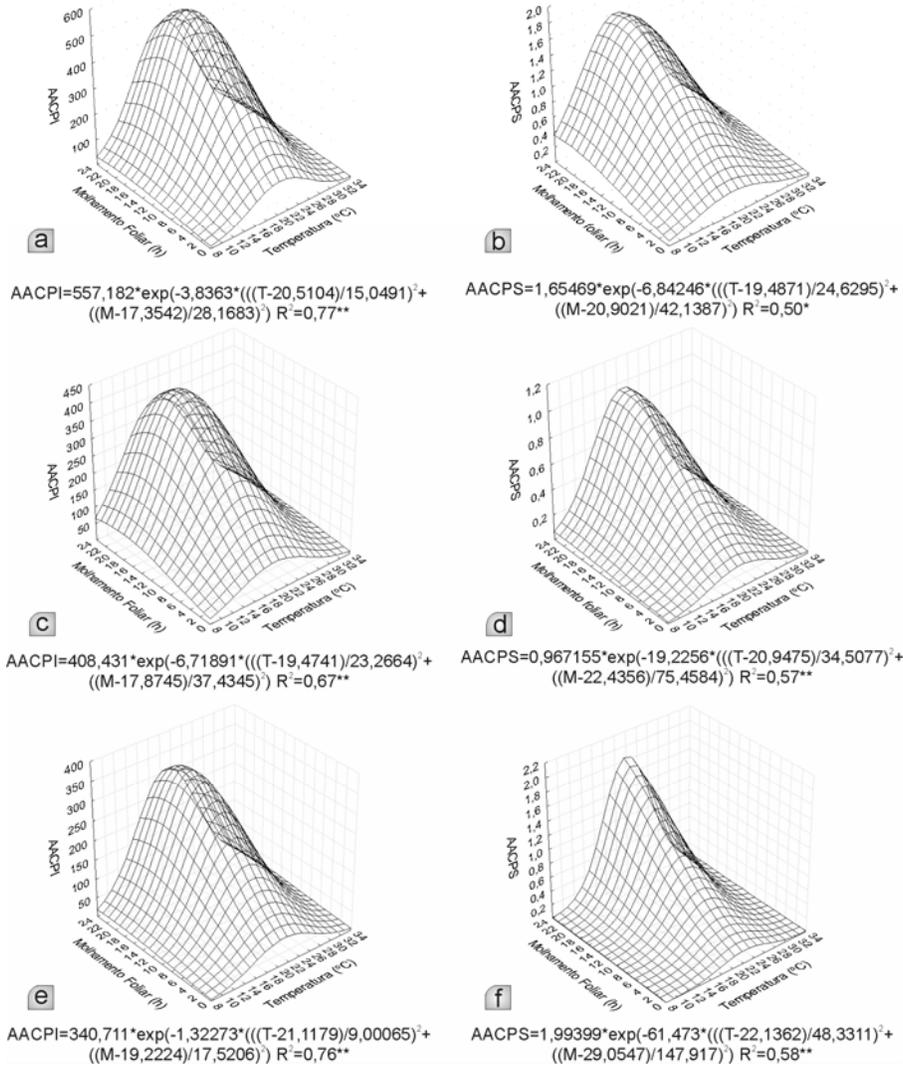


FIGURA 2 Modelos de regressão não-linear ajustados ao progresso da incidência (AACPI) (a, c, e) e severidade (AACPS) (b, d, f) da ferrugem asiática da soja, nas cultivares conquista (a, b), savana (c, d) e suprema (e, f). UFLA, Lavras, MG, 2006.

Cabe ressaltar que a variável dependente no caso do SLF foi denominada de área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) e de intensidade da doença, já que nesse caso, foram considerados tanto resultados de AACPI como de AACPS no desenvolvimento do sistema de inferência ‘fuzzy’.

Após a coleta dos dados, procedeu-se à validação do SLF por meio da correlação de Pearson e tendência de relação linear entre valores estimados e observados, de forma comparativa com os modelos de regressão não-linear.

Implementação

Após a fase de validação, procedeu-se à fase de implementação com o uso de um Sistema de Informações Geográficas e Geoestatística (Burrough & McDonnell, 1998). Assim, utilizou-se do SNF para estimar a doença baseando-se em observações de temperatura mensal média de 39 estações climatológicas do INMET, referentes às Normais Climatológicas (1961-1990) (BRASIL, 1992) do mês de janeiro, simulando a ocorrência de molhamento foliar de 12 horas em todas as estações consideradas, pois não há séries históricas dessa variável (Brasil, 1992). Como o número de estações climatológicas disponíveis em Minas Gerais e regiões circunvizinhas são escassos, optou-se por utilizar a técnica da co-krigagem (Isaaks & Srivastava, 1989) para melhorar a qualidade da interpolação dos dados e aumentar a resolução espacial das estimativas, por meio de uma base de dados de altitude, latitude e longitude, em malha regular de um 1 km no interior dos limites do estado de Minas Gerais, considerando-se o modelo de elevação digital da superfície terrestre com resolução espacial de 90m (NASA, 2005). Adicionaram-se à malha regular no interior de Minas Gerais, os valores de altitude, latitude e longitude referentes às estações do INMET. Em

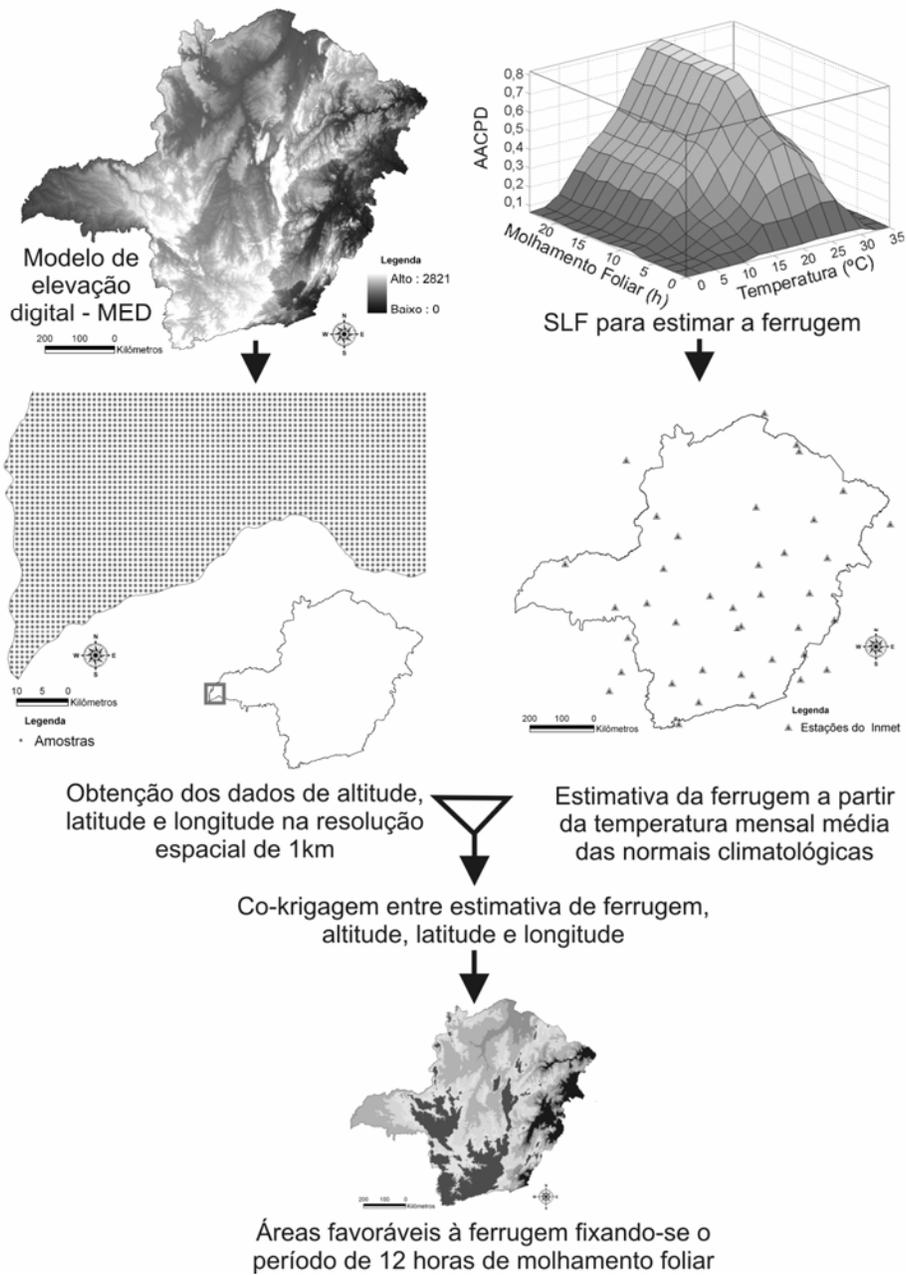


FIGURA 3 Esquema utilizado para implementar o Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ (SLF). UFLA, Lavras, MG, 2006.

seguida, aplicou-se a técnica da co-krigagem para espacializar o progresso espacial potencial da doença com base nessas variáveis (Figura 3). Optou-se pela técnica da co-krigagem para explorar a influência conhecida da altitude, latitude e longitude na variação da temperatura (Sediyama & Mello Jr., 1998), bem como na ocorrência de doenças (Yang & Feng, 2001), além de melhorar a resolução espacial das estimativas.

Após espacializar a ferrugem utilizando-se a técnica da co-krigagem, o mesmo procedimento foi aplicado para caracterizar o clima de Minas Gerais, de forma a verificar a existência de relação entre a intensidade da ferrugem com o índice de umidade anual de Thornthwaite (Iu), bem como com a evapotranspiração potencial anual (ETp) (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite e Mather, 1955). A caracterização climática foi realizada com base em dados climatológicos de temperatura e precipitação pluvial referente às 32 localidades do INMET (BRASIL, 1992). Para isso, calculou-se a ETp pelo método de Thornthwaite com base nos valores de temperatura mensal média e, a partir daí, de posse da precipitação pluvial e considerando-se a capacidade de armazenamento de água no solo equivalente a 100 mm (valor médio para a maioria das plantas cultivadas), calculou-se o balanço hídrico climatológico. Baseando-se nos valores de excesso e déficit obtidos do balanço hídrico, foi possível estimar o índice hídrico e índice de aridez, de forma a se obter o Iu segundo Thornthwaite, para cada localidade. Em seguida procedeu-se à interpolação da ETp e do Iu, gerando os mapas de caracterização climática. Após a interpolação, as classes do Iu e ETp foram definidas conforme Thornthwaite (1948).

Cabe ressaltar que o método da krigagem ordinária foi utilizado de forma comparativa com a co-krigagem para estimar áreas favoráveis à ferrugem asiática em Minas Gerais a fim de comparar a qualidade das estimativas de ambas metodologias.

‘Softwares’ utilizados

O MATLAB R2006b v.7.3.0.267[®] e ArcGis9.0[®] foram utilizados respectivamente para desenvolver e implementar o SLF. O Statistica 6.0[®] e SAS v.8.1[®] foram utilizados para validar o modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na construção do SLF, as variáveis de entrada e saída foram divididas em cinco categorias, de acordo com informações de especialistas, sendo classificadas de acordo com a proximidade do universo de discurso. Por exemplo, em uma posição do conjunto ‘fuzzy’ alta no universo para temperatura, e baixa no universo para duração do molhamento foliar, implicou condições desfavoráveis ao progresso da ferrugem asiática da soja (Figura 4). Em seguida, especificou-se um conjunto de regras baseadas no conhecimento de especialistas, de acordo com a influência da temperatura e do molhamento foliar na ocorrência de doença (Tabela 1), de forma a constituir, juntamente com os conjuntos ‘fuzzy’ o sistema de inferência (Figura 5). Com isso, possibilitou-se desenvolver uma superfície de resposta do SLF referente às variáveis de entrada e de saída (Figura 6). Ao final da fase de desenvolvimento, foram realizados testes com dados de forma a se verificar o pleno funcionamento do SLF, de acordo com uma estrutura adequada para processar dados de entrada de temperatura e molhamento foliar, conferindo uma resposta referente à área abaixo da curva de progresso da doença, de forma coerente com a literatura (Batchelor et al., 1997; Bromfield, 1984; Kim et al., 2005; Marchetti et al., 1975; Melching et al., 1989; Pivonia & Yang, 2004; Reis et al., 2004; Vale, 1984; Vale et al., 1990).

Posteriormente, procedeu-se à validação do modelo com base em dados de experimento desenvolvido sob condições controladas. Nesse caso, modelos de regressão não-linear foram ajustados aos dados de incidência e severidade da ferrugem para as cultivares Conquista, Savana e Suprema, para comparar com o SLF desenvolvido. Assim, pôde-se verificar maior correlação dos dados observados com as estimativas do SLF do que dos modelos de regressão não-linear para estimar o processo monocíclico da ferrugem em todas as curvas de

progresso de incidência e severidade, à exceção da variável severidade para a cultivar Suprema (Figuras 7, 8 e Tabela 2).

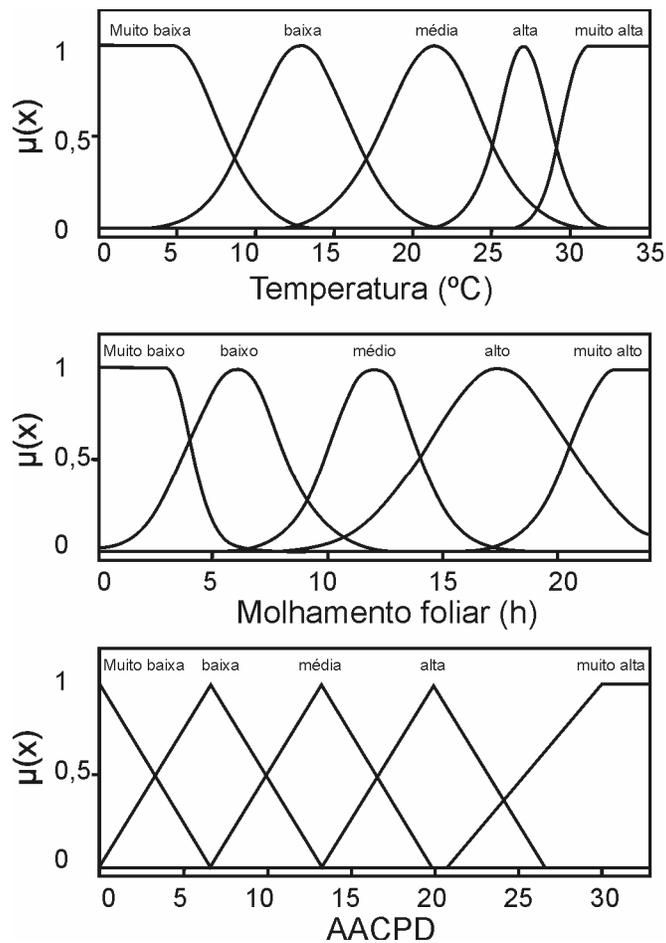


FIGURA 4 Conjuntos 'fuzzy' para temperatura, molhamento foliar e área abaixo da curva de progresso da ferrugem asiática da soja (AACPD) ou intensidade da doença. UFLA, Lavras, MG, 2006.

TABELA 1 Regras utilizadas para desenvolver o Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ relativo ao processo moncíclico da ferrugem asiática da soja (AACPD). UFLA, Lavras, MG, 2006.

Regra N°	SE (Temperatura - °C)	E (Molhamento foliar - h)	ENTÃO (AACPI)
1	-	Muito baixo	Muito baixa
2	Muito baixa	Baixo	Muito baixa
3	Muito baixa	Médio	Muito baixa
4	Muito baixa	Alto	Muito baixa
5	Muito baixa	Muito alto	Muito baixa
6	Baixa	Baixo	Baixa
7	Baixa	Médio	Média
8	Baixa	Alto	Média
9	Baixa	Muito alto	Média
10	Média	Baixo	Alta
11	Média	Médio	Muito alta
12	Média	Alto	Muito alta
13	Média	Muito alto	Muito alta
14	Alta	Baixo	Média
15	Alta	Médio	Média
16	Alta	Alto	Média
17	Alta	Muito alto	Média
18	Muito alta	Baixo	Baixa
19	Muito alta	Médio	Baixa
20	Muito alta	Alto	Baixa
21	Muito alta	Muito alto	Muito baixa

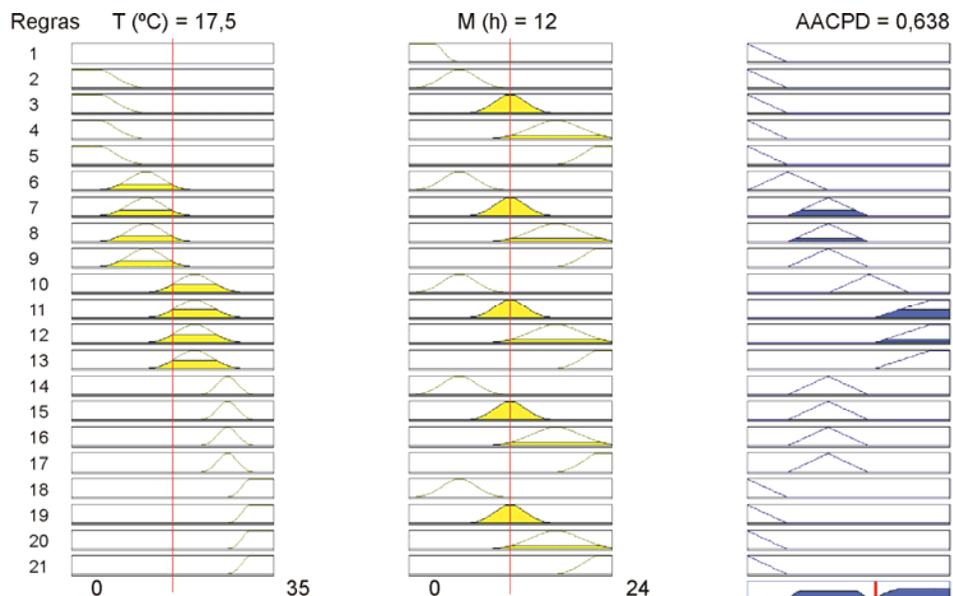


FIGURA 5 Diagrama de inferência 'fuzzy' utilizado para estimar o processo monocíclico da ferrugem asiática da soja (AACPD). UFLA, Lavras, MG, 2006.

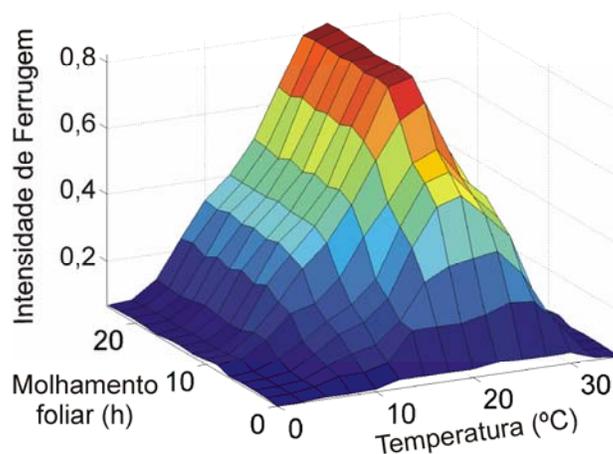


FIGURA 6 Representação tridimensional do SLF proposto para estimar o processo monocíclico da ferrugem asiática da soja (AACPD), com base na temperatura e no número de horas de molhamento foliar. UFLA, Lavras, MG, 2006.

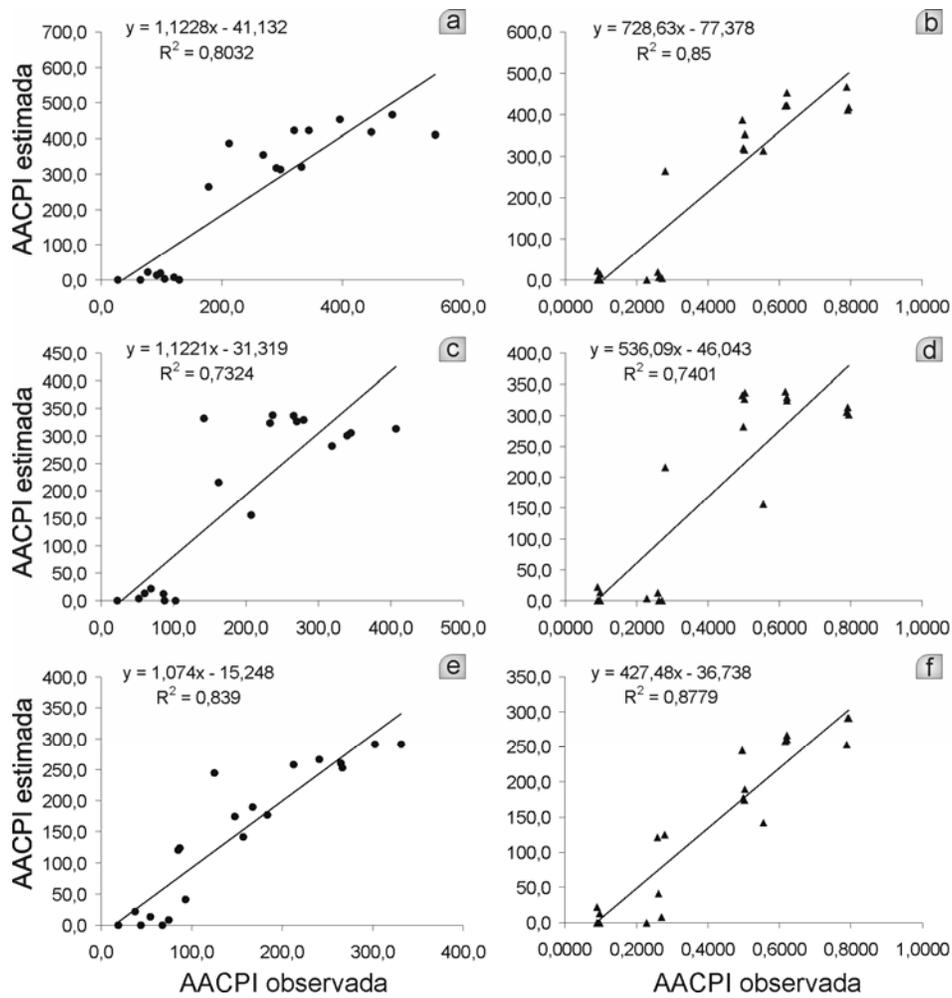


FIGURA 7 Relação linear entre valores observados e estimados da área abaixo da curva de progresso da incidência (AACPI) da ferrugem asiática da soja por meio de modelos de regressão não-linear (●) (a, c, e) e SLF (▲) (b, d, f), relativo às cultivares Conquista (a, b), Savana (c, d) e Suprema (e, f). UFLA, Lavras, MG, 2006.

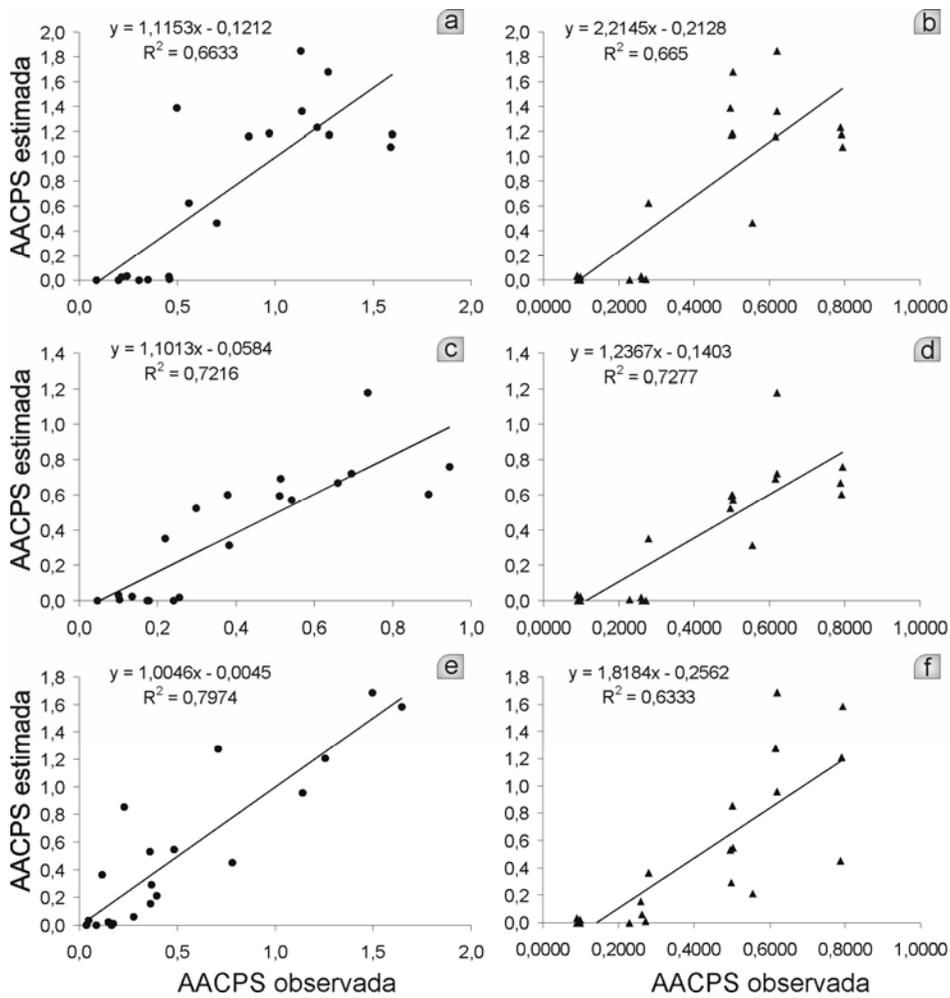


FIGURA 8 Relação linear entre valores observados e estimados da área abaixo da curva de progresso da severidade (AACPS) da ferrugem asiática da soja por meio de modelos de regressão não-linear (●) (a, c, e) e SLF (▲) (b, d, f), relativo às cultivares Conquista (a, b), Savana (c, d) e Suprema (e, f). UFLA, Lavras, MG, 2006.

Isso provavelmente ocorreu, pois, nesse caso específico, a duração do molhamento foliar apresentou tendência de incremento até o período de 29 h, diferente das curvas de progresso da doença referentes às cultivares Conquista e Suprema, as quais apresentaram resposta de período de molhamento máximo próximo a 17 h e 23 h.

TABELA 2 Coeficientes de correlação (r) de Pearson relativos aos valores observados da área abaixo da curva de progresso da incidência (AACPI) e da severidade (AACPS) da ferrugem asiática da soja e os estimados por modelos de regressão não-linear (RNL) e Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ (SLF). UFLA, Lavras, MG, 2006.

Método	AACPI observada			AACPS observada		
	Conquista	Savana	Suprema	Conquista	Savana	Suprema
RNL*	0,8962	0,85583	0,91599	0,81441	0,84947	0,89295
SLF	0,92195	0,8603	0,93697	0,81548	0,85303	0,7958

*Significativo a 1%.

De forma semelhante ao presente estudo, Kim et al. (2005) desenvolveram um SLF para estimar a taxa de infecção aparente de severidade da ferrugem asiática da soja considerando resultados de 73 experimentos de campo em Taiwan. Entretanto, nesse caso, o modelo foi desenvolvido com base na temperatura média noturna, temperaturas mínimas e máximas do dia, associadas a critérios biológicos relativos à doença, possibilitando-se estimá-la nas cultivares TK 5 e G8587, de modo a explicar 85% do progresso da severidade, principalmente nos estádios iniciais da epidemia.

Castañeda-Miranda et al. (2006) também desenvolveram um SLF para controlar o ambiente dentro de casa de vegetação com variáveis meteorológicas, entretanto, após validar o sistema, procedeu-se sua implementação em um circuito eletrônico integrado ao SLF (Figura 9).

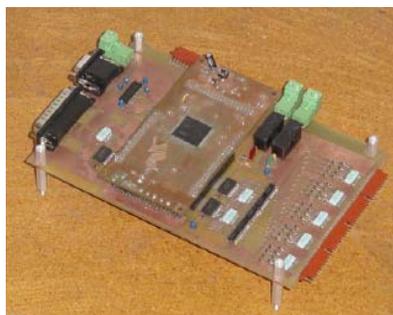


FIGURA 9 Exemplo de circuito eletrônico utilizado para processar dados e controlar temperatura, umidade e ventilação no interior de casa-de-vegetação (Adaptado de Castañeda-Miranda et al., 2006).

De forma semelhante à realizada por Castañeda-Miranda et al. (2006), espera-se desenvolver um circuito eletrônico para integrar o SLF desenvolvido no presente estudo a estações meteorológicas automatizadas, a fim de auxiliar a tomada de decisão de produtores rurais, sobre o momento mais adequado para proceder ao manejo integrado da ferrugem asiática da soja.

Após a fase de validação, o SLF foi implementado com o uso de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Geoestatística, considerando-se dados de temperatura mensal média de 39 estações climatológicas do INMET, localizadas em Minas Gerais e estados circunvizinhos, referentes às Normais Climatológicas (1961-1990) (BRASIL, 1992) do mês de janeiro, fixando-se a situação hipotética de ocorrência de molhamento foliar de 12 horas em todas as estações consideradas. Após estimar o progresso potencial da doença nessas estações, utilizou-se a técnica da co-krigagem para espacializar as áreas favoráveis à doença, pois houve maior acurácia e precisão com as estimativas desse método quando comparado à krigagem ordinária, pois foram considerados, além da temperatura, dados de altitude, latitude e longitude (Tabela 2). Com isso, foi possível observar áreas mais favoráveis à doença em regiões de altitude mais elevada, classificadas com a cor vermelha, bem como, áreas menos favoráveis

com a cor azul, principalmente nas regiões Leste e Norte de Minas Gerais (Figura 10). Outros estudos já aplicaram a co-krigagem de forma a melhorar estimativas com base em co-variáveis. Assim, Desbarats et al. (2002) também utilizaram a co-krigagem para estimar a altura de colunas de poços de água do aquífero ‘Oak Ridges Moraine’, em Ontário, Canadá, em uma área de 250 km², considerando-se a altitude como co-variável. Segundo os autores, observou-se maior altura de colunas de água em áreas de topografia mais elevada.

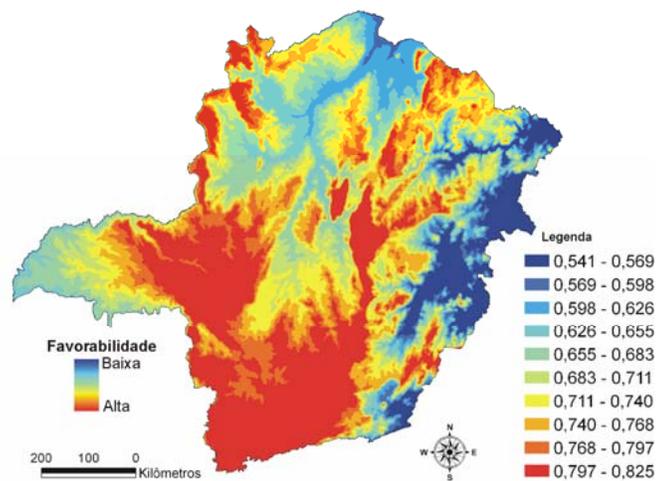


FIGURA 10 Intensidade da ferrugem asiática da soja em Minas Gerais, estimada por SLF, correspondente ao período de 1961 a 1990, com base em observações de temperatura mensal média de janeiro de 39 estações climatológicas do INMET, com período de molhamento foliar fixado em 12 horas, utilizando-se altitude, latitude e longitude como co-variáveis. UFLA, Lavras, MG, 2006.

TABELA 2 Coeficientes de qualidade das estimativas dos métodos de krigagem ordinária e co-krigagem. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Variável	Krigagem ordinária		Co-krigagem	
	QM erro	Erro padrão	QMerro	Erro padrão
Ferrugem	0,07526	0,07746	0,05497	0,03604

Com base na comparação entre os intervalos utilizados para classificar a doença como baixa ou alta com relação a outros modelos de previsão da ferrugem previamente desenvolvidos, verificou-se consistência dos resultados obtidos de acordo com a literatura disponível. Assim, para Sinclair (1975) e Bromfield (1981), a temperatura ótima para infecção por *P. pachyrhizi* está na faixa de 18 °C a 21 °C se a folha permanecer molhada durante pelo menos 16 horas, porém Vale (1985), estudando a cultivar Paraná, citou a temperatura de 20 °C em umidade relativa superior a 90%, enquanto Casey (1980), na Austrália, determinou temperaturas de 18 °C a 26 °C e extensos períodos de molhamento da folha, de aproximadamente 10 horas por dia, como necessários para ocorrer epidemias com altas taxas de progresso da severidade. Em outra revisão, Sinclair & Backman (1989) citaram como faixa de temperatura ótima para a infecção de *P. pachyrhizi* em soja de 20 °C a 25 °C, ou seja, todos esses autores citam temperaturas próximas a 20 °C, embora em alguns casos próxima a 25 °C, como a ideal para ocorrer a maior intensidade da doença, sempre com maiores períodos de molhamento foliar. Essas diferenças podem estar associadas às cultivares, como discutido anteriormente. Em relação às temperaturas limitantes, Casey (1980) citou valores acima de 30 °C e abaixo de 15 °C em condições secas, ou seja, com poucas horas de molhamento, responsáveis por retardar o progresso da ferrugem, enquanto Bromfield (1981) citou temperaturas abaixo de 20 °C ou acima de 30 °C. De acordo com Vale et al. (1990), a temperatura e molhamento foliar podem ser fatores determinantes na esporulação, no número médio de lesões.cm⁻² de área foliar, no número médio de urédias.lesão⁻¹, e na redução do período latente da doença na cultivar Paraná, sob temperatura de 20 °C e molhamento foliar de 12 h a 24 h, de forma semelhante à do presente estudo, com as cultivares Conquista, Savana e Suprema.

Já Marchetti et al. (1975) estudaram o efeito da ferrugem na cultivar Wayne e observaram que plantas incubadas a 27,5 °C não apresentaram infecção

independentemente do período de molhamento. Da mesma forma, Melching et al. (1989), estudando efeitos de duração, frequência e temperatura de períodos de molhamento foliar na ferrugem asiática da soja, em Taiwan, cultivar Wayne, constataram que após 8 horas de período de orvalho entre 18 °C e 26,5 °C, intensidades de lesões foram 10 vezes maiores do que aquelas a 6 horas em temperaturas correspondentes, apesar do aumento de molhamento de 12 a 16 horas não resultar em aumento significativo da intensidade da ferrugem, mesmo em temperaturas favoráveis entre 18 °C e 26,5 °C. Não houve aparecimento de lesões a 9 °C e 28,5 °C mesmo em períodos de molhamento de 20 horas. Assim, pelo fato de a cultivar Wayne e a raça da ferrugem serem provavelmente adaptadas às condições de latitude, longitude e conseqüentemente das normais climatológicas diferentes de Lavras, Minas Gerais, onde houve o primeiro relato de *P. pachyrhizi* no Brasil (Bromfield, 1984) e coletou-se o inóculo da ferrugem, sendo uma área potencial de origem ou de adaptação geográfica da doença, provavelmente, sob condições de temperaturas acima de 28 °C, não se observou infecção da doença nessa cultivar, divergindo do presente estudo.

No entanto, no modelo climático para previsão da Ferrugem Asiática da soja no Brasil, Reis et al. (2004), com base nos dados de Melching et al. (1989) com a cultivar Wayne, propuseram valores diários de probabilidade de infecção de uredósporos com ocorrência de infecção mesmo em temperaturas próximas a 29 °C, com 16 horas de molhamento foliar e sob temperaturas mais baixas de 9 °C com 11 horas de molhamento foliar após o ajuste de modelo de regressão não-linear, discordando dos próprios resultados de Melching et al. (1989), mas semelhante às situações verificadas no presente trabalho para cultivares brasileiras e isolado adaptado à região de Lavras, Minas Gerais. Com isso, apesar de ter sido constatado na literatura respostas semelhantes da doença com relação à variação da temperatura e duração do molhamento foliar, pôde-se constatar em algumas situações, diferenças nos intervalos mais favoráveis à

doença, provavelmente em função a características do hospedeiro, tanto na diferença entre genótipos quanto em seu estágio vegetativo e nutricional, de modo a justificar o desenvolvimento de uma medida subjetiva para avaliar o processo monocíclico da doença, como no caso do presente SLF.

Após espacializar a ferrugem utilizando-se a técnica da co-krigagem, o mesmo procedimento foi aplicado para caracterizar o clima de Minas Gerais, de forma a verificar a existência de relação entre a intensidade da ferrugem com o índice de umidade anual de Thornthwaite (Iu), bem como com a evapotranspiração potencial anual (ETp) (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite e Mather, 1955). Portanto, comparando-se o mapas de intensidade da doença (Figura 10) com os de ETp e Iu (Figura 11), pôde-se constatar correspondência entre áreas de alta intensidade da ferrugem com menores valores de ETp e maiores valores de Iu. Essa relação também foi verificada por meio da relação linear da intensidade da doença com a ETp e Iu, nas 39 localidades do INMET avaliadas (Figura 12) e pela correlação negativa da intensidade da ferrugem com a ETp ($r = -0,86457$; $p < 0,0001$) e positiva com o Iu ($r = 0,76682$; $p < 0,0001$). Outra constatação foi o potencial de uso do método da co-krigagem para detalhar a resolução espacial de uma base de dados de variáveis em escala macroclimática a partir de uma base de dados de co-variáveis em escala mesoclimática. Da mesma forma, baseando-se no zoneamento climático realizado, será possível subsidiar a implantação e planejamento de diversas

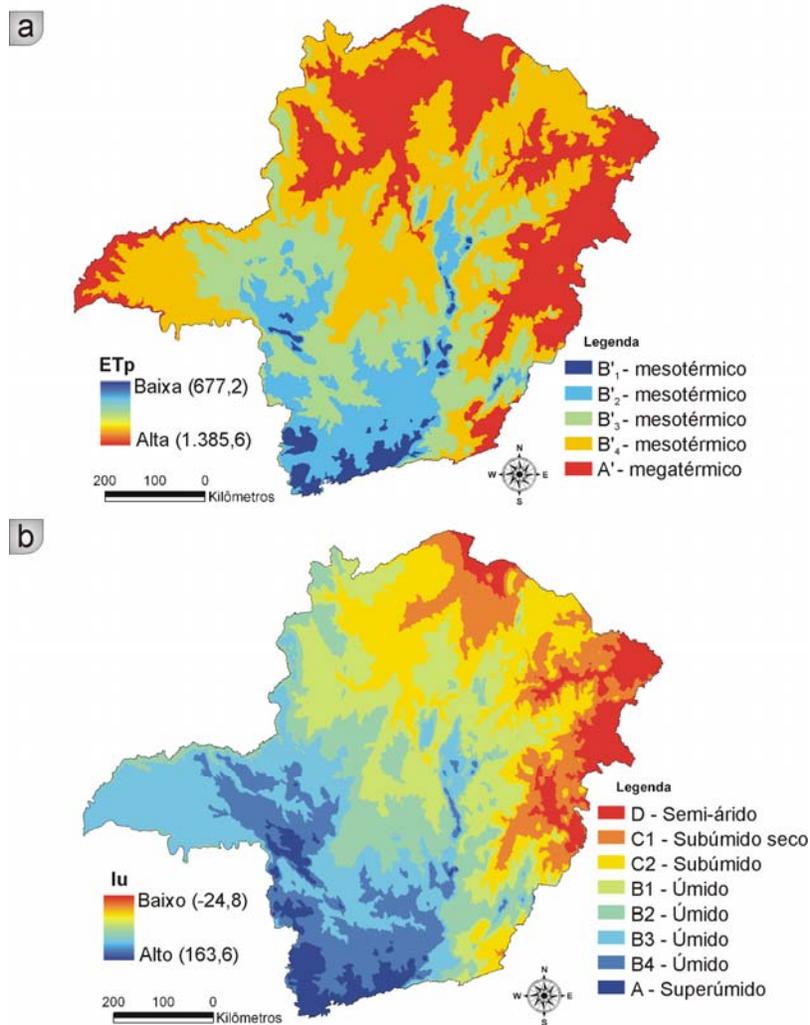


FIGURA 11 Representação da evapotranspiração potencial anual (ETp) estimada por Thornthwaite (TW) (a) e do índice de umidade anual (Iu) estimado por TW (b) em Minas Gerais, com base em observações de 39 estações climatológicas do INMET, especializados pela técnica da co-krigagem, utilizando-se altitude, latitude e longitude como co-variáveis. UFLA, Lavras, MG, 2006.

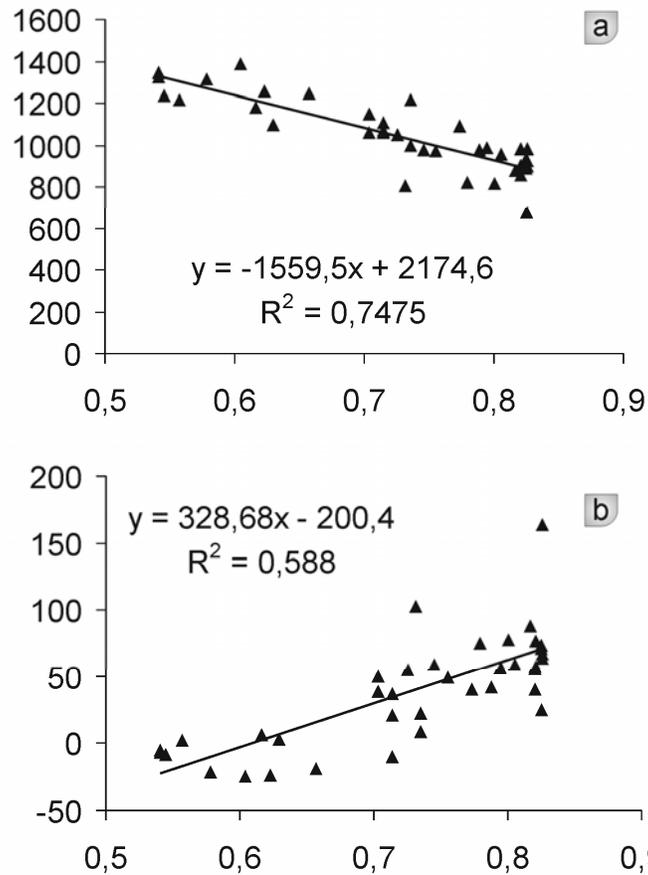


FIGURA 12 Relação linear entre a evapotranspiração potencial anual (ETp) estimada por Thornthwaite (TW) (a) e o índice de umidade anual (Iu) estimado por TW (b), com a intensidade potencial da ferrugem asiática da soja estimada por SLF com base em observações de temperatura mensal média de janeiro em 39 estações climatológicas do INMET em Minas Gerais e estados circunvizinhos, com período de molhamento foliar fixado em 12 horas. UFLA, Lavras, MG, 2006.

áreas, tais como indústria, agricultura, transportes, arquitetura, biologia, medicina etc (Vianello & Alves, 1991), de forma sustentável (Mitchell et al., 2004), além de embasar a tomada de decisão adequada para minimizar os riscos e impactos negativos do clima nos recursos naturais (Machado, 1995; Hansen, 2002).

De forma semelhante, Morales & Jones (2004) utilizaram SIG para estudar a ecologia e a epidemiologia da mosca branca (*Bemisia tabaci* Gennadius, 1889), transmissora de geminiviruses em culturas tropicais da América Latina, por meio de 304 pontos georeferenciados em localidades onde a mosca branca e as geminiviruses causaram dano significativo. Para isso, desenvolveu-se um modelo matemático incluindo duas variáveis climáticas, temperatura e precipitação, para mapear a probabilidade de ocorrerem áreas favoráveis à praga. Posteriormente, utilizando-se a classificação climática de Koeppen foi possível verificar que 55% das localidades afetadas por geminiviruses estavam localizadas na região tropical úmido-seca, 22% nas regiões de clima úmido-seco tropicais, subtropicais e locais remanescentes de clima equatorial úmido, com ventos litorâneos freqüentes. Segundo os autores, com base nos resultados foi possível compreender as epidemias da mosca branca e de geminiviruses, de forma a auxiliar o manejo integrado sustentável de pragas e doenças nas regiões estudadas. Vale et al. (2004) também relatou a influência do clima na sobrevivência de inóculo, tanto entre estações de cultivo quanto dentro da estação de cultivo. Segundo os autores, a sobrevivência do inóculo entre estações de cultivo é menor em regiões temperadas ou semi-áridas com verão seco, pois sob essas características, há destruição das estruturas de sobrevivência de forma a limitar a infecção do patógeno. Já dentro da estação de cultivo, no caso de doenças policíclicas causadas por fungos e bactérias, a sobrevivência do inóculo é maior nas regiões temperadas, onde é favorecida por baixas temperaturas, pouca radiação solar e maior duração de molhamento

foliar. Segundo os mesmos autores, a temperatura interfere nos processos fisiológicos da planta, como evapotranspiração, porém, de acordo com os resultados do presente estudo, essa variável também pode estar relacionada com processos de infecção, colonização, esporulação e sobrevivência de fitopatógenos.

Nesse contexto, tornou-se possível desenvolver, validar e implementar um SLF de previsão da ferrugem asiática da soja, com base em temperatura e molhamento foliar, para as cultivares Conquista, Savana e Suprema. Outras características importantes sobre o SLF podem estar relacionadas com a simplicidade do sistema, facilidade de implementá-lo em condições de campo, e a flexibilidade do método utilizado permitir incorporar outras variáveis ao sistema.

6 CONCLUSÕES

Foi possível desenvolver, validar e implementar um Sistema de Lógica ‘Fuzzy’ (SLF) para estimar o processo monocíclico da ferrugem asiática da soja, referente às cultivares Conquista, Savana e Suprema, com base nas variáveis independentes temperatura, molhamento foliar e, variável dependente, área abaixo da curva de progresso da incidência (AACPI) e severidade (AACPS) da doença.

O método da co-krigagem foi mais acurado e preciso do que o método da krigagem ordinária para espacializar a intensidade da ferrugem asiática.

Observaram-se maior correlação das estimativas do SLF com os dados observados do que com os modelos de regressão não-linear, para AACPI e AACPS, à exceção da AACPS da cultivar Suprema.

Com o uso de técnicas e produtos de Geociência foi possível identificar áreas favoráveis à ferrugem asiática em Minas Gerais, considerando temperatura, altitude, latitude e longitude nas estimativas.

Verificaram-se com base nas normais climatológicas, áreas menos favoráveis à ferrugem principalmente ao norte e leste de Minas Gerais.

O índice de umidade e a evapotranspiração potencial de Thornthwaite correlacionaram-se significativamente com as estimativas da ferrugem asiática da soja.

Período de molhamento foliar acima de 12 horas e temperaturas próximas a 20 °C, nas 3 cultivares avaliadas, determinaram maior intensidade da ferrugem asiática. Temperaturas próximas a 30 e 15 °C ocasionaram menor intensidade da doença. Período de molhamento foliar abaixo de 6 horas reduziu a intensidade da doença.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. C.; POZZA, E. A.; CARVALHO, L. G.; OLIVEIRA, M. S.; CARVALHO, L. M. T.; MACHADO, J. C.; SOUZA, P. E. Sistema de Informação Geográfica, Geoestatística e Estatística aplicados ao zoneamento ecológico potencial da ferrugem asiática da soja. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 181, 2006 Supl. CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOPATOLOGIA, 39, 2006, Salvador.

BATCHELOR, W. D.; YANG, X. B.; TSCHANZ, A. T. Development of a neural network for soybean rust epidemics. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 40, n. 1, p. 247-252, Jan./Feb. 1997.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas (1961-1990)**. Brasília, 1992. 84 p.

BROMFIELD, K. R. Differential reaction of some soybean accessions to *Phakopsora pachyrhizi*. **Soybean Rust Newsletter**, Shanhua, v. 4, n. 2, 1981.

BROMFIELD, K. R. **Soybean rust**. St. Paul: American Phytopathological Society, 1984. 64 p. (Monograph, 11).

BROMFIELD, K. R. World soybean rust situation. In: Hill, L. D. **World Soybean Research: proceedings of the world soybean research conference**. Danville: The Interstate Printers and Publishers, 1976. p. 491-500.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems: spatial information systems and geostatistics**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. **Introducion to plant disease epidemiology**. New York: Jonhn Wiley, 1990. 532 p.

CASEY, P. S. The epidemiology of soybean rust - *Phakopsora pachyrhizi* Syd. **Soybean Rust Newsletter**, Shanhua, v. 4, n. 1, p. 3-5, 1980.

CASTAÑEDA-MIRANDA, R.; VENTURA-RAMOS jr., E.; PENICHE-VERA, R. R.; HERRERA-RUIZ, G. Fuzzy Greenhouse Climate Control System based

on a Field Programmable Gate Array. **Biosystems Engineering**, San Diego, v. 94, n. 2, p. 165-177, June 2006.

COX, E. **The fuzzy systems**: handbook a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems. London: Academic Press, 1994. 625 p.

DESBARATS, A. J.; LOGAN, C. E.; HINTON, M. J.; SHARPE, D. R. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 255, n. 1/4, p. 25-38, Jan. 2002.

DRIANKOV, D.; HELLENDORRN, H.; REINFRANK, M. **An introduction to fuzzy control**. New York: Springer-Verlag, 1993. 316 p.

HANSEN, J. W. Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. **Agricultural Systems**, Oxford, v. 74, n. 3 p. 309-330, Dec. 2002.

HARTMAN, G. L.; MILES, M. R.; FREDERICK, R. D. Breeding for resistance to soybean rust. **Plant Disease**, St Paul, v. 89, n. 6, p. 664-666, June 2005.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

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**, Oxford, v. 3, n. 5, p. 447-455, May 2004.

KIM, K. S.; WANG, T. C.; YANG, X. B. Simulation of apparent infection rate to predict severity of soybean rust using a fuzzy logic system. **Phytopathology**, St Paul, v. 95, n. 10, p. 1122-1131, 2005.

KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic**: theory and applications. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 574 p.

MACHADO, M. A. M. **Caracterização e avaliação climática da estação de crescimento de cultivos agrícolas para o estado de Minas Gerais**. 1995. 61 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MARCHETTI, M. A.; UECKER, F. A.; BROMFIELD, K. R. Uredial development of *Phakopsora pachyrhizi* in soybean. **Phytopathology**, St. Paul, v. 65, n. 7, p. 822-823, July 1975.

- MASSAD, E.; ORTEGA, N. R. S.; STRUCHINER, C. J.; BURATTINI, M. N. Fuzzy epidemics. **Artificial Intelligence in Medicine**, Amsterdam, v. 29, n. 3, p. 241-259, Nov. 2003.
- McGEE, D. C. **Soybean diseases: a reference source for seed technologists**. St. Paul: The American Phytopathological Society, 1992. 151 p.
- MEDINA, P. F.; WUTKE, E. B.; MIRANDA, M. A. C.; BRAGA, N. R.; ITO, M. F.; BARRETO, M.; HARAKAWA, R. Qualidade de sementes de soja de cultivares IAC, produzidas diante da ocorrência natural a campo de *Phakopsora pachyrhizi*, agente causal da ferrugem asiática. **Informativo Abrates**, Londrina, v. 16, n. 1/3, p. 24, 2006.
- MELCHING, J. S.; DOWLER, W. M.; KOOGLE, D. L.; ROYER, M. H. Effects of duration, frequency, and temperature of leaf wetness periods on soybean rust. **Plant Disease**, St. Paul, v. 73, n. 2, p. 117-122, Feb. 1989.
- MITCHELL, N.; ESPIE, P.; HANKIN, R. Rational landscape decision-making: the use of meso-scale climatic analysis to promote sustainable land management. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v. 67, n. 1/4, p. 131-140, Mar. 2004.
- MORALES, F. J.; JONES, P. G. The ecology and epidemiology of whitefly-transmitted viruses in Latin America. **Virus Research**, Amsterdam, v. 100, n. 1, p. 57-65, Mar. 2004.
- MOUZOURIS, G. C.; MENDEL, J. M. Dynamic Non-Singleton Fuzzy Logic Systems for Nonlinear Modeling. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, New York, v. 5, n. 2, p. 199-208, May 1997.
- NASA, **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 2000**. Land Information Worldwide Mapping, LLC. Raster, 1:50000. 2005.
- PINTO, A. C. S.; POZZA, E. A.; SOUZA, P. E.; POZZA, A. A. A.; TALAMINI, V.; BOLDINI, J. M.; SANTOS, F. S. Descrição da epidemia da ferrugem do cafeeiro com redes neurais. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 517-524, set. 2002.
- PIVONIA, S.; YANG, X. B. Assessment of epidemic potential of soybean rust in the United States. **Plant Disease**, St Paul, v. 89, n. 6, p. 678-682, June 2005.

- PIVONIA, S.; YANG, X. B. Assessment of the potential year-round establishment of soybean rust throughout the world. **Plant Disease**, St. Paul, v. 88, n. 5, p. 523-529, May 2004.
- REIS, E. M.; SARTORI, A. F.; CÂMARA, R. K. Modelo climático para previsão da ferrugem da soja. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 30, n. 2, p. 290-292, abr./jun. 2004.
- RITCHIE, S.; HANWAY, J. J.; THOMPSON, H. E. **How a soybean plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1982. 20 p. (Special Report, 53).
- SCHERM, H. Simulating uncertainty in climate-pest models with fuzzy numbers. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 108, n. 3, p. 373-379, 2000.
- SEDIYAMA, G.; MELLO Jr., J. C. Modelos para estimativas das temperaturas normais mensais médias, máximas, mínimas e anual no estado de Minas Gerais. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa, v. 6, n. 1, p. 57-61, 1998.
- SINCLAIR, J. B. (Ed.). **Compendium of soybean diseases**. Minesota: American Phytopathological Society, 1975. 69 p.
- SINCLAIR, J. B.; BACKMAN, P. A. (Ed.). **Compendium of soybean diseases**. 3. ed. St. Paul: APS Press, 1989. p. 24-27.
- TANAKA, K. **An introduction to fuzzy logic for practical applications**. 1997. 138 p.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1).
- URENÃ, R.; RODRÍGUEZ, F.; BERENGUEL, M. A machine vision system for seeds germination quality evaluation using fuzzy logic. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 32, n. 1, p. 1-20, July 2001.
- VALE, F. X. R. **Aspectos epidemiológicos da ferrugem (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow) da soja (*Glycine max* L. Merrill)**. 1985. 104 p. Tese (Doutorado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

- VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, L.; CHAVES, G. M. Efeito do binômio temperatura-duração do molhamento foliar sobre a infecção por *Phakopsora pachyrhizi* em soja. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 3, p. 200-202, set. 1990.
- VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, L.; COSTA, L. C.; LIBERATO, J. R.; DIAS, A. P. S. Influência do clima no desenvolvimento de doenças de plantas. In: VALE, F. X. R.; JESUS JUNIOR, W. C.; ZAMBOLIM, L. **Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas**. Belo Horizonte: Editora Perffil, 2004. p. 47-87.
- VARGENS, J. M.; TANSCHKEIT, R.; VELLASCO, M. M. B. R. Previsão de produção agrícola baseada em regras lingüísticas e lógica fuzzy. **Revista Brasileira de Controle & Automação**, Campinas, v. 2, n. 14, p. 114-120, 2003.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária/UFV, 1991. 449 p.
- VON ALTROCK, C. **Fuzzy Logic and NeuroFuzzy Applications Explained**. USA: Prentice Hall, 1995. 384 p.
- YANG, X. B.; FENG, F. Ranges and diversity of soybean fungal diseases in North America. **Phytopathology**, St Paul, v. 91, n. 8, p. 769-775, Aug. 2001.
- YANG, X. B.; ROYER, M. H.; TSCHANZ, A. T.; TSAI, B. Y. Analysis and quantification of soybean rust epidemics from 73 sequential planting experiments. **Phytopathology**, St. Paul, v. 80, n. 12, p. 1421-1427, Dec. 1990.
- YANG, X. B.; TSCHANZ, A. T.; DOWLER, W. M.; WANG, T. C. Development of yield loss models in relation to reductions of components of soybean infected with *Phakopsora pachyrhizi*. **Phytopathology**, St. Paul, v. 81, n. 11, p. 1420-1426, Nov. 1991.
- YORINORI, J. T.; LAZZAROTTO, J. J. **Situação da ferrugem asiática da soja no Brasil e na América do Sul**. Londrina: Embrapa Soja, 2004. 30 p. (Documentos, 236). Disponível em <<http://www.cnpso.embrapa.br>> em: < dez. 2004.
- ZAMBENEDETTI, E. B. **Preservação de *Phakopsora pachyrhizi* Sydow & Sydow e aspectos epidemiológicos e ultra-estruturais da sua interação com a soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. 2005. 92 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, San Diego, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM 'NEURO-FUZZY' DO PROCESSO MONOCÍCLICO DA FERRUGEM DO CAFEIRO

1 RESUMO

ALVES, Marcelo de C. **Modelagem ‘Neuro-Fuzzy’ do processo monocíclico da ferrugem do cafeeiro**. 2006. 186 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, MG.*

Objetivou-se neste trabalho, estudar o efeito do binômio temperatura-molhamento foliar no processo monocíclico da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome), desenvolver, validar e implementar um modelo para estimar a doença nas cultivares Mundo Novo e Catuaí (*Coffea arabica* L.), com base em um Sistema ‘Neuro-Fuzzy’ (SNF). Procedeu-se à validação do SNF de forma comparativa com um modelo de regressão não-linear ajustado aos mesmos dados utilizados no desenvolvimento do SNF. Verificou-se maior desempenho do SNF do que do modelo de regressão não-linear para estimar a ferrugem. O SNF foi implementado com o uso de Sistema de Informações Geográficas e Geoestatística. A técnica da co-krigagem foi utilizada para espacializar as áreas favoráveis à doença, considerando-se além da temperatura média do ar, dados de altitude, latitude e longitude, fixando-se o período de molhamento foliar em 12 horas, referente ao período médio de 1967 a 1999 e cenários de mudanças climáticas globais A1B, A2 e B1, correspondentes a média dos períodos de 2000 a 2032, 2033 a 2065 e 2066 a 2098 no estado brasileiro de Minas Gerais. Considerando-se o período de 1967 a 1999, houve áreas menos favoráveis nas regiões a leste do estado e extremo oeste do Triângulo Mineiro. Com base nos cenários de mudanças climáticas globais A2, A1B e B1, foi possível observar redução das áreas favoráveis à ferrugem em Minas Gerais, ao longo do tempo, com maior redução no cenário A2, seguido pelo cenário A1B e B1.

*Comitê Orientador: Edson Ampélio Pozza – UFLA (Orientador), José da Cruz Machado – UFLA (Co-orientador).

2 ABSTRACT

ALVES, Marcelo de C. **Neuro-fuzzy modeling of coffee rust monocyclic process**. 2006. 186 p. Tesis (Doctorate in Crop Science) – Federal University of Lavras, MG.*

It was aimed at in this work, to study the effect of temperature and leaf wetness in the monocyclic process of the coffee rust (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome), to develop, validate and implement a model to estimate the disease on New World and Catuaí (*Coffea arabica* L.) cultivars, using a Neuro-Fuzzy System (NFS). The NFS was validated in comparison with a non-linear regression model developed with the same data used in the development of NFS. It was verified higher NFS performance on the estimation of the coffee rust when compared with the non-linear regression. The NFS was implemented using Geographical Information System and Geostatistics. The co-kriging technique was used to map the disease favorable areas, considering the air mean temperature, altitude, latitude and longitude data, fixing the leaf wetness period in 12 hours, concerning the medium period from 1967 to 1999 and A1B, A2 and B1 global climate change scenarios, corresponding to the average periods from 2000 to 2032, 2033 to 2065 and 2066 to 2098, at Minas Gerais Brazilian state. Considering the period from 1967 to 1999, there were less favorable areas at the east of the state and at the Triângulo Mineiro region far west. Based on the A2, A1B and B1 global climatic changes scenarios, it was possible to observe the reduction of the rust favorable areas at Minas Gerais, throughout the time, with higher A2 scenario reduction, followed by the A1B and B1 scenarios.

*Advising Committee: Edson Ampélio Pozza – UFLA (Adviser), José da Cruz Machado – UFLA (Co-Adviser).

3 INTRODUÇÃO

Doenças de plantas ocorrem em todas as regiões do globo terrestre onde há hospedeiros suscetíveis, patógenos agressivos e virulentos e ambiente favorável (Agrios, 2004), sendo o clima capaz de influenciar a população de patógenos, de hospedeiros e a resultante dessa interação, a de lesões ou mais especificamente o processo dinâmico doença.

As variáveis climáticas de interesse em epidemiologia de doenças de plantas são temperatura, umidade, precipitação pluvial, radiação e vento (Campbell & Madden, 1990). Entre essas variáveis, a temperatura e a umidade exercem papel fundamental no progresso de epidemias (Agrios, 2004; Duthie, 1997; Jones, 1986). Em geral, a temperatura é o fator ambiental freqüentemente correlacionado com respostas biológicas em estudos de epidemias de doenças de plantas (Sutton et al., 1984), pois interfere nos processos iniciais de infecção, colonização, esporulação, sobrevivência do patógeno e nos processos fisiológicos da planta como evapotranspiração, fotossíntese, metabolismo, entre outros (Vale et al., 2004). A umidade também pode influenciar patógenos, hospedeiros e conseqüentemente as doenças de plantas (Duniway, 1982), sendo representada em estudos epidemiológicos por meio das variáveis umidade relativa, molhamento foliar, chuva e umidade do solo. O molhamento foliar é indispensável para a germinação de fungos e a precipitação, na forma de chuva ou irrigação na disseminação de patógenos (Campbell & Madden, 1990).

Entre as várias espécies de interesse agrônomo cultivadas no Brasil, destaca-se o cafeeiro, por sua importância tanto econômica quanto social. Certamente o clima pode influenciar na produtividade dessa cultura, por influenciar no excesso ou déficit hídrico do sistema água-solo-planta-atmosfera,

bem como na absorção de nutrientes pela planta, relacionada com a ocorrência e a intensidade de doenças (Agrios, 2004).

As doenças do cafeeiro são responsáveis por perdas significativas na produção. Assim, vários estudos foram realizados visando a entender a influência do clima e do hospedeiro na epidemiologia da ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) (Akutsu, 1981; Garçon et al., 2004; Kushalappa et al., 1983; Kushalappa & Eskes, 1989; Souza, 1980; Vale et al., 2004; Zambolim, 1999; Zambolim, 2005). De posse das informações sobre os efeitos do ambiente nas epidemias, estudos podem ser realizados para modelar, simular, estimar a ocorrência (Kushalappa, 1989; Pinto et al., 2002) e formular estratégias de controle de doenças (Pivonia & Yang, 2004; Pivonia & Yang, 2005). Além disso, podem-se utilizar cenários para avaliar o impacto de mudanças climáticas na intensidade de doenças (Chalfoun et al., 2001; Coakley, 1995; Coakley & Scherm, 1996; Ghini, 2005; Scherm & Yang, 1995), considerando-se que no final do século XIX a temperatura média da superfície da Terra aumentou $0,6 \pm 0,2$ °C, ocasionando mudanças na intensidade dos ventos, na precipitação, na umidade (Folland et al., 2001) e alterando conseqüentemente os agroecossistemas (Fuhrer, 2003; Goudriaan & Zadoks, 1995), a distribuição geográfica de hospedeiros (Carter et al., 1996; Kenny et al., 1993; Midgley et al., 2005; Neilson et al., 2005), e epidemias de doenças de plantas (Chakraborty et al., 1998; Patterson et al., 1999; Woods et al., 2005).

Técnicas de regressão não-linear (Akutsu, 1981; Kushalappa et al., 1983), Redes Neurais (Batchelor et al., 1997; Pinto et al., 2002) e Lógica ‘Fuzzy’ (Kim et al., 2005) têm sido empregadas para modelar a influência de variáveis abióticas no progresso de ferrugem. Além disso, Mouzouris & Mendel (1997) demonstraram a possibilidade de utilizar redes neurais para definir parâmetros de Sistemas de Lógica ‘Fuzzy’ e obter melhor performance do que a Estatística em modelagem não-linear de sistemas dinâmicos. Pinto et al. (2002)

também constataram melhor performance de redes neurais do que a Estatística para descrever epidemia de ferrugem do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) considerando-se temperatura mínima, umidade relativa do ar, produção e insolação coletadas 30 dias antes da data de avaliação da doença. Entretanto, nesse caso, valores de temperatura média do ar e de molhamento foliar não foram considerados no modelo.

Assim, considerando-se a importância da cultura do cafeeiro para o Brasil, bem como as perdas causadas pela ferrugem, faz-se necessário utilizar modelos para estimar a doença e entender melhor a epidemia. Portanto, objetivou-se neste trabalho, estudar o efeito do binômio temperatura-molhamento foliar no processo monocíclico da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome), bem como desenvolver, validar e implementar um modelo para estimar a doença nas cultivares Mundo Novo e Catuaí (*Coffea arabica* L.), com base em um Sistema ‘Neuro-Fuzzy’.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para desenvolver o Sistema ‘Neuro-Fuzzy’ (SNF) proposto, foram utilizadas as fases de seleção do problema, desenvolvimento, avaliação e implementação.

Seleção do problema

Consideraram-se como critérios para estudar a aplicação de um SNF para estimar a ferrugem do cafeeiro, a seleção do problema, a ocorrência sazonal, a existência de especialistas e a literatura na área, a importância da cultura e a facilidade de adquirir informações.

Na fase de seleção do problema, informações da literatura sobre a epidemiologia da doença e especialistas na área foram consultadas (Akutsu, 1981; Garçon et al., 2004; Kushalappa et al., 1983; Kushalappa & Eskes, 1989; Montoya & Chaves, 1974; Souza, 1980; Vale et al., 2004; Zambolim, 1999) e alguns aspectos importantes foram considerados no projeto, tais como, simplicidade para facilitar sua posterior implementação e flexibilidade para permitir incorporar novas variáveis (Von Altmann, 1995).

Desenvolvimento

Para desenvolver o SNF foram utilizados dados referentes ao estudo de Akutsu (1981), publicados em Kushalappa et al. (1983) e Zambolim (1999). Os ensaios de infectividade de uredosporos foram conduzidos em mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) das cultivares Mundo Novo e Catuaí, transplantadas em sacos plásticos. A inoculação foi realizada com um atomizador. Um volume de

0,25 ml de uma suspensão de uredosporos frescos, da raça II, na concentração de 2 mg.L⁻¹, 0,125% de Tween 80, foi pulverizado na superfície inferior de cada folha do primeiro par bem desenvolvido. Os ensaios para verificar o efeito do molhamento foliar e da temperatura foram realizados separadamente sob delineamento experimental inteiramente casualizado. No ensaio realizado para determinar o efeito do molhamento foliar na infectividade de *H. vastatrix*, foram utilizados cinco tratamentos de molhamento foliar e dez repetições. As mudas após inoculadas foram submetidas à câmara úmida sob escuro total, por 6, 12, 18, 24 e 48 horas, sob temperatura de 21± 2°C, sendo posteriormente removidas da câmara e expostas à ventilação em ambiente com 60% de umidade relativa, por 60 minutos. Em seguida, as mudas foram dispostas em outra câmara, ao escuro, por 48 horas e após esse período, mantidas em um viveiro à sombra até o aparecimento dos sintomas. No ensaio utilizado para verificar a temperatura ótima para infecção de *H. vastatrix*, foram utilizados três tratamentos de temperatura e dez repetições. Após a inoculação, as mudas foram pulverizadas com atomizador de forma abundante na superfície superior com água destilada e, em seguida, dispostas em câmara úmida com sacos plásticos contendo 10 ml de água e cobertas com outro saco plástico sob estrutura de arame para evitar o contato direto com as folhas. Posteriormente, submeteram-se as mudas a temperaturas de 15, 20 e 30° C por 24 horas, seguido por retirada dos sacos plásticos em uma câmara e secagem com ventilação em ambiente com 60% de umidade relativa, por 60 minutos, à temperatura de 21± 2°C. Após, mantiveram-se as plantas em uma câmara com alternância de 12 horas de luz e 12 horas de escuro até a data da avaliação das lesões provocadas pela doença (Akutsu, 1981). Os dados médios de ambas as cultivares foram transformados para a proporção de zero a um, considerando-se como um o molhamento foliar e a temperatura nos quais se observou a maior infecção e como zero a menor infecção. Posteriormente, para explorar o efeito da interação entre molhamento

foliar e temperatura procedeu-se o produto de cada tratamento avaliado de forma a compor uma matriz semelhante à idealizada por Garçon et al. (2004) e Wallin (1962). Esses dados foram utilizados para desenvolver o SNF. Nesse caso, definiram-se as funções de pertinência ou funções membro e base de regras por meio de uma rede neuronal (Jang, 1993; Jang & Sun, 1995; Almeida, 2004).

O sistema utilizou o operador de implicação “Sugeno” (Sugeno, 1985), por possibilitar adaptar a técnica de redes neurais na construção de Sistemas de Lógica ‘Fuzzy’ (Klir & Yuan, 1995; Mouzouris & Mendel, 1997) (Figura 1).

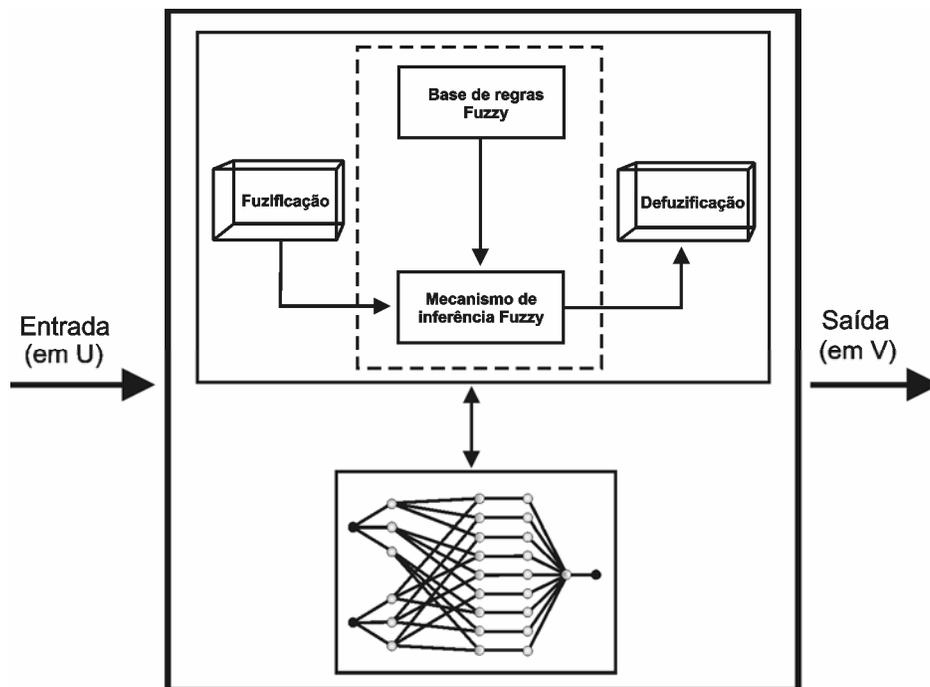


FIGURA 1 Estrutura de um Sistema ‘Neuro-Fuzzy’. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Além disso, esse método tem sido utilizado com sucesso e de forma mais eficiente e com menor complexidade computacional do que outros métodos (Finol et al., 2001; Lin, 2005).

Após concluir o desenvolvimento do SNF foram realizados testes para confirmar o seu pleno funcionamento, com o objetivo de avaliar sua precisão e consistência de acordo com os resultados de outros modelos utilizados para descrever o processo monocíclico da ferrugem do cafeeiro (Akutso, 1981; Kushalappa et al., 1983).

Validação

Na fase de validação, procedeu-se o desenvolvimento de um modelo de regressão não-linear, a partir da mesma variável dependente utilizada no desenvolvimento do SNF. Posteriormente, foram ajustados modelos de regressão linear para comparar os resultados observados com os estimados pelo modelo de regressão não-linear e SNF.

Implementação

Após a fase de validação, procedeu-se à fase de implementação com o uso de um Sistema de Informações Geográficas e Geoestatística (Burrough & McDonnell, 1998). Assim, utilizou-se do SNF para estimar a doença a partir de observações de temperatura mensal média de 39 estações climatológicas do INMET, referentes às Normais Climatológicas (1961-1990) (BRASIL, 1992) do mês de janeiro, simulando a ocorrência de molhamento foliar de 12 horas em todas as estações consideradas. Como o número de estações climatológicas disponíveis em Minas Gerais e regiões circunvizinhas são escassos, optou-se por utilizar a técnica da co-krigagem (Isaaks & Srivastava, 1989) para melhorar a qualidade da interpolação dos dados e aumentar a resolução espacial das estimativas, por meio de uma base de dados de altitude, latitude e longitude, em malha regular de um 1 km no interior dos limites do estado de Minas Gerais,

obtida a partir do modelo de elevação digital da Terra com resolução espacial de 90m (NASA, 2005). Adicionaram-se à malha regular no interior de Minas Gerais, os valores de altitude, latitude e longitude referente às estações do INMET. Em seguida, aplicou-se a técnica da co-krigagem para espacializar o progresso espacial potencial da doença com base nessas variáveis. Optou-se pela técnica da co-krigagem para explorar a influência conhecida da altitude, latitude e longitude na variação da temperatura (Sediyama & Mello Jr., 1998), bem como na ocorrência de doenças (Yang & Feng, 2001), além de melhorar a resolução espacial das estimativas (Figura 2).

Os dados de clima futuro também foram utilizados na fase de implementação, entretanto, a base de dados foi referente ao IPCC ('Intergovernmental Panel on Climate Change') (NCAR, 2006), modelo CCSM 3.0, na resolução espacial de 1,4 ° x 1,4° (Figura 2). Nesse caso, utilizou-se o mesmo procedimento abordado no estudo da intensidade da doença no período atual (BRASIL, 1992) (Figura 3), no entanto, utilizaram-se os valores de temperatura média do ar do mês de janeiro, correspondente à média dos períodos de 2000 a 2032, 2033 a 2065 e 2066 a 2098, nos cenários de mudanças climáticas globais A1B, A2 e B1.

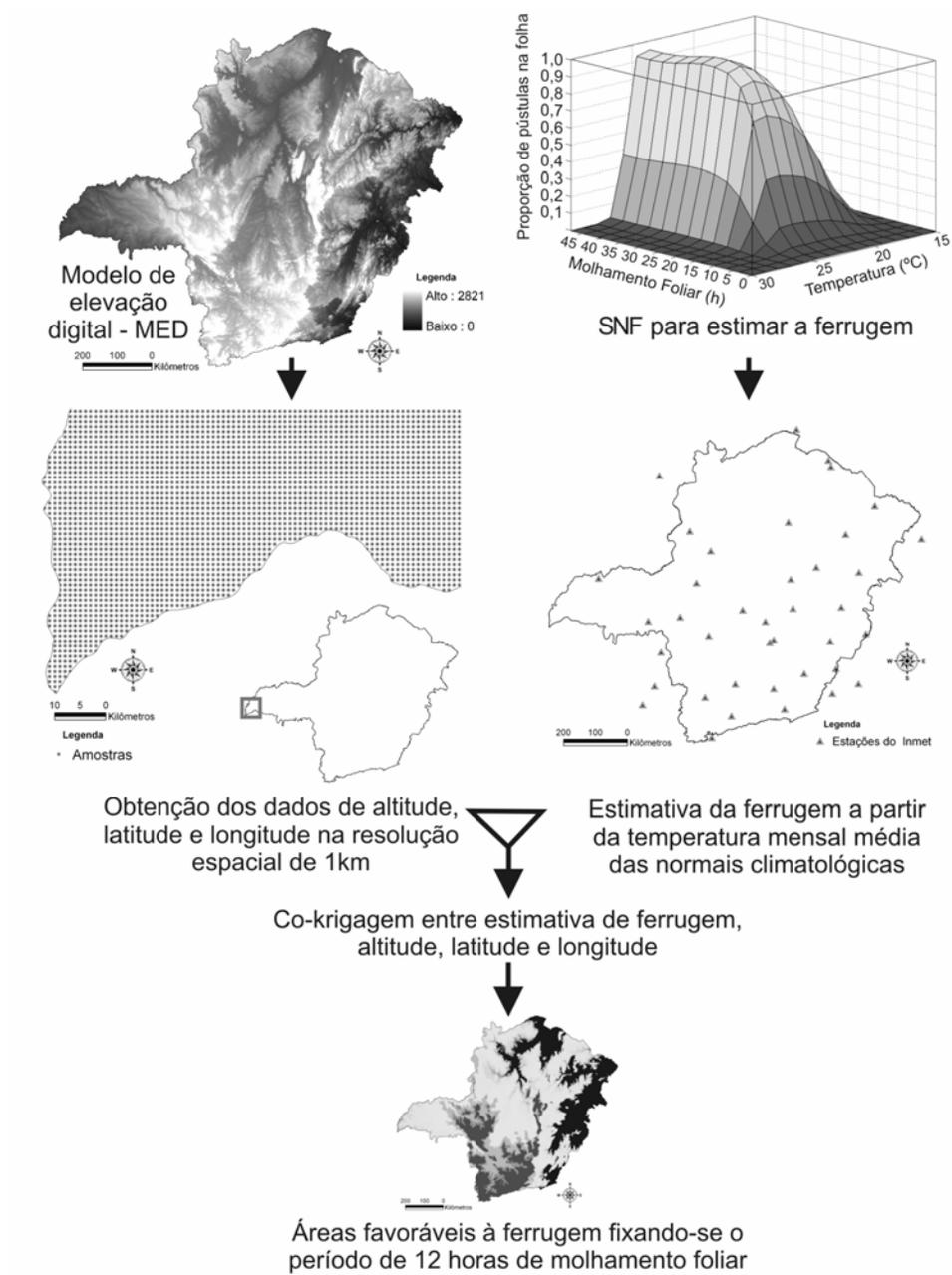


FIGURA 2 Esquema utilizado para implementar o Sistema ‘Neuro-Fuzzy’ (SNF). UFLA, Lavras, MG, 2006.

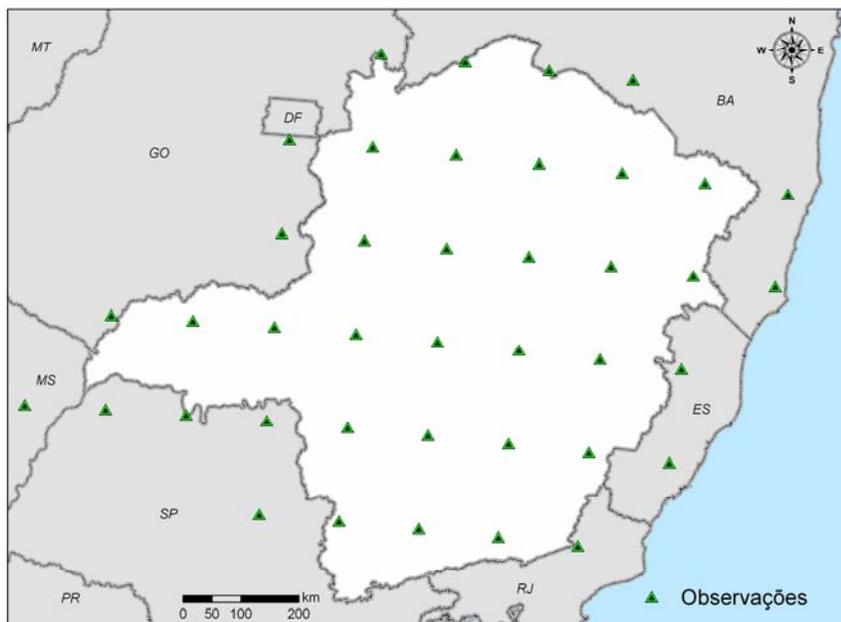


FIGURA 3 Arranjo espacial da malha composta por 40 observações de temperatura média do ar utilizada para estimar a ferrugem do cafeeiro em Minas Gerais sob cenários futuros de mudanças climáticas globais. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Nas projeções de mudanças climáticas, utiliza-se uma hierarquia de modelos com base no clima, meio-ambiente, uso da terra, aspectos tecnológicos e socioeconômicos, integrados, para indicar respostas globais e padrões regionais de mudanças climáticas (Nakicenovic et al., 2001). Esses cenários variam de acordo com o grau de interferências antrópicas no ambiente (Carter et al., 2001; Cubash et al., 2001), onde:

- A1: é o cenário que descreve um mundo futuro com rápido crescimento econômico, com aumento da população global na metade do século XXI, seguida por declínio. Há rápido desenvolvimento de tecnologias eficientes. Há

maior capacidade de evolução cultural e interações sociais, com menor discrepância econômica entre regiões. Esse cenário foi dividido em três grupos de acordo com a forma tecnológica de uso de energia: Fóssil intensivo (A1FI), sem fonte de energias fósseis (A1T), ou um nível intermediário entre os dois anteriores (A1B).

- A2: Mundo futuro heterogêneo onde a regionalização é dominante. Existiria um fortalecimento de identidades culturais regionais, com ênfase em valores da família e tradições locais. Outras características são um crescimento populacional alto e menor desenvolvimento econômico e tecnológico.

- B1: O crescimento populacional será semelhante ao A1, mas com rápida mudança na economia, com tendência a serviços e economia de informação, redução na intensidade de materiais e, a introdução de recursos tecnológicos básicos e eficientes. Há ênfase em soluções globais para economia, sustentabilidade social e ambiental, com melhoria em igualdade, mas sem iniciativas relacionadas a fatores climáticos.

Após espacializar a intensidade da doença em Minas Gerais, sob os diferentes cenários futuros considerados, procedeu-se ao cálculo das áreas favoráveis à ferrugem no estado de Minas Gerais, de forma a possibilitar comparar quantitativamente o progresso potencial da doença nos cenários A1B, A2 e B1.

‘Softwares’ utilizados

O MATLAB R2006b v.7.3.0.267[®] (ANFIS) e ArcGis9.0[®] foram utilizados respectivamente para desenvolver e implementar o SNF. O Statistica 6.0[®] e SAS v.8.1[®] foram utilizados para validar o modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na construção do Sistema ‘Neuro-Fuzzy’ (SNF), realizou-se o treinamento de uma rede neuronal (Figura 4) com base em dados oriundos de experimentação sob condições controladas (Akutsu, 1981), para definir os conjuntos fuzzy relativos às variáveis de entrada temperatura e molhamento foliar. A rede foi treinada com o método híbrido caracterizado pela combinação do método de ‘backpropagation’ e o dos mínimos quadrados, sendo o primeiro associado às estimativas dos parâmetros das funções membro de entrada, e o segundo, associado às estimativas dos parâmetros de saída das funções membro. Ao final do treinamento da rede, a partir de 42 pares de dados e arquitetura de 35 nós, definiram-se 9 parâmetros lineares, 12 parâmetros não-lineares, 3 funções de pertinência para temperatura, 3 funções de pertinência para molhamento foliar (Figura 5) e 9 regras ‘fuzzy’, com o quadrado médio do erro de 0,00765255. O SNF foi configurado com os seguintes operadores: ‘AndMethod’ = ‘prod’, ‘OrMethod’ = ‘probor’, ‘ImpMethod’ = ‘min’, ‘AggMethod’ = ‘max’, ‘DefuzzMethod’ = ‘wtaver’, de acordo com um sistema de inferência ‘fuzzy’ (Figura 6).

Na fase final de desenvolvimento do SNF, foram realizados testes com dados aleatórios de forma a se verificar o pleno funcionamento do sistema e estrutura adequada para processar dados de entrada de temperatura e molhamento foliar, conferindo uma resposta referente ao número de pústulas / lesões por folha de forma coerente com a literatura (Akutsu, 1981; Garçon et al., 2004; Kushalappa et al., 1983; Kushalappa & Eskes, 1989; Montoya & Chaves, 1974; Souza, 1980; Vale et al., 2004; Zambolim, 1999).

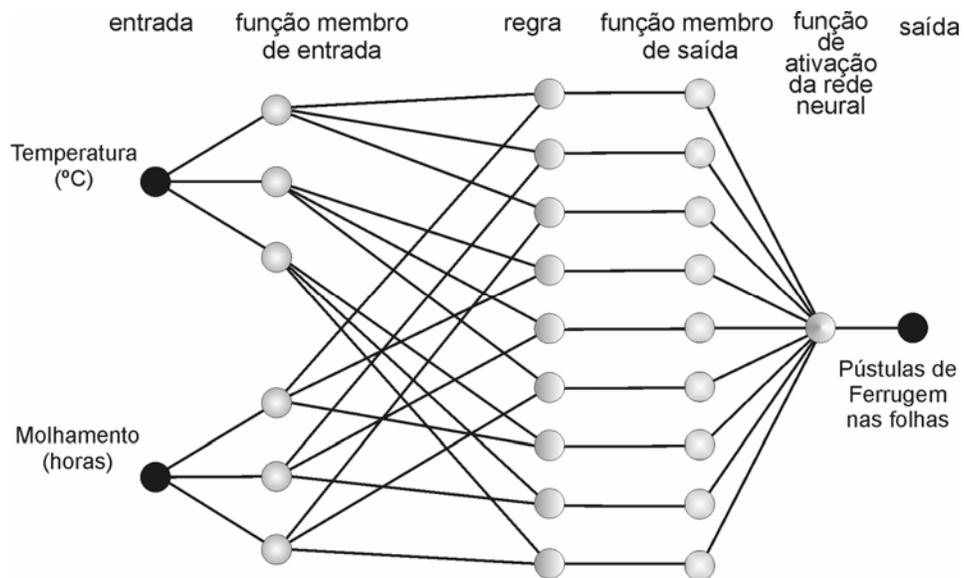


FIGURA 4 Arquitetura da rede neural utilizada para definir o Sistema ‘Neuro-Fuzzy’ utilizado para descrever o processo monocíclico da ferrugem do cafeeiro.

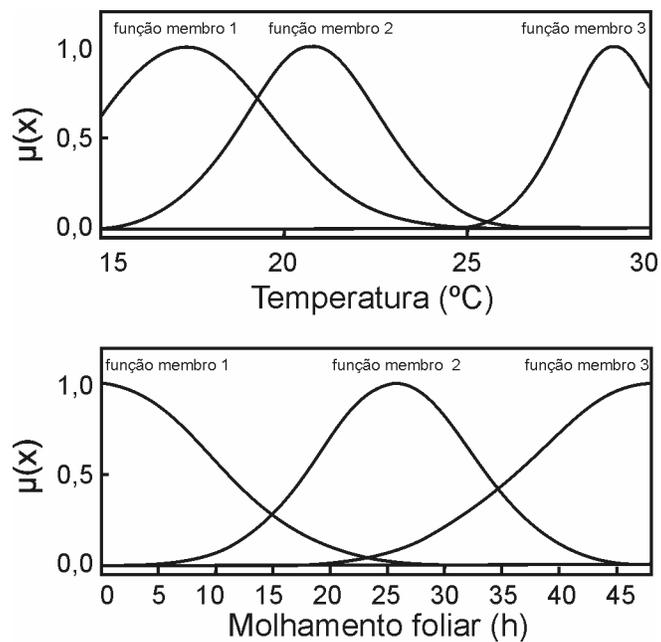


FIGURA 5 Conjuntos ‘fuzzy’ definidos pela rede neural para representar a variação da temperatura (a) e molhamento foliar (b). UFLA, Lavras, MG, 2006.

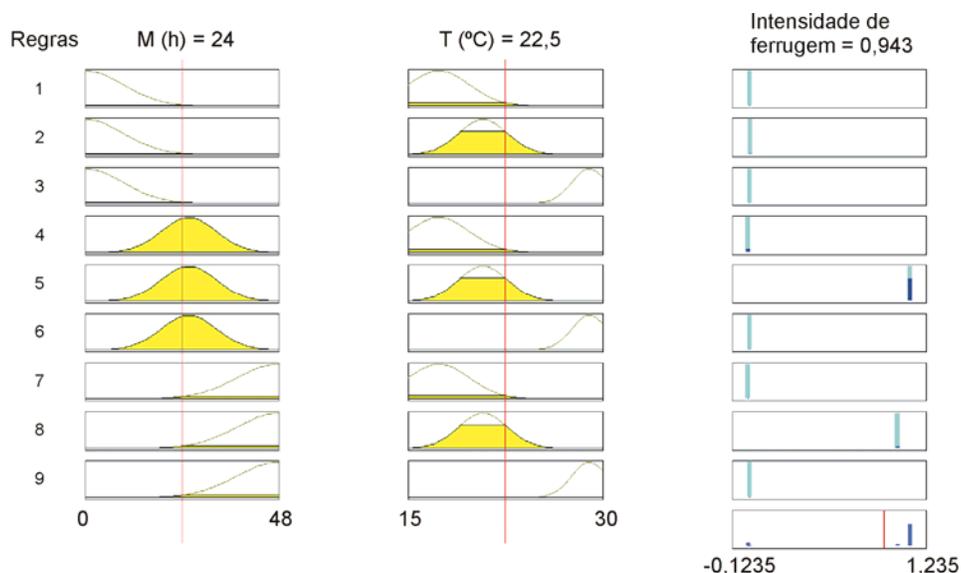


FIGURA 6 Diagrama de inferência 'fuzzy' utilizado para estimar o processo moncíclico da ferrugem do cafeeiro. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Posteriormente, procedeu-se à validação do SNF com base nos dados observados no experimento desenvolvido sob condições controladas (Akutsu, 1981). Nesse caso, um modelo de regressão não-linear foi ajustado aos dados relativos ao efeito da temperatura e duração do molhamento foliar no número de pústulas / lesões de ferrugem (*Hemileia vastatrix*) em folhas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) das cultivares Mundo Novo e Catuaí, para comparar com SLF desenvolvido. Assim, pôde-se verificar a melhor aplicação do SNF para estimar a intensidade da ferrugem com maior desempenho do que o modelo de regressão não-linear (Figura 7).

Com isso, de acordo com o SNF, observou-se maior intensidade da doença nas cultivares Mundo Novo e Catuaí sob temperatura de $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e molhamento foliar entre 27 e 31 horas. Já com o modelo de regressão não-linear, a temperatura de $22,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a duração do molhamento foliar de 35,2 horas corresponderam à resposta máxima de intensidade da ferrugem. Em ambos os

modelos, temperaturas acima de 26 °C, abaixo de 17 °C, bem como períodos de molhamento foliar abaixo de 6 horas reduziram o progresso da doença. Akutsu (1981) também observou em mudas de cafeeiro das cultivares Mundo Novo e Catuaí infecção a partir de 6 horas de molhamento foliar, com infecção máxima sob 24 horas de molhamento. Com relação ao período de molhamento foliar, sob 6 horas e 48 horas de molhamento, houve redução de 97,2% e 3,17% da intensidade da doença, respectivamente. Segundo o mesmo autor, com relação à temperatura, de forma semelhante à verificada por meio do ajuste do SNF, a intensidade máxima da doença foi observada a 24 °C, com redução nas temperaturas abaixo de 18 °C e acima de 26 °C. Da mesma forma, Kushalappa et al. (1983) estudando mudas de cafeeiro da cultivar Mundo Novo, constataram maior intensidade da ferrugem a 24 °C, sob períodos de molhamento foliar entre 20 e 48 horas, já temperaturas abaixo de 18 °C e acima de 26 °C e a duração de molhamento abaixo de 6 horas acarretaram em redução da intensidade da doença. Montoya & Chaves (1974) também realizaram experimentos de laboratório e casa-de-vegetação com mudas da cultivar Catuaí inoculadas artificialmente e constataram, de forma semelhante aos estudos anteriores, temperatura ótima para infecção e germinação de esporos sob agar água e superfície foliar de 22 °C e 23,7 °C, respectivamente.

Após a fase de validação, o SNF foi implementado com o uso de Sistema de Informações Geográficas e Geoestatística, a partir de dados de temperatura mensal média de 39 estações climatológicas do INMET, localizadas em Minas Gerais e estados circunvizinhos, referentes às Normais Climatológicas (1961-1990) (BRASIL, 1992) do mês de janeiro, fixando-se a situação hipotética de ocorrência de molhamento foliar de 12 horas em todas as estações consideradas.

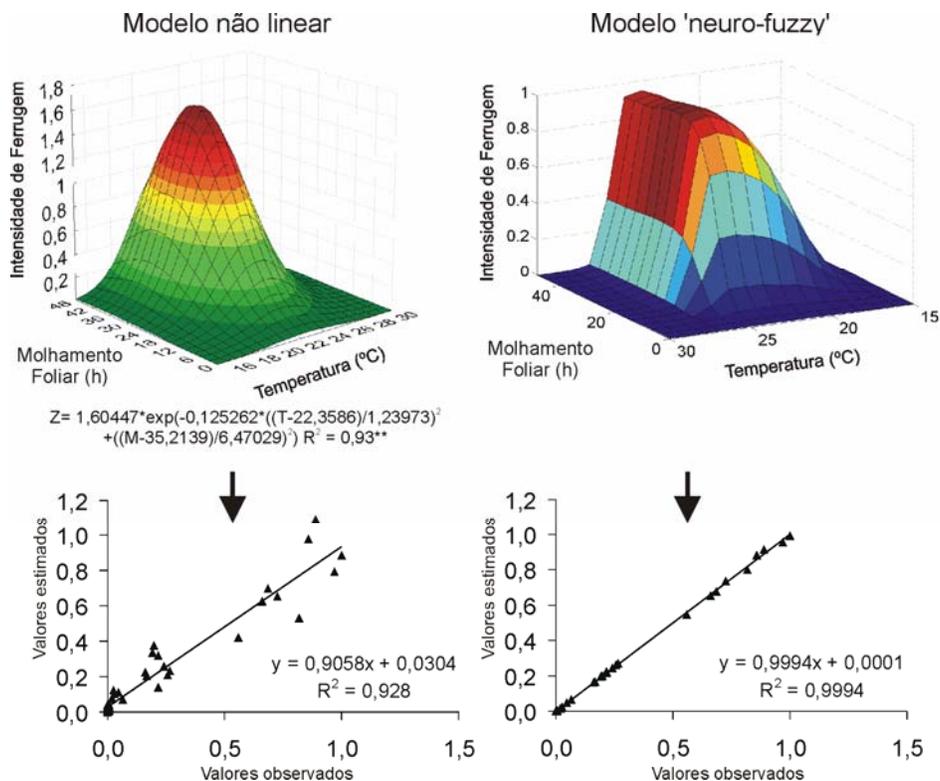


FIGURA 7 Representação tridimensional do modelo de regressão não linear (a) e superfície ‘Neuro-Fuzzy’ (b) utilizados para representar o processo monocíclico da ferrugem do cafeeiro e validação dos modelos por meio da relação linear entre valores observados em experimento sob condições controladas e estimados pelos modelos, relativo às cultivares Mundo Novo e Catuaí. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Após estimar o progresso potencial da doença nessas estações, utilizou-se a técnica da co-krigagem para espacializar as áreas favoráveis à doença, considerando-se além da temperatura, dados de altitude, latitude e longitude em uma resolução espacial de 1 km. Com isso, foi possível observar áreas mais favoráveis à doença em regiões classificadas com a cor vermelha, bem como

áreas menos favoráveis com a cor azul, principalmente nas regiões a leste do estado e extremo oeste do Triângulo Mineiro (Figura 8).

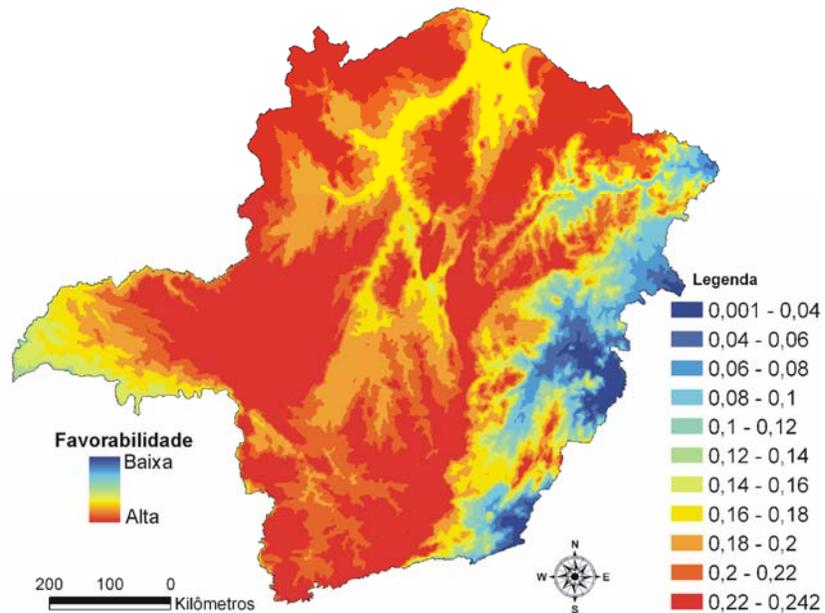


FIGURA 8 Intensidade da ferrugem do cafeeiro em Minas Gerais, estimada por Sistema 'Neuro-Fuzzy' (SNF), correspondente ao período de 1961 a 1990, com base em observações de temperatura mensal média de janeiro de 39 estações climatológicas do INMET, com período de molhamento foliar fixado em 12 horas, utilizando-se altitude, latitude e longitude como co-variáveis. UFLA, Lavras, MG, 2006.

De forma semelhante ao presente estudo, Skirvin et al. (2003) utilizaram os desvios da altitude para melhorar estimativas de krigagem da precipitação e temperatura na microbacia de São Pedro, no sudeste do Arizona, em uma área de 10.000km², entretanto, nesse caso não se aplicou a técnica da co-krigagem, mas foi utilizada uma variável para melhorar a estimativa de outra variável. Já Chappell (1998), utilizou a técnica da co-krigagem para melhorar a qualidade de

estimativas e reduzir custos com relação ao mapeamento de césio em solo da Nigéria. Nesse caso, com uma imagem do satélite Spot utilizada como co-variável, na resolução espacial de 20 m, foi possível obter melhores estimativas do que com o uso da krigagem ordinária, de forma a auxiliar o levantamento de amostras coletadas em malha irregular com interseções a 5, 20 e 100 m.

Após estudar as áreas favoráveis à ferrugem com os dados referentes às Normais Climatológicas, procedeu-se ao estudo do efeito de mudanças climáticas globais na intensidade da ferrugem do cafeeiro em Minas Gerais, pois há evidências científicas de que as atividades humanas interferem no clima global, já que a queima de combustíveis fósseis e biomassa têm produzido gases de efeito estufa e aerossóis que afetam a composição atmosférica (CO₂, O₃, CH₄, N₂O, H₂O, etc) reduzindo a filtragem da radiação solar e balanço de energia (Baede et al., 2001). Da mesma forma, com o aumento da intensidade do uso da terra devido à urbanização, práticas agrícolas e florestais, as propriedades biológicas e físicas da superfície da Terra também foram afetadas, aumentando o impacto potencial das mudanças climáticas globais e regionais (Salinger, 2005).

Nesse contexto, utilizaram-se os valores de temperatura média do ar do mês de janeiro, correspondentes à média dos períodos de 2000 a 2032, 2033 a 2065 e 2066 a 2098, nos cenários de mudanças climáticas globais A1B, A2 e B1. Considerando-se as estimativas das áreas favoráveis à ferrugem do cafeeiro, bem como a situação hipotética de ocorrência de molhamento foliar de 12 horas em todos os pontos da malha amostral considerada, constatou-se nos mapas de co-krigagem, redução das áreas favoráveis à doença ao longo do tempo nos cenários A1B, A2 e B1, porém, com maior redução no cenário A2, seguido pelo cenário A1B e B1 (Figura 9). Esses mesmos resultados foram constatados ao calcular as áreas favoráveis à doença considerando-se a classe com proporção de ferrugem acima de 0,22. Assim, as áreas favoráveis para o cenário A2, A1B e B1, no período de 2000 a 2032, 2033 a 2065 e 2066 a 2098, foram

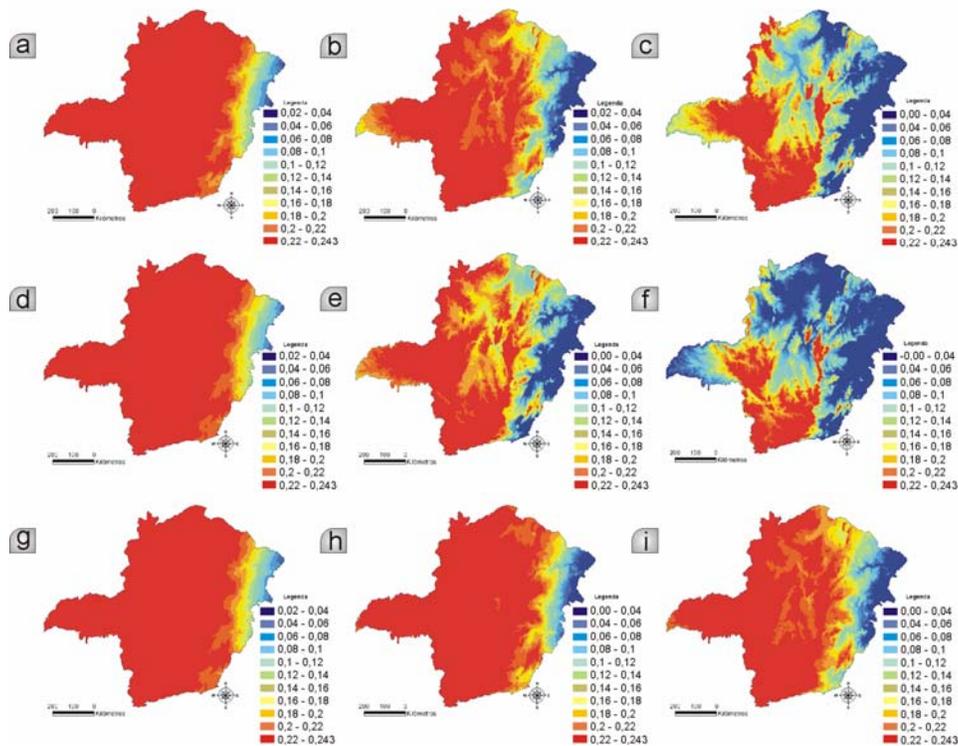


FIGURA 9 Intensidade da ferrugem do cafeeiro em Minas Gerais, estimada por Sistema ‘Neuro-Fuzzy’ (SNF), considerando-se 40 observações de temperatura mensal média de janeiro, nos períodos de 2000 a 2032 (a, d, g), 2033 a 2065 (b, e, h) e 2066 a 2098 (c, f, i) e cenários de mudanças climáticas globais A1B (a, b, c), A2 (d, e, f) e B1 (g, h, i), com o período de molhamento foliar fixado em 12 horas, utilizando-se altitude, latitude, longitude como co-variáveis. UFLA, Lavras, MG, 2006.

respectivamente de 489.632, 228.452 e 84.921 km² para o cenário A2; 481.409, 291.724 e 146.223 km² para o cenário A1B; e de 487.255, 441.107 e 334.237 km² para o cenário B1 (Figura 10). Segundo Cubasch et al. (2001), a diferença de temperatura entre os cenários ocorrerá em função da emissão diferenciada de gases, como por exemplo, nos cenários com uso intensivo de combustíveis

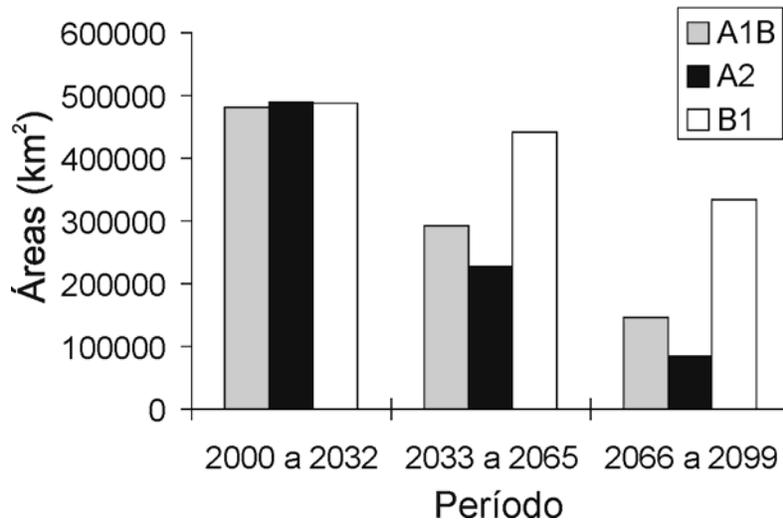


FIGURA 10 Efeito de mudanças climáticas globais nas áreas favoráveis à ferrugem do cafeeiro em Minas Gerais, relativo à classe de intensidade da doença maior que 0,22, estimado por Sistema ‘Neuro-Fuzzy’ (SNF), considerando-se 40 observações de temperatura mensal média de janeiro, correspondente e à média dos períodos de 2000 a 2032, 2033 a 2065 e 2066 a 2098, nos cenários de mudanças climáticas globais A1B, A2 e B1, com o período de molhamento foliar fixado em 12 horas, utilizando-se altitude, latitude, longitude como co-variáveis. UFLA, Lavras, MG, 2006.

fósseis e, conseqüentemente, altas emissões de dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O), como no caso dos cenários A2 e A1B, resultando em maior aquecimento global após meados do século XXI e maior mudança climática comparado ao cenário B1. No entanto, cabe ressaltar que, além da temperatura, a maior “esporulação” ou visualização dos sinais poderá ser influenciada de acordo com condições térmicas, hídricas mais favoráveis ao patógeno biotrófico, sob influência de outros fatores, tais como o estado nutricional das plantas principalmente na fase final de formação de frutos, quando ocorre a redução na

quantidade de nutrientes na folha e maior suscetibilidade do hospedeiro (Alves et al., 2006).

De forma semelhante ao presente estudo, Scherm & Yang (1995), estudando a influência do El Niño (fase quente) e do La Niña (fase fria) no nordeste dos Estados Unidos e norte da China, na ferrugem do trigo, por um período de 40 anos, com análise espectral cruzada, também observaram redução significativa da severidade da doença durante a ocorrência do fenômeno, pois essa oscilação climática é um dos mais importantes mecanismos de caracterização de mudanças climáticas globais.

Portanto, com o aquecimento global, sob as condições mais severas observadas pelo cenário A2, as altas temperaturas irão limitar o processo monocíclico da ferrugem do cafeeiro, no mês de janeiro, sob a condição hipotética de molhamento foliar de 12 horas, no período de 2066 até 2098, com relação ao período de 2000 a 2032 em 17,3 %, principalmente nas regiões localizadas no Triângulo Mineiro, Norte, Leste e Zona da Mata de Minas Gerais. No entanto, Assad et al. (2004), estudando o impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do cafeeiro em Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná, constataram uma redução da área apta à cultura superior a 95% em Goiás, Minas Gerais e São Paulo, e de 75% no Paraná, com inviabilização da cultivo do cafeeiro no Brasil, nos próximos 100 anos. Entretanto, esses autores não consideraram a variabilidade espaço-temporal do clima no Brasil, conferida pelos modelos de circulação atmosférica projetados pelo IPCC (Cubasch et al., 2001), com variações diferenciadas de acordo com cada região brasileira. Com isso, a simulação de incrementos de temperatura de 1°C, 3°C e 5,8°C sobre os mapas de riscos climáticos atuais para a cafeicultura nos estados, realizada por Assad et al. (2004), sem considerar os cenários de mudanças climáticas globais e modelos de circulação atmosférica projetados pelo IPCC, podem apresentar divergências com relação ao presente estudo.

Como resultado das tendências dos cenários estudados, poderá haver escassez de terras agricultáveis, deslocamento da área de ocorrência de doenças do cafeeiro (Parry et al., 1990) e produção de café (Assad et al., 2004) para áreas montanhosas e de maior altitude, onde haja temperaturas mais adequadas ao cultivo. Caso contrário será necessário utilizar ferramentas como a biotecnologia ou melhoramento genético para obter cultivares adaptadas as mudanças climáticas (Evenson, 1999). Além disso, alternativas poderão ser utilizadas, como a irrigação, se houver água suficiente e novas técnicas de cultivo para adaptar a essas novas condições, porém também poderá haver seleção de populações de fungos adaptados a essas novas condições. Como consequência, os custos de produção poderão ser maiores ou até mesmo, em situações extremas, poderá ocorrer impossibilidade de adotar tecnologias para reverter o impacto das mudanças climáticas (Downing, 1992; Parry et al., 1990).

6 CONCLUSÕES

Foi possível desenvolver, validar e implementar um Sistema Neuro-Fuzzy' (SNF) e desenvolver um modelo de regressão não-linear para estimar o processo monocíclico da ferrugem asiática da soja, nas cultivares Conquista, Savana e Suprema com base nas variáveis independentes temperatura, molhamento foliar e variável dependente número de pústulas por folha.

Observaram-se melhores estimativas da intensidade da ferrugem pelo SNF comparado aos dados observados do que o modelo de regressão não-linear.

Com o uso de técnicas e produtos de Geociência foi possível identificar áreas favoráveis à ferrugem asiática em Minas Gerais, considerando temperatura, altitude, latitude e longitude nas estimativas.

Verificaram-se, neste estudo, com base nas normais climatológicas, áreas menos favoráveis à ferrugem principalmente ao leste de Minas Gerais.

Houve redução de áreas favoráveis à doença no período de 2000 a 2098, em todos os cenários futuros do IPCC avaliados, com menor redução no A2, seguido pelo A1B e B1.

Nos modelos de SNF e regressão não-linear, temperaturas acima de 26°C e abaixo de 17 °C, bem como períodos de molhamento foliar abaixo de 6 horas reduziram o progresso da doença.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. 5. ed. San Diego, California: Academic Press, 2004. 952 p.

AKUTSU, M. **Relação de funções climáticas e bióticas com a taxa de infecção da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.)**. 1981. 67 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ALMEIDA, M. R. A. **Sistema híbrido neuro-fuzzy-genético para mineração automática de dados**. Rio de Janeiro : PUC. Departamento de Engenharia Elétrica, 2004. 112 p.

ALVES, M. C.; POZZA, E. A.; SILVA, F. M.; SOUZA, P. E.; POZZA, A. A. A. Estudo da variabilidade espacial da nutrição, produtividade e ferrugem do cafeeiro por meio da geoestatística e estatística clássica. In: CONGRESSO PAULISTA DE FITOPATOLOGIA, 29., 2006, Botucatu, SP. **Anais...** Botucatu, 2006. v. 32. p. 22.

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

BAEDE, A. P. M.; AHLONSOU, E.; DING, Y.; SCHIMEL, D.; POLLONAI, B. B. S. The Climate System: an Overview. In: HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P. J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A. (Ed.). **Climate change 2001: the scientific basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press ; Cambridge: United Kingdom and New York, 2001. p. 87-98.

BATCHELOR, W. D.; YANG, X. B.; TSCHANZ, A. T. Development of a neural network for soybean rust epidemics. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 40, n. 1, p. 247-252, Jan./Feb. 1997.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas (1961-1990)**. Brasília, 1992. 84 p.

CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. **Introduction to plant disease epidemiology**. New York: John Wiley, 1990. 532 p.

CARTER, T. R.; ROVERE, E. L. L.; JONES, R. N.; LEEMANS, R.; MEARNES, L. O.; NAKICENOVIC, N.; PITTOCK, A. B.; SEMENOV, S. M.; SKEA, J. Developing and Applying Scenarios. In: MCCARTHY, J. J.; CANZIANI, O. F.; LEARY, N. A.; DOKKEN, D. J.; WHITE, K. S. (Ed.). **Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press ; Cambridge: United Kingdom and New York, 2001. p. 147-190.

CARTER, T. R.; SAARIKKO, R. A.; NIEMI, K. J. Assessing the risks and uncertainties of regional crop potential under a changing climate in Finland. **Agricultural and Food Science in Finland**, Yokiainen, v. 5, n. 3, p. 329-350, 1996.

CHALFOUN, S. M.; CARVALHO, V. L.; PEREIRA, M. C. Efeito de alterações climáticas sobre o progresso da ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 5, p. 1248-1252, set./out. 2001.

CHAKRABORTY, S.; MURRAY, G. M.; MAGAREY, P. A.; YONOW, T.; O'BRIEN, R. G.; CROFT, B. J.; BARBETTI, M. J.; SIVASITHAMPARAM, K.; OLD, K. M.; DUDZINSKI, M. J.; SUTHERST, R. W.; PENROSE, L. J.; ARCHER, C.; EMMETT, R. W. Potential impact of climate change on plant diseases of economic significance to Australia. **Australasian Plant Pathology**, Toowoomba, v. 27, n. 1, p. 15-35, 1998.

CHAPPELL, A. Using remote sensing and geostatistics to map ¹³⁷Cs-derived net soil flux in south-west Niger. **Journal of Arid Environments**, London, v. 39, n. 3, p. 441-455, July 1998.

COAKLEY, S. M. Biospheric change: will it matter in plant pathology? **Canadian Journal of Plant Pathology**, Ottawa, v. 17, n. 2, p. 147-153, June 1995.

COAKLEY, S. M.; SCHERM, H. Plant disease in a changing global environment. **Aspects of Applied Biology**, v. 45, p. 227-238, 1996.

CUBASCH, U.; MEEHL, G. A.; BOER, G. J.; STOUFFER, R. J.; DIX, M.; NODA, A.; SENIOR, C. A.; RAPER, S.; YAP, K. S. The Climate System: an

Overview. In: HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P. J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A. (Ed.). **Climate change 2001: projections of future climate change**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press ; Cambridge: United Kingdom and New York, 2001. p. 87-98.

DOWNING, T. E. **Climate change and vulnerable places: Global Food Security and country studies in Zimbabwe, Kenya, Senegal and Chile**. Research Report 1, Environmental Change Unit. United Kingdom: University of Oxford, 1992. 54 p.

DUNIWAY, J. M. Soil-plant-water relations and disease. In: HATFIELD, J. L.; THOMASON, I. J. **Biometrology in integrated pest management**. London: Academic, 1982. p. 307-325.

DUTHIE, J. A. Models of the response of foliar parasites to the combined effects of temperature and duration of wetness. **Phytopathology**, St Paul, v. 87, n. 11, p. 1088-1095, Nov. 1997.

EVENSON, R. E. Global and local implications of biotechnology and climate change for future food supplies. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 96, n. 11, p. 5921-5928, May 1999.

FINOL, J.; GUO, Y. K.; JING, X. D. A rule based fuzzy model for the prediction of petrophysical rock parameters. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam, v. 29, n. 2, p. 97-113, Apr. 2001.

FOLLAND, C. K.; KARL, T. R.; CHRISTY, J. R.; CLARKE, R. A.; GRUZA, G. V.; JOUZEL, J.; MANN, M. E.; OERLEMANS, J.; SALINGER, M. J.; WANG, S. W. Observed Climate Variability and Change. In: HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J. ; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P. J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A. (Ed.). **Climate change 2001: the scientific basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press ; Cambridge: United Kingdom and New York, 2001. p. 101-181.

FUHRER, J. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 97, n. 1/3, p. 1-20, July 2003.

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

GOUDRIAAN, J.; ZADOKS, J. C. Global climate change: modelling the potential responses of agro-ecosystems with special reference to crop protection. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 87, n. 2, p. 215-224, 1995.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JANG, J. S. R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, New York, v. 23, n. 3, p. 665-685, May 1993.

JANG, J. S. R.; SUN, C. T. Neuro-fuzzy modeling and control. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 83, n. 3, p. 378-406, Mar. 1995.

JONES, A. L. Role of wet periods in predicting foliar diseases. In: Leonard, K. J.; Fry, W. E. **Plant disease epidemiology**. New York: Macmillan, 1986. p. 87-100.

KENNY, G. J.; HARRISON, P. A.; PARRY, M. L. **The effect of climate change on agricultural and horticultural potential in Europe**. Oxford: Environmental Change Unit, 1993. 224 p.

KIM, K. S.; WANG, T. C.; YANG, X. B. Simulation of apparent infection rate to predict severity of soybean rust using a fuzzy logic system. **Phytopathology**, St Paul, v. 95, n. 10, p. 1122-1131, Oct. 2005.

KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications**. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 574 p.

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

KUSHALAPPA, A. C.; ESKEES, A. B. Advances in coffee rust research. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 27, p. 503-531, 1989.

LIN, J. A vibration absorber of smart structures using adaptive networks in hierarchical fuzzy control. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 287, n. 3, p. 683-705, Sept. 2005.

MIDGLEY, G. F., FRAGOSO, J. M. V., LISCHKE, H., THOMPSON, K. Forecasting Regional to Global Plant Migration in Response to Climate Change. **BioScience**, Washington, v. 55, n. 9, p. 749-759, Sept. 2005.

MONTOYA, R. H.; CHAVES, G. M. Influência da temperatura e da luz na germinação, infectividade e período de geração de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. **Experientiae**, Viçosa, v. 18, p. 239-266, 1974.

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G. VRIES, B. de; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GRÜBLER, A.; JUNG, T. Y.; KRAM, T.; LA ROVERE, E. L.; MICHAELIS, L.; MORI, V.; MORITA, T.; PEPPER, W. ; PITCHER, H.; PRICE, L.; RAIHI, K.; ROEHL, A.; ROGNER, H. -H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. **Emissions scenarios**. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press ; Cambridge : United Kingdom and New York, 2000. 599 p.

NASA, **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 2000**. Land Information Worldwide Mapping, LLC. Raster, 1:50000. 2005.

NCAR. National Center for Atmospheric Research. Disponível em: <<http://www.gisclimatechange.org>>. Acesso em: 2006.

NEILSON, R. P.; PITELKA, L. F.; SOLOMON, A. M.; NATHAN, R.; MIDGLEY, G. F.; FRAGOSO, J. M. V.; LISCHKE, H.; THOMPSON, K. Forecasting Regional to Global Plant Migration in Response to Climate Change. **BioScience**, Washington, v. 55, n. 9, p. 749-759, Sept. 2005.

PARRY, M. L.; PORTER, J. H.; CARTER, T. R. Agriculture: climate change and its implications. **Trends in Ecology and Evolution**, Oxford, v. 5, n. 9, p. 318-322, Sept. 1990.

PATTERSON, D. T.; WESTBROOK, J. K.; JOYCE, R. J. V.; LINGREN, P. D.; ROGASIK, J. Weeds, insects, and diseases. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 43, n. 4, p. 711-727, Dec. 1999.

- PINTO, A. C. S.; POZZA, E. A.; SOUZA, P. E.; POZZA, A. A. A.; TALAMINI, V.; BOLDINI, J. M.; SANTOS, F. S. Descrição da epidemia da ferrugem do cafeeiro com redes neurais. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 517-524, set. 2002.
- PIVONIA, S.; YANG, X. B. Assessment of epidemic potential of soybean rust in the United States. **Plant Disease**, St Paul, v. 89, n. 6, p. 678-682, June 2005.
- PIVONIA, S.; YANG, X. B. Assessment of the potential year-round establishment of soybean rust throughout the world. **Plant Disease**, St. Paul, v. 88, p. 523-529. 2004.
- SALINGER, M. J. Climate Variability and Change: Past, Present and Future - An Overview, **Climatic Change**, Dordrecht, v. 70, n. 1/2, p. 9-29, May 2005.
- SCHERM, H.; YANG, X. B. Interannual variations in wheat rust development in China and the United States in relation to the El Niño/southern oscillation. **Phytopathology**, St Paul, v. 85, n. 9, p. 970-976, Sept. 1995.
- SEDIYAMA, G.; MELLO Jr., J. C. Modelos para estimativas das temperaturas normais mensais médias, máximas, mínimas e anual no estado de Minas Gerais. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 6, n. 1, p. 57-61, jan./mar. 1998.
- SKIRVIN, S. M.; MARSH, S. E.; McCLARAN, M. P.; MEKO, D. M. Climate spatial variability and data resolution in a semi-arid watershed, south-eastern Arizona. **Journal of Arid Environments**, London, v. 54, n. 4, p. 667-686, Aug. 2003.
- SOUZA, S. M. C. **Importancia da chuva e da temperatura do ar na incidencia da ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berk. e Br.) em cafeeiros, de tres localidades do estado de Minas Gerais**. 1980. 50 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- SUGENO, M. **Industrial applications of fuzzy control**. New York: Elsevier Science, 1985.
- VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, L.; COSTA, L. C.; LIBERATO, J. R.; DIAS, A. P. S. Influência do clima no desenvolvimento de doenças de plantas. In: VALE, F. X. R.; JESUS JUNIOR, W. C.; ZAMBOLIM, L. **Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas**. Belo Horizonte: Editora Perffil, 2004. p. 47-87.

VON ALTROCK, C. **Fuzzy logic and neuroFuzzy applications explained**. USA: Prentice Hall, 1995. 384 p.

WALLIN, J. R. Summary of recent progress in predicting late blight epidemics in United States and Canada. **American Potato Journal**, Oromo, v. 39, n. 8, p. 306-312, Aug. 1962.

WOODS, A.; COATES, K.; DAVID, H.; ANDREAS. Is an Unprecedented Dothistroma Needle Blight Epidemic Related to Climate Change?. **BioScience**, London, v. 55, n. 9, p. 761-769, Sept. 2005.

YANG, X. B.; FENG, F. Ranges and diversity of soybean fungal diseases in North America. **Phytopathology**, St Paul, v. 91, n. 8, p. 769-775, Aug. 2001.

ZAMBOLIM, L. **I Encontro sobre produção de café com qualidade**. Viçosa: UFV/DFP, 1999. 259 p.

ZAMBOLIM, L.; VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, E. M. Doenças do cafeeiro (*Coffea arábica* e *C. canephora*). In: KIMATI, H.; AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. (Ed.). **Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas**. 4. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2005. v. 2, p. 165-180.

CAPÍTULO 4

AGRICULTURA DE PRECISÃO PARA ESTUDAR A VARIABILIDADE ESPACIAL E A INTERAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS AGRONÔMICAS, PRAGAS E DOENÇAS EM LAVOURA CAFEIEIRA

1 RESUMO

ALVES, Marcelo de C. **Agricultura de Precisão para estudar a variabilidade espacial e a interação entre variáveis agronômicas, pragas e doenças em lavoura cafeeira.** 2006. 186 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) -Universidade Federal de Lavras, MG.*

Objetivou-se, com este trabalho, utilizar técnicas de Agricultura de Precisão para detectar padrões de variabilidade espacial de variáveis agronômicas em lavoura de cafeeiro a fim de obter-se uma visão holística da interação da dinâmica dos processos de múltiplos fatores que influenciam no manejo de uma lavoura cafeeira sob manejo convencional, no sul de Minas Gerais. O experimento foi conduzido na fazenda Cafua, localizada no município de Ijací, sul de Minas Gerais, em uma área de aproximadamente 6,2 ha de lavoura de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) da cultivar Mundo Novo. Foram demarcados na área transectos com distâncias de 25x25 e 50x50 metros, num total de 67 pontos amostrais, com base nos quais realizaram-se amostragem da produtividade, índice de área foliar, intensidade de pragas e doenças, características físico-químicas do solo, teores foliares de macronutrientes e micronutrientes, em diferentes épocas. Com o uso de técnicas de Sistema de Informações Geográficas, Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagem Digital, Geoestatística e Estatística, foi possível detectar a variabilidade espacial de variáveis agronômicas na lavoura, ao longo do tempo, as quais, em grande parte, foram relacionadas com propriedades físico-químicas do solo, nutrição mineral das plantas, ocorrência de pragas e doenças na lavoura, de forma a influenciar na bienalidade da produtividade.

*Comitê Orientador: Edson Ampélio Pozza – UFLA (Orientador), José da Cruz Machado – UFLA (Co-orientador).

2 ABSTRACT

ALVES, Marcelo de C. **Precision Farming to study the spatial variability and the interaction between pests, diseases and agronomic variables in coffee crop.** 2006. 186 p. Tesis (Doctorate in Crop Science) – Federal University of Lavras, MG.*

It was aimed at, with this work, to use Precision Farming techniques to detect the spatial variability patterns of agronomic variables in coffee crop and to obtain a holistic vision about the interaction of the multiples factors dynamical process that influence the coffee crop, under conventional management, in the south of Minas Gerais. The experiment was conducted in the Cafua farm, located in Ijací, a municipal district of the south of Minas Gerais, in an area of approximately 6,2 ha, with coffee crop (*Coffea arabica* L.) plantation, from New World cultivar. 25x25 and 50x50 meters transects distances where delimited to evaluate the coffee productivity, leaf area index, pests and diseases intensity, physiochemical soil characteristics, micro and macro leaf nutrients tenors, at different time periods, composing a total of 67 sampling points. Using Geographical Information System, Remote Sensing, Digital Image Processing, Geostatistics and Statistics techniques, it was possible to detect the agronomic variables spatial variability of the area, throughout the time, which were mostly related to the soil physiochemical properties, plant mineral nutrition and disease and pests occurrency in the plantation influencing the productivity bienniality.

*Advising Committee: Edson Ampélio Pozza – UFLA (Adviser), José da Cruz Machado – UFLA (Co-Adviser).

3 INTRODUÇÃO

O homem depende da biosfera para obter recursos como alimentos, fibras e água para sua sobrevivência. Todavia, em função dessa necessidade vital, aproximadamente 18 milhões de km² da superfície terrestre são utilizadas com cultivo de lavouras, 34 milhões de km² com pastagens e 2,5 milhões de km² com áreas urbanas. Juntos, esses três ecossistemas antrópicos ocupam aproximadamente um terço da superfície global da Terra (Leff et al., 2004). Com isso, a conversão dos ecossistemas naturais em agroecossistemas, caracterizados por muitos indivíduos e poucas espécies, geralmente uma monocultura, favoreceram a instabilidade do ambiente, resultando em desequilíbrio da distribuição das populações de organismos-praga, entre eles as pragas e doenças, responsáveis por expressivas perdas na produção (Conceição, 2000). Entretanto, para isso, é necessário conhecer e modelar padrões espaciais e estabelecer sua relação com as variáveis ambientais (Agrios, 2004; Campbell & Madden, 1990; Estrada-Peña, 1999; Jaime-Garcia et al., 2001; Liebhold et al., 1991; Liebhold et al., 1993; Nelson et al., 1999). Para isso, tornou-se cada vez mais necessário utilizar metodologias para subsidiar o apoio à tomada de decisão sobre a redução de custos nos programas de controle de qualidade de empreendimentos rurais (Andriotti, 2003; Matthews et al., 1999; Miranda, 2005; Silva, 2003) por meio da Geoinformática de forma integrada com a Tecnologia da Informação (TI) (Blaschke & Kux, 2005).

Tendo em vista o vasto potencial de uso da Geoinformática aliada às pressões para produzir produtos e serviços com maior eficácia, rapidez e baixo custo, verifica-se a necessidade de utilizar esses avanços tecnológicos para obter produtos superiores, de melhor qualidade, ou realizar serviços mais qualificados na Agricultura (Cortez, 1999; Turban, 2003). Além disso, estudar os fatores que influenciam os agroecossistemas e sua variabilidade podem auxiliar na adoção

de estratégias e táticas de manejo mais eficazes e de menor impacto ambiental (Cox, 2002; Lowenberg-DeBoer, 2000).

No caso da cultura do cafeeiro, há um campo vasto de pesquisa com o uso de técnicas da Agricultura de Precisão, não só pela importância dessa cultura para o Brasil, mas também pelo alto grau tecnológico observado nas lavouras (Silva & Salvador, 1998), sendo possível referenciar uma infinidade de pontos dentro de uma região, área ou gleba, com precisão submétrica e mapear a cultura planta por planta (Sartori et al., 2001). Assim, com a aplicação dessa tecnologia, pode-se potencializar o manejo sustentável da cultura, de acordo com as relações existentes entre o estado nutricional das plantas, as características físico-químicas do solo, a produtividade da cultura (Russell, 1973) e a intensidade de doenças (Huber, 1980; Pozza et al., 2004) e pragas na lavoura (Souza et al., 1998; Souza & Reis, 1997).

Dessa forma, partindo da hipótese de existir variação espacial de nutrientes ao longo do perfil do solo, de forma a influenciar na produtividade do cafeeiro, no índice de área foliar das plantas e na intensidade de pragas e doenças, objetivou-se, com este trabalho, utilizar técnicas da Agricultura de Precisão e Estatística para detectar padrões na variabilidade espacial de variáveis agronômicas em uma lavoura cafeeira.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na fazenda Cafua, localizada no município de Ijací, sul de Minas Gerais, em uma área de 6,5 ha de lavoura de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) da cultivar Mundo Novo, com dez anos de idade, com espaçamento de 4m entre linhas e 1m entre plantas, totalizando 2500 plantas. ha⁻¹. As coordenadas geográficas são de 21° 10' 11" de latitude sul e 44° 58' 37" de longitude oeste de Greenwich, com altitude média de 934 metros e declividade de 0,84 % no sentido norte-sul e de 12 % no sentido leste-oeste. Foram demarcados na área transectos com distâncias de 25x25 e 50x50 metros, num total de 67 pontos amostrais (Figura 1).

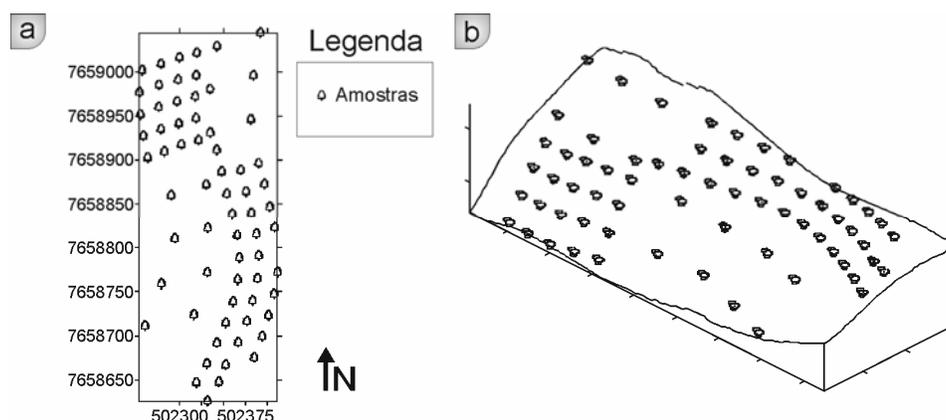


FIGURA 1 Representação bidimensional (a) e tridimensional (b) dos pontos amostrais georreferenciados na área experimental. UFLA, Lavras, MG, 2006.

O georreferenciamento dos pontos foi realizado com GPS TRIMBLE 4600 LS[®] e Estação Total Leica TC600[®], com base em correção de cotas por coordenadas conhecidas no câmpus da Universidade Federal de Lavras. A adubação foi realizada em novembro de 2004, janeiro, novembro, dezembro de

2005 e janeiro de 2006 aplicando-se 50 kg.ha⁻¹ N, P, K (26 00 26), (20 05 20), (20 05 15), (20 05 15) e (20 05 10) por cova, respectivamente. Realizaram-se aplicações de Zn, B e Cl (2,5 – 1,5 – 2,5) em novembro de 2004, março, abril de 2005, novembro de 2005, janeiro e fevereiro de 2006, aplicando-se 100 L.ha⁻¹. O controle químico de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado em novembro de 2004 (0,6 L.ha⁻¹ Opus[®]), abril de 2005 (2 L.ha⁻¹ de Nimbus[®], 2 L.ha⁻¹ de Endosulfan AG[®], 100 g.ha⁻¹ de Amistar[®], 0,4 L.ha⁻¹ Opus[®]), maio de 2005 (3 kg.ha⁻¹ de Roundup WG[®]), novembro de 2005 (1 kg.ha⁻¹ Verdadero 600 WG[®]), janeiro de 2006 (2 L.ha⁻¹ de Nimbus[®], 2 L.ha⁻¹ de Endosulfan AG[®], 100 g.ha⁻¹ de Amistar[®] e 2 kg.ha⁻¹ de Roundup WG[®]). Realizou-se capina manual, mecânica e retirada de cipó sempre que necessário.

Avaliações de incidência e da severidade da ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome), cercosporiose (*Cercospora coffeicola* Berkeley & Cooke) nas folhas e infestação de bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*) (Guérin-Mèneville, 1842) (Lepidoptera:Lyonetiidae) nas folhas foram realizadas observando-se os sinais da praga e das doenças em 100 folhas coletadas em cada ponto amostral, a partir do terceiro e do quarto par de folhas, no terço médio das plantas, por serem os mais representativos (Huerta, 1963). Foram amostradas dez folhas de cada lado da rua, na direção leste e oeste, em cinco plantas por ponto. As folhas foram destacadas e analisadas em Laboratório.

Avaliações nos frutos da infestação da broca-do-café (*Hypothenemus hampei*) (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Scolytidae), incidência e severidade da cercosporiose (*C. coffeicola*) do cafeeiro e incidência de mancha anular (Coffee ringspot vírus – CoRSV) foram realizadas observando-se os sinais desses organismos-praga em 100 frutos cereja coletados em cada ponto amostral. Os frutos foram coletados aleatoriamente no terço médio de duas plantas, sendo 25 frutos de cada lado da rua, por ponto amostrado, num total de 100 frutos por ponto. Os grãos com orifício na coroa do fruto foram considerados infestados

para o levantamento da Broca-do-café (Gallo et al., 2002). A Cercosporiose foi contabilizada em frutos com manchas escuras, deprimidas, no sentido das extremidades (Boldini, 2001). Círculos irregulares pardo-amarelados nos frutos foram contabilizados como sintomas de incidência de mancha-anular (Carvalho & Chaulfoun, 2000).

O teor de macronutrientes N, P, K, Ca, Mg, S (gkg^{-1}) e de micronutrientes Zn, B, Cu, Fe, Mn (ppm) nas folhas foi avaliado de acordo com metodologia proposta por Malavolta et al. (1997). Foram amostradas 5 folhas de cada lado da rua, na direção leste e oeste, em três plantas por ponto. Logo após a coleta, as amostras foram submetidas à limpeza com água corrente e enxaguadas em água deionizada para remover contaminações na superfície. Em seguida foi realizada a secagem das folhas a 60 °C em estufa, por 72 horas. A matéria seca das folhas foi moída e armazenada em frascos de vidro para proceder as determinações analíticas.

A amostragem de solo foi realizada na camada de 0-20 cm, de acordo com metodologia de Cantarutti et al. (1999), na projeção da copa das plantas, em cada ponto amostral, para determinar teores de macronutrientes, micronutrientes, textura e matéria orgânica.

Com o objetivo de verificar o efeito da doença no enfolhamento da cultura, foi utilizada a escala de notas proposta por Boldini (2001), estabelecendo-se notas de 1 a 5, de acordo com a porcentagem de enfolhamento das plantas, sendo 1 (0 a 20 % de enfolhamento); 2 (21 a 40 %); 3 (41 a 60 %); 4 (61 a 80 %) e 5 (81 a 100 %), para cinco plantas por ponto.

A produção de café (L.planta^{-1}) foi obtida por meio da colheita no pano e no chão, das mesmas cinco plantas de café, amostradas anteriormente em cada um dos 67 pontos do experimento e, em seguida, verificou-se o volume em litros coletado por meio de um recipiente graduado.

A dependência espacial foi analisada com o uso da Geoestatística, por meio de ajustes de semivariogramas, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, de acordo com metodologia de Burrough & McDonnell (1998). O ajuste dos modelos de semivariogramas foi escolhido em função do quadrado médio do erro, erro padrão de predição e a autovalidação ('Jack Knife'). Após o ajuste dos semivariogramas, foi realizada a interpolação dos dados por krigagem ordinária, de forma a possibilitar visualizar padrões de distribuição espacial das variáveis na lavoura sob diferentes épocas de avaliação.

Os resultados da krigagem foram sobrepostos ao modelo de elevação digital da área experimental por método de sobreposição ponderada de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Uma imagem digital orbital multiespectral de altíssima resolução espacial foi obtida da empresa Intersat[®], sendo o produto constituído de 1 imagem do satélite QuickBird[®] OrtoquickPac, com 4 bandas multiespectrais (vermelho - R - 0,63 a 0,69 μ m, verde - G - 0,52 a 0,60 μ m, azul - B - 0,45 a 0,52 μ m e infravermelho próximo - 0,76 a 0,90 μ m), com resolução espacial de 2,4m, 1 banda pancromática com resolução de 0,6 m e coeficientes polinomiais que permitem a ortorretificação da imagem, na resolução radiométrica de 8 bits, referentes a 25 km² sobre a região de Ijaci, MG. O QuickBird[®] possui sensores do tipo CCD ('Charge Coupled Device'), que realizam varredura eletrônica em fileira linear ('pushbroom linear array') flexíveis para visadas 'off-nadir' até 30°, ao longo do terreno imageado. A visada 'off-nadir' permite a cobertura do terreno de forma a possibilitar adquirir pares estereoscópicos. Os dados coletados pelo satélite são captados por duas estações na Terra (Fairbanks, Alasca, EUA e Tromsø, Noruega). A partir dessas estações, os dados são enviados para o centro de processamento da DigitalGlobe[®] no Colorado, EUA (Pinheiro et al., 2005). Optou-se por composições coloridas, pois, segundo

Moreira (2005), em imagens coloridas, a separação de tipos de vegetação e de características como desenvolvimento da vegetação, infestação de pragas e epidemias de doenças é facilitada. Segundo o mesmo autor, o matiz da cor resultante está intimamente relacionado à fase de desenvolvimento, crescimento e condições fitossanitárias das plantas.

O georeferenciamento da imagem foi realizado com base nas coordenadas geográficas obtidas pelo GPS geodésico, na fase de demarcação dos pontos amostrais. O modelo digital de elevação de Minas Gerais foi utilizado para ortorectificar a imagem (NASA, 2005). Posteriormente, Técnicas de Processamento de Imagem Digital foram utilizadas para proceder ao realce da imagem visando a melhorar a qualidade dos dados (Gonzalez & Woods, 2000) e combinar imagens de diferentes características espectrais e espaciais para sintetizar uma nova imagem com melhor resolução espacial do que a imagem multiespectral original (Jensen, 2000). Para isso, optou-se pela fusão das bandas da imagem QuickBird[®] pela técnica de componentes principais (Showengerdt, 1997) em função dos melhores resultados obtidos por esse método com relação aos de IHS e Transformada Wavelet (Leonardi et al., 2005). Para minimizar a variabilidade de fatores externos, a reflectância espectral foi combinada em índices de vegetação, de acordo com a informação contida na reflectância de dosséis referentes às regiões do vermelho e do infravermelho próximo, combinadas sob a forma de razões, pois a radiância no vermelho exibe uma relação inversa não-linear com a biomassa verde, enquanto a radiância no infravermelho próximo exibe uma relação não-linear direta oriunda de um processo de espalhamento intra e interfoliar, dependente da quantidade de folhas existentes, sua distribuição e arranjo espacial no dossel. Com isso, os índices de vegetação foram utilizados como indicadores do crescimento e do vigor da vegetação verde, diagnóstico de parâmetros biofísicos, biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade (Meneses &

Madeira Netto, 2001). Assim, empregou-se o índice de vegetação (NDVI) na avaliação do vigor da cobertura vegetal (Moreira, 2005):

$$\text{NDVI} = (\text{IVP} - \text{Ver}) / (\text{IVP} + \text{Ver})$$

em que, IVP é a energia refletida na região do infravermelho próximo; e Ver, a energia refletida na região do vermelho do espectro eletromagnético. Nesse caso, a assinatura espectral característica de uma vegetação verde e sadia apresenta-se com evidente contraste entre a região do visível, especificamente no vermelho e do infravermelho próximo. Quanto maior for esse contraste, maior vigor da vegetação ocorrerá na área imageada (Moreira, 2005).

O experimento foi realizado nos anos de 2005 e 2006 e as variáveis agronômicas analisadas foram obtidas em diferentes épocas (Tabela 1).

‘Softwares’ utilizados

O GS+ v.7.0[®] e SURFER v. 8.0[®] foram utilizados respectivamente para análise geoestatística e plotagem dos mapas sobrepostos ao modelo digital de elevação da área. O RSI Envi v.4.2[®] foi utilizado no processamento de imagens e o SAS v.8.1[®] para análises descritivas dos dados.

TABELA 1 Data de obtenção das variáveis agronômicas na área experimental da Fazenda Cafua, Ijaci, MG. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Variável	27/5/2003	15/6/2005	9/7/2005	20/12/2005	4/2/2006	29/5/2006	7/6/2006
Índice de vegetação (NDVI)	X						
Índice de área foliar das plantas (escala diagramática)		X		X		X	
Produtividade			X				X
Teor de nutrientes nas folhas		X		X		X	
Características físico-químicas do solo					X		
Incidência de ferrugem nas folhas		X		X		X	
Severidade de ferrugem nas folhas				X		X	
Incidência de cercosporiose nas folhas		X		X		X	
Severidade de cercosporiose nas folhas				X		X	
Infestação de bicho-mineiro nas folhas		X		X		X	
Infestação de broca-do-café nos frutos		X				X	
Incidência de mancha anular nos frutos (CoRSV)						X	

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em uma área de 6,5 há, foi possível identificar plantas de cafeeiro da cultivar Mundo Novo, de dez anos, com base em imagem QuickBird[®] de altíssima resolução espacial. Ramirez (2002) também conseguiram identificar plantios de café (*Cofea arabica* L.) com o uso de imagem pancromática do Ikonos-II (resolução espacial de 1m) de altíssima resolução espacial, de forma que o número de talhões identificados pela imagem do canal pancromático do Ikonos-II foi 1,5 vezes superior ao do Landsat/ETM+ e a maior área não identificada pelo Landsat/ETM+ foi de 4,4 ha.

Posteriormente, com metodologias de análise de Processamento de Imagem Digital, por meio da técnica de componentes principais, realizou-se a fusão das bandas multiespectrais e pancromática para possibilitar compor uma imagem colorida, uma infravermelha e possibilitar visualizar padrões espaciais na lavoura. Com o uso do método de fusão por Componentes Principais foi possível gerar um produto com preservação das cores da imagem original e transferir as informações de detalhes da banda pancromática para o produto híbrido (Figura 2). De forma semelhante, Leonardi et al. (2005), em estudo comparativo de métodos de fusão de imagens por Componentes Principais, IHS e transformada de Wavelet dos sensores SPOT5 (bandas 1,2,3 e pancromática), SPOT4 (bandas 1, 2 e 3), CBERS-2 (bandas 2, 3 e 4), Landsat ETM-7 (bandas 2, 3 e 4) e QuickBird[®] (bandas 1, 2, 3 e pancromática), referentes a cenas do Rio de Janeiro, também observaram melhor qualidade espectral, espacial e melhor desempenho do método de fusão por Componentes Principais.



FIGURA 2 Composição colorida 321 (a) e infravermelha falsa cor 432 (b) referentes à fusão por componentes principais das bandas multiespectrais (MS) (2,4 m) e banda pancromática (PAN) (0,6 m) de imagem QuickBird® de 27/05/2003. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Na fusão da imagem ortoretificada colorida normal, verificou-se a vegetação mais exuberante representada por coloração verde mais intensa e a vegetação em estado de senescência pela cor verde menos intensa. Da mesma forma, na composição infravermelha, pôde-se constatar padrão espacial diferenciado da vegetação ao comprimento de onda de 900nm, que corresponde à região do infravermelho próximo, na qual a vegetação possui alta reflectância da energia incidente. Nesse caso, foi possível detectar mudanças no comportamento espectral da vegetação, pela diferença dos índices de área foliar

(Figura 2). Para realizar a composição infravermelha, a camada sensível ao verde recebeu a coloração azul, a camada sensível à luz vermelha recebeu a cor verde e a camada sensível à radiação infravermelha recebeu a cor vermelha, compondo uma imagem colorida falsa-cor. Com isso, uma vegetação verde, a qual apresenta dois picos de maior reflectância no verde e no infravermelho próximo, foi representada pelo azul e o vermelho (cores primárias), resultando em uma cor secundária denominada magenta, já o solo exposto, o qual apresenta cor avermelhada, apresentou-se com tonalidade verde. Segundo Moreira (2005), há grande vantagem do uso de imagens infravermelhas falsa-cor, em relação às coloridas normais, pelo fato das primeiras conterem informações sobre a radiação eletromagnética na região do infravermelho próximo. Assim, como a vegetação reflete mais esta radiação, torna-se mais fácil identificar a variabilidade de tipos de vegetação, espaçamento entre linhas de plantio e entre plantas, estado fenológico, estado fitossanitário, estresse hídrico, excesso de umidade do solo, etc. Dessa forma, a partir da diferença no matiz do magenta, observou-se na presente composição infravermelha, padrões de magenta mesclado com fundo esverdeado (sudeste da área), representado por pastagem, padrões com cor esverdeada, representada por carreadores e estrada. Na cultura do cafeeiro, observaram-se dois padrões da cor magenta, um padrão magenta tendendo para o vermelho e outro tendendo para rosa-claro, nesse último caso, provavelmente em função do menor índice de área foliar das plantas (Figura 2).

Posteriormente, o índice de vegetação foi calculado para ser utilizado como indicador do crescimento e do vigor da vegetação verde (Meneses & Madeira Netto, 2001). Nesse caso, a assinatura espectral característica de uma vegetação verde e sadia apresentou-se com evidente contraste na região do visível, correspondente ao maior vigor da vegetação nas áreas com esse padrão (Moreira, 2005) (Figura 3).

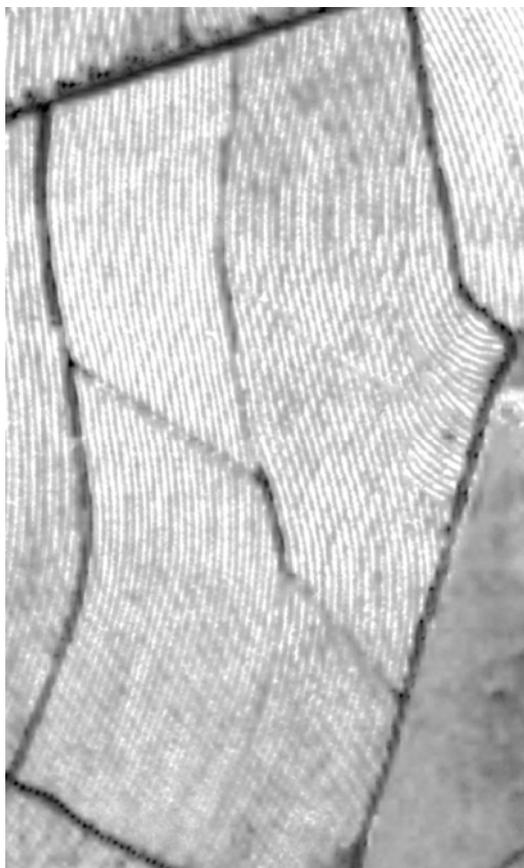


FIGURA 3 Índice de vegetação calculado com base em imagem QuickBird® de 27/05/2003. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Em seguida, com o uso de Sistema de Informações Geográficas, obteve-se o valor do pixel correspondente à localização de cada ponto da malha de amostragem utilizada no levantamento de campo das demais variáveis agrônômicas estudadas a partir da imagem com valores de NDVI.

Com isso, foi possível reunir um total de 84 variáveis obtidas em um período de dois anos e mapear a variabilidade espacial dessas variáveis por meio de mapas de krigagem (Figuras 4 a 9), bem como caracterizar a estrutura e magnitude de dependência espacial por meio de semivariogramas (10 a 14). No

caso do NDVI, por meio do mapa de krigagem (Figura 4), pôde-se observar variabilidade espacial semelhante a da imagem (Figura 3), porém com padrão espacial bem definido.

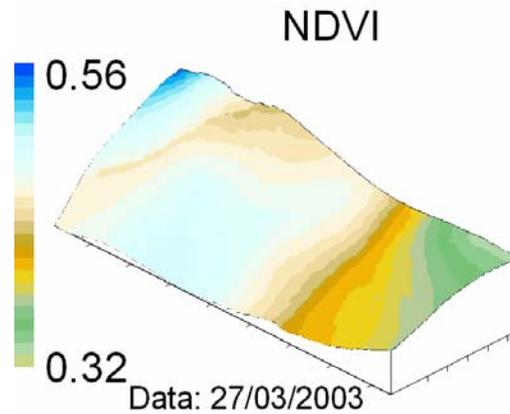


FIGURA 4 Krigagem do índice de vegetação (NDVI) com base em imagem QuickBird® (27/05/2003), nos 67 pontos da malha amostral considerada. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Com relação à produção de café, observou-se, com os mapas de krigagem, padrão de variabilidade espacial inverso da produtividade em 2005 e 2006 (Figura 5).

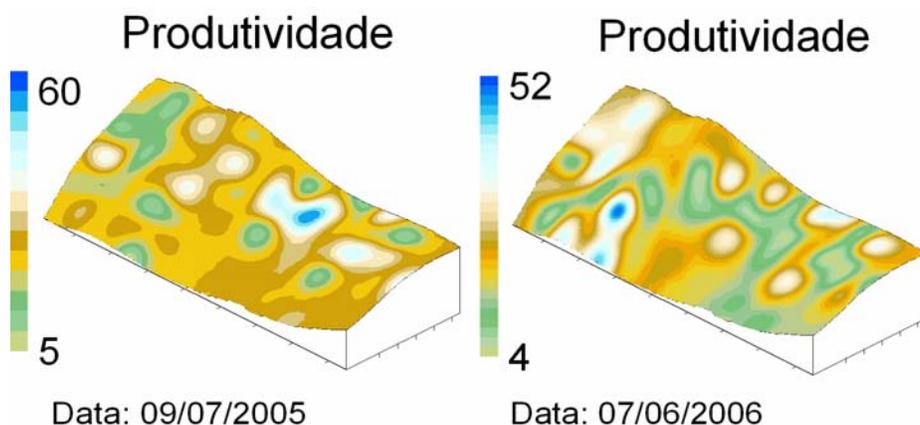


FIGURA 5 Krigagem da produtividade das plantas (litros.planta⁻¹) em 09/07/2005 e 07/06/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

No caso da produção em 2005, observou-se padrão de variabilidade espacial correspondente nos mapas de produtividade em 2005 com os de teor foliar de Ca, Mg, B, incidência foliar de ferrugem e cercosporiose em 6/2005, bem como padrões inversos com os mapas de teor foliar de K, P e infestação de broca nos frutos nesse período (Figura 6). Com relação à produção em 2006, observou-se padrão de variabilidade espacial correspondente nos mapas de produtividade em 2006 com os de teor foliar de Cu e índice de área foliar em 12/2005, argila, silte, matéria orgânica, SB e t no solo em 2/2006, índice de área foliar, intensidade de ferrugem e cercosporiose nas folhas, teores foliares de Ca e Mg em 5/2006, bem como padrões inversos com os mapas de severidade foliar de ferrugem, incidência e severidade foliar de cercosporiose em 12/2005 e infestação de broca em 5/2006 (Figuras 7, 8 e 9). Chaves & Sarruge (1984) estudando as alterações nas concentrações de macronutrientes nos frutos e folhas de cafeeiro durante um ciclo produtivo do cafeeiro também verificaram altos níveis de Ca e Mg nas folhas, no período próximo à maturação dos frutos, bem como redução das concentrações foliares de N, P e K na fase de crescimento dos frutos. Segundo os autores, houve mobilização de macronutrientes de folhas para

os frutos, com acúmulo de N, P, K, Ca e Mg a partir do início da frutificação. Assim, de forma geral, as plantas muito produtivas ficam debilitadas em função do dreno de nutrientes das folhas para os frutos em anos de alta produtividade, pois o cafeeiro não regula a carga de frutos, provocando distúrbios fisiológicos na planta (Rena et al., 1996), culminando em queda de folhas, redução da fotossíntese e baixa produtividade no ano subsequente. Além disso, a queda das folhas com nutrição deficiente, pode ser intensificada pela ocorrência de doenças, pois segundo Carvalho & Souza (1998), pode haver desfolha natural dos cafeeiros de 60 %, devido à frutificação e às condições climáticas, podendo atingir 90 %, pela queda prematura provocada pela ferrugem, bem como em função do aumento da produção de etileno em plantas infectadas pela cercosporiose, de forma a intensificar a desfolha das plantas (Valencia, 1970). A influência da nutrição mineral e de pragas e doenças também foram constatadas pela análise de correlação (Tabelas 2 e 3).

Também se observou nos mapas, padrão de variabilidade espacial com correspondência inversa entre a incidência da ferrugem em 2005 e a produtividade em 2006. Segundo Vale et al. (2004), isso ocorreu em todos os relatos sobre os danos causados pela ferrugem, como consequência da queda precoce das folhas e seca dos ramos doentes, os quais se tornam improdutivos no ano subsequente. Chalfoun et al. (1978) também observaram a existência de uma correlação negativa entre a produtividade e o índice de infecção do ano anterior, pelo menor progresso da doença nos anos de menor produtividade.

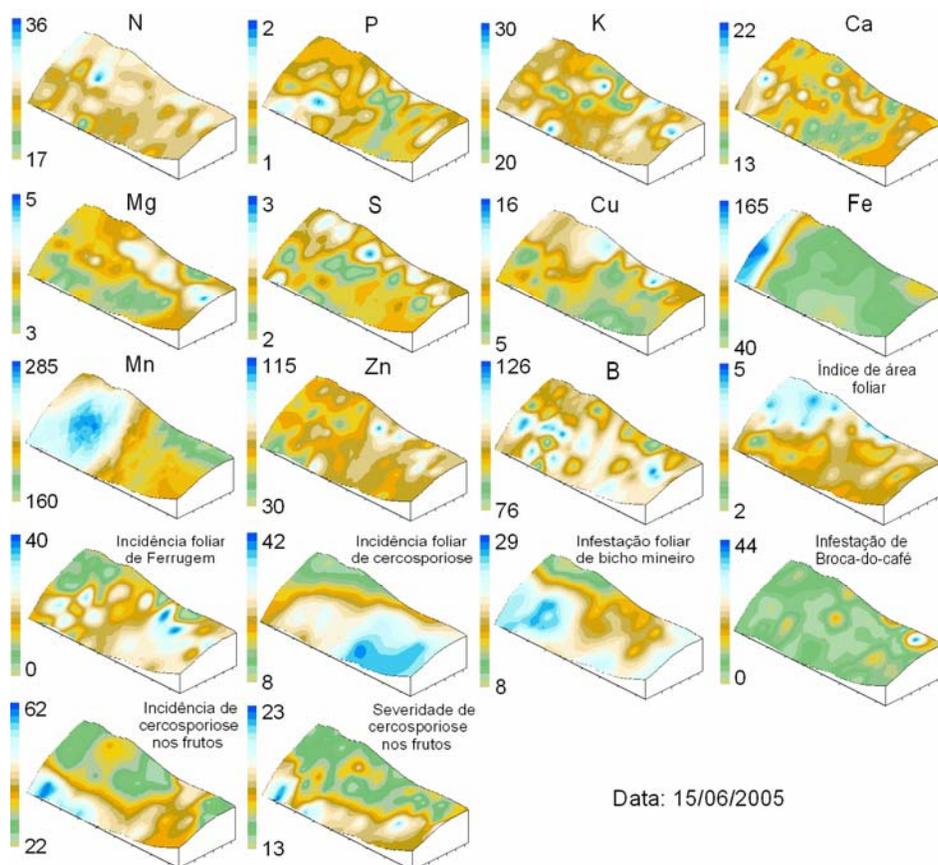


FIGURA 6 Krigagem de nitrogênio (N) (g.kg^{-1}), fósforo (P) (mg.dm^{-3}), potássio (K) (mg.dm^{-3}), cálcio (Ca) (g.kg^{-1}), magnésio (Mg) (g.kg^{-1}), enxofre (S) (g.kg^{-1}), cobre (Cu) (mg.dm^{-3}), ferro (Fe) (mg.dm^{-3}), manganês (Mn) (mg.dm^{-3}), zinco (Zn) (mg.dm^{-3}), boro (B) (mg.dm^{-3}), índice de área foliar (escala diagramática), incidência (%) de ferrugem e cercosporiose nas folhas, incidência (%) e severidade (escala diagramática) de cercosporiose nos frutos, infestação de bicho-mineiro nas folhas (%) e infestação de broca-do-café (%) nos frutos, amostrados em 15/06/2005. UFLA, Lavras, MG, 2006.

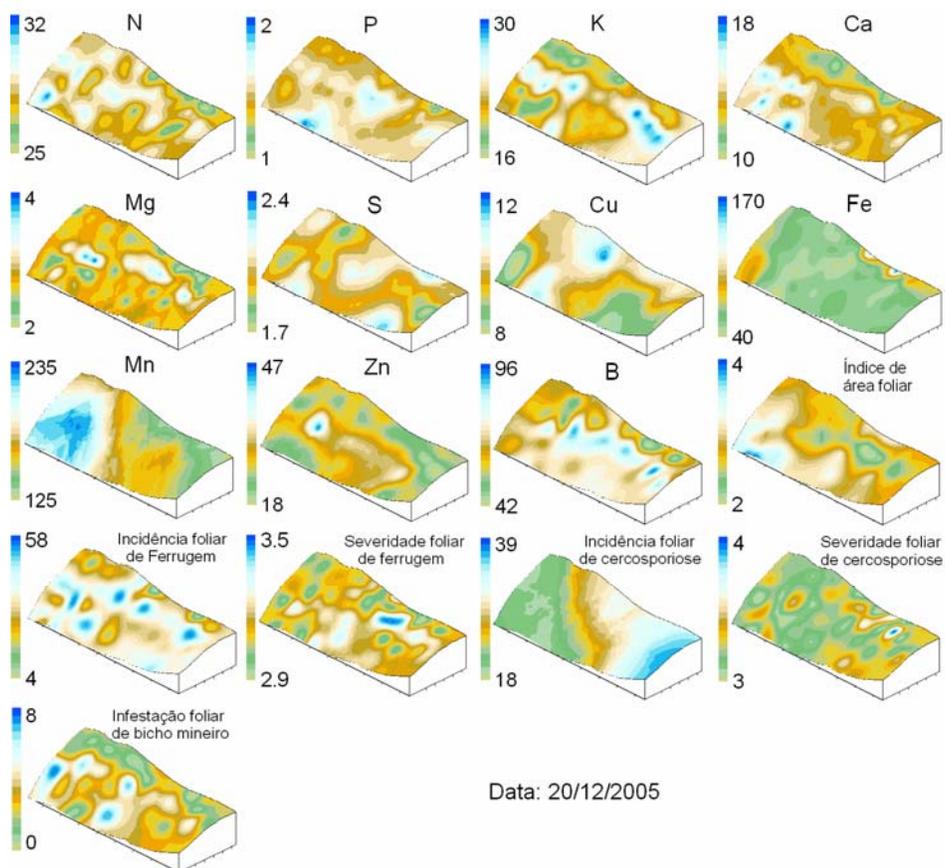


FIGURA 7 Krigagem de nitrogênio (N) (g.kg^{-1}), fósforo (P) (mg.dm^{-3}), potássio (K) (mg.dm^{-3}), cálcio (Ca) (g.kg^{-1}), magnésio (Mg) (g.kg^{-1}), enxofre (S) (g.kg^{-1}), cobre (Cu) (mg.dm^{-3}), ferro (Fe) (mg.dm^{-3}), manganês (Mn) (mg.dm^{-3}), zinco (Zn) (mg.dm^{-3}), boro (B) (mg.dm^{-3}), índice de área foliar (escala diagramática), incidência (%) e severidade (escala diagramática) de ferrugem e cercosporiose nas folhas, incidência (%) e severidade (escala diagramática) de cercosporiose nos frutos e infestação de bicho-mineiro nas folhas (%), amostrados em 20/12/2005. UFLA, Lavras, MG, 2006.

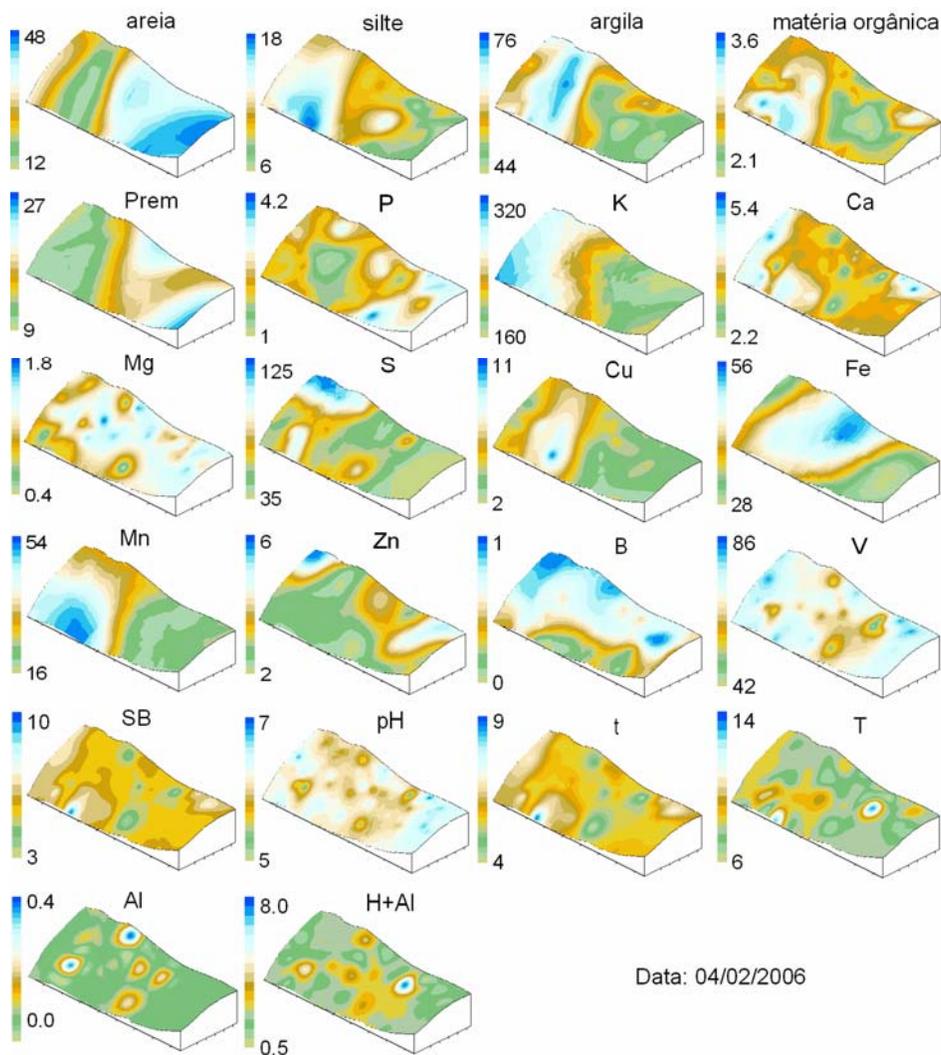


FIGURA 8 Krigagem de argila, silte, areia e matéria orgânica (dag.kg^{-1}), fósforo remanescente (P-rem) (mg.L^{-1}), fósforo (P) (mg.dm^{-3}), potássio (K) (mg.dm^{-3}), cálcio (Ca) (cmolc.dm^{-3}), magnésio (Mg) (cmolc.dm^{-3}), enxofre (S) (mg.dm^{-3}), cobre (Cu) (mg.dm^{-3}), ferro (Fe) (mg.dm^{-3}), manganês (Mn) (mg.dm^{-3}), zinco (Zn) (mg.dm^{-3}), boro (B) (mg.dm^{-3}), saturação por bases (V) (%), soma de bases (SB) (cmolc.dm^{-3}), pH em água, capacidade efetiva de troca de cátions (t) (cmolc.dm^{-3}), etc a pH 7,0 (T) (cmolc.dm^{-3}), alumínio (Al) e acidez potencial (H + Al) (cmolc.dm^{-3}), amostrados em 4/2/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

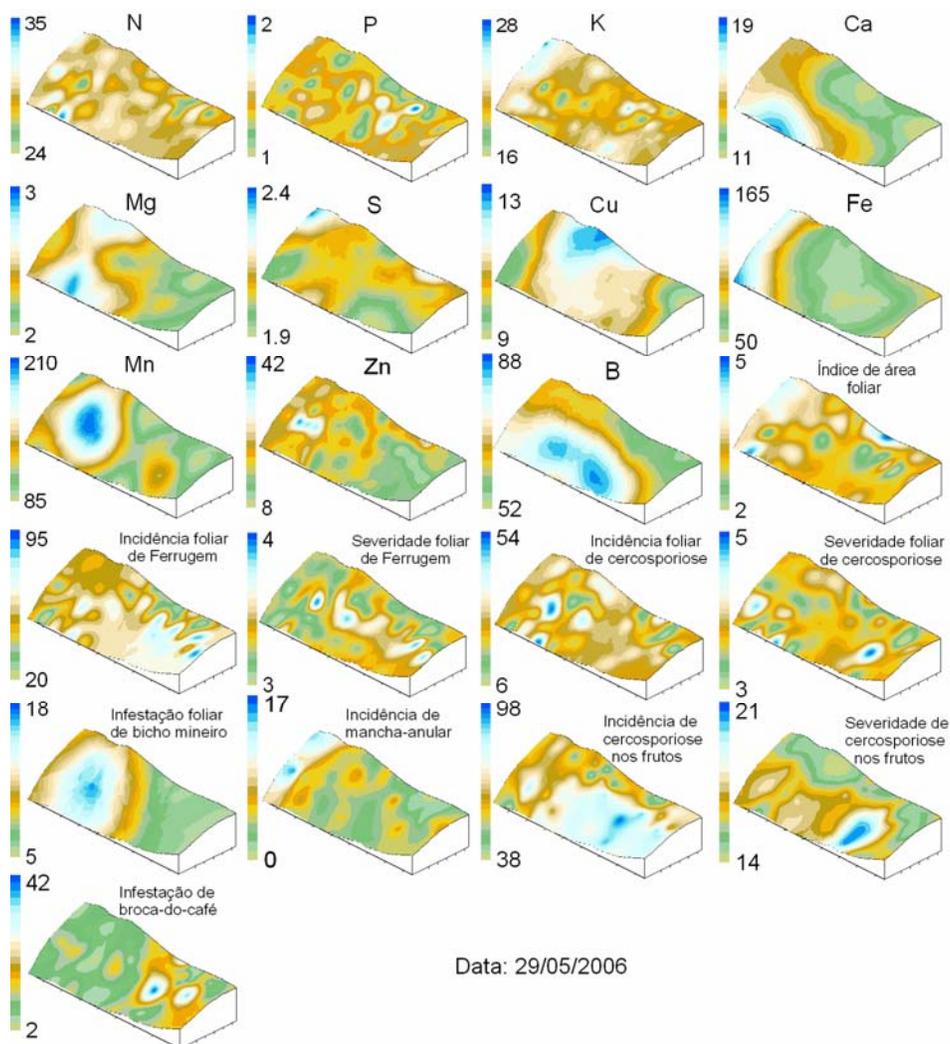


FIGURA 9 Krigagem de nitrogênio (N) (g.kg^{-1}), fósforo (P) (mg.dm^{-3}), potássio (K) (mg.dm^{-3}), cálcio (Ca) (g.kg^{-1}), magnésio (Mg) (g.kg^{-1}), enxofre (S) (g.kg^{-1}), cobre (Cu) (mg.dm^{-3}), ferro (Fe) (mg.dm^{-3}), manganês (Mn) (mg.dm^{-3}), zinco (Zn) (mg.dm^{-3}), boro (B) (mg.dm^{-3}), índice de área foliar (escala diagramática), incidência (%) e severidade (escala diagramática) de ferrugem e cercosporiose nas folhas, incidência (%) e severidade (escala diagramática) de cercosporiose nos frutos, infestação de bicho-mineiro nas folhas (%), infestação de broca-do-café (%) e incidência de vírus da mancha-anular (%) nos frutos, amostrados em 29/05/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

TABELA 2 Correlação (r) da produtividade em 09/07/2005 e variáveis agronômicas avaliadas na fazenda Cafua em 15/6/2005. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Variável*	Produtividade em 2005
Teor foliar de K em 6/2005	-0,31527
Teor foliar de P5 em 6/2005	-0,48023
Teor foliar de Ca5 em 6/2005	0,51436
Teor foliar de Mg5 em 6/2005	0,51659
Teor foliar de B5 em 6/2005	0,40561
Incidência foliar de ferrugem em 6/2005	0,37194
Incidência foliar de cercosporiose em 6/2005	0,38728
Infestação de broca nos frutos em 6/2005	-0,41031

*P significativo a 1%

TABELA 3 Correlação (r) da produtividade em 07/06/2005 e variáveis agronômicas avaliadas na fazenda Cafua em 20/12/2005, 4/2/2006 e 29/5/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Variável*	Produtividade em 2006
Teor foliar de K em 12/2005	-0,37683
Teor foliar de Cu 12/2005	0,48161
Teor foliar de B 12/2005	-0,37641
Índice de área foliar em 12/2005	0,57307
Severidade foliar de cercosporiose em 12/2005	-0,42601
Incidência foliar de cercosporiose em 12/2005	-0,35750
Incidência foliar de ferrugem em 12/2005	-0,34397
SB no solo em 2/2006	0,31502
t no solo 2/2006	0,31579
Teor foliar de Ca 5/2006	0,58489
Teor foliar de Mg 5/2006	0,55749
Incidência foliar de cercosporiose em 5/2006	0,41497
Infestação de broca em 5/2006	-0,36474
Índice de área foliar em 5/2006	0,35575

*P significativo a 1%

Ainda com relação à ferrugem, observou-se nos mapas padrão de variabilidade espacial com correspondência inversa entre a intensidade da

doença nas áreas com menor teor foliar de N, P, Ca, Mg, S, Cu, índice de área foliar em 6/2005; S, Cu, índice de área foliar em 12/2005 e N, P, Ca, Mg, S, índice de área foliar em 5/2006. Outros autores também já constataram existir relação entre a nutrição mineral das plantas e a intensidade da ferrugem do cafeeiro, sendo consenso que o desequilíbrio nutricional favoreceu o progresso da doença e a produtividade influenciou na epifítia da ferrugem do cafeeiro. Da mesma forma, esses resultados foram confirmados anteriormente por Acuña (1985), o qual observou de forma concreta que o fator condicionante do nível da doença ocorreu pelo ‘stress’ causado na planta em detrimento a alta carga de frutos, debilitando a planta e reduzindo sua resistência ao desenvolvimento da ferrugem. Assim, Acuña (1985), estudando plantas de cafeeiro da cultivar Catuaí Vermelho, observaram em épocas de maior incidência da ferrugem e antes da colheita de frutos, redução dos teores de N, P, K, S, e aumento dos teores de cálcio e magnésio nos tratamentos com alta produtividade das plantas. Silva-Acuña et al. (1992) também verificaram relação entre a produção de grãos, o teor foliar de macronutrientes e a severidade da ferrugem do cafeeiro, com maior incidência da doença em plantas com baixos teores foliares de N, P, K e S. Da mesma forma, Carvalho et al. (1996), estudando o progresso da ferrugem do cafeeiro na cultivar Mundo Novo, verificaram que os teores foliares de N e K influenciaram a ferrugem e, Pereira et al. (1996), também constataram a indução de resistência parcial a *Hemileia vastatrix* quando da aplicação de adubos nitrogenados em cafeeiro.

Com relação à cercosporiose, observou-se nos mapas, padrão de variabilidade espacial com correspondência direta entre a incidência da doença nas folhas e a incidência, severidade nos frutos, com a produtividade tanto em 06/2005 quanto em 5/2006 e inversa com o índice de área foliar nesse mesmo período. Por outro lado, houve correspondência inversa da variabilidade espacial da doença com os teores foliares de P, Ca, Mg, S, Cu, índice de área foliar em

06/2005. Em 12/2006 verificou-se relação inversa da incidência da cercosporiose com o teor foliar de Mn e da severidade da doença com o teor foliar de N, K, Ca e Mg. Nesse mesmo período, a incidência da cercosporiose nas folhas também parece ter sido influenciada por características físico-químicas do solo e nutrição mineral das plantas. Assim, observou-se nos mapas correspondência direta entre a doença em 27/12/2005 com os teores no solo de areia, Prem e inversa com os teores de silte, argila, K, Mn e Cu. (Figuras 6, 7, 8, 9). Esses resultados também foram constatados com a análise de correlação (Tabelas 2, 3, 4, 5, 6).

Esse fato pode ser explicado, pois a cercosporiose tem sido problema em lavouras mal conduzidas, onde há deficiência e desequilíbrio nutricional (Garcia Júnior et al., 2003; Pozza et al., 2000).

TABELA 4 Correlação (r) da intensidade da cercosporiose nas folhas e nos frutos e sua relação com o índice de área foliar em 07/06/2005, 20/12/2005 e 29/5/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Variável*	IAF em 15/06/2005	IAF em 20/12/2005	IAF em 29/05/2006
incidência nos frutos em 15/06/2005	-0,29423		
severidade nos frutos em 15/06/2005	-0,35247		
incidência nas folhas em 15/06/2005	-0,56147		-0,43351
incidência nas folhas em 20/12/2005		-0,57811	
incidência nos frutos em 29/05/2006			-0,49643

*P significativo a 1%

TABELA 5 Correlação (r) da intensidade da cercosporiose nas folhas e nos frutos e sua relação com a nutrição mineral das plantas em 15/06/2005, 20/12/2005 e 29/5/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Variável*	N	Mg	S	Cu	Fe	Mn
incidência nos frutos em 15/06/2005 nutrição foliar em 15/06/2005		-0,31				
severidade nos frutos em 15/06/2005 nutrição foliar em 15/06/2005	-0,38			-0,31		
incidência nas folhas em 15/06/2005 nutrição foliar em 15/06/2005	-0,29		-0,31	-0,50		
incidência nas folhas em 20/12/2005 nutrição foliar em 20/12/2005						-0,35
incidência nos frutos em 29/05/2006 nutrição foliar em 29/05/2006					-0,30	

*P significativo a 1%

TABELA 6 Correlação (r) da incidência da cercosporiose nas folhas em 20/12/2005 com as características físico-químicas do solo em 04/02/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Características físico-químicas do solo em 04/02/006*	Incidência de cercosporiose nas folhas em 20/12/2005
Areia	0,61389
Silte	-0,53236
Argila	-0,5775
Prem	0,51728
K	-0,42573
Mn	-0,45381
Cu	-0,47797

*P significativo a 1%

Em solução nutritiva, Pozza et al. (2000), estudando a nutrição mineral de mudas de café e seu efeito no progresso da cercosporiose, também observaram aumento no número total de lesões, número de lesões por folha e desfolha com a redução das doses de nitrogênio e aumento das doses de potássio. Segundo os autores, houve redução nos teores foliares de cálcio e cobre

em detrimento da elevação das doses de potássio e conseqüente favorecimento da doença. De forma semelhante, Garcia Júnior et al. (2003) constataram efeito significativo de interação quadrática da solução nutritiva com Ca e K sobre a área abaixo da curva de progresso da cercosporiose do cafeeiro, comprovando haver efeito na intensidade da doença de acordo com a variação desses nutrientes. De forma semelhante, segundo Zambolim (1999), a cercosporiose é favorecida em lavouras com estado nutricional desequilibrado e em anos de maior produção. Juliatti & Silva (2001) também mencionaram que os danos causados pela cercosporiose decorrem da redução da área foliar e da desfolha, principalmente em áreas com maior produção. Talvez por esse fato, tenha ocorrido correspondência direta entre a intensidade da cercosporiose nas folhas e nos frutos com a ferrugem em 15/06/2005, 20/12/2005 e 29/5/2006 (Figuras 6, 7, 9; Tabela 7).

Assim, de forma semelhante à observada para ferrugem, provavelmente o desequilíbrio nutricional das plantas em função da alta carga pendente de frutos, também pode ter sido a causa da relação entre alta produtividade e intensidade da cercosporiose, por haver dreno de nutrientes das folhas para frutos ocasionando a deficiência nutricional das folhas (Boldini, 2001). O menor enfolhamento também pode ter ocorrido fisiologicamente, em detrimento à elevada produção de etileno nas plantas infectadas pela cercosporiose, conforme relatado por Valencia (1970).

Com isso, de forma geral, nas áreas com maior intensidade de cercosporiose e ferrugem, pode ter havido menor enfolhamento do cafeeiro, aumentando a insolação das plantas e a exposição dos frutos ao sol, acarretando em danos nos tecidos, estresse hídrico da planta, redução da absorção de nutrientes da solução do solo e conseqüentemente, na maior intensidade da doença nessas áreas.

De acordo com os estudos de Daly (1976) e Scott & Smillie (1966), após a infecção do tecido do hospedeiro com um patógeno, há incremento da taxa respiratória, acarretando em aumento da atividade biossintética, fluxo de carbono por meio das vias Embden-Meyerhoff e da pentose fosfato, divisão de metabólitos secundários e formação de compostos tais como ligninas, isoflavonóides e outros como fitoalexinas (Kossuge et al., 1981), os quais provavelmente auxiliam na defesa do cafeeiro contra fitopatógenos (Acuña, 1985). Entretanto, nas plantas de cafeeiro altamente produtivas, há dreno de fotoassimilados para os frutos, indisponibilizando energia suficiente para impedir o progresso dos patógenos (Acuña, 1985).

TABELA 7 Correlação (r) da intensidade da cercosporiose nas folhas e nos frutos com a intensidade da ferrugem em 15/06/2005, 20/12/2005 e 29/5/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Cercosporiose*	Incidência de ferrugem (15/06/2005)	Severidade de ferrugem (20/12/2005)	Incidência de ferrugem (29/5/2006)	Severidade de ferrugem (29/5/2006)
severidade nos frutos em 15/06/2005	0,28758			
incidência nas folhas em 15/06/2005	0,61644	0,38797		0,29982
incidência nas folhas em 20/12/2005		0,38744		
incidência nos frutos em 29/5/2006	0,3876		0,39139	0,32956
incidência nas folhas em 29/5/2006			0,43835	0,41392

*P significativo a 1%

Por meio da técnica da krigagem também foi possível mapear a distribuição de frutos com mancha anular e o potencial de disseminação do ácaro *Brevipalpus phoenecis*, transmissor do vírus, em 29/05/2006 (Figura 9). Entretanto, estudos posteriores devem ser realizados para verificar se há relação entre o ácaro transmissor, a ocorrência do vírus na lavoura, bem como a época mais adequada para amostragem e controle.

Com relação ao bicho-mineiro do cafeeiro, verificou-se por meio das cartas de krigagem, de forma geral, maior infestação da praga em regiões com maior teor no solo de argila, silte, matéria orgânica, teores foliares e no solo de K, Ca, Mg, Cu, Mn, Fe, Zn, B, bem como nas áreas com menor teor de areia, Prem e menor índice de área foliar (Figuras 6, 7, 8, 9). Esses resultados também foram verificados por meio da análise de correlação (Tabelas 8, 9).

TABELA 8 Correlação (r) da infestação de bicho-mineiro do cafeeiro nas folhas em 15/06/2005 e 29/5/2006 com as características físico-químicas do solo em 04/02/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Características físico-químicas do solo em 04/02/006*	Bicho-mineiro em 15/06/2005	Bicho-mineiro em 29/05/2006
Areia	-0,34617	-0,56786
Prem	-0,28989	-0,35661
Argila	0,28724	0,52202
Silte	0,39608	0,52285
Matéria orgânica		0,33021
K		0,36786
Mn	0,45979	0,50506
Fe		0,31343
Cu	0,31922	0,46225

*P significativo a 1%

TABELA 9 Correlação (r) da infestação de bicho-mineiro do cafeeiro nas folhas com a nutrição mineral de folhas de cafeeiro em 15/06/2005, 20/12/2005 e 29/5/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Período*	K	Ca	Mg	Mn	Zn	B
15/06/2005		0,31976		0,32258		0,32722
20/12/2005	0,31908	0,29066				0,25785
29/5/2006		0,47226	0,32395	0,52115	0,33428	0,50886

*P significativo a 1%

Da mesma forma, a disponibilidade de outros nutrientes no solo e nas folhas das plantas e sua variabilidade na área, podem ter influenciado a preferência do inseto pelo hospedeiro, pois a nutrição mineral pode alterar a composição química, a morfologia, anatomia, bem como a fenologia da planta (Marschner, 1995). Além disso, as mariposas de bicho-mineiro, provavelmente selecionam plantas nutricionalmente mais adequadas para ovipositar (Nestel et al., 1994). Caixeta et al. (2004) também constataram que a adequada nutrição nitrogenada, o excesso de potássio, o aumento nos teores de proteínas, decréscimo nos teores de lignina, amido e açúcares solúveis totais nas folhas aumentaram a intensidade de ataque do bicho-mineiro em mudas de cafeeiro. Portanto, de forma diferente da verificada para as doenças, provavelmente a hipótese do vigor da planta é válida para a interação bicho-mineiro com as plantas de cafeeiro (Michereff, 2000).

Com relação à broca-do-café, observou-se nos mapas de krigagem, padrões diferenciados de infestação em 2005 e 2006, entretanto, observaram-se em 2006, maior infestação associada aos menores teores de argila, matéria orgânica e maiores teores de areia no solo. Esses resultados também podem ser observados pela análise de correlação, por meio da qual se verificaram correlação negativa entre a broca-do-café em 29/05/2006 com os teores de areia ($r = 0,39411$; $p = 0,001$) e negativa com os teores de argila ($r = -0,43369$; $p =$

0,0002) no solo em 04/02/006. Nesse caso, provavelmente, a preferência do inseto por plantas localizadas sob solo mais arenoso pode estar relacionada com a sobrevivência potencial do inseto em locais de menor umidade do fruto, já que a água em excesso nos frutos do solo faz com que as fêmeas os abandonem, possivelmente como uma prevenção a infecções causadas por fungos, como por exemplo, *B. bassiana* (Baker et al., 1992). Outra constatação no presente estudo foi a relação entre a praga e a produção de café. Tanto para a infestação da broca em 20/05/2005, quanto para a infestação em 29/05/2006, observou-se correlação negativa da broca-do-café com a produtividade em 09/07/2005 e 07/06/2006 (Tabelas 2 e 3). Isso ocorreu, provavelmente, pelo ataque do inseto em qualquer estágio de maturação dos frutos, desde verdes até maduros ou secos, causando redução direta na produtividade (Souza & Reis, 1997).

TABELA 10 Correlação (r) da infestação da broca-do-café nos frutos em 29/5/2006 com características físicas do solo em 04/02/2006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Características físico-químicas do solo em 04/02/006*	broca-do-café em 29/05/2006
Areia	0,39411
Argila	-0,43369

*P significativo a 1%

Com relação às variáveis amostradas no solo em 04/02/2006 e sua relação com as demais variáveis observadas no presente trabalho, verificou-se padrão semelhante entre a variabilidade espacial do NDVI em 27/05/2003, com o teor de argila, silte, Cu, Mn no solo e inverso com o teor de areia e Prem no solo. Apesar do intervalo de tempo entre as observações do NDVI e as características do solo, o Cu está relacionado com a queda da produção de etileno nas folhas e conseqüentemente com a preservação do enfolhamento das

plantas, o Mn com a liberação fotoquímica do O₂ na reação de Hill da fotossíntese (Malavolta et al., 1997). Já o teor de argila e silte são relacionados com a retenção de água no solo, conforme observado no estudo de Arruda et al. (1987) (Figuras 5 e 9). Esses resultados também foram constatados pela análise de correlação negativa entre o NDVI e o teor de areia, Prem e positiva com os teores de silte, argila, Cu e Mn (Tabela 11). Outra possível causa da relação entre a variabilidade espacial do NDVI com as características físico-químicas do solo pode estar relacionada com a troca de cátions e adsorção de íons com cargas opostas no solo, influenciados pela fração argila e outras frações como o silte, considerado um dos mais importantes fenômenos para a humanidade, depois da fotossíntese (Resende et al., 1997).

TABELA 11 Correlação (r) entre NDVI em 27/05/2003 e características físico-químicas do solo em 04/02/006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Variável*	Argila	Silte	Areia	Prem	Cu	Mn
NDVI	0,36489	0,41701	-0,41296	-0,35479	0,50766	0,44081

*P significativo a 1%

Com relação à textura do solo e matéria orgânica, constatou-se padrão de variabilidade espacial semelhante entre argila, silte e matéria orgânica, os quais foram inversos ao teor de areia em 04/02/006 (Figura 9). Assim, observou-se correlação negativa entre os teores de areia e silte e de areia com argila. Também houve correlação positiva da matéria orgânica do solo com os teores de argila e silte e negativa com o teor de areia, pois de acordo com Russel (1976), um teor mais elevado de argila favorece o incremento de carbono orgânico no solo e a associação entre compostos orgânicos e a argila dificulta sua decomposição (Tabela 12).

TABELA 12 Correlação (r) de características texturais do solo e matéria orgânica em 04/02/006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Variável*	Argila	Silte	Areia
Areia	-0,96992	-0,79433	1,00000
Matéria orgânica	0,4623	0,49072	-0,51152

*P significativo a 1%

Ainda com relação às variáveis de solo amostrado em 04/02/2006, observou-se nos mapas, relação direta entre a capacidade efetiva de troca de cátions (t) com o teor de matéria orgânica no solo, soma de bases, teor de silte e inversa com o teor de areia. Para os teores de silte, nesse mesmo período, também se observou relação direta com a soma de bases, t e ctc a pH 7,0 (T). Esses resultados também foram verificados por meio da análise de correlação (Tabela 13).

TABELA 13 Correlação (r) entre silte, matéria orgânica, SB, t e T em 04/02/006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Características físico-químicas do solo em 04/02/006*	capacidade efetiva de troca de cátions (t) em 04/02/2006	Silte em 04/02/2006
matéria orgânica	0,51238	-0,79433
soma de bases	0,50337	0,36031
Silte	0,37475	
ctc a pH 7,0 (T)		0,40397

*P significativo a 1%

Nesse caso, isso pode ter ocorrido, pois as partículas de silte são caracterizadas como o ponto de instabilidade máxima do solo, geralmente menos resistentes e mais ricos em reservas de nutrientes quando comparados à fração argila. Portanto, a fração silte pode ser uma indicadora da reserva de nutrientes do solo, seu grau de intemperização, ou de seu potencial de conter minerais

primários facilmente intemperizáveis (Resende et al., 1997). Dessa forma, observou-se nos mapas em 04/02/2006, correspondência direta dos teores de argila, silte e matéria orgânica com os teores no solo de K, Ca, Mg, Mn, Cu, S e inversa com os de P, Prem e Zn. Já os teores de areia apresentaram efeito inverso sob a disponibilidade de nutrientes quando comparados à fração argila, silte e matéria orgânica, provavelmente influenciados pela menor fixação desses elementos à fração areia. Esses resultados também foram verificados por meio da análise de correlação (Tabela 14). As relações negativas observadas com relação aos teores de P e Prem podem estar relacionadas com a elevada correlação do teor de argila com a fixação de fosfatos (Lopes, 1983). Assim, as correlações negativa e positiva dos macronutrientes e micronutrientes observadas com os teores de argila, silte, areia e matéria orgânica podem ter sido influenciadas por reações de trocas de cargas negativas e positivas, bem como pela adsorção dos elementos por colóides com características de reter íons de forma trocável (Resende et al., 1997).

TABELA 14 Correlação (r) entre características físico-químicas do solo em 04/02/006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Características físico-químicas do solo em 04/02/006*	Areia	Argila	Silte	Matéria orgânica
Prem	0,67986	-0,67613		-0,35159
P	0,37953	-0,37197		
K	-0,56082	0,50836	0,53430	
Ca			0,31710	0,52368
S	-0,39985	0,43805		
Cu	-0,87363	0,85013	0,68702	0,48578
Mn	-0,74554	0,64247	0,79350	0,70294
Zn	0,34890	-0,35753		

*P significativo a 1%

Da mesma forma, no tocante à matéria orgânica, as partículas componentes de substâncias húmicas ocorrem na forma de ácidos fracos, sorvem fortemente a água e fazem parte do processo de troca de cátions, formando complexos com íons metálicos os quais interagem com argilominerais (Jenny, 1980). O pH do solo também pode ter influenciado a disponibilidade dos elementos químicos, pois, muitas vezes, sua solubilidade é altamente dependente do pH. Com isso, observou-se nos mapas, relação direta do pH com os teores no solo de Ca, Mg, V, SB, t, T e inversa com S, Al e H+Al. Esses resultados também foram verificados por meio da análise de correlação (Tabela 15).

TABELA 15 Correlação (r) entre o pH e características físico-químicas do solo em 04/02/006. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Características físico-químicas do solo em 04/02/006*	pH
Ca	0,68574
SB	0,60734
t	0,58267
V	0,83692
Al	-0,56292
H+Al	-0,70773
m	-0,56202
S	-0,65874

*P significativo a 1%

Cabe ressaltar que a análise de correlação não considera a dependência espacial das variáveis estudadas, como na análise geoestatística, de forma que muitas vezes as variáveis não foram correlacionadas entre si, porém observou-se nos mapas de krigagem padrões correspondentes entre essas variáveis, com suporte no ajuste de modelos de semivariogramas aos dados observados. Portanto, o estudo das relações das variáveis agronômicas na lavoura cafeeira com base nas ferramentas de análise geoestatística é mais prática e realista desde

que o fenômeno estudado apresente auto-correlação espacial detectada com base no ajuste de modelos de semivariograma (Rossi et al., 1992).

Com relação à análise dos semivariogramas ajustados aos dados estudados, observou-se estrutura de dependência espacial na maioria das variáveis estudadas, pois o valor absoluto da diferença entre duas amostras observadas cresceu com o aumento da distância entre elas, até um valor no qual os efeitos locais não apresentaram mais influência, culminando na estabilidade do modelo a partir da distância que separa o universo estruturado (amostras correlacionadas) do aleatório (amostras independentes) (Andriotti, 2003). No caso das doenças e pragas avaliadas, o comportamento estruturado do semivariograma está relacionado com o padrão agregado de dispersão ao redor de focos, reboleiras ou áreas contínuas com esses organismos-praga na lavoura (Chellemi et al., 1988; Liebhold et al., 1993; Rossi et al., 1992) (Figuras 10, 11, 12, 13, 14).

Portanto, com o uso de Sistema de Informações Geográficas, Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagens Digitais, Geoestatística e Estatística, foi possível detectar a variabilidade espacial de variáveis agronômicas na lavoura, ao longo do tempo, as quais, em grande parte, foram relacionadas com propriedades físico-químicas do solo, de modo a influenciar na bialidade da produtividade, bem como com a ocorrência de pragas e doenças na lavoura.

Além disso, em algumas situações, duas variáveis apresentaram correlação entre si, no entanto, essa correlação pode ter sido determinada pela influência de um terceiro fator, o qual proporcionou a associação indireta dessas variáveis e um padrão de variabilidade espacial semelhante na lavoura. Daí a importância da visão holística, da interação dos múltiplos fatores e da dinâmica de processos que influenciam no manejo do cafeeiro, os quais devem ser

considerados como premissas essenciais à definição de estratégias e táticas para um manejo racional dos agroecossistemas.

Estudos posteriores devem ser realizados para tentar reduzir a bienalidade da produção e homogeneizar a variabilidade espacial de nutrientes no solo e nas folhas, de acordo com a variabilidade espacial da textura. Da mesma forma, com base na variabilidade espacial da intensidade de pragas e doenças na lavoura, pode-se realizar o controle localizado apenas nas regiões acima de um limiar de dano pré-estabelecido, a fim de reduzir o impacto ambiental do uso excessivo de produtos fitossanitários na lavoura, bem como para aumentar a relação custo-benefício do produtor rural.

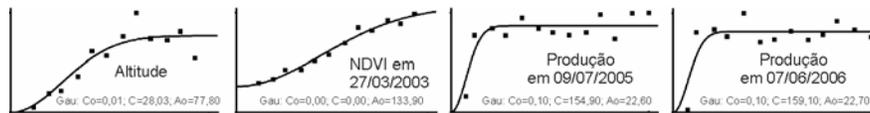


FIGURA 10 Semivariograma de altitude, índice de vegetação (NDVI) em 27/05/2003, produtividade das plantas ($\text{litros.planta}^{-1}$) em 09/07/2005 e 07/06/2006 (obs: Co = efeito pepita; C = patamar; Ao = alcance; Esf = esférico; Exp = exponencial; Gaus = gaussiano).

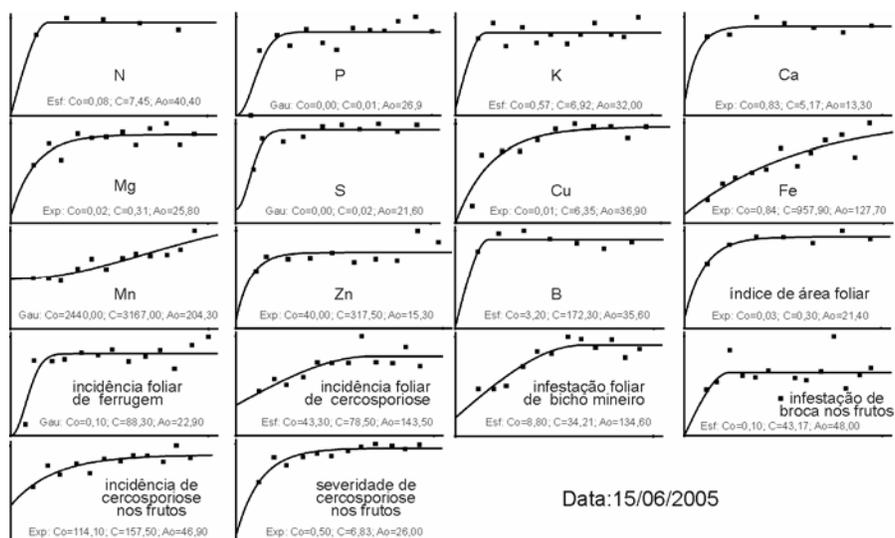


FIGURA 11 Semivariogramas de nitrogênio (N) (g.kg^{-1}), fósforo (P) (mg.dm^{-3}), potássio (K) (mg.dm^{-3}), cálcio (Ca) (g.kg^{-1}), magnésio (Mg) (g.kg^{-1}), enxofre (S) (g.kg^{-1}), cobre (Cu) (mg.dm^{-3}), ferro (Fe) (mg.dm^{-3}), manganês (Mn) (mg.dm^{-3}), zinco (Zn) (mg.dm^{-3}), boro (B) (mg.dm^{-3}), índice de área foliar (escala diagramática), incidência (%) de ferrugem e cercosporiose nas folhas, incidência (%) e severidade (escala diagramática) de cercosporiose nos frutos, infestação de bicho-mineiro nas folhas (%) e infestação de broca-do-café (%) nos frutos, amostrados em 15/06/2005 (obs: Co = efeito pepita; C = patamar; Ao = alcance; Esf = esférico; Exp = exponencial; Gaus = gaussiano). UFLA, Lavras, MG, 2006.

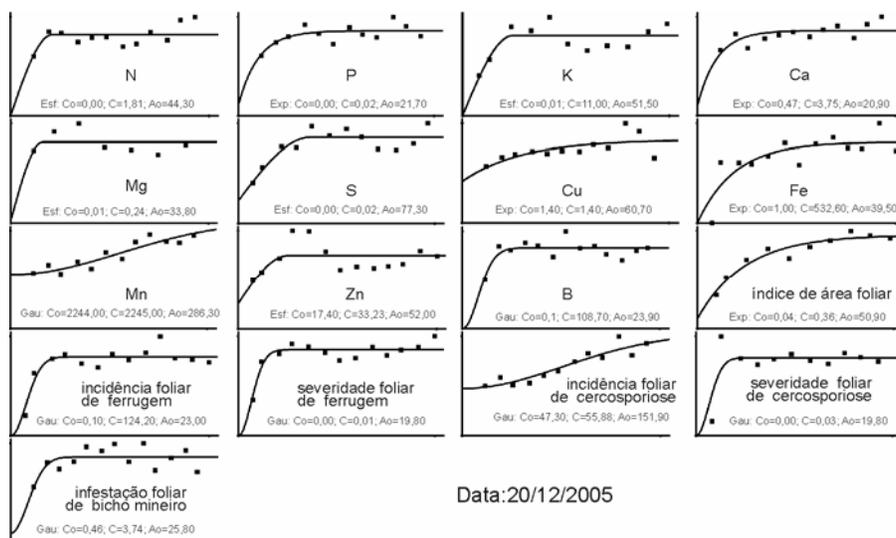


FIGURA 12 Semivariogramas de nitrogênio (N) (g.kg^{-1}), fósforo (P) (mg.dm^{-3}), potássio (K) (mg.dm^{-3}), cálcio (Ca) (g.kg^{-1}), magnésio (Mg) (g.kg^{-1}), enxofre (S) (g.kg^{-1}), cobre (Cu) (mg.dm^{-3}), ferro (Fe) (mg.dm^{-3}), manganês (Mn) (mg.dm^{-3}), zinco (Zn) (mg.dm^{-3}), boro (B) (mg.dm^{-3}), índice de área foliar (escala diagramática), incidência (%) e severidade (escala diagramática) de ferrugem e cercosporiose nas folhas, incidência (%) e severidade (escala diagramática) de cercosporiose nos frutos e infestação de bicho-mineiro nas folhas (%), amostrados em 20/12/2005 (obs: Co = efeito pepita; C = patamar; Ao = alcance; Esf = esférico; Exp = exponencial; Gaus = gaussiano). UFLA, Lavras, MG, 2006.

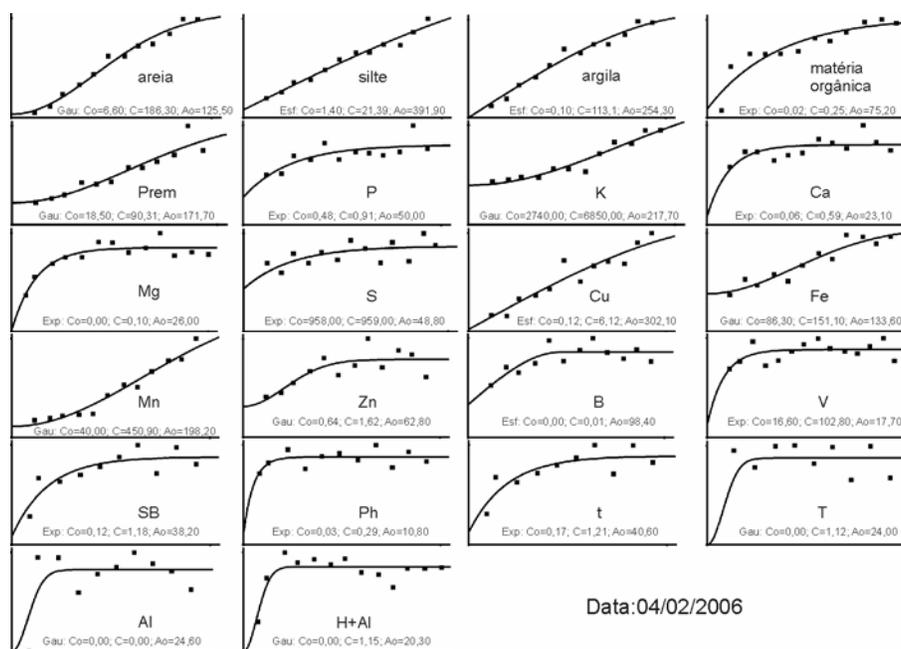


FIGURA 13 Semivariogramas de argila, silte, areia e matéria orgânica (dag.kg^{-1}), fósforo remanescente (P-rem) (mg.L^{-1}), fósforo (P) (mg.dm^{-3}), potássio (K) (mg.dm^{-3}), cálcio (Ca) (cmolc.dm^{-3}), magnésio (Mg) (cmolc.dm^{-3}), enxofre (S) (mg.dm^{-3}), cobre (Cu) (mg.dm^{-3}), ferro (Fe) (mg.dm^{-3}), manganês (Mn) (mg.dm^{-3}), zinco (Zn) (mg.dm^{-3}), boro (B) (mg.dm^{-3}), saturação por bases (V) (%), soma de bases (SB) (cmolc.dm^{-3}), pH em água, capacidade efetiva de troca de cátions (t) (cmolc.dm^{-3}), etc a pH 7,0 (T) (cmolc.dm^{-3}), alumínio (Al) e acidez potencial (H + Al) (cmolc.dm^{-3}), amostrados em 4/2/2006 (obs: Co = efeito pepita; C = patamar; Ao = alcance; Esf = esférico; Exp = exponencial; Gau = gaussiano). UFLA, Lavras, MG, 2006.

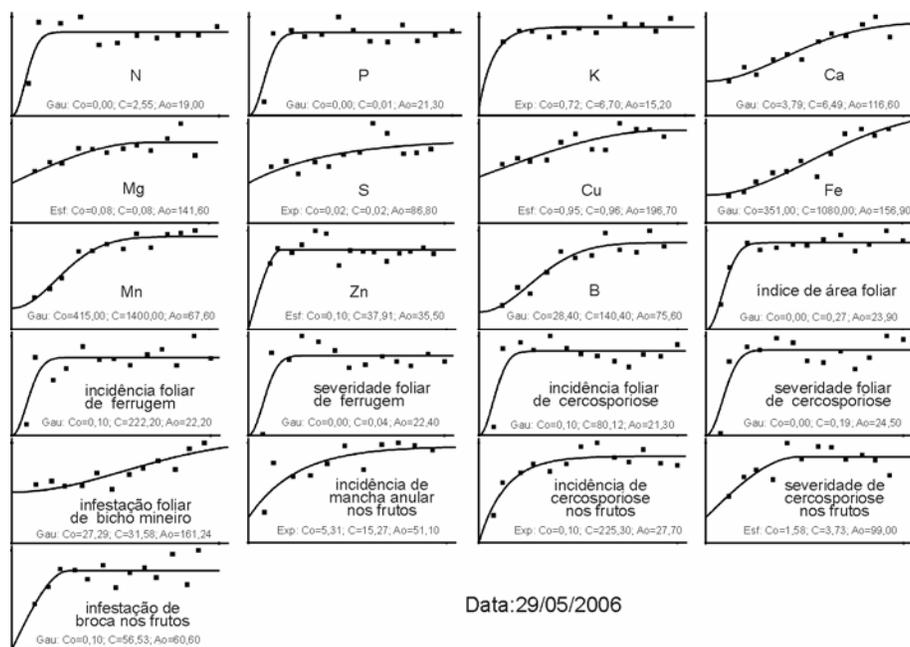


FIGURA 14 Semivariogramas de nitrogênio (N) (g.kg^{-1}), fósforo (P) (mg.dm^{-3}), potássio (K) (mg.dm^{-3}), cálcio (Ca) (g.kg^{-1}), magnésio (Mg) (g.kg^{-1}), enxofre (S) (g.kg^{-1}), cobre (Cu) (mg.dm^{-3}), ferro (Fe) (mg.dm^{-3}), manganês (Mn) (mg.dm^{-3}), zinco (Zn) (mg.dm^{-3}), boro (B) (mg.dm^{-3}), índice de área foliar (escala diagramática), incidência (%) e severidade (escala diagramática) de ferrugem e cercosporiose nas folhas, incidência (%) e severidade (escala diagramática) de cercosporiose nos frutos, infestação de bicho-mineiro nas folhas (%), infestação de broca-do-café (%) e incidência de vírus da mancha-anular (%) nos frutos, amostrados em 29/05/2006 (obs: Co = efeito pepita; C = patamar; Ao = alcance; Esf = esférico; Exp = exponencial; Gaus = gaussiano). UFLA, Lavras, MG, 2006.

6 CONCLUSÕES

Houve variabilidade espacial de variáveis agronômicas na lavoura cafeeira detectada com o uso da Geoestatística.

Com o uso do método de fusão por Componentes Principais foi possível gerar um produto com preservação das cores da imagem original e transferir as informações de detalhes da banda pancromática para o produto híbrido.

A partir da metodologia de cálculo do índice de vegetação (NDVI) foi possível sinalizar áreas na lavoura com maior vigor da vegetação com base em imagem orbital QuickBird®.

Com o uso de Sistema de Informações Geográficas, Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagens Digitais, Geoestatística e Estatística, foi possível detectar e representar a variabilidade espacial de variáveis agronômicas na lavoura, ao longo do tempo, as quais, em grande parte, foram relacionadas com propriedades físico-químicas do solo, de modo a influenciar na bienalidade da produtividade, bem como com a ocorrência de pragas e doenças na lavoura.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUÑA, R. S. **Fatores que influenciam o progresso da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.)**. 1985. 91 p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. 5. ed. San Diego, California: Academic Press, 2004. 952 p.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo, RS: Unisinos, 2003. 165 p.

ARRUDA, F. B.; ZULLO Jr., J.; OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 11-15, jan./abr. 1987.

BAKER, P. S.; LEY, C.; BALBUENA, R.; BARRERA, J. F. Factors affecting the emergence of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) from coffee berries. **Bulletin of Entomological Research**, London, v. 82, n. 2, p. 145-150, June 1992.

BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados: métodos inovadores**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 286 p.

BOLDINI, J. M. **Epidemiologia da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro irrigado e fertirrigado**. 2001. 67 p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems: Spatial Information Systems and Geostatistics**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CAIXETA, S. L.; MARTINEZ, P. CANÇO, H. E. P.; M. C.; CECON, P. R.; ESPOSTI, M. D. D.; AMARAL, J. F. T. Nutrição e vigor de mudas de cafeeiro e infestação por bicho-mineiro. Nutrição e vigor de mudas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1429-1435, set./out, 2004.

CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. **Introduction to plant disease epidemiology**. New York: J. Wiley, 1990. 532 p.

CANTARUTTI, R. B.; ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Amostragem do solo. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (eds.). **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 13-20.

CARVALHO, V. L.; CHALFOUN, S. M. **Doenças do cafeeiro**: diagnose e controle. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 44 p. (EPAMIG. Boletim Técnico, 58).

CARVALHO, V. L.; CHALFOUN, S. M.; CASTRO, H. A.; CARVALHO, V. D. Influência da produção na incidência da ferrugem-do-cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 6, p. 401-405, jun. 1996.

CARVALHO, V. L.; SOUZA, S. M. C. **Ferrugem**: doença mais importante do cafeeiro. Lavras: EPAMIG, 1998. (EPAMIG. Circular Técnica, n. 87).

CHALFOUN, S. M.; SILVA, C. M.; PEREIRA, A. A.; PAIVA, F. A. Relação entre diferentes níveis de infecção de ferrugem (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) e produção dos cafeeiros (*Coffea arabica* L.) em algumas localidades de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 6., 1978, Ribeirão Preto. **Resumos...** Rio de Janeiro, 1978. p. 392-394.

CHAVES, J. C.; SARRUGE, J. R. Alterações nas concentrações de macronutrientes nos frutos e folhas do cafeeiro durante um ciclo produtivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 4, p. 427-432, abr. 1984.

CHELLEMI, D. O.; ROHRBACH, K. G.; YOST, R. S.; SONODA, R. M. Analysis of the spatial pattern of plant pathogens on diseased plants using geostatistics. **Phytopathology**, St Paul, v. 78, n. 2, p. 221-226, Feb. 1988.

CONCEIÇÃO, M. Z. Manejo Integrado em Defesa Vegetal. In: ZAMBOLIM, L. **Manejo Integrado**: doenças, pragas e plantas daninhas. Viçosa: UFV, 2000. p. 1-79.

CORTEZ, E. M. Research, education, and economics information system: An engine for strategic planning and information policy development at the U. S. Department of Agriculture. **Journal of Government Information**, Oxford, v. 26, n. 2, p. 119-129, Mar./Apr. 1999.

COX, S. Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 36, n. 2-3, p. 93-111, Nov. 2002.

DALY, J. M. The carbon balance of diseased plant changes in respiration, photosynthesis and translocation. In: **Encyclopedia of plant physiology**, v. 4, Berlin: Springer Verlag, 1976. p. 450-479.

ESTRADA-PEÑA, A. Geostatistics and remote sensing using NOAA-AVHRR satellite imagery as predictive tools in tick distribution and habitat suitability estimations for *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) in South America. **Veterinary Parasitology**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 73-82, Feb. 1999.

GALLO, D.; NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R. P. L.; BAPTISTA, G. C.; BERTI FILHO, E.; PARRA, J. R. P.; ZUCCHI, R. A.; ALVES, S. B.; VENDRAMIM, J. D.; MARCHINI, L. C.; LOPES, J. R. S.; OMOTO, C. **Entomologia agrícola**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 920 p.

GARCIA JÚNIOR, D.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; SOUZA, P. E.; CARVALHO, J. G.; BALIEIRO, A. C. Incidência e severidade da cercosporiose do cafeeiro em função do suprimento de potássio e cálcio em solução nutritiva. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 3, p. 286-291, maio/jun. 2003.

GODOY, C. V.; BERGAMIN FILHO, A.; SALGADO, C. L. Doenças do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). In: KIMATI, H. **Manual de fitopatologia: Doenças de plantas e seu controle**. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1997. v. 2, p. 184-200.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 509 p.

HUBER, D. M. The role of mineral nutrition in defense. In: HORSFALL & COWLING, E. B. **Plant pathology: an advanced treatise**. New York: Academic Press, 1980. v. 5, p. 381-406.

HUERTA, S. A. Par de folhas representativo del estado nutricional del cafeto. **Cenicafé**, Chinchina, v. 14, n. 1, p. 11-127, ene./mar. 1963.

JAIME-GARCIA, R.; ORUM, T. V.; FELIX-GASTELUM, R.; TRINIDAD-CORREA, R.; VANETTEN, H. D.; NELSON, M. R. Spatial Analysis of *Phytophthora infestans* Genotypes and Late Blight Severity on Tomato and Potato in the Del Fuerte Valley Using Geostatistics and Geographic Information Systems. **Phytopathology**, St Paul, v. 91, n. 12, p. 1156-1165, Dec. 2001.

JENNY, H. **The soil resource-origin and behavior**. New York: Springer-Verlag, 1980. 377 p. (Ecological Studies, v. 37).

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment:** an Earth resource perspective. New Jersey: Upper Saddle River, 2000. 544 p. (Prentice Hall Series in Geographic Information Science).

JULIATTI, F. C.; SILVA, S. A. **Manejo integrado de doenças na cafeicultura do cerrado.** Uberlândia: UFU, 2001. 132 p.

KOSSUGE, T.; KIMPEL, J. A. Energy use and metabolic regulation in plant pathogen interaction. In: AYRES, P. G. **Effects of disease on the physiology of the growing plant.** Cambridge: Cambridge University Press, 1981. p. 29-45.

LEFF, B.; RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A. Geographic distribution of major crops across the world. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 18, n. 1, GB-1009, Jan. 2004.

LEONARDI, S. S.; ORTIZ, J. O.; FONSECA, L. M. G. Comparação de técnicas de fusão de imagens para diferentes sensores orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, Brasil. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 4111-4113.

LIEBHOLD, A. M. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. **Annual Review Entomology**, Palo Alto, v. 38, p. 303-327, 1993.

LIEBHOLD, A. M.; ZHANG, X.; HOHN, M. E.; ELKINTON, J. S.; TICEHURST, M. et al. Geostatistical analysis of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) egg mass populations. **Environmental Entomology**, Lanhan, v. 20, n. 5, p. 1407-1417, Oct. 1991.

LOPES, A. S. **Solos sob cerrado:** características, propriedades e manejo. Piracicaba: POTAFOS, 1983. 162 p.

LOWENBERG-DeBOER, J. Economic analysis of precision farming. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M.; MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R.; VALLE, F. X. R.; GOMIDE, R. L. **Agricultura de Precisão.** 2000. p. 147-180.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas:** princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Potafós, 1997. 319p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. San Diego: Academic, 1995. 889 p.

MATTHEWS, K. B.; SIBBALD, A. R.; CRAW, S. Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: integrating geographic information system and environmental models with search and optimisation algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 23, n. 1, p. 9-26, June 1999.

MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília, DF: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 262 p.

MICHEREFF, M. F. F. **Comportamento reprodutivo do bichomineiro do cafeeiro, *Leucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville, 1842)(Lepidoptera : Lyonetiidae)**. 2000. 46 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2005. 425 p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320 p.

NASA, **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 2000**. Land Information Worldwide Mapping, LLC. Raster, 1:50000. 2005.

NELSON, M. R.; ORUM, T. V.; JAIME-GARCIA, R.; NADEEM, A. Applications of geographic information systems and geostatistics in plant disease epidemiology and management. **Plant Disease**, St. Paul, v. 83, n. 4, p. 308-319, Apr. 1999.

NESTEL, D.; DICKSCHEN, F.; ALTIERI, M. A. Seasonal and spatial population loads of a tropical insect: the case of the coffee leaf-miner in Mexico. **Ecological Entomology**, Oxford, v. 19, n. 2, p. 159-167, May 1994.

PEREIRA, J. C. R.; SILVA-ACUÑA, R.; PEREIRA, A. A.; GUIMARÃES, F. B. Efeito de fontes de nitrogênio em componentes da resistência à ferrugem do cafeeiro. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 2, p. 292-295, abr./jun. 1996.

PINHEIRO, E. S.; KUX, H. J. H. Imagens Quickbird aplicadas ao mapeamento do uso e cobertura da terra do centro de pesquisas e conservação da natureza Pró-Mata. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados: métodos inovadores**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. p. 263-281.

POZZA, A. A. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; CARVALHO, V. L.; POZZA, E. A.; CARVALHO, J. G.; ROMANIELLO, M. M. **Interação entre as doenças e o estado nutricional do cafeeiro**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2004. 84 p. (Boletim Técnico, 73).

RAMIREZ, G. M. **Comparação entre imagens pancromáticas do satélite Ikonos-II e Landsat/ETM+ na identificação de plantios de café (*Coffea arabica* L.)**. 2002. 63 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RENA, A. B.; NACIF, A. P.; GONTIJO, P. T.; PEREIRA, A. A. Fisiologia do cafeeiro em plantios adensados. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, Londrina, 1994. **Anais...** Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 1996. p. 73-85.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa, 1997. 367 p.

ROSSI, R. E.; MULLA, D. J.; JOURNAL, A. G.; FRANZ, E. H. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. **Ecological Monographs**, Washington, v. 62, n. 2, p. 277-314, June 1992.

RUSSELL, E. W. **Soil conditions and plant growth**. London: Longman, 1973. 849 p.

SARTORI, S.; FAVA, J. F. M.; DOMINGUES, E. L.; RIBEIRO FILHO, A. C.; SHIRAISSI, L. I. Mapping the spatial variability of coffee yield with mechanical harvester. In: WORLD CONGRESS OF COMPUTERS IN AGRICULTURE AND NATURAL RESOURCES, 2001, Foz do Iguaçu, Brasil. p. 196-205.

SCOTT, K. T.; SMILLIE, R. M. Metabolic regulation in diseased leaves. I. The respiration rise in barley leaves infected with powdery mildew. **Plant Physiology**, Rockville, v. 41, n. 2, p. 289-297, 1966.

SHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing models and methods for image processing** New York: Academic press, 1997. 552 p.

SILVA, A. B. **Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003. 236 p.

SILVA, F. M.; SALVADOR, N. **Mecanização da lavoura cafeeira.** Lavras: UFLA, 1998. 55 p.

SILVA-ACUÑA, R.; ZAMBOLIM, L.; VENEGAS, V. H. A.; CHAVES, G. M. Relação entre a produção de grãos, o teor foliar de macronutrientes e a severidade da ferrugem do cafeeiro. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 39, n. 224, p. 365-377, jul./ago. 1992.

SOUZA, J. C.; REIS, P. R. **Broca-do-café: histórico, reconhecimento, biologia, prejuízos, monitoramento e controle.** 2. ed. rev. aum. Belo Horizonte: EPAMIG, 1997. 40 p. (Boletim Técnico, 50).

SOUZA, J. C.; REIS, P. R.; RIGITANO, R. L. O. **Bicho-mineiro do cafeeiro: biologia, danos e manejo integrado.** 2. ed. rev. aum. Belo Horizonte: EPAMIG, 1998. 48 p. (Boletim Técnico, 54).

TURBAN, E.; RAINER Jr., R. K.; POTTER, R. E. **Administração da tecnologia da informação: teoria e pratica.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2003. 598 p.

VALE, F. X. R.; JESUS JUNIOR, W. C.; ZAMBOLIM, L. Natureza das epidemias. In: VALE, F. X. R.; JESUS JUNIOR, W. C.; ZAMBOLIM, L. **Epidemiologia aplicada ao manejo de doenças de plantas.** Belo Horizonte: Editora Perfil, 2004. p. 21-46.

VALENCIA, A. G. Estúdio fisiológico de la defoliacion causada por *Cercospora coffeicola* em el cafeto. **Cenicafé**, Caldas, Colômbia, v. 21, n. 3, p. 105-114, jun./sept. 1970.

ZAMBOLIM, L. **I Encontro sobre produção de café com qualidade.** Viçosa: UFV, DFP, 1999. 259 p.

CAPÍTULO 5

**SIG E GEOESTATÍSTICA APLICADOS AO ESTUDO DE ASPECTOS
ECOLÓGICOS E EPIDEMIOLÓGICOS DA ANTRACNOSE E
RAMULOSE TRANSMITIDAS POR SEMENTES.**

1 RESUMO

ALVES, Marcelo de C. **SIG e Geoestatística aplicados ao estudo de aspectos ecológicos e epidemiológicos da antracnose e ramulose transmitidas por sementes.** 2006. 186 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, MG.*

Objetivou-se com este trabalho caracterizar a estrutura e a magnitude da dependência espacial e mapear a probabilidade de incidência da antracnose [*Colletotrichum lindemuthianum* (Sacc. & Magnus) Briosi & Cavara] do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) e da ramulose [*Colletotrichum gossypii* (South) var. *cephalosporioides* A. S. Costa] do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) ao longo do tempo, por meio da Sistema de Informações Geográficas e Geoestatística. Sementes infectadas com restrição hídrica do meio BDA+manitol a -1 MPa foram semeadas no centro de parcelas como fonte de inóculo do tipo ponto. Pelos semivariogramas isotrópicos e anisotrópicos ajustados aos dados e mapas de krigagem indicatriz foi possível constatar padrões de agregação, bem como a influência do clima no progresso espaço-temporal das epidemias. Houve disseminação inicial a partir da fonte primária de inóculo, com a formação posterior de focos de inóculo secundário que coalesceram com o tempo. Com o uso de Sistema de Informações Geográficas calcularam-se as áreas com probabilidade de 1 a 100% de incidência de doença, nos períodos avaliados, de forma a constatar aumento das áreas com probabilidade de infecção ao longo do tempo.

*Comitê Orientador: Edson Ampélio Pozza – UFLA (Orientador), José da Cruz Machado – UFLA (Co-orientador).

2 ABSTRACT

ALVES, Marcelo de C. **GIS and Geostatistics applied to study of antracnose and ramulose ecological and epidemiological aspects transmitted by seeds.** 2006. 186 p. Tesis (Doctorate in Crop Science) – Federal University of Lavras, MG.*

With the present work, it was aim at to characterize the spatial dependence structure and magnitude and to map the incidence probability of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) antracnose [*Colletotrichum lindemuthianum* (Sacc. & Magnus) Briosi & Cavara] and of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) ramulose [*Colletotrichum gossypii* (South) var. *cephalosporioides* A. S. Costa] throughout the time using Geographical Information Systems and Geostatistics. Seeds inoculated with the PDA+manitol means' hydric restriction at -1 MPa were sowed in the center of plots as a point type inoculum source. Patterns of agregation and the weather influence in the space-time epidemics' progress were verified through isotropic and anisotropic semivariograms adjustment to the data and to the indicator kriging maps. The epidemics were initially disseminated through the primary inoculum source, originating later secondary inoculum sources, that became coalescent throughout the time. Using Geographical Information Systems it was possible to calculate the incidence disease probability areas from 1 to 100%, over the evaluated periods in order to verify the increase of the areas with infection probability throughout the time.

*Advising Committee: Edson Ampélio Pozza – UFLA (Adviser), José da Cruz Machado – UFLA (Co-Adviser).

3 INTRODUÇÃO

Estudar a dinâmica populacional, a variabilidade e a epidemiologia das doenças associadas a esses organismos nos agroecossistemas podem auxiliar na adoção de estratégias e táticas de controle mais eficazes e de menor impacto ambiental (Agrios, 2004). Entretanto, para isso, é necessário conhecer e modelar padrões espaciais, o gradiente, analisar a curva de progresso de doenças ao longo do tempo e estabelecer sua relação com as variáveis ambientais (Campbell & Madden, 1990).

Para estudar a variabilidade espacial dessas variáveis, métodos de análise espacial clássicos detectaram padrões de dispersão espacial agregado de fungos, cujos agentes etiológicos são do gênero *Colletotrichum* spp. (Araújo, 2004; Talamini, 2003). Apesar disso, com o uso desses métodos não foi possível descrever a variabilidade espacial dos patógenos. No entanto, com o uso de métodos de análise espacial Geoestatística e de Sistema de Informações Georreferenciadas (SIGs), pode-se estudar a estrutura e a magnitude da variabilidade espacial de um fenômeno e o comportamento da variabilidade em diferentes direções (Burrough & McDonnell, 1998; Isaaks & Srivastava, 1989; Stein, 1998), obter a incerteza ou margem de erro que acompanha a estimativa (Andriotti, 2003), verificar o grau de semelhança ou dependência espacial entre duas variáveis, estimar a mais onerosa ou de difícil medição (Vieira, 2000) e otimizar a amostragem (Burrough & McDonnell, 1998). Entre essas ferramentas, a krigagem ordinária indicatriz utiliza modelos de semivariogramas para estimar o valor indicador a partir de um determinado limiar ou frequência de corte (Castrignano, 2000; Liebhold, 1993). Assim, pode-se estudar diferentes padrões espaciais da mesma variável, de acordo com a indicação de diferentes limiares, diferentemente dos procedimentos do inverso da potência da distância e

krigagem linear, em que os pesos designados às amostras variam de acordo com a distribuição espacial da variável (Isaaks & Srivastava, 1989).

A krigagem indicatriz foi aplicada ao estudo de pragas florestais para gerar mapas de manejo integrado de populações de mosca cigana (*Lymantria díspar* L.) (Lepidoptera: Lymantriidae) na região costeira da Inglaterra (Liebhold et al., 1991) com o nível de controle de 200 ovos por acre. Para estudar doenças em florestas de *Pinus ponderosa*, Kallas et al. (2003) também utilizaram a krigagem indicatriz para identificar áreas com probabilidade de ocorrência de *Armillaria* spp. em raízes de pinus. Com o cruzamento de informações de altitude e declividade com o mapa de krigagem foi possível identificar áreas com alta probabilidade de incidência da doença no nordeste de 'Black Hills', em Dakota do Sul, EUA. No estudo de Jaime-Garcia et al. (2001) a krigagem indicatriz também foi utilizada para estudar o progresso espacial e temporal da requeima em tomate e batata em diferentes safras, sendo possível constatar maior severidade da doença nas áreas próximas da região costeira do rio 'Del Fuerte'.

Entretanto, ainda não se verificou o uso dessa técnica no estudo da dinâmica espaço-temporal de antracnoses transmitidas por sementes. Assim, partindo-se da hipótese de a krigagem indicatriz poder ser utilizada para estudar padrões de disseminação com base em dados binários de incidência de doenças de plantas transmitidas por sementes, objetivou-se caracterizar a estrutura e a magnitude da dependência espacial e mapear a incidência da antracnose [*Colletotrichum lindemuthianum* (Sacc. & Magnus) Briosi & Cavara] do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) e da ramulose [*Colletotrichum gossypii* (South) var. *cephalosporioides* A. S. Costa] do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) por meio de Sistema de Informações Geográficas e Geoestatística.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados analisados foram cedidos por Araújo (2004), Pinto et al. (2001) e Talamini (2003). Os ensaios foram conduzidos na área experimental do Departamento de Fitopatologia (DFP) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Da mesma forma, os dados climatológicos referentes ao período de condução dos experimentos foram obtidos na estação climatológica da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e podem ser encontrados em Araújo (2004), Pinto et al. (2001), Talamini (2001) e Talamini (2003).

Antes de instalar os experimentos foram retiradas amostras de solo para corrigir a acidez e adubar as parcelas experimentais (Araújo, 2004; Talamini, 2003).

O experimento com a antracnose do feijoeiro foi conduzido durante abril a junho de 1998 (período das secas) e de dezembro de 1998 a fevereiro de 1999 (período das águas). Foram selecionados lotes de sementes suscetíveis da cultivar Carioca, livres de infecção por *C. lindemuthianum*. Para isso foi utilizado o método do rolo de papel (Brasil, 1992). Duas sementes inoculadas artificialmente, ou 0,5% das sementes utilizadas, foram consideradas fonte tipo ponto (Campbell & Madden, 1990), semeadas exatamente no meio de uma parcela de 9 linhas, com 5 m de comprimento e área útil de 7 linhas de 4 metros, no espaçamento de 0,5m entre linhas com 12 plantas/m.

As sementes foram inoculadas por restrição hídrica (Carvalho et al., 1998). Sementes de feijão foram mantidas por 7 dias em meio de cultura BDA+manitol com *C. lindemuthianum* raça 89, em potencial osmótico de -1 MPa, à temperatura de 20°C, com 12h de luz e 12h de escuro em câmara BOD. Antes do plantio, as sementes não inoculadas foram tratadas com benomil + thiram. As avaliações da incidência foram realizadas semanalmente, nos períodos de 26, 33, 40, 47, 54 e, 61 dias após o plantio (DAP), observando-se

todas as plantas da área útil da parcela, num total de 525 observações em cada período de avaliação e época de cultivo (Figura 1).

O experimento com a ramulose do algodoeiro foi instalado no cultivo das águas (dezembro/2002 a março/2003) em parcela experimental de 6 linhas de 5 metros de comprimento, com espaçamento de 0,9 metros entre linhas e 11 sementes por metro linear. Foram utilizadas sementes da linhagem IAC 01/273 da safra 2001/02, altamente suscetíveis à ramulose, livres de infecção por *C. gossypii* var. *cephalosporioides*. Para a seleção das sementes, foi utilizado o método de incubação em substrato de papel com 2,4-D e teste padrão de germinação (Brasil, 1992). Após deslindadas, 2% das sementes foram inoculadas com cultura pura de *C. gossypii* var. *cephalosporioides* em meio BDA+manitol por 7 dias, no potencial hídrico de -1 MPa (Carvalho et al., 1998).

Foram semeadas 2 % de sementes inoculadas no centro da parcela, constituindo fonte de inóculo tipo ponto (Campbell & Madden, 1990). O desbaste foi realizado aos 30 DAP, com o objetivo de manter 30 plantas por linha. As avaliações de incidência foram realizadas nos períodos de 37, 44, 58, 80 e 90 DAP, observando-se todas as plantas da parcela, com total de 186 observações por período de avaliação (Figura 1).

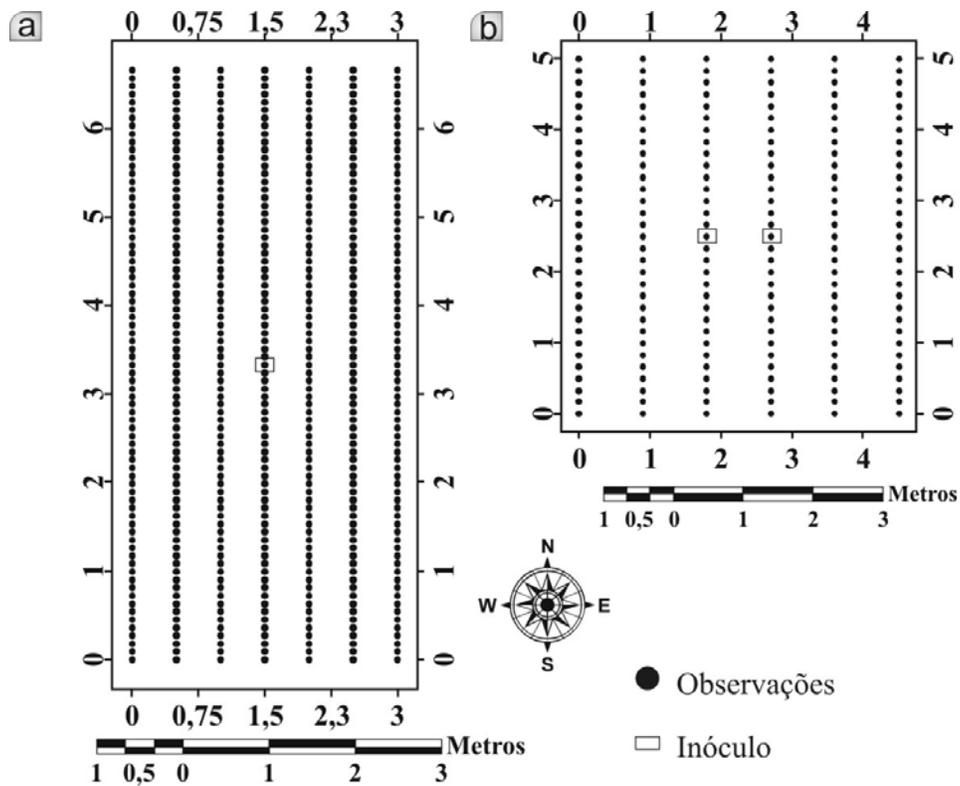


FIGURA 1. Localização das observações para avaliar a incidência da antracnose do feijoeiro (525 observações) (a) e ramulose do algodoeiro (186 observações) (b), disseminadas em sementes artificialmente infectadas, semeadas no centro das parcelas como fonte de inóculo do tipo ponto. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Procedeu-se o processamento e análise dos dados de acordo com a estrutura de um SIG (Figura 2).

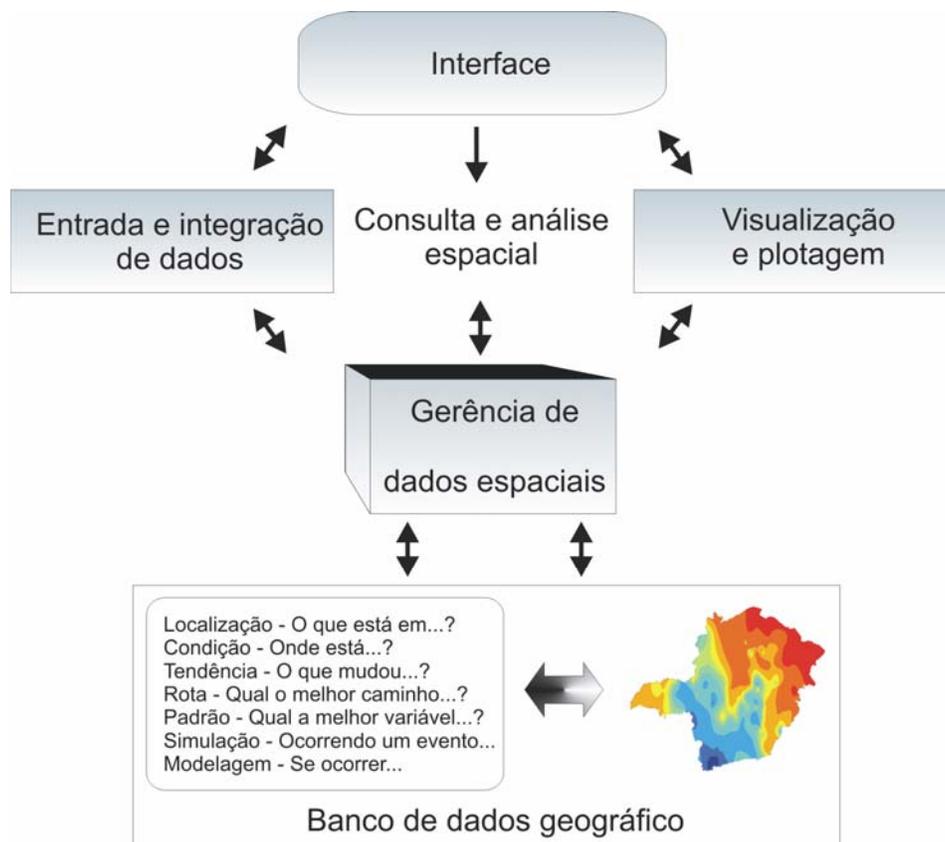


FIGURA 2 Arquitetura de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) (adaptado de Câmara & Medeiros, 1998, Silva, 2003). UFLA, Lavras, MG, 2006.

Análise geoestatística dos dados foi realizada com a técnica da krigagem indicatriz. Nesse método é precedido por uma transformação não-linear, chamada de codificação por indicação para transformar cada valor do conjunto amostral de acordo com um valor de corte ou limiar definido (Andriotti, 2003). A análise do semivariograma foi processada de forma semelhante à realizada na

krigagem linear, considerando-se separadamente o conjunto de valores por indicação para cada valor de corte (Felgueiras, 2004).

Atribuíram-se notas com o valor '1' para plantas doentes e '0' para plantas saudáveis. Para modelar apenas as áreas com incidência de doença optou-se pelo limiar maior que '0'.

O ajuste dos modelos foi escolhido em função do quadrado médio do erro e do erro-padrão de predição. Para analisar o grau de dependência espacial das variáveis, foi utilizada a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados de forte dependência espacial os semivariogramas que têm efeito pepita 25% do patamar, moderada quando entre 25 e 75% e de fraca quando >75%.

Após o ajuste dos semivariogramas, foi realizada interpolação por krigagem indicatriz ordinária para mapear a probabilidade de incidência das epidemias (Felgueiras, 2004). O número de vizinhos mais próximos para a estimação variou em função das melhores estimativas situando-se entre 5 e 20 vizinhos.

Após realizar os mapas de interpolação por krigagem, foi utilizado um Sistema de Informações Geográficas para calcular as áreas (m²) com probabilidade de 1 a 100 % de ocorrer doença, em todos os períodos avaliados.

'Softwares' utilizados

O ArcGis9.0[®] foi utilizado na análise geoestatística dos dados e plotagem dos mapas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi constatada dependência espacial entre os dados de incidência da antracnose do feijoeiro e da ramulose do algodoeiro. O padrão agregado de dispersão de ambas epidemias foi constatado por meio do ajuste de modelos de semivariogramas aos dados, pois o valor absoluto da diferença entre duas amostras observadas cresceu com o aumento da distância entre elas, até um valor no qual os efeitos locais não apresentaram mais influência, culminando na estabilidade do modelo a partir da distância que separa o universo estruturado (amostras correlacionadas) do aleatório (amostras independentes) (Andriotti, 2003). Para a antracnose, o melhor ajuste foi obtido com modelos de semivariograma esféricos e, para a ramulose, esféricos e gaussianos. A partir dos modelos gaussianos ajustados ao progresso espaço-temporal da ramulose aos 37 e 58 DAP pôde-se inferir sobre a capacidade de disseminação do patógeno em curto período de tempo com a rápida infecção de plantas vizinhas, pois segundo Isaaks & Srivastava (1989) e Burrough & McDonnell (1998), esse tipo de semivariograma é utilizado para fenômenos contínuos. Assim, o hábito de crescimento arbustivo do algodoeiro também pode ter contribuído para o progresso da doença, facilitando a disseminação do patógeno. Verificou-se, de forma geral, aumento do alcance dos semivariogramas com o passar do tempo, provavelmente em função do progresso da doença cada vez mais distantes do foco de infecção inicial (Tabela 1).

Ajustaram-se modelos de semivariogramas isotrópicos para a antracnose e a ramulose no cultivo das águas, aos 26 e 44 DAP, respectivamente. Assim, nesses períodos, a doença progrediu de forma semelhante em todas as direções. Para os demais períodos foram ajustados modelos anisotrópicos, ou seja, houve diferenças no progresso da doença em direções específicas, possivelmente devido a influência de fatores climáticos, pois a anisotropia é característica

TABELA 1 Coeficientes e parâmetros de modelos de semivariogramas isotrópicos e anisotrópicos relativos a diferentes períodos de avaliação da incidência da antracnose do feijoeiro no cultivo das águas e seca e, da ramulose do algodoeiro, no cultivo das águas, disseminadas em sementes infectadas artificialmente. UFLA, Lavras, MG, 2006.

Cultivo	Dias Após plantio	Modelo	Direção	Efeito pepita (Co)	Patamar (Co+C)	Maior Alcance (a ₁)	Menor Alcance (a ₂)	Quadrado Médio do erro	Erro Padrão médio	Co / Co+C
Antracnose no cultivo das águas	26	Esférico	Isotrópico	0,00388	0,01751	1,14960	1,14960	0,08275	0,08484	0,22160
	33	Esférico	Anisotrópico	0,00710	0,04908	1,73410	1,51400	0,11640	0,11760	0,14471
	40	Esférico	Anisotrópico	0,00683	0,06606	2,01290	1,40750	0,12560	0,12480	0,10342
	47	Esférico	Anisotrópico	0,00229	0,09187	2,17010	1,40230	0,11350	0,11030	0,02497
	54	Esférico	Anisotrópico	0,00026	0,12551	2,54860	1,57540	0,10990	0,10610	0,00209
	61	Esférico	Anisotrópico	0,00756	0,16718	3,00240	2,09850	0,14250	0,14600	0,04523
Antracnose no cultivo das secas	26	Esférico	Anisotrópico	0,00419	0,05705	1,79480	1,10730	0,13040	0,10080	0,07338
	33	Esférico	Anisotrópico	0,02658	0,09352	2,18880	1,41690	0,21950	0,19730	0,28425
	40	Esférico	Anisotrópico	0,04181	0,15377	2,62690	1,49390	0,25430	0,24430	0,27191
	47	Esférico	Anisotrópico	0,03079	0,19960	2,39260	1,42460	0,25410	0,22630	0,15425
	54	Esférico	Anisotrópico	0,06662	0,22738	4,02450	2,77390	0,29940	0,29900	0,29299
	61	Esférico	Anisotrópico	0,08543	0,22252	5,45200	4,10320	0,29240	0,32160	0,38392
Ramulose no cultivo das águas	37	Gaussiano	Anisotrópico	0,02631	0,01524	1,01970	0,77428	0,17990	0,18510	1,72708
	44	Esférico	Isotrópico	0,03229	0,05367	0,66731	0,66731	0,24350	0,25440	0,60155
	58	Gaussiano	Anisotrópico	0,08520	0,21776	3,35440	1,74820	0,32110	0,31620	0,39126
	95	Esférico	Anisotrópico	0,07858	0,21392	4,13530	2,20960	0,35560	0,34900	0,36734

freqüente nos elementos da natureza, determinada, por exemplo, pela direção do vento, água da chuva ou de irrigação (Câmara et al., 2004).

Jaime-Garcia et al. (2001), estudando o progresso espacial de *Phytophthora infestans* em tomate e batata com Sistema de Informações Geográficas e Geoestatística, também utilizaram semivariogramas anisotrópicos para verificar o efeito do clima no progresso espaço-temporal da requeima. Com isso, foi possível verificar que a direção de disseminação do patógeno, a magnitude e o grau de dependência espacial das doenças variaram de acordo com as estações do ano, em diferentes safras, ao longo da região do vale 'Del Fuerte', 'Sinaloa', México.

Com relação à dependência espacial, por meio da técnica da geoestatística, pôde-se constatar aumento da força de dependência espacial da antracnose e ramulose no cultivo das águas, em todos os períodos de avaliação, conforme a classificação de Cambardella et al. (1994). Entretanto, no caso da antracnose no cultivo da seca, verificou-se forte grau de dependência espacial aos 26 e 47 DAP, e grau moderado nas demais avaliações. Para a ramulose, observou-se fraca dependência espacial aos 37 DAP e grau moderado, nas demais avaliações (Tabela 1).

Os semivariogramas atingiram um patamar dentro de cada período de avaliação, correspondente ao seu alcance. Houve tendência de aumento dos alcances e dos patamares dos semivariogramas para ambas as doenças, com as épocas de avaliação, correspondente ao aumento do progresso espacial das doenças no campo, com o passar do tempo, devido ao aumento da severidade e do número de plantas doentes no foco primário. Isso também implica no fato de, cada vez mais, plantas saudáveis ao lado de plantas doentes tornarem-se doentes, com o passar do tempo. Os valores de maior alcance para antracnose do feijoeiro variaram de 1,14 a 3,00 metros no cultivo do período chuvoso e de 1,79 a 5,45

metros no cultivo do período seco. Para a ramulose do algodoeiro, esse intervalo foi de 0,66 a 4,13 metros (Tabela 1, Figura 3).

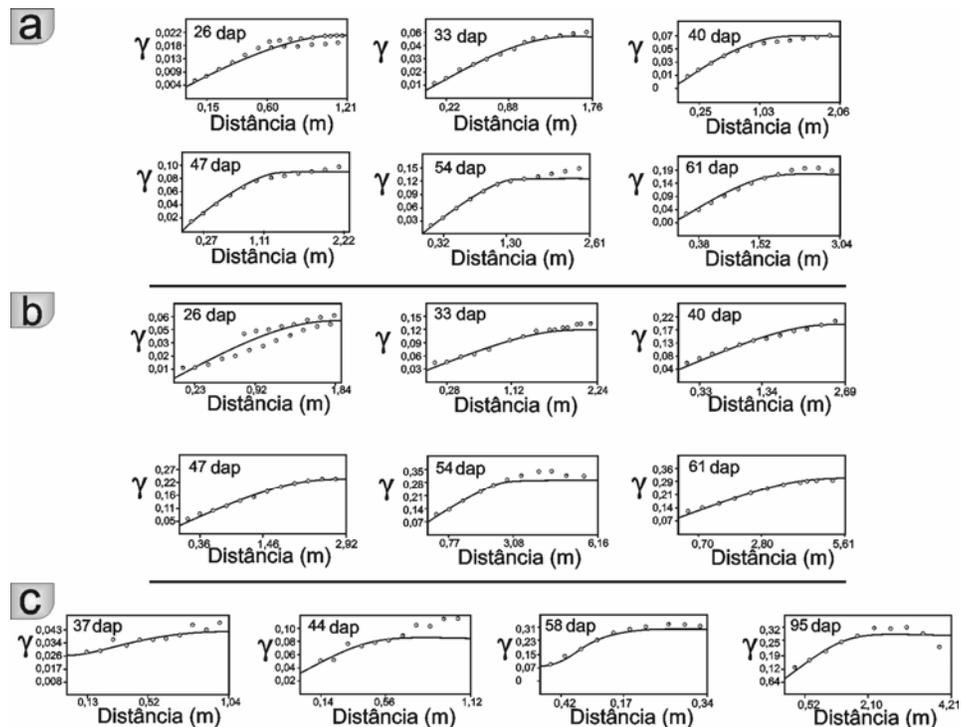


FIGURA 3 Semivariogramas relativos à incidência da antracnose do feijoeiro aos 26, 33, 40, 47, 54 e 61 dias após o plantio (DAP), no cultivo do período chuvoso (a) e seco (b) e, da ramulose do algodoeiro, aos 37, 44, 58 e 95 DAP(c).

Após ajustar os semivariogramas, a krigagem indicatriz foi utilizada para mapear a probabilidade de ocorrência das epidemias nas áreas estudadas, em cada período de avaliação. No caso da antracnose do feijoeiro e da ramulose do algodoeiro, Araújo (2004), Pinto et al. (2001) e Talamini (2003), utilizando métodos clássicos de análise espacial, como o teste de ‘ordinary runs’ e mapas de quadrats, também detectaram o padrão agregado das epidemias e a influência

do clima no progresso da doença. Entretanto, apesar de serem rápidos, simples e econômicos (Campbell & Madden, 1990), esses métodos não possibilitaram quantificar a magnitude e o grau de dependência espacial das epidemias, a direção de disseminação predominante e nem mapear a probabilidade de incidência das doenças ao longo do tempo.

Com o uso da krigagem, foi possível constatar nos mapas o padrão agregado das epidemias. Na primeira avaliação dos patossistemas estudados, houve padrão de disseminação na fonte primária de inóculo, comprovando a eficiência da metodologia de inoculação das sementes no estabelecimento das epidemias no campo. Nas avaliações posteriores, pôde-se constatar aumento gradual da incidência de doença até o último tempo de avaliação. Além disso, verificou-se a partir do segundo período de avaliação, a formação de focos de inóculo secundário além do foco primário, em função da natureza policíclica das epidemias (Figuras 4, 5 e 6). O efeito da influência de fatores climáticos e da irrigação na incidência das doenças, conforme relatado por Pinto et al. (2001) também puderam ser visualizados nos mapas. Com isso, pôde-se observar maior progresso da antracnose no cultivo da seca do que no cultivo das águas, possivelmente em função da temperatura favorável (média de 19,4 °C), associada a ventos na direção sul-norte e irrigação por aspersão no período das secas, conforme relatado por Pinto et al. (2001) e Talamini (2003) (Figuras 4 e 5). Com relação à ramulose, observou-se maior progresso após 58 DAP, sendo que aos 95 DAP a área com probabilidade de incidência da doença preencheu quase toda a área da parcela estudada. Isso pode ter ocorrido em função de condições climáticas mais adequadas para a doença, pois segundo Araújo (2004), no período de 60 DAP houve um aumento da temperatura média, próxima a 25 °C, e da radiação solar, de modo a favorecer o progresso da doença após esse período (Figura 6).

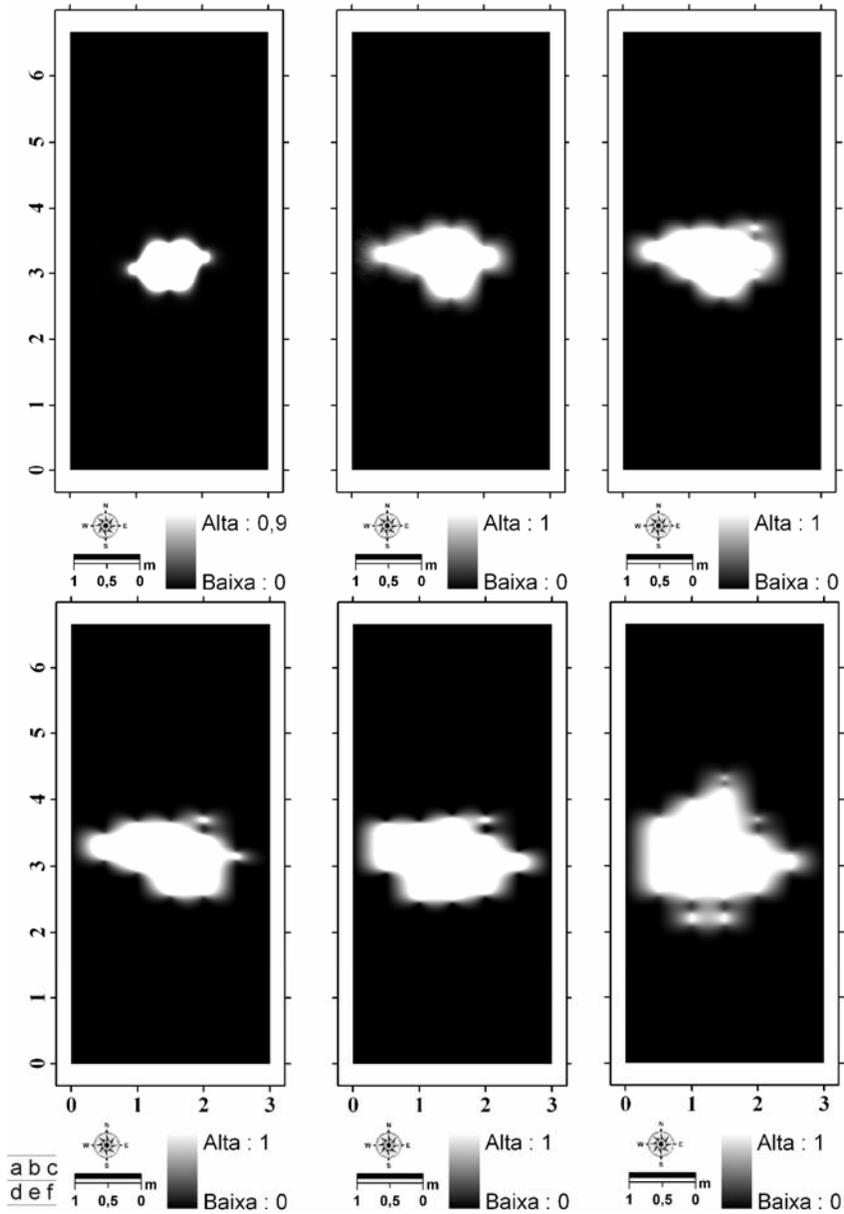


FIGURA 4. Mapas de krigagem indicatriz relativos à probabilidade de incidência da antracnose do feijoeiro, no cultivo das águas, aos 26 (a), 33 (b), 40 (c), 47 (d), 54 (e) e 61 (f) dias após o plantio. UFLA, Lavras, MG, 2006.

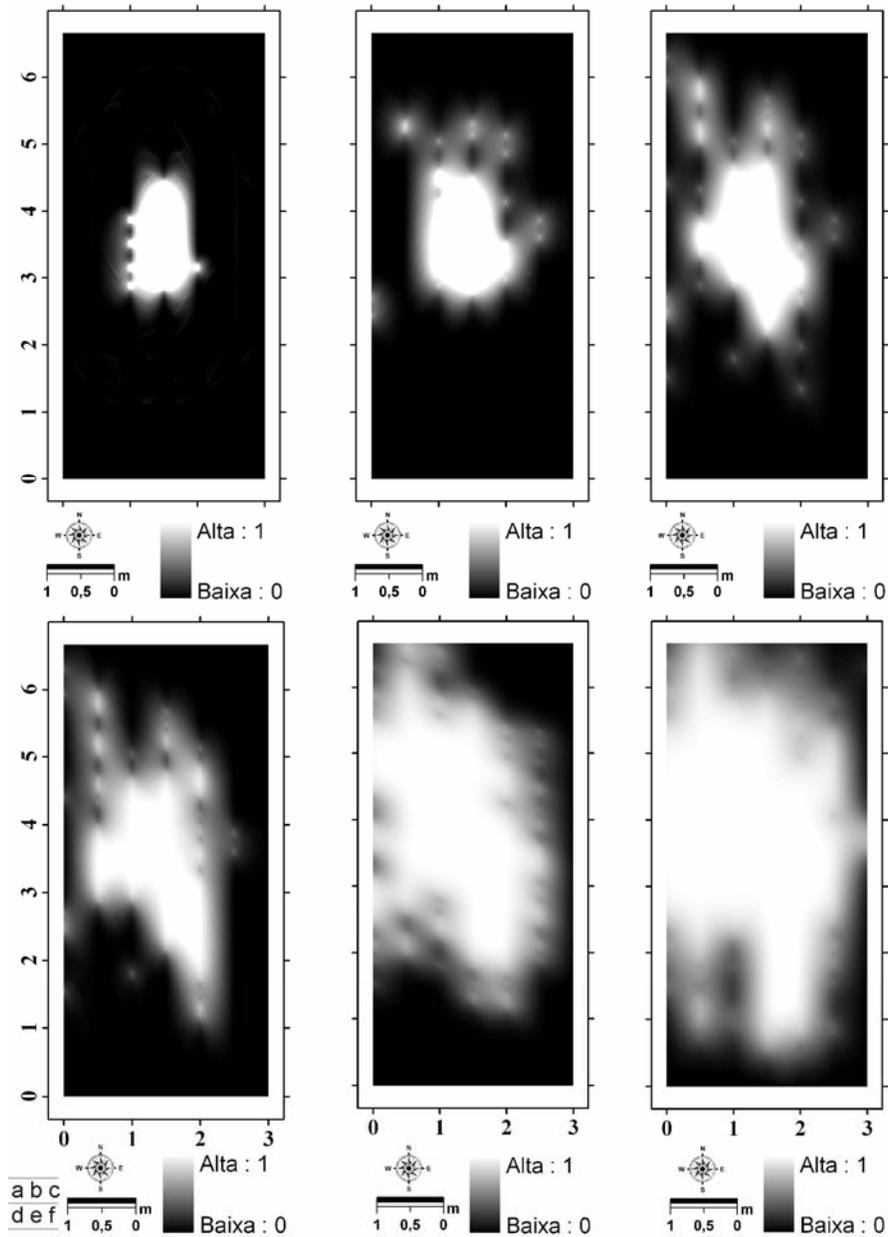


FIGURA 5. Mapas de krigagem indicatriz relativos à probabilidade de incidência da antracnose do feijoeiro, no cultivo da seca, aos 26 (a), 33 (b), 40 (c), 47 (d), 54 (e) e 61 (f) dias após o plantio. UFLA, Lavras, MG, 2006.

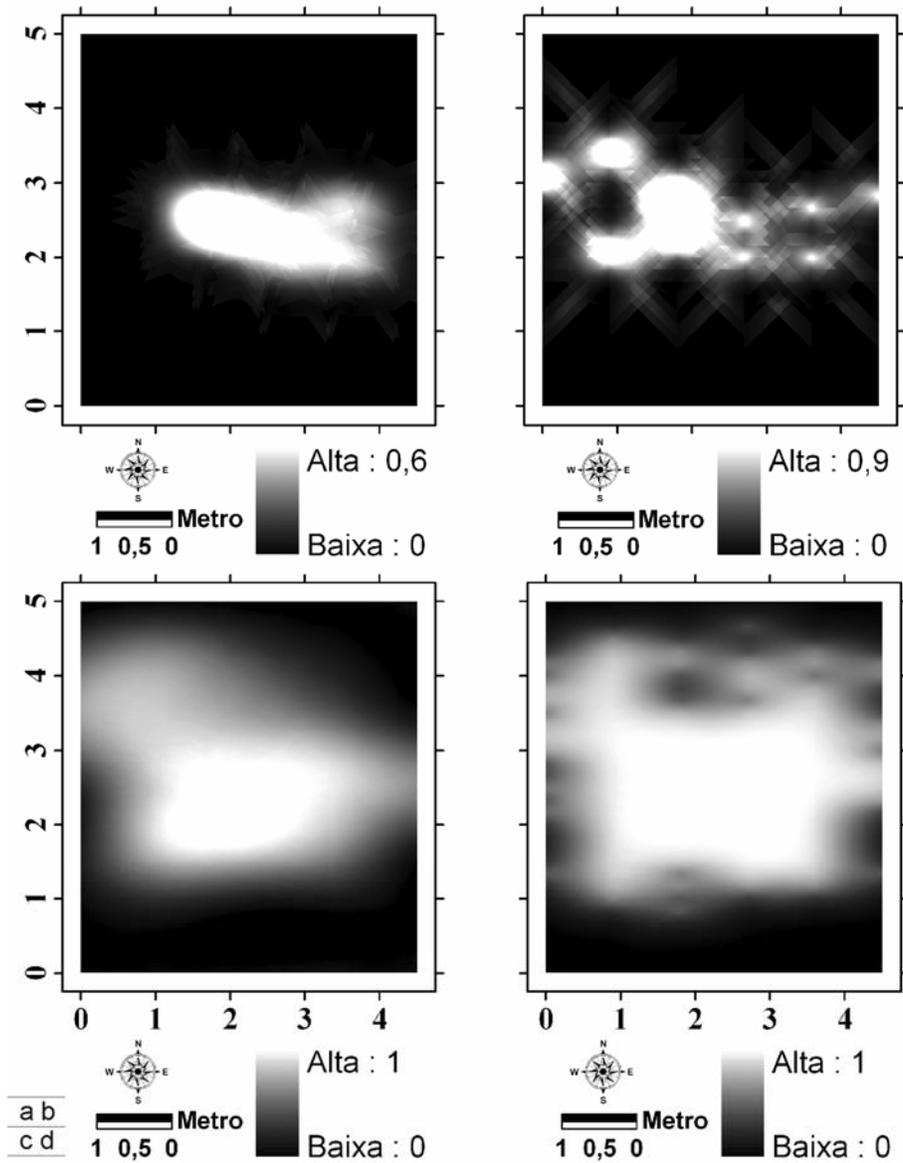


FIGURA 6. Mapas de krigagem indicatriz relativos à probabilidade de incidência da ramulose do algodoeiro, no cultivo das águas, aos 37 (a), 44 (b), 58 (c) e 95 (d) dias após o plantio. UFLA, Lavras, MG, 2006.

No estudo de Jaime-Garcia et al. (2001) a krigagem indicatriz também foi utilizada para estudar o progresso espacial e temporal da requeima em tomate e batata nas safras de 1994-95, 1995-96 e 1996-97. Nesse caso, observou-se para a batata, maior severidade da doença nas áreas próximas da região costeira, e, para o tomate, nas áreas costeiras e ao norte da região próxima ao rio ‘Del Fuerte’.

Com relação aos patossistemas estudados, com o uso de Sistema de Informações Geográficas foi possível calcular as áreas com probabilidade de infecção de 1 a 100% de incidência. Assim, constatou-se tendência de aumento linear do progresso das doenças com o tempo, bem como maiores áreas de probabilidade de progresso da antracnose do feijoeiro no período das secas do que no das águas.

Assim, para a antracnose do feijoeiro e ramulose do algodoeiro, de forma semelhante à detectada por métodos clássicos de análise de padrão espacial de doenças (Araújo, 2004; Pinto et al., 2001), observou-se com o ajuste de modelos de semivariogramas e mapas de krigagem indicatriz o padrão agregado de disseminação das epidemias a partir da fonte primária de inóculo, com a formação posterior de focos de inóculo secundário que coalesceram com o tempo, em função da natureza policíclica dessas doenças. Além disso, com os mapas de krigagem, foi possível constatar a transmissibilidade dos patógenos da semente infectada para as plântulas e, posteriormente entre plantas no campo ao longo do tempo.

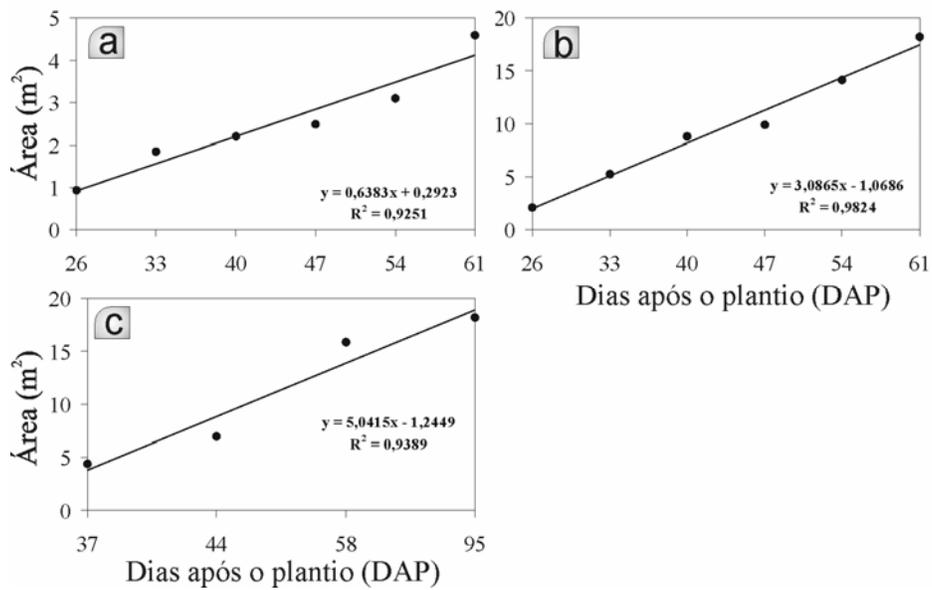


FIGURA 6. Valores observados (.) e estimados (-) do progresso espacial (m²) (a, b, c) da antracnose do feijoeiro no cultivo das águas (a), secas (b) e da ramulose do algodoeiro no cultivo das águas (c), na probabilidade de incidência de 1 a 100%. UFLA, Lavras, MG, 2006.

6 CONCLUSÕES

Com a metodologia de análise geoestatística foi possível quantificar a magnitude e o grau de dependência espacial, mapear a variabilidade espacial da incidência da antracnose do feijoeiro e da ramulose do algodoeiro, bem como visualizar o progresso espacial das doenças influenciadas por fatores bióticos e abióticos, relacionados às técnicas de cultivo, clima regional, patógeno e hospedeiro, em microescala, ao longo do tempo.

Com os semivariogramas e mapas de krigagem, foi possível descrever o padrão espaço-temporal e constatar a transmissibilidade dos patógenos da semente infectada para as plântulas e, posteriormente, entre plantas no campo, ao longo do tempo, de acordo com a natureza policíclica das doenças avaliadas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. 5. ed. San Diego, California: Academic Press, 2004. 952 p.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo, RS: Unisinos, 2003. 165 p.

ARAÚJO, D. V. **Níveis de inóculo de *Colletotrichum gossypii* var. *cephalosporioides* nas sementes e sua influencia na epidemia da Ramulose do algodoeiro**. 2004. 87 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Regras para análise de sementes**. Brasília: LANARV/SNAD/MA, 1992. 360 p.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; DRUCK, S.; CARVALHO, M. S. Análise espacial e Geoprocessamento. In: In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 19-52.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Fieldscale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.

CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. **Introduction to plant disease epidemiology**. New York: J. Wiley, 1990. 532 p.

CARVALHO, J. C. B.; MACHADO, J. C.; VIEIRA, M. G. G. C. Desenvolvimento de metodologia de infecção de sementes de feijão por *Colletotrichum lindemuthianum* através do condicionamento osmótico. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 23, p. 232, ago. 1998. Suplemento.

CASTRIGNANO, A.; GOOVAERTS, P.; LULLI, L.; BRAGATO, G. A geostatistical approach to estimate probability of occurrence of Tuber

melanosporum in relation to some soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 98, n. 3/4, p. 95-113, Dec. 2000.

FELGUEIRAS, C. A.; DRUCK, S.; MONTEIRO, A. M. V. Análise espacial de superfícies por Geoestatística: o enfoque por indicação. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 124-154.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JAIME-GARCIA, R.; ORUM, T. V.; FELIX-GASTELUM, R.; TRINIDAD-CORREA, R.; VANETTEN, H. D.; NELSON, M. R. Spatial Analysis of *Phytophthora infestans* Genotypes and Late Blight Severity on Tomato and Potato in the Del Fuerte Valley Using Geostatistics and Geographic Information Systems. **Phytopathology**, St Paul, v. 91, n. 12, p. 1156-1165, Dec. 2001.

KALLAS, A. M.; REICH, R. M.; JACOBI, W. R.; LUNDQUIST, J. E. Modeling the probability of observing Armillaria root disease in the Black Hills. **Forest Pathology**, Berlin, v. 33, n. 4, p. 241-252, Aug. 2003.

LIEBHOLD, A. M. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. **Annual Review Entomology**, Palo Alto, v. 38, p. 303-327, 1993.

LIEBHOLD, A. M.; ZHANG, X.; HOHN, M. E.; ELKINTON, J. S.; BENZON, G. L.; CAMPBELL, R. W. TICEHURST, M. et al. Geostatistical analysis of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) egg mass populations. **Environmental Entomology**, Lanhan, v. 20, n. 5, p. 1407-1417, Oct. 1991.

LOWENBERG-DeBOER, J. Economic analysis of precision farming. IN: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M.; MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R.; VALLE, F. X. R.; GOMIDE, R. L. **Agricultura de Precisão**, 2000. p. 147-180.

PINTO, A. C. S.; POZZA, E. A.; TALAMINI, V.; MACHADO, J. C.; SALES, N. L. P.; GARCIA JÚNIOR, D.; SANTOS, D. M. Análise do padrão espacial e do gradiente da antracnose do feijoeiro em duas épocas de cultivo. **Summa Phytopathologica**, Piracicaba, v. 27, n. 3, p. 392-398, jul./set. 2001.

SILVA, A. B. **Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003. 236 p.

STEIN, A. Analysis of space-time variability in agriculture and the environment with geostatistics. **Statistica Neerlandica**, Oxford, v. 52, n. 1, p. 18-41, Mar. 1998.

TALAMINI, V. **Progresso especial e temporal da Antracnose a partir de diferentes níveis de inoculo inicial em sementes de feijoeiro**. 2003. 144 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

TALAMINI, V.; POZZA, E. A.; MACHADO, J. C.; OLIVEIRA, F. A. Epidemiologia de doenças associadas a *Colletotrichum* spp. Transmitidas por sementes. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, Passo Fundo, v. 10, p. 219-248, 2001.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como os sistemas agrícolas e ambientais apresentam natureza complexa, dinâmica e não-linear, objetivou-se no presente estudo, com o uso de técnicas de Geociência e Inteligência Artificial, explorar e compreender fatores bióticos e abióticos do ambiente, de forma a auxiliar na tomada de decisão na resolução de problemas relacionados à Proteção de Plantas. Assim, pôde-se constatar que as metodologias de análise das áreas de Geociência e Inteligência Artificial podem apresentar potencial de utilização em um país de dimensões continentais como o Brasil, onde existe carência de informações para auxiliar o processo de tomada de decisão acerca de questões relacionadas com a Agricultura, Proteção de Plantas e recursos naturais.

No entanto, para aprimorar ainda mais os resultados obtidos no presente trabalho, espera-se desenvolver no futuro um circuito eletrônico para integrar os Sistemas de Lógica ‘Fuzzy’ e ‘Neuro-Fuzzy’ desenvolvidos no presente estudo a estações meteorológicas automatizadas, a fim de auxiliar produtores rurais, sobre o momento mais adequado para proceder ao manejo integrado da ferrugem asiática da soja e da ferrugem do cafeeiro. Além disso, novas variáveis devem ser incorporadas aos modelos a fim de ser possível descrever o processo policíclico das ferrugens estudadas. Estudos de mudanças climáticas também devem ser realizados para verificar o potencial de progresso da ferrugem asiática sob cenários futuros relacionados aos recursos naturais, tecnologia e socioeconomia mundial.

Com relação ao estudo das variáveis agronômicas na lavoura cafeeira, levantamentos subseqüentes associados com o manejo localizado de insumos na lavoura devem ser realizados para tentar reduzir a bienalidade da produção e homogeneizar a variabilidade espacial de nutrientes no solo e nas plantas. Da mesma forma, técnicas de Geoestatística, como a krigagem indicatriz, devem ser

aplicadas a fim de proceder ao controle de pragas e doenças acima do nível de controle, de forma a reduzir o impacto ambiental do uso excessivo de produtos fitossanitários na lavoura e aumentar a relação custo-benefício do produtor rural.

Com relação ao estudo sobre os aspectos ecológicos e epidemiológicos de doenças de plantas transmitidas por sementes, a transmissibilidade, estrutura e magnitude de dependência espacial de outros patógenos de importância econômica em Patologia de Sementes devem ser avaliadas, de forma a auxiliar no estabelecimento de padrões fitossanitários desses microrganismos em lotes de sementes, com base no alcance da doença sob diferentes situações de manejo das culturas agrícolas no campo.

9 GLOSSÁRIO

Abiótico – sem vida;

Acurácia – refere-se a quão próximo do valor real está uma estimativa de acordo com algum padrão conhecido. O significado estatístico da acurácia refere-se ao grau de proximidade de uma estimativa média ao verdadeiro valor da média.

Agregação – é a combinação das conseqüências de cada regra em um sistema de inferência Mandani como preparativo para defuzificação.

Agroecossistemas – são ecossistemas modificados pelo homem para melhor atender aos objetivos humanos, incluindo produção de alimento, fibra ou combustível por meio do uso controlado e deliberado de plantas e animais.

Alcance – é a diferença aritmética entre o maior e o menor valor em um conjunto; em análise geoestatística é a distância na qual o semivariograma estabiliza após o aumento dos valores de semivariância.

Algoritmo – conjunto de regras para resolver um problema.

Amostragem – técnica de obtenção de uma séria de observações que possibilitem representar de forma satisfatória o fenômeno estudado.

Análise de Componentes Principais (ACP) – método de análise multivariada de dados utilizado para representar sua variação com relação a um número

mínimo de componentes principais ou combinações lineares das variáveis originais parcialmente correlacionadas.

Anisotrópico – adjetivo para descrever a variabilidade espacial de um fenômeno com estruturas diferentes e direções específicas.

ANFIS – ‘Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System’. Técnica utilizada com o sistema de inferência do tipo Sugeno para o treinamento de dados.

Biótico – vivo; associado a, causado por organismos vivos.

Cartografia – ciência e arte de representar cartas e mapas.

Cenário – é o resultado de um modelo de simulação numérica em que algumas entradas de dados devem ser fornecidas para se obter resultados de situações ainda não observadas.

Ciclo de vida – sucessivos estádios no crescimento e desenvolvimento de um organismo caracterizado pelo aparecimento e reaparecimento do mesmo estágio (ex. esporo) do organismo; séries progressivas de alterações que ocorrem nos organismos vivos.

Co-krigagem – técnica de estimativa de uma variável regionalizada por meio de observações suplementares de uma ou mais co-variáveis na mesma área geográfica, de forma a proporcionar redução da variância estimada no caso de haver menor densidade amostral da variável original.

Conjuntos fuzzy – conjunto de objetos utilizados por funções de pertinência contínua de forma a apresentar valores em diferentes intensidades ou gradativamente.

Dado Geográfico – localidade no espaço com um valor relativo a um fenômeno.

Dano – qualquer redução na quantidade e ou qualidade da produção ou a diferença entre a produção possível e a produção real.

Dano econômico – é a diferença entre a produção econômica e a produção real.

Dano teórico – é a diferença entre a produção teórica e a real.

Dano inevitável – é a diferença entre a produção teórica e a possível.

Defuzificação – é o processo de transformação da saída ‘fuzzy’ de um sistema de inferência ‘fuzzy’ em uma saída discreta.

Digital – representação de dados de forma discreta em unidades ou dígitos.

Dispersão – movimento dos propágulos do patógeno de sua origem em direção a um sítio de infecção.

Disseminação – ato de espalhar o inóculo do patógeno a partir de uma fonte, nas fases de disseminação, liberação, dispersão e deposição do propágulo do patógeno.

Doença – alterações morfológicas e fisiológicas na planta resultantes da interação entre patógeno, hospedeiro e ambiente.

Ecossistema – refere-se ao sistema como um todo, incluindo não somente o complexo de organismos, mas também o complexo de fatores físicos que compõem o ambiente do bioma e fatores do hábitat em seu sentido mais amplo.

Efeito Pepita – na krigagem e variografia, a parte da variância de uma variável regionalizada sem representação espacial (erro experimental e de densidade de amostragem).

Endemia – refere-se à doença sempre presente em uma determinada área, com balanço de processos de infecção e remoção próximas do neutro, quando se considera um período de tempo relativamente longo.

Epidemiologia – é o estudo de populações de patógenos em populações de hospedeiros e da doença resultante desta interação, sob a influência do ambiente e a interferência humana.

Epidemia – aumento temporário na incidência ou severidade de uma doença infecciosa numa área definida; é a ciência da doença em populações.

Epidemia cíclica – refere-se a um surto epidêmico de uma doença normalmente endêmica.

Epidemia explosiva – é o aumento rápido na intensidade de doença.

Epidemia poliética – refere-se àquelas epidemias que necessitam de anos para causar aumento na intensidade de doença. Ocorre geralmente em hospedeiros perenes ou patógenos de solo, entretanto, o possível componente poliético de algumas doenças foliares não está bem estabelecido.

Epidemia progressiva – caracteriza o aumento em extensão de epidemias.

Epidemia tardívaga – é o aumento lento na intensidade de doença.

Evapotranspiração – transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera por evaporação direta da água e transpiração das plantas.

Evapotranspiração potencial (ETp) – evapotranspiração em extensa área com vegetação densa, rasteira, de crescimento ativo, cobrindo toda a superfície (grama batatais) e sob condições de solo sem restrição hídrica. Conceito introduzido por Thornthwaite em 1948 sendo mais apropriado para estudos climatológicos.

Evapotranspiração de referência (ETo) – conceito introduzido por Doorenbos e Pruitt (1977) e adotado pela FAO - Food and Agriculture Organization, sendo a grama substituída por uma cultura hipotética, (Allen et al. (1998). Conceito apropriado para manejo de irrigação.

Escala – é a relação entre o tamanho de um objeto em um mapa e seu tamanho real.

Função membro ou de pertinência – função utilizada para especificar o grau que uma determinada entrada pertence a um determinado conjunto ou conceito.

Fuzificação – é o processo de geração de valores membro ‘fuzzy’ de uma variável utilizando funções de pertinência.

GPS – (Global Positioning System), conjunto de satélites em órbita geoestacionária da Terra, organizados de forma a constituir uma rede de apoio para determinar a localização na superfície terrestre por meio de receptores eletrônicos.

Incidência de doença – número de unidades de plantas, ou de suas partes, expresso como porcentagem ou proporção do número total de unidades avaliadas.

Infecção – o estabelecimento do parasita dentro de uma planta hospedeira.

Infestação – relacionado a um grande número de insetos, nematóides, etc. em uma área ou lavoura. Também aplicado para superfície de plantas, solo, recipientes ou ferramenta contaminada com bactéria, fungos, etc.

Inferência do tipo Mandani – os conjuntos ‘fuzzy’ de cada regra são combinados com o operador de agregação e o conjunto resultante é defuzificado para gerar a resposta do sistema.

Inferência do tipo Sugeno – o resultado de cada regra é uma combinação linear das entradas; a saída é uma combinação linear ponderada dos resultados.

Injúria – Qualquer sintoma visível causado por um organismo nocivo.

Inóculo inicial – propágulo do parasito com potencial de iniciar uma infecção.

Intensidade de doença – termo geral para referir-se à quantidade de doença presente numa população.

Normais Climatológicas – média de série de 30 (trinta) anos de elementos meteorológicos diários, sendo as últimas normais correspondente ao período de 1961-1990.

Krigagem em Blocos – estimativas de atributos em blocos quadrados de área por métodos de interpolação geoestatística.

Krigagem Indicatriz – método de interpolação de krigagem não-linear caracterizado por transformar os dados originais em escala binária e mapear sua probabilidade de ocorrência espacial a partir de um limiar.

Krigagem Ordinária – método de interpolação de dados com a teoria das variáveis regionalizadas, em que os pesos das estimativas são obtidos do semivariograma ajustado aos dados.

Krigagem Simples – técnica de interpolação utilizada para estimar valores com base em regressão linear generalizada, sob pressuposição da estacionariedade de segunda ordem e média conhecida.

Limiar de dano – é a população mais baixa do patógeno para a qual algum dano pode ser esperado.

Malha – conjunto de pontos amostrais arranjados de forma regular no espaço.

Monociclo – termo utilizado para referir-se à um ciclo de produção de propágulos pelo patógeno.

Modelo – é a representação de atributos ou feições da superfície da terra em uma base digital; um conjunto de algoritmos codificados em computador para descrever a variabilidade espacial de um processo físico ou fenômeno natural da superfície terrestre; uma função ajustada a dados para representar observações.

Modelo de Dados Geográficos – esquema formal de representação de dados com localização e características.

Modelo de Elevação Digital – uma malha de dados de elevação obtidos por imagem de radar orbital.

Operadores ‘fuzzy’ – operadores and, or ou not; também conhecidos como conectores lógicos.

Patossistema – é um subsistema de um ecossistema definido pelo fenômeno do parasitismo.

Pandemia – refere-se a epidemias progressivas que ocupam uma área de tamanho continental.

Parasitismo – representado por pequenos organismos que vivem sobre e obtêm nutrientes de um organismo maior (relação hospedeiro-parasita).

Perda – redução em retorno financeiro causado por organismos nocivos, por unidade de área.

Precisão – refere-se ao grau de exatidão ou de refinamento de uma medida; grau de acurácia de uma representação numérica; número de dígitos significativos; grau de variação de uma observação com relação a sua média.

Previsão – refere-se a probabilidade do surgimento ou aumento na intensidade de doença embasada em informações sobre o clima, hospedeiro e patógeno. Na previsão é importante conhecer os fatores mais relevantes que interagem no sistema.

Probabilidade – refere-se à quantificação da provável ocorrência de um evento.

Produção – é o produto mensurável de valor econômico de uma plantação.

Produção primitiva – está relacionada com a produção típica da agricultura de subsistência, que não emprega conhecimentos científicos.

Produção teórica – é aquela que poderia ser conseguida sob as melhores condições possíveis, não sendo uma proposta econômica ou ambiental ideal.

Produção possível – é aquela alcançada em pequenas parcelas experimentais utilizando modernas tecnologias.

Produção econômica – é a que possibilita a maior obtenção de lucro para o produtor.

Produção real – refere-se à produção que os agricultores estão realmente obtendo com as práticas correntes de manejo da cultura.

Programa – conjunto de informações codificadas em computador e organizadas para realizar determinada tarefa.

Policiclo – termo utilizado para referir-se à pelo menos dois ciclos de infecção do patógeno numa estação de cultivo.

Pústula – pequena mancha caracterizada pela elevação da epiderme e formação de esporos fúngicos na porção superior e inferior da folha.

Área Abaixo da Curva de Progresso de Doença (AACPD) – modelos integrais que relacionam dano com alguma variável que represente a totalidade da epidemia ou desenvolvimento da doença ao longo do tempo.

Pixel – elemento de imagem digital; menor unidade de informação em uma imagem digital.

Progresso Espacial de Doença – é a variabilidade espacial de doença.

Resolução – é a menor distância entre dois elementos processados ou o menor tamanho de feições passíveis de serem mapeadas ou amostradas.

Sensoriamento Remoto (SR) – informação de unidade amostral ou de alvo obtido por meio de aparelhos remotos, os quais não entram em contato direto com o alvo amostrado.

Sistema – é o comportamento como um todo em resposta a estímulos dirigidos a qualquer parte.

Sistema de Informação Geográfica (SIG) – conjunto de ferramentas computacionais para capturar, armazenar, recuperar, transformar e projetar dados espaciais.

Simulação – é a representação de um sistema real e condução de experimentos com o propósito de entender seu comportamento ou realizar avaliações. Simulação requer o conhecimento de todos os fatores que interagem no sistema

Semivariograma – gráfico da semivariância versus a distância; constitui uma série de funções matemáticas que possibilitam ajustar pontos a modelos esféricos, exponenciais, gaussianos, lineares, etc.

Unidade amostral – menor unidade de avaliação experimental.

Validação cruzada – método de validação no qual as estimativas estatísticas são utilizadas para verificação da qualidade do ajuste de um modelo.

Variável regionalizada – função aleatória definida a partir de uma medida de um fenômeno natural no espaço de acordo com conjunto de coordenadas em escala que possibilite sua representação analítica.

Variabilidade espacial – distribuição da variável ao longo do espaço.