

**ACOPLANDO UM MODELO DE DOENÇAS
AO MODELO CROPGRO-SOYBEAN:
FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA**

JOÃO EDUARDO PEDRINI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Fitopatologia.

Passo Fundo, julho de 2010.

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ACOPLANDO UM MODELO DE DOENÇAS
AO MODELO CROPGRO-SOYBEAN:
FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA

JOÃO EDUARDO PEDRINI

Orientador: Prof. PhD. José Maurício Cunha Fernandes

Co-Orientador: Prof. Dr. Willingthon Pavan

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Fitopatologia.

Passo Fundo, julho de 2010.

P371a Pedrini, João Eduardo

Acoplando um modelo de doenças ao modelo Cropgro-
soybean : ferrugem asiática da soja / João Eduardo
Pedrini. – 2010.
128 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade
de Passo Fundo, 2010.

Orientador: Prof. PhD. José Maurício Cunha
Fernandes.

Co-orientador: Prof. Dr. Willingthon Pavan.

1. Ferrugem da soja (doença). 2. Ferrugem asiática.
3. Soja – doenças e pragas. I. Fernandes, J. M. (José
Maurício), orientador. II. Pavan, Willingthon, co-orientador.
III. Título.

CDU: 633.34

Bibliotecária responsável Angela Saadi Machado - CRB 10/1857



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOPATOLOGIA



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

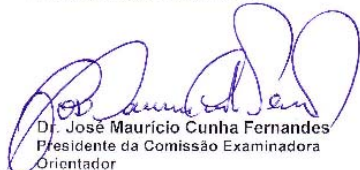
"Acoplando um modelo de doenças ao modelo
cropgro-soybean: ferrugem asiática da soja"

Elaborada por

JOÃO EDUARDO PEDRINI

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Agronomia – Área de Fitopatologia

Aprovada em: 27/07/2010
Pela Comissão Examinadora



Dr. José Maurício Cunha Fernandes
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador



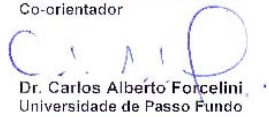
Dr. Wilson Antonio Klein
Coord. Prog. Pós-Graduação em Agronomia



Dr. Willingthon Pavan
Universidade de Passo Fundo
Co-orientador



Dr. Hélio Carlos Rocha
Diretor FAMV



Dr. Carlos Alberto Forcelini
Universidade de Passo Fundo



Dr. Paulo Fernando Bertagnolli
Embrapa Trigo

A meus pais pelo, amor, carinho e apoio incondicional que sempre me proporcionaram ao longo de minha vida, e que sempre fizeram entender que o futuro, é feito a partir da constante dedicação no presente.

AGRADECIMENTOS

A Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, juntamente com a coordenação do PPGAgro, pela valiosa oportunidade proporcionada;

Ao meu orientador Prof. PhD. José Maurício Cunha Fernandes e ao meu co-orientador Prof. PhD. Willingthon Pavan, pelas preciosas orientações e também pela compreensão e amizade em todos estes anos de trabalho.

A todos os meus familiares e amigos que direta ou indiretamente, me ajudaram a tornar possível a execução deste trabalho.

Há tantos mais a agradecer, por tanto se dedicarem a mim, não somente por terem ensinado, mas por terem me feito aprender. Muito obrigado a todos os professores, funcionários, colegas que fizeram parte desta jornada.

Ao Instituto Interamericano para Pesquisas em Mudanças Globais (IAI), pelo auxílio financeiro que oportunizou a continuação de meus estudos.

Por fim, à aquele, que me permitiu tudo isso, ao longo de toda a minha vida, e, não somente nestes anos como universitário, à você meu DEUS, obrigado, reconheço cada vez mais em todos os meus momentos, que você é o maior mestre, que uma pessoa pode conhecer e reconhecer!!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xix
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Modelos Simulação de Culturas	7
2.1.1 DSSAT	7
2.2 Modelos de Simulação de Doença	13
2.2.1 Modelo Genérico de Doenças	16
2.2.2 DESSAC	19
2.3 Abordagens de Integração de Modelos	23
2.3.1 Abordagem Monolítica	24
2.3.2 Abordagem Programada	25
2.3.3 Abordagem Orientada a Componentes	26
2.3.4 Abordagem de Comunicação	28

CAPÍTULO I

IMPLEMENTANDO À INTEGRAÇÃO DE MODELOS DINÂMICOS	31
Introdução	34
Material e Métodos	39
Modelos	39
Linguagens de programação	44
Integração dos Modelos	48
Fluxo da Integração	51
Resultados	53
Discussão	55

CAPÍTULO II

CALIBRAÇÃO DO MODELO DE FERRUGEM DA SOJA	61
Introdução	63
Material e Métodos	68
Dados de Alimentação dos Modelos	68
Resultados	75
Discussão	84

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS **89****REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** **91**

Anexo A – Dados Climáticos Passo Fundo 2009

LISTA DE FIGURAS

1	Códigos dos modelos são limpos para criarem novos códigos de modelos (modificado de BULATEWICZ, 2006).	25
2	Entradas e saídas dos modelos são conectadas (modificado de BULATEWICZ, 2006).	26
3	Componentes são conectados para criação de modelos (modificado de BULATEWICZ, 2006).	27
4	Modelos são modificados então eles podem trocar dados em tempo de execução (modificado de BULATEWICZ, 2006).	29
5	Visão geral dos componentes e da estrutura modular do DSSAT.	41
6	Estrutura do modelo genérico de doenças desenvolvido por Pavan (2007).	43
7	Criação de objetos compartilhados com códigos em C e FORTRAN.	46
8	Diagrama de Fluxo da integração dos modelos	52
9	Dados de clima para as safras de 2006/2007 e 2007/2008.	75
10	Dados de clima para as safras de 2008/2009 e 2009/2010.	76
11	Simulações do modelo CROPGRO:Soybean-Ferrugem para as cultivares Bragg e Don Mário na safra 2006/2007 em Passo Fundo-RS	80

12	Simulações do modelo CROPGRO:Soybean-Ferrugem para as cultivares Bragg e Don Mário na safra 2007/2008 em Passo Fundo-RS	81
13	Simulações do modelo CROPGRO:Soybean-Ferrugem para as cultivares Bragg e Don Mário na safra 2008/2009 em Passo Fundo-RS	82
14	Simulações do modelo CROPGRO:Soybean-Ferrugem para as cultivares Bragg e Don Mário na safra 2009/2010 em Passo Fundo-RS	83

LISTA DE TABELAS

1	Coeficientes das cultivares Bragg e Don Mário (parte I).	70
2	Coeficientes das cultivares Bragg e Don Mário (parte II).	71
3	Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem asiática da soja parte I (modificado de PAVAN, 2007).	72
4	Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem asiática da soja parte II (modificado de PAVAN, 2007).	73
5	Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem asiática da soja parte III (modificado de PAVAN, 2007).	74
6	Produções simuladas para a cultivar Bragg, com doença (CD) e sem doença (SD), e o estágio fenológico de início da doença (EF-ID) para as safras de 2006/2007 à 2009/2010	77
7	Dias da emergência após a floração e a maturação para a cultivar Bragg, para as safras de 2006/2007 à 2009/2010	77
8	Produções simuladas para a cultivar Don Mário, com doença (CD) e sem doença (SD), e o estágio fenológico de início da doença (EF-ID) para as safras de 2006/2007 à 2009/2010	78
9	Dias da emergência após a floração e a maturação para a cultivar Don Mário, para as safras de 2006/2007 à 2009/2010	78

RESUMO

ACOPLANDO UM MODELO DE DOENÇAS AO MODELO CROPGRO-SOYBEAN: FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA

JOÃO EDUARDO PEDRINI ¹

RESUMO - Quantificar o impacto da ferrugem asiática da soja sobre o rendimento é de grande interesse. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos, representando a relação entre a produção de intensidade da doença. Estes modelos, reconhecidamente úteis, são baseados em relações empíricas determinada quer em campo ou em condições controladas. Por outro lado, o modelo CSM-CROPGRO-Soybean contido no DSSAT (*Decision Support System for Agro-Technology Transfer*) simula o crescimento e desenvolvimento da planta desde a sementeira até à maturação usando um passo de tempo diário, e, finalmente, prevê o rendimento. O modelo CSM-CROPGRO-Soybean como a maioria dos modelos de simulação de culturas foi desenvolvido em linguagem FORTRAN. Portanto, um dos principais desafios para a comunidade de modelos de simulação de culturas é a integração de modelos científicos criados por diferentes grupos, que devem ampliar a utilidade do novo modelo acoplado. No acoplamento, alguns aspectos devem ser considerados, estes incluem a identificação de modelos adequados, as especificações das interações e da possibilidade de acoplamento dinâmico de diferentes códigos fonte. Portanto, há necessidade da construção de um componente estrutural que contenha a interface e os protocolos de comunicação

¹Mestre em Agronomia, Universidade de Passo Fundo - joaoepedrini@gmail.com

entre os componentes do sistema. Além dessas etapas, é necessário escolher uma abordagem adequada para o conjunto de modelos. Integrar diferentes aspectos de um modelo de simulação de culturas que imita o crescimento e desenvolvimento da soja e também para os impactos da ferrugem asiática da soja sobre o rendimento deve ser útil para analisar e implementar práticas de manejo da doença. Utilizando diferentes técnicas de programação e de abordagens para integração foi possível desenvolver uma versão modificada do CSM-CROPGRO-Soybean, que respondeu à intensidade ferrugem. A determinação das melhores práticas para alcançar altas produtividades, enquanto ambientalmente e economicamente sustentável é uma informação valiosa para os planos estratégicos no Brasil e em outros lugares. No entanto, usando a abordagem convencional experimental deve consumir uma quantidade significativa de tempo e recursos. O uso de modelos de simulação de culturas, podem ser uma alternativa para a compreensão da resposta da cultura em diferentes condições de crescimento. O modelo CSM-CROPGRO-Soybean, acoplado a um modelo de doença, de forma dinâmica representa o progresso da ferrugem asiática da soja e seu impacto na produtividade. coeficientes de cultura para o CSM-CROPGRO-Soybean foram obtidos a partir da base de dados DSSAT. Os parâmetros para a ferrugem da soja foram obtidos a partir da literatura ou estimados a partir de dados experimentais. Os dados meteorológicos e as características do solo de Passo Fundo, RS, Brasil, foram utilizados para avaliar o modelo modificado CSM-CROPGRO-Soybean. Uma seqüência de dados observados categórica que representa a intensidade da ferrugem da soja na área foi utilizada para comparação de modelos. Os resultados mostraram que o modelo acoplado representada razoavelmente bem o impacto na produção, devido à colonização da ferrugem. Na simulação, a produtividade de soja foi menos afetada em anos em que a doença foi considerada de baixa intensidade e significativamente afetada em anos classificados de alta intensidade.

Palavras chave: Integração, abordagens metodológicas, CSM-CROPGRO-Soybean, modelo genérico de doenças, linguagens de programação, Ferrugem Asiática da soja, calibração, simulação.

ABSTRACT**COUPLING A DISEASE EPIDEMIC MODEL TO
CSM-CROPGRO-SOYBEAN MODEL: ASIAN
SOYBEAN RUST****JOÃO EDUARDO PEDRINI ¹**

ABSTRACT - Quantifying the impact of Asian Soybean rust on yield is of great interest. Mathematical models have been developed representing the relationship between disease intensity yield. These models, admittedly useful, are based on empirical relationships determined either under field or controlled conditions. By the other hand, the CSM-CROPGRO-Soybean model contained within DSSAT (*Decision Support System for Agro-Technology Transfer*) simulates plant growth and development from sowing to maturity using a daily time step, and ultimately predicts yield. The CSM-CROPGRO-Soybean model like the majority of crop simulation models was developed in FORTRAN. Therefore, one of the main challenges to the crop simulation models community is the integration of scientific models created by different groups, which should expand the usefulness of the coupled new model. In coupling, aspects that should be considered include the identification of appropriate models, specifications of interactions and the possibility of dynamic coupling different source codes. Therefore, there is a need to build a structural component containing the interface and the communication protocols between the components of the system. Beyond these stages, it is necessary to choose an adequate approach to couple the models.

¹Mestre em Agronomia, Universidade de Passo Fundo - joaoepedrini@gmail.com

Integrating different aspects of a crop simulation model that mimics the growth and development of soybean and also accounts for the Asian Soybean Rust impacts on yield should be useful for analyzing and implementing disease management practices. Using different techniques of programming and coupling approaches was possible to develop a modified CSM-CROPGRO-Soybean that responded to rust intensity. The determination of best practices for achieving high yields while environmentally and economically sustainable is valuable information for strategic plans in Brazil and elsewhere. However, using the conventional experimental approach should consume a significant amount of time and resources. The use of crop simulation models, may be an alternative option for understanding crop response under various conditions of growth. The model CSM-CROPGRO-Soybean, coupled to a disease model, dynamically represents the Asian rust soybean progress and its impact on yield. Crop coefficients for CSM-CROPGRO-Soybean were obtained from the DSSAT data base. The parameters for the soybean rust were obtained either from literature or estimated from experimental data. Weather data and soil characteristics from Passo Fundo, RS, Brazil were used to evaluate the modified model CSM-CROPGRO-Soybean. A sequence of observed categorical data representing soybean rust intensity in the area was used for model comparison. The results showed that the coupled model represented reasonable well the impact on yield due to rust colonization. In the simulation, soybean yield was less affected in years when disease was considered of low intensity and significantly affected in years categorized of high intensity.

Keywords: Integration, methodological approach, CSM-CROPGRO-Soybean model, generic disease model, programming languages, asian soybean rust, calibration, simulation.

1 INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill], é uma das principais culturas na agricultura mundial e brasileira em função da sua produtividade e valor nutritivo com diversas aplicações na alimentação humana e animal, bem como no papel sócio econômico, impulsionando de forma significativa o agronegócio. Danos na produção deste produto podem ser causados por diversos fatores como, por exemplo, climáticos, tais como, seca, geada, chuva excessiva, granizo, fortes ventos, etc. Diferentes fatores também devem ser mencionados como os agronômicos (espaçamento, adubação, irrigação, entre outros) e fatores bióticos como pragas e doenças.

Dentro do fator biótico doenças, destaca-se a ferrugem asiática da soja, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi* que segundo DEL PONTE (2006) as perdas e o impacto causada por esta doença, desde que foi identificada nas principais regiões produtoras de soja nos continentes americanos, principalmente no Brasil, as colocam no patamar de doença mais importante da cultura.

Plantas de soja infectadas por este fungo normalmente apresentam a característica de desfolha precoce, comprometendo a formação e o enchimento de vagens, reduzindo o peso final dos grãos.

Desde sua detecção na América do Sul, em 2002, a ferrugem asiática se disseminou pelas áreas de soja no Brasil e facilmente atingiu níveis severos de epidemias em várias regiões produtoras de soja no Brasil causando danos significativos na produção e sérias perdas

econômicas (YORINORI et al., 2005).

A doença foi detectada posteriormente na Argentina (ROSSI, 2003) e nos Estados Unidos (SCHNEIDER, 2005).

Seu comportamento tem sido extremamente variável entre e dentro de cada uma dessas regiões. Ataques mais severos normalmente ocorrem sob condições climáticas favoráveis à doença, associadas com ausência ou falhas de manejo da cultura, podendo levar a um aumento de duas a três vezes no número de aplicações de fungicidas, na tentativa de tentar frear o avanço da doença (SIQUERI, 2005).

As perdas econômicas devido à esta doença no Brasil, que foram estimadas em 125 milhões de dólares na safra de 2001/2002, saltaram para mais de um bilhão de dólares em 2002/2003, e para mais de dois bilhões de dólares em 2003/2004 (YORINORI, 2005). Segundo estimativas recentes, os danos na produtividade provocados pela ferrugem asiática da soja somaram aproximadamente 4,5% da safra brasileira de soja em 2006/07, o que equivale a 2,67 milhões de toneladas de grãos. Somando-se o custo da operação de controle, o custo total da ferrugem asiática na safra 2006/07 foi estimado em U\$ 2,19 bilhões (EMBRAPA SOJA, 2007).

A experiência adquirida ao longo dos anos de convívio com a doença e a adoção de práticas mais eficientes de controle recomendadas pela pesquisa têm permitido, em muitas situações, o controle da doença em níveis aceitáveis (GODOY, 2005). No entanto, a garantia da produção, muitas vezes, tem um alto custo que pode tornar inviável o agronegócio. Infelizmente são poucas as armas disponíveis atualmente para combater a doença. Enquanto não se dispõe de cultivares com resistência aceitável, o controle da doença depende do uso de fungicidas, cuja eficiência varia com o produto utilizado e o momento

e a frequência de aplicações, por meio de uma correta tecnologia de aplicação.

Recentemente, medidas regulamentares como o vazio sanitário têm sido implantadas em alguns estados do Brasil, principalmente na região central e oeste do país. A medida consiste na proibição de plantio de soja na entressafra, em um período de três meses anteriores ao plantio na época normal. Fundamenta-se no fato do fungo necessitar de plantas vivas para se manter ativo, portanto o inóculo pode ser reduzido, causando um atraso no início da doença e nas aplicações de fungicidas, que pode resultar em menor dano e perdas econômicas.

Diversos estudos epidemiológicos vêm sendo conduzidos no país para se identificar os fatores de risco da ferrugem asiática da soja e assim poder prever o seu comportamento (REIS et al., 2004; DEL PONTE & YANG, 2006; DEL PONTE et al., 2006a; ALVES et al., 2006; ESKER et al., 2007).

Por meio de uma iniciativa coordenada pelo Ministério da Agricultura e do Abastecimento (MAPA), o Consórcio Antiferrugem, o “Sistema de Alerta” foi desenvolvido na safra 2004/05 (www.consorcioantiferrugem.net). Este consiste em uma rede de comunicação para: informar à assistência técnica pública e privada e aos agricultores sobre os problemas detectados durante a safra, orientar quanto a possíveis soluções e captar, entre os agentes de transferência e o desempenho da safra nas várias regiões produtoras. Além dos informativos, foi desenvolvido um sistema para a divulgação dos relatos de ocorrência da ferrugem da soja no Brasil, com a mobilização da rede de laboratórios credenciados ao Consórcio Antiferrugem. Para tal, um sistema computacional foi proposto baseado em três componentes: a) uma base de dados para o registro das informações de ocorrência da

doença; b) programas para inclusão e administração, geração de relatórios e consulta das informações; c) interfaces para visualização das informações requisitadas, em formato de tabela e de um mapa geográfico. O sistema contém diferentes níveis de usuários que manipulam as informações no sistema. A administração central é feita pela Embrapa Soja e a alimentação do banco de dados é totalmente descentralizada, de forma que cada um dos laboratórios participantes do consórcio (ao redor de 80) tem acesso ao sistema através de um acesso à área restrita. O mapa da dispersão da ferrugem da soja, cuja tecnologia foi reformulada para a safra 2007/08 (DEL PONTE et al., 2007) e está disponível na Internet para produtores e assistência técnica do setor público e privado que usam a informação para a tomada de decisão de manejo regional.

Na safra de 2007/08 segundo dados do Consórcio Antiferrugem (2008) foram detectados mais de 2100 focos da doença em lavouras comerciais. Iniciativas similares, porém de abrangência regional, tem sido feitas por Fundações e associações de produtores, incluindo o mapeamento de ocorrência da doença e risco estimado por modelos de previsão com base no monitoramento das condições climáticas (www.fundacaoabc.org.br).

Devido a importância de fatores abióticos, como condições favoráveis do ambiente para o desenvolvimento da ferrugem asiática na cultura da soja, muitos estudos foram desenvolvidos sobre os efeitos destes fatores e suas interações nesta relação patógeno-hospedeiro-ambiente, como, por exemplo, temperatura na sobrevivência (Kochman, 1979); temperatura na germinação de esporos (Bonde et al., 2007), interação de temperatura e molhamento foliar na infecção (Marchetti et al., 1976; Melching et al., 1989, Alves et al., 2006); temperatura na infecção (Alves et al., 2006; Bonde et

al., 2007) duração do período latente (ALVES, 2006; WILLOCQUET CARLINI, 2009), tamanho das lesões (ALVES et al., 2006), entre outros. Trabalhos como os citados acima servem como base para o desenvolvimento de sistemas de simulação utilizando a modelagem matemática.

Modelos matemáticos de previsão, implicam em uma ótima ferramenta para o auxílio à tomada de decisões. Um exemplo para o uso destes modelos é a previsão do tempo onde institutos meteorológicos como INMET rodam modelos através de simulações gerando uma previsão de tempo com mais de 95% de confiabilidade, podendo então ajudar no suporte a decisões no campo. A modelagem do efeito de variáveis climáticas no ciclo da doença é uma etapa fundamental. Diversos são os elementos do clima que exercem influência sobre o fungo e na epidemiologia da doença.

Levando em consideração a importância econômica da ferrugem asiática na cultura da soja e possuindo como base as informações anteriormente citadas, foi desenvolvida uma interface para integração de dois modelos de simulação, tendo como objetivo simular o progresso da ferrugem asiática em conjunto com o desenvolvimento da cultura soja, assim estimar o impacto na produção de grãos causada doença.

O modelo de simulação da cultura da soja CSM-CROPGRO-SOYBEAN modificado para contabilizar o impacto na produção causado pela ferrugem asiática pode responder perguntas do tipo “Qual a relevância da ferrugem asiática na região sul do Brasil”, “Qual é o impacto na produção causado por este fungo?”, entre outras, além da possibilidade de prever diferentes cenários para um mesmo sistema de produção.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Modelos Simulação de Culturas

2.1.1 DSSAT

O DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) é uma das mais conhecidas e difundidas aplicações dos modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas, sendo desenvolvido pelo projeto IBSNAT (*International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer*) junto à Universidade do Havaí a partir de 1974. O projeto IBSNAT teve duração de cerca de dez anos, resultando no aplicativo DSSAT e numa rede internacional de pesquisadores envolvidos no desenvolvimento e em teste de modelos de simulação. Atualmente é mantido pelo consórcio ICASA (*International Consortium for Agricultural Systems Applications*), que reúne um grande número de cientistas de diversas universidades e centros de pesquisa, os quais trabalham de forma colaborativa para a construção dos modelos e suas aplicações (JONES e PORTER, 2001; Jones et al., 2003; ICASA, 2010).

O DSSAT é um sistema composto por diversos modelos de simulação, esses orientados a processos, projetados para aplicações globais e que trabalham independente de local, estação e cultivar (VERHAGEN et al., 2001). É apropriado para que os estudos a longo prazo avaliem as estratégias eficientes de manejo da cultura e otimizem a produção (FARIA, 2003). O DSSAT combina dados de solo e de

clima com modelos de culturas e aplicativos a fim de simular os resultados de vários anos de estratégias no manejo de culturas (ICASA, 2010). É o resultado do trabalho colaborativo de muitos cientistas de diversas universidades e centros de pesquisa que fazem parte do consórcio ICASA (International Consortium for Agricultural Systems Applications).

Como um pacote de software, que integra os efeitos de solo, características da espécie, coeficientes genéticos, dados climáticos e opções de manejo, o DSSAT permite que os usuários possam solicitar resposta a perguntas tais como “O que...se...?” e simular os resultados de experimentos em minutos num computador, os quais poderiam consumir uma parte significativa da vida profissional de um agrônomo (ICASA, 2010).

O DSSAT é uma coleção de programas independentes que interagem entre si, no qual os modelos de simulação de culturas ficam ao centro, enquanto as bases de dados descrevem o clima, solo, observações e condições ambientais, além de informações sobre genótipos para aplicar nos modelos em diferentes situações (JONES et al., 2003). Os componentes de software do DSSAT são escritos em diversas linguagens:

- FORTRAN (modelos)
- C (shell)
- Pascal (gráficos)
- Dbase (base de dados)
- Basic (programas de gerenciamento de estratégia e risco).

O DSSAT fornece também a possibilidade de validação das saídas dos modelos, permitindo assim, que os usuários possam comparar os resultados da simulação com os resultados observados. Assim simulando diferentes estratégias de gerenciamento de culturas, oferecem ao usuário as informações necessárias para apreciar novas culturas, produtos e práticas a fim de adotá-las (ICASA, 2010).

Atualmente a suíte DSSAT é composta por 27 diferentes modelos de culturas, formada por uma coleção de programas independentes que operam em conjunto, estando inseridos numa ferramenta que facilita a criação e o gerenciamento de arquivos de experimentos, de solo e de clima. Inclui aplicações que auxiliam na análise sazonal e sequencial dos riscos econômicos e impactos ambientais associados com a irrigação, uso de fertilizantes e nutrientes, mudanças climáticas, seqüestro de carbono no solo, variabilidade climática e agricultura de precisão (JONES et al., 2003; ICASA, 2010).

O DSSAT simula o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura considerando uma área uniforme de terreno com as informações de manejo informadas ou simuladas, assim como mudanças no conteúdo da água do solo, carbono e nitrogênio que ocorrem em relação ao tempo. Possui uma estrutura composta por um programa principal, uma unidade módulo solo e os módulos para os componentes primários. A unidade módulo solo é responsável pela interface entre a aplicação e os componentes que interagem numa área uniforme de solo, ao passo que os componentes descrevem as mudanças temporais no solo e nas plantas em resposta ao clima e ao manejo (JONES et al., 2003). Cada módulo possui seis passos operacionais responsáveis pela estruturação e organização, os quais são: inicialização da execução, instalação da cultura, cálculo das taxas, integração, saídas diárias e sumário das saídas.

Dentre os componentes primários encontrados no DSSAT, como clima, solo-planta-atmosfera, CSM-CROPGRO-Soybean (modelo para a cultura da soja), planta, manejo e praga, o módulo solo é representado como um perfil unidimensional, sendo homogêneo horizontalmente e consistindo de um número de camadas verticais de solo. O módulo solo é composto por quatro sub-módulos: água no solo, temperatura do solo, carbono e nitrogênio do solo.

O sub-módulo água no solo computa as mudanças diárias no conteúdo de água do solo pela infiltração da chuva e irrigação, drenagem vertical, fluxo insaturado evaporação e processo de absorção de água pelas raízes. A infiltração de água é computada pela subtração da quantidade de água da precipitação que ocorre durante o dia, sendo o processo baseado no número da curva, que leva em conta a textura, declive e cobertura. A drenagem através do perfil é calculada com base num parâmetro assumido para que seja constante com a profundidade. Se a condutividade hidráulica saturada de qualquer camada for menor que a drenagem vertical computada, a água é acumulada na camada acima. Quando há a aplicação de irrigação, a quantidade de água é adicionada à precipitação para cálculo de infiltração e quantidade de água diária (FARIA, 2003).

O submódulo solo-planta-atmosfera é responsável por computar diariamente a evaporação do solo e transpiração das plantas; traz junto ao solo as entradas da planta e atmosfera e computa a intercepção da luz pelo dossel, a evapotranspiração potencial e a transpiração da planta.

Com o módulo praga o usuário pode entrar com as observações sobre populações de insetos ou danos em diferentes partes da planta, severidade de doenças em diferentes tecidos da planta e danos físicos

a plantas ou a seus componentes. Os efeitos da praga e/ou doença no crescimento e produção são determinados de forma empírica, por meio de uma função de dano.

Os dados mínimos exigidos pelo modelo para sua operação abrangem o local onde o modelo será operado (latitude, longitude, elevação, médias anuais de temperatura e sua amplitude etc.), dados climáticos diários do período do ciclo de crescimento (radiação solar, temperatura do ar máxima e mínima e precipitação pluvial), características do solo (características básicas das camadas do solo), condições iniciais (cultura anterior) e gerenciamento da cultura (tipo e nome do cultivar; data de plantio; profundidade; espaçamento; etc.).

Conforme VERHAGEN et al. (2001), dentro da estrutura do DS-SAT podem-se encontrar alguns modelos de simulação para diversas culturas como os seguintes:

- a família CSM-CERES de modelos: maize, wheat, (CSM-CROPSIM-wheat), rice, barley, sorghum e millet;
- a série de modelos CSM-CROPGRO para leguminosas: soybean, peanut, dry bean (*Phaseolus*);
- a série de modelos CSM-CROPSIM para culturas de raiz: CSM-CROPSIM-cassava e CSM-SUBSTOR-potato;
- outras culturas: CSM-CROPGRO-Tomato, CSM-CROPGRO-Chickpea, Sugarcane e Sunflower.

Todos os modelos de culturas compartilham um formato comum de entrada e saída e são similares em nível de detalhe, operando num passo de tempo diário; são baseados num entendimento de processos

biofísicos. Os modelos são orientados a processo, projetados para aplicações globais e trabalham independentemente de local, estação climática, cultivar e sistemas de gerenciamento. Os modelos simulam o efeito do clima, água no solo, genótipo e dinâmica do nitrogênio na cultura e no solo em relação ao crescimento da cultura e produção VERHAGEN et al. (2001).

Dentre as maiores limitações existentes no DSSAT relacionadas com os modelos de simulação de culturas estão a ausência do efeito imposto às culturas por pragas/doenças, o modo de preparo do solo, o excesso de água no solo, entre outros, deixando um campo aberto para a inserção de outros modelos, mesmo que isso implique gasto de energia para a integração dos diferentes modelos.

A função do DSSAT primeiramente foi selecionada para dar suporte aos usos dos modelos de simulação de cultura na aplicação de tomadas de decisão. A utilidade deste sistema depende da capacidade dos modelos de cultura para fornecer estimativas realistas da performance da cultura num amplo espectro de condições ambientais, práticas de manejo e na disponibilidade de dados requeridos. O primeiro lançamento do DSSAT (V2.1) continha modelos de quatro culturas: milho (Ceres-Maize V2.10), trigo (Ceres-Wheat V2.10), soja (SoyGro V5.42) e amendoim (PNUTGRO V1.02). Posteriormente, mais quatro modelos de cultura foram adicionados: arroz (Ceres-Rice), feijão (BeanGro; V1.01), sorgo (Ceres-Sorghum) e milheto (Ceres-Millet).

Esses modelos são desenvolvidos e designados para ter uma aplicação global, independente de local, época, cultivar e sistema de manejo. Os modelos simulam o efeito do clima, água do solo, cultivar, dinâmicas de nitrogênio no solo e na cultura, no crescimento e produtividade em solos bem drenados.

2.2 Modelos de Simulação de Doença

Além dos modelos de simulação voltados às culturas, muitos esforços foram realizados para o desenvolvimento de simuladores de doenças de plantas. Segundo FERNANDES (1994), dentre os primeiros relatos encontra-se o EPIDEM, para a alternariose em tomate (WAGGONER e HORSFALL, 1969), e o EPIMAY, para a queima da folha do milho (WAGGONER et al., 1972). A partir dos trabalhos citados, muitos outros modelos foram desenvolvidos para a simulação de epidemias, alguns sendo utilizados pela academia com fins educacionais e outros, para aplicações práticas em sistemas de auxílio à tomada de decisões.

Os primeiros modelos de simulação serviram para avaliar aspectos básicos da epidemiologia e identificar falhas existentes no conhecimento do sistema. Com o passar do tempo e com a evolução do conhecimento, outros aspectos foram sendo introduzidos nos modelos de simulação, como o manejo de pragas e doenças, além da tomada de decisão. A inclusão desses aspectos visa ao fornecimento de informações quantitativas da projeção da doença, permitindo que decisões de manejo sejam tomadas levando em consideração a relação custo/-benefício (FERNANDES, 1994).

Modelos de simulação de epidemias têm sido vislumbrados por muitos como uma ferramenta de utilidade para agricultores e agentes de extensão, com vistas a apoiá-los na tomada de decisão com relação ao controle da doença, podendo projetar situações e estimar a resposta do sistema ao tipo de manejo ou às alternativas disponíveis (FERNANDES, 1994; DEL PONTE, 2004).

Segundo FERNANDES (1994), a maioria dos simuladores de epi-

demias traz em si a equação da taxa básica de infecção de Vanderplank, visto que os modelos mais simples se baseiam na equação original, considerando um período latente p , um período infeccioso i e uma taxa r . A epidemia inicia com um esporo depositado numa planta suscetível germinando e , após completar o período latente, estabelecendo uma lesão, iniciando a esporular continuamente durante o período infeccioso. Durante esse período de esporulação, novos esporos são produzidos, podendo iniciar uma nova lesão, que, ao final do período latente, produzirá novos esporos, os quais podem originar novas lesões.

DEL PONTE (2006c), em seu artigo, relaciona um grupo de doze modelos de ferrugem, organizando-os em modelos de simulação (sete) e modelos empíricos (cinco). Modelos de simulação são baseados em conceitos derivados de um patossistema e ajudam a melhorar o entendimento da estrutura e comportamento de um sistema biológico. Por sua vez, modelos empíricos são tipicamente construídos através de relacionamentos estatísticos de variáveis explanatórias com dados experimentais.

Entre os modelos de simulação relacionados por DEL PONTE (2006) estão o SOYRUST e o CLIMEX como modelos epidemiológicos, e o HYSPLIT e o SRAPS, como modelos aéreo-biológicos. Os modelos aéreo-biológicos mostram-se importantes quando se necessita controlar a entrada de uma nova praga numa determinada área. Como exemplo, pode-se citar a necessidade de monitoramento da ferrugem da soja nos Estados Unidos da América, o que fez com que grupos de pesquisadores desenvolvessem um grande número de modelos de simulação (MAGAREY, 2007).

Portanto, uma descrição sucinta de alguns modelos relatados por

DEL PONTE (2006) pode ser encontrada abaixo:

- SOYRUST - É um modelo de simulação para a ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), desenvolvido para avaliar epidemias da doença, simulando o aumento diário da severidade da doença em duas variedades: reflete o efeito ambiental do ciclo da epidemia, a fim de prever o desenvolvimento, em passos diários. As equações que descrevem os efeitos ambientais nos componentes da doença foram desenvolvidas para racionalizar dados coletados, com vistas a obter um método de avaliação do sistema. As taxas de infecção foram preditas utilizando o orvalho e a temperatura após a inoculação como variáveis independentes ($R^2 = 0,88$, $P < 0,0001$). Os modelos exponenciais, que usaram dia fisiológico como uma variável independente, explicaram 98% das variações do período latente e senescente das lesões da doença (YANG, 1991; DEL PONTE, 2006).
- CLIMEX - É um modelo computacional utilizado para avaliar o efeito das mudanças climáticas em processos biológicos. Permite a estimativa da distribuição geográfica potencial e a abundância sazonal de uma espécie em relação ao clima. Os modelos do CLIMEX consistem num conjunto de parâmetros que definem as condições ideais de temperatura e umidade, os quais permitem o crescimento populacional de uma determinada espécie durante uma estação favorável, e um conjunto de parâmetros de estresse, que definem sua habilidade para sobreviver em estações desfavoráveis (SUTHERST, 1985; MCCLAY, 2005; DEL PONTE, 2006).
- HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) - É um modelo que simula a simples trajetória de par-

tículas, sua dispersão, concentração e deposição, originado de uma determinada localização geográfica e período do ano. É um modelo de dispersão para simular o transporte a longa distância de esporos de *Phakopsora pachyrhizi* utilizando prognósticos climáticos de um mês. É o resultado do trabalho cooperativo do NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) e BOM (Australia's Bureau Of Meteorology) (DEL PONTE, 2006; NOAA, 2007).

- SRAPS - (Soybean Rust Aerobiology Prediction System) - É um modelo modular que trata da maioria dos estádios dos processos aerobiológicos, como a produção de esporos, sua liberação e saída do dossel, mortalidade e deposição em regiões alvo. O modelo requer como dados de entrada informações sobre a localização geográfica do inoculo (DEL PONTE, 2006).

Em ARIS (2000) encontra-se a descrição do desenvolvimento de um modelo de simulação para a mancha da gluma do trigo. O modelo foi criado e adaptado para as condições climáticas prevalentes na Carolina do Norte, EUA, utilizando dados climáticos diários, com o objetivo de ser utilizado posteriormente para toda a região. A metodologia principal utilizada neste trabalho foi a adição de um modelo de doença a um modelo de crescimento de uma cultura já existente, neste caso o CERES-Wheat, do qual saídas (área foliar) serviram de entrada para o modelo doença.

2.2.1 Modelo Genérico de Doenças

PAVAN (2007) relata em seu estudo a utilização do modelo CropSim-Wheat para a modelagem e simulação de doenças. PAVAN

(2007) utilizou o modelo para o patossistema ferrugem da folha do trigo, onde o autor incorpora ao modelo de crescimento de trigo o módulo doença. Para o desenvolvimento deste modelo genérico, foram utilizadas as mais variadas e heterogêneas tecnologias. Tomou-se por base o ciclo de vida do patógeno, criando uma estrutura facilmente parametrizável, buscando, dessa forma, obter os resultados esperados. Como os modelos necessitam de integração (modelo de crescimento do trigo e do progresso da doença), todo processamento se dá pela troca de dados sobre o número de folhas criadas e a área disponível sobre cada uma (área sadia) naquele instante e pela informação sobre a área que a doença está utilizando (área infectada). O modelo é composto pelos módulos:

- Simulador;
- Condições iniciais;
- Planta;
- Órgão;
- Doença;
- Núvem - quantidade de esporos disponíveis para novas infecções;
- Núvem do Órgão;
- Núvem da Planta;
- Núvem do Campo;
- Grupo de Lesões;
- Interface com o Usuário;

- Interface com o R;
- Interface implementada pelos demais módulos;
- Clima;
- Estatísticas.

desenvolvidos como classes da linguagem Java, os quais descrevem as características do grupo que representam, estando organizadas de forma hierárquica a fim de representar o modelo da forma mais próxima possível da realidade. O modelo é de passo diário, alimentando-se de dados climáticos armazenados em bancos de dados, tanto prognósticos como observados e capturados de estações meteorológicas. Cada componente do modelo é entendido como um objeto ou um grupo de objetos, ou seja, uma entidade virtual que representa as características essenciais da entidade real (PAVAN, 2007). O modelo de simulação do patossistema Puccinia-Trigo simula corretamente o crescimento da área foliar do trigo e o progresso da ferrugem da folha, apresentando-se como uma excelente alternativa, para o estudo das relações entre o patógeno e o hospedeiro. O modelo foi desenvolvido com o objetivo de abranger um maior número possível de doenças (genérico), de forma que estas pudessem ser parametrizadas a fim de representar o mais realisticamente possível as observações feitas em campo. Nesse sentido, modelos de simulação como o proposto são de grande valia para o entendimento dos processos em funcionamento, como o impacto das doenças no rendimento (PAVAN, 2007).

WILLOCQUET e SAVARY (2004) apresentam um modelo de simulação epidemiológico integrando três escalas organizacionais de populações em plantas hospedeiras, sendo elas pequenas áreas (sítios), folhas e plantas inteiras. O modelo tem como objetivo, incorporar

essas escalas numa estrutura espacial hierárquica de uma epidemia, utilizando taxas de auto-deposição, deposição de um propágulo produzido numa lesão localizada na própria folha, e allo-deposição, deposição de um propágulo produzido numa lesão localizada em outra folha da mesma planta ou outra planta. Com um passo diário, o modelo simula o ciclo de infecção na escala do sítio, da folha e da planta. Na escala do sítio, o modelo distingue três tipos de infecções: (i) infecções de áreas localizadas na folha doente, (ii) infecções de áreas pertencentes a folhas sadias de uma planta infectada e (iii) infecções de áreas localizadas em plantas sadias. A distinção destes três tipos de infecções permite a incorporação de parâmetros epidemiológicos para a propagação da doença em diferentes escalas, assim como as taxas de auto-deposição e allo-deposição dos propágulos (WILLOCCQUET e SAVARY, 2004). Para o sítio, mais baixa escala, o modelo simula a dinâmica das áreas livres, latentes, infecciosas e removidas, considerando que não há propágulos vindos de fora, que o número de áreas, folhas e plantas não muda no tempo e que não há expansão das lesões. Além de fornecer uma base para avaliar a eficiência potencial do uso de diferentes cultivares com suscetibilidade e resistência num patossistema, fornece uma maneira de investigar os efeitos da interação entre a arquitetura do hospedeiro e a disseminação do patógeno na dinâmica da epidemia (WILLOCCQUET e SAVARY, 2004).

2.2.2 DESSAC

A ferramenta DESSAC (Decision Support System for Arable Crop) foi implementada no Reino Unido para aprimorar o uso racional de fungicidas em áreas de trigo. Este objetivo foi alcançado pelo desenvolvimento de um software de computador baseado num sistema de suporte de decisão (DSS) para ajudar nas tomadas de decisões no

controle de doenças de trigo de inverno.

Os sistemas de suporte de decisão fornecem informações relevantes para a decisão e permitem aos usuários perguntas do tipo: “O que se.....?” ou seja, questionamentos para testar as consequências de diferentes decisões. O modelo de doenças de trigo foi desenvolvido como um sistema que opera em um software específico (DESSAC Shell), capaz de operar um número de sistemas de suporte de decisões para produção de culturas (BROOKS, 2001). Entretanto, essa ferramenta é composta por vários modelos, dentre os quais está inserido também o modelo de crescimento e desenvolvimento de doenças, que simula as principais doenças foliares de trigo de inverno como: septória, ferrugens, oídio entre outras. O modelo simula a infecção e o progresso da doença nas seis últimas folhas do dossel. A estrutura do modelo genérico inclui os efeitos de resistência dos cultivares no crescimento da doença e, portanto, são descritas as características das doenças. Quando possível os fatores ambientais são quantificados através de dados publicados. Os parâmetros remanescentes são montados a partir de dados experimentais de progresso de doença para investigar os efeitos do ambiente no desenvolvimento epidêmico. A produtividade é afetada primeiramente pela ocorrência de doença nas folhas superiores do dossel da planta e, por esta razão, são modeladas apenas as seis folhas superiores do dossel (BROOKS, 2001). Os níveis de doença são simulados pela construção de uma série de infecções diárias que são dependentes do tempo de desenvolvimento da planta, condições climáticas e qualquer aplicação de fungicida que tenha sido realizada. A taxa de desenvolvimento da doença é em grande parte controlada pela temperatura (KING, 1983), assim o crescimento de uma infecção é modelada em função do tempo térmico. A expressão do evento de uma única infecção é seguida pela solução da equação logística

$dy/dT=8y(1-y)$ com $y(0)=a$ onde, y é a porcentagem de doença na folha com o tempo térmico T ($^{\circ}\text{C}$ dias, base zero). O modelo logístico foi utilizado para representar o progresso da doença tanto numa escala de campo como também na escala de planta. Os níveis de infecção numa folha da planta dependem da quantidade da fonte de inóculo, a distância entre o alvo e a fonte, condições ambientais, resistência de cultivares e o efeito de proteção de qualquer aplicação de fungicida.

O objetivo do modelo é de estimar o risco de ocorrência de doença utilizando dados ambientais diários. Dados experimentais são utilizados para obter uma eficiência de infecção devido às condições ambientais, que combina o seu impacto na esporulação, transmissão e germinação. Com exceção da resistência de cultivares, o efeito de cada um desses fatores diferem entre as doenças, porém apresentam um comportamento funcional semelhante. O efeito da resistência de cultivares é quantificado pelo grau de resistência a doença (1=suscetível e 9=resistente).

O modelo de simulação de doenças de trigo, associado a um mecanismo genérico de simulação de cultura (DESSAC Shell) fornecem um ambiente dentro do qual estão inseridas informações independentes e relevantes para que o técnico ou o produtor possam tomar as melhores decisões referentes a produção da cultura. Este modelo possibilita a adição de novos dados para atualizar o sistema dos modelos e as bases de dados. O objetivo específico do projeto, os quais têm sido alcançados, foram: desenvolver um mecanismo genérico para o suporte de tomadas de decisões (DESSAC Shell) na produção de culturas, e desenvolver um sistema de suporte de decisões específico que permite a utilização racional de fungicidas no controle de doenças no trigo de inverno (BROOKS, 2001). Entretanto, percebe-se que existe uma ampla gama ferramentas e modelos de simulação sendo utiliza-

das nas mais diversas culturas e com finalidades bastante distintas. Porém, essas ferramentas ainda podem alcançar um maior espaço no cenário agrícola nacional e mundial, auxiliando nas tomadas de decisões e, conseqüentemente, contribuindo para o aumento da produção e da produtividade de culturas.

Entre os fatores que limitam a produção da soja destaca-se a ocorrência de um elevado número de doenças como a ferrugem asiática que varia de intensidade de ano para ano de acordo com as condições climáticas existentes. A ferrugem asiática da soja nos locais mais atingidos pelo fungo pode causar reduções de rendimento de grãos estimadas entre 30% e 70% (COSTAMILAN et al., 2002).

Estimar danos através de observações de doenças é extremamente difícil. A severidade dos sintomas visuais pode ser resultante de diferentes alterações na fisiologia da planta; o efeito depende do que aconteceu com a planta no passado, o que está acontecendo no presente e o que vai acontecer no futuro. Portanto, uma possível estratégia de prever danos é o emprego da simulação que usa modelos matemáticos de crescimento da planta em relação ao ambiente em que a planta se encontra e também, simula as alterações, produzidas pelo patógeno, no crescimento, na fisiologia e as conseqüências no rendimento (SHAW, 1997).

Porém, o desenvolvimento de modelos de simulação necessita de muito trabalho de obtenção de dados. Para progredir é preciso presumir efeitos e testá-los para ver quanto próximo estamos da situação real. Para as doenças foliares, por exemplo, é razoável supor que a maioria dos efeitos possam ser atribuídos aos sintomas visuais e proporcionais a intensidade dos sintomas. Infelizmente, esta suposição não é verdadeira em todos os patosistemas.

2.3 Abordagens de Integração de Modelos

Os modelos construídos no passado muitas vezes atendem as necessidades atuais dos cientistas na forma em que foram concebidos. Por outro lado, em sua maioria existe a necessidade de que estes modelos sejam modificados para contabilizar outros fatores de influência de maneira que sejam ainda mais próximos do sistema real em estudo. Portanto, o acoplamento de modelos, partindo do ponto de reutilização de código legado (sistemas de simulação já consagrados, testados, validados e aceitos pela comunidade científica) torna-se uma ferramenta poderosa e útil.

A construção de estruturas de integração entre modelos de simulação era normalmente um caminho cheio de espinhos e incertezas, pois não existiam padrões de desenvolvimento, e em cada estudo relatado criava-se uma nova estrutura de acoplamento. Na maioria dos casos relatados na literatura, a construção da integração dependia basicamente do conhecimento prévio do cientista com a estrutura do modelo em estudo, assim facilitando a etapa de identificação dos pontos de acoplamento para incorporação de novos módulos ou mesmo de outro modelo de simulação. Em contraste, esta tarefa é de complexidade elevada para o cientista que não tenha intimidade com o modelo, pois para o desenvolvimento de uma interface na maioria dos casos de integração é necessário um completo e detalhado conhecimento dos modelos os quais desejam ser integrados.

Hoje, a construção de novos modelos tente à seguir algumas características, tais como a modularização dos processos envolvidos, na qual os módulos do modelo tendem a ser fracamente acoplados facilitando a substituição ou o reaproveitamento, e a integração de qualquer módulo sem comprometer a estrutura global do modelo. Entretanto,

a maioria dos modelos desenvolvidos no passado não segue estes padrões e necessitam serem estudados a fundo para que esta tarefa seja possível.

Alguns aspectos importantes devem ser abordados em uma integração entre modelos. Entre estes destacamos, por exemplo, a identificação de modelos apropriados, especificação das interações (conversões de dados, tipos de variáveis, etc), e a verificação da possibilidade de integração dos códigos fontes. Uma vez ultrapassada esta etapa há a necessidade de escolher a abordagem de integração mais apropriada e, então, implementar a acoplagem entre os modelos.

Os aspectos metodológicos da escolha de uma abordagem apropriada de integração para os modelos em estudo, é extremamente importante para implementar a integração. Isto se deve ao grau de complexidade muitas vezes envolvido no processo de interação.

BULATEWICZ (2006) apresentou algumas das abordagens mais utilizadas para a integração de modelos de simulação, tais como a monolítica, programada (agendada), orientada a componentes e orientada a comunicação, estas, as quais estão descritas a seguir:

2.3.1 Abordagem Monolítica

A abordagem monolítica é definida como a criação de um programa através de um único código fonte, onde encaixando fragmentos de código fonte de dois ou mais modelos, desenvolve-se um novo modelo customizado, este sistematizado na figura 1.

Ao trabalhar com este tipo de abordagem, obtemos um certo grau de facilidade no momento da integração dos códigos dos modelos, pois trabalha-se apenas com uma única linguagem de programação. Outro



Figura 1: Códigos dos modelos são limpos para criarem novos códigos de modelos (modificado de BULATEWICZ, 2006).

ponto importante a ser destacado é o controle sobre todos os detalhes do código fonte do modelo tais como, sua estrutura de controle, formatos de entrada e saída de dados, tipos de dados, alocação de memória, formatos de entrada e saída, etc.

Existem alguns aspectos que podem dificultar a aplicação deste tipo de abordagem tais como, a necessidade de um completo entendimento da constituição do modelo, a dificuldade de trabalhar com códigos legados (pela razão dos modelos possuírem pouca documentação ou não possuírem e serem pobremente comentados), e por fim dificuldades na aplicação de técnicas de engenharia de software, tais como testes, verificações, atualizações, entre outras.

2.3.2 Abordagem Programada

Na abordagem programada, os modelos permanecem como programas independentes, não afetando um ao outro em tempo de execução, isto significa que, a saída de dados de um modelo integrado dentro desta abordagem é utilizada como entrada de dados para outro modelo.

A aplicação desta abordagem, fornece um automatizado caminho

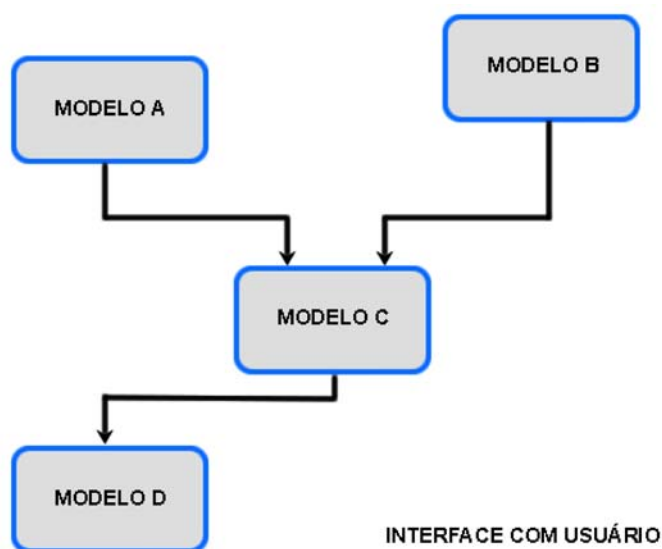


Figura 2: Entradas e saídas dos modelos são conectadas (modificado de BULATEWICZ, 2006).

para o cientista selecionar os modelos e os conjuntos de dados, além disso, pode-se especificar a distribuição dos conjuntos de dados e a ordem de execução dos modelos na integração. Entretanto, diferentes interfaces entre modelos necessitam do desenvolvimento de padrões (para que seja possível a troca de dados através das interfaces), tais como a transformação de dados (mesmas unidades de medidas), que exige a substituição de todas as entradas e saídas dos modelos que não sigam os mesmo padrões.

2.3.3 Abordagem Orientada a Componentes

Similar a abordagem monolítica em que o resultado da integração é um único modelo. Esta abordagem decompõe os códigos dos modelos em componentes de software, no qual os componentes são sub-rotinas modulares e reutilizáveis. A modularidade significa que os componentes podem ser escritos com pouco conhecimento de ou-

tros componentes do modelo, e que eles podem ser independentemente substituídos sem significantes mudanças no resto do modelo. A reutilização significa que um componente pode ser utilizado em uma variedade de situações sem necessidade de desenvolver alterações no componente.

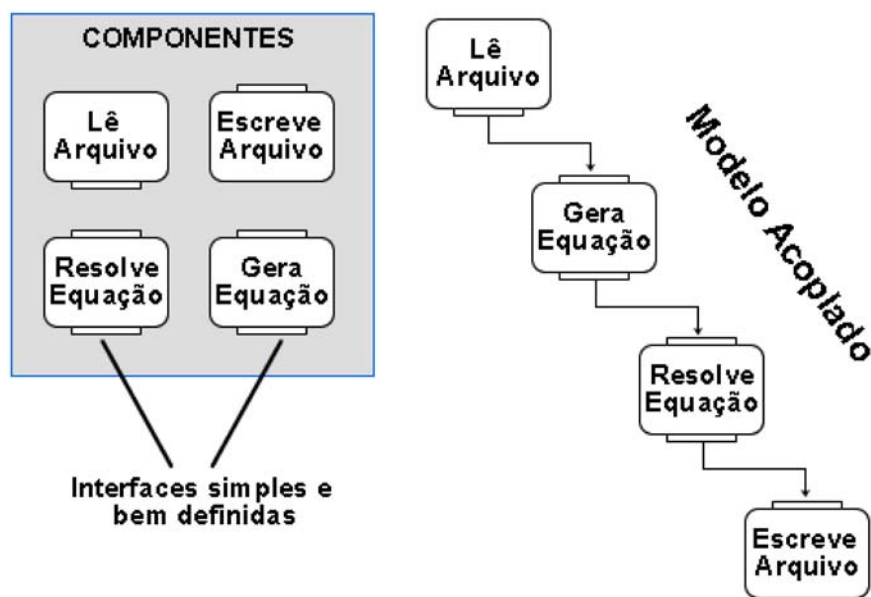


Figura 3: Componentes são conectados para criação de modelos (modificado de BULATEWICZ, 2006).

A computação que os componentes executam é encapsulada dentro do componente, onde o cientista necessita apenas conhecer os tipos de dados utilizados na entrada e saída do componente. Com a utilização de componentes, é possível facilmente aplicar técnicas de engenharia de software tais como, testes, atualizações, comparações e verificações, entre outras. Componentes são facilmente agregados, reagrupados em novas construções e podem ser reutilizados em composições futuras.

Ao utilizar esta abordagem de acoplamento de modelos com có-

digos legados, ainda existe a necessidade de conhecer completamente e detalhadamente os códigos dos modelos, além de ser necessário conhecer a ordem de execução do modelo em uma possível conversão para componentes, conversão esta que exige grande reprogramação dos códigos existentes, porém, na maioria das vezes, esta conversão é inviável.

2.3.4 Abordagem de Comunicação

A abordagem de comunicação é a mais complexa, porém a mais utilizada, pois propicia a integração de códigos legados com tecnologias mais atuais aumentando assim a vida útil do modelo legado.

Os códigos dos modelos dentro desta abordagem permanecem independentes, porém interagem através da troca de dados via mensagens durante o processo de execução. As funções primárias de uma interface de troca de dados, a qual segue a abordagem orientada a comunicação, são a constituição dos fluxos, a transformação de dados, e algumas vezes pode controlar a inicialização do modelo ou traçar o estado global da integração.

Modelos desenvolvidos com esta abordagem podem ser classificados pelo uso ou não de aplicações independentes que intermediam a execução e a comunicação entre modelos. Sem a utilização de aplicações independentes (sem interface de acoplamento) são consideradas bibliotecas de transferência de dados, rotinas customizadas para conversão de dados e definição do estilo de comunicação utilizados pelos modelos. Com a utilização de aplicações independentes (com interface de acoplamento), possuem bibliotecas de comunicação que suportam diretamente a interface modelo a modelo tão bem como suportam a interface modelo a interface de acoplamento. Em ambas classificações

as bibliotecas necessitam da conversão dos dados do modelo dentro de um padrão.

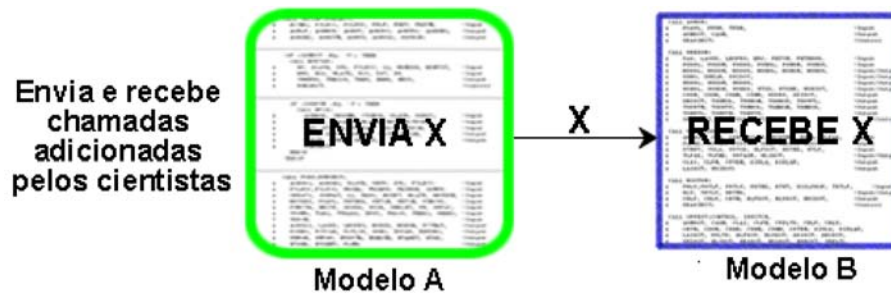


Figura 4: Modelos são modificados então eles podem trocar dados em tempo de execução (modificado de BULATEWICZ, 2006).

A abordagem orientada a comunicação evita a reescrita substancial de códigos fontes necessária pelas abordagens monolítica e de componentes, porém, ainda há a necessidade de conhecer detalhadamente os códigos do modelo para trabalhar no acoplamento, o processo de acoplamento deve ser repetido em cada nova interface, e por fim, inconsistências na comunicação podem interferir nos resultados do modelo.

O cientista ao conhecer algumas abordagens de integração, torna mais fácil a experimentação com diversos modelos, facilitando a construção e reduzindo esforços.

O desempenho na execução de modelos integrados depende de como é desenvolvida a troca de dados, caso esta interface for requisitada frequentemente e existirem muitos passos para a negociação destes dados, isto pode acarretar em uma drástica desaceleração no tempo de execução do modelo.

A abordagem orientada a componentes, demonstra ser o caminho ideal para a construção de novos modelos se componentes estiverem

disponíveis para tal construção, caso contrário esta abordagem não é ideal para acoplar modelos existentes. Bulatewicz ainda descreve que a abordagem de comunicação permite que modelos existentes sejam acoplados com mínimas mudanças nos códigos fontes.

CAPÍTULO I

IMPLEMENTANDO À INTEGRAÇÃO DE MODELOS DINÂMICOS

João Eduardo Pedrini Faculdade de Agronomia e Medicina
Veterinária Universidade de Passo Fundo C.P. 611,99001-970

RESUMO

Quantificar o impacto da ferrugem asiática da soja sobre o rendimento é de grande interesse. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos, representando a relação entre a produção e a intensidade da doença. Estes modelos, reconhecidamente úteis, são baseados em relações empíricas determinadas em campo ou em condições controladas. Por outro lado, o modelo CSM-CROPGRO-Soybean contido DSSAT (*Decision Support System for Agro-Technology Transfer*) simula o crescimento e desenvolvimento da planta desde o plantio até à maturidade usando um passo de tempo diário, e, finalmente, prevê o rendimento. O modelo CSM-CROPGRO-Soybean como a maioria dos modelos de simulação de culturas foi desenvolvido em linguagem FORTRAN. Portanto, um dos principais desafios para a comunidade de desenvolvedores de modelos de simulação é a integração de modelos científicos criados por grupos diferentes, que devem ampliar a utilidade dos modelos. No acoplamento os novos aspectos que devem ser considerados incluem a identificação de modelos adequados, especificações das interações e da possibilidade de acoplamento dinâmico códigos de fonte diferente. Portanto, há uma necessidade de construir um componente estrutural que contém a interface e os protocolos de comunicação entre os componentes do sistema. Além dessas etapas, é necessário escolher uma abordagem adequada para o casal de modelos. Integrar diferentes aspectos de um modelo de simulação de culturas que imita o crescimento e desenvolvimento

das contas de soja e também para os impactos ferrugem asiática da soja sobre o rendimento deve ser útil para analisar e implementar práticas de manejo da doença. Utilizando diferentes técnicas de programação e de abordagens de engate foi possível desenvolver uma versão modificada CSM-CROPGRO soja, que respondeu à ferrugem intensidade. A determinação das melhores práticas para alcançar altas produtividades, enquanto ambientalmente e economicamente sustentável é uma informação valiosa para os planos estratégicos no Brasil e em outros lugares.

Palavras chave: Integração de Modelos, CSM-CROPGRO-Soybean, modelo genérico de doenças, ferrugem da soja, Java, C, Fortran.

ABSTRACT

Quantifying the impact of Asian Soybean rust on yield is of great interest. Mathematical models have been developed representing the relationship between disease intensity yield. These models, admittedly useful, are based on empirical relationships determined either under field or controlled conditions. By the other hand, the CSM-CROPGRO-Soybean model contained within DSSAT (*Decision Support System for Agro-Technology Transfer*) simulates plant growth and development from sowing to maturity using a daily time step, and ultimately predicts yield. The CSM-CROPGRO-Soybean model like the majority of crop simulation models was developed in FORTRAN. Therefore, one of the main challenges to the crop simulation models community is the integration of scientific models created by different groups, which should expand the usefulness of the coupled new model. In coupling, aspects that should be considered include the identification of appropriate models, specifications of interactions and the possibility of dynamic coupling different source codes. Therefore, there is a need to build a structural component containing the interface and the communication protocols between the components of the system. Beyond these stages, it is necessary to choose an adequate approach to couple the models. Integrating different aspects of a crop simulation model that mimics the growth and development of soybean and also accounts for the Asian Soybean Rust impacts on yield should be useful for analyzing and implementing disease management practices. Using different techniques of programming and coupling approaches was possible to develop a modified CSM-CROPGRO-Soybean that responded to rust intensity. The determination of best practices for achieving high yields while environmentally and economically sustainable is valuable information for strategic plans in Brazil and elsewhere.

Key Words: Integration of models, CSM-CROPGRO-Soybean, model generic of diseases, soybean rust, Java, C, Fortran.

Introdução

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill], é uma das principais culturas na agricultura mundial e brasileira em função da produtividade e do valor nutritivo encontrado nos grãos, com diversas aplicações na alimentação humana e animal, bem como no papel sócio econômico, impulsionando de forma significativa o agronegócio. Danos no rendimento de grãos podem ser causados por diversos fatores como, por exemplo, climáticos, tais como, seca, geada, chuva excessiva, granizo, fortes ventos, etc. Diferentes fatores também devem ser mencionados como os agronômicos (espaçamento, adubação, irrigação, entre outros) e fatores bióticos como pragas e doenças.

Entre os fatores bióticos, destaca-se a ferrugem asiática da soja, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi* que segundo DEL PONTE et al. (2007) as perdas e o impacto causada por esta doença, desde que foi identificada nas principais regiões produtoras de soja nos continentes americanos, principalmente no Brasil, as colocam no patamar de doença mais importante da cultura no Brasil.

Nos últimos anos, as epidemias de ferrugem asiática da soja atingiram níveis severos em várias regiões produtoras de soja no Brasil causando danos significativos na produção e sérias perdas econômicas. A intensidade das epidemias tem sido extremamente variável entre anos e dentro de cada uma dessas regiões, sendo que os ataques mais severos normalmente ocorrem sob condições climáticas favoráveis à doença, associadas com falhas de manejo da cultura, podendo levar a um aumento de duas a três vezes no número de aplicações de fungicidas. Segundo estimativas recentes, os danos na produtividade pela ferrugem asiática somaram aproximadamente 4,5% da safra brasileira de soja em 2006/07, o que equivaleu a 2,67 milhões de toneladas

de grãos. Somando-se o custo da operação de controle, o custo total da ferrugem asiática na safra 2006/07 foi estimado em U\$ 2,19 bilhões (SCHERM et al., 2009).

Por um longo tempo tem havido um grande interesse em quantificar o impacto das doenças de plantas no rendimento das culturas (MADDEN et al., 2000), e muitos modelos matemáticos foram publicados mostrando a relação entre a intensidade de doença e o rendimento das culturas (MADDEN e NUTTER, 1995). Estes modelos, reconhecidamente úteis, são baseados em relações empíricas determinadas em situações de campo ou em condições controladas.

Entretanto, vários são os fatores que isolados ou interagindo entre si contribuem para as doenças ocasionarem danos no rendimento das culturas. Entre os tanto fatores podemos destacar o momento da infecção, a idade do tecido, o estágio de desenvolvimento da cultura, a composição genética do hospedeiro, os aspectos nutricionais do hospedeiro, a agressividade do patógeno e as condições do ambiente. Por isso, as relações empíricas muitas vezes falham ao tentar explicar o impacto das doenças no rendimento das culturas quando usadas em condições muito diferentes daquelas onde foram determinadas (FERNANDES e MAFFIA, 1994).

Por outro lado, modelos baseados em processos são muito úteis para o aprendizado sobre o sistema. Neste sentido, podemos considerar um sistema como um conjunto de componentes que constituem um todo do mundo real mas ainda separados por linhas divisórias bem definidas (JONES e LUYTEN, 1998). Um patossistema é um sistema composto do patógeno, da planta e o ambiente que interfere na relação entre o patógeno e a planta. A doença é capaz de progredir somente quando as condições providas pelo hospedeiro são favoráveis

e o patógeno presente é virulento. O entendimento dos componentes epidemiológicos tem como finalidade determinar os principais fatores que governam a epidemias e assim poder prever o curso do progresso da doença. Assim, as epidemias caracterizam-se por um processo integrado entre a planta, o ambiente e o patógeno. Portanto, um modelo de doenças precisa considerar a resposta da planta ao ambiente. Por exemplo, ao estimar o dano no rendimento devido a uma doença que causa lesões no limbo foliar requer a quantificação da redução na interceptação da radiação solar para o processo de fotossíntese, a redução na eficiência do uso da radiação solar, a desfolha, etc.

Uma das mais conhecidas e difundidas aplicações dos modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas dá-se na integração de sistemas de suporte à tomada de decisão na agricultura. Este é o caso do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), desenvolvido pelo projeto IBSNAT (*International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer*) junto à Universidade do Haváí (JONES et al., 1989). O projeto IBSNAT teve duração de cerca de dez anos, resultando no aplicativo DSSAT e uma rede internacional de pesquisadores envolvidos no desenvolvimento e teste de modelos de simulação. O sistema DSSAT engloba, além dos modelos de simulação de culturas, um sistema gerenciador de base de dados e um módulo de aplicativos, para a avaliação de estratégias tecnológicas, via simulações de longo prazo. As maiores limitações existentes no DSSAT são aquelas relacionadas com os modelos de simulação de culturas, entre elas a ausência do efeito imposto às culturas por pragas, modo de preparo do solo, excesso de água no solo, entre outros (BOOTE et al., 1996). O DSSAT incorpora 27 modelos de simulação de culturas. Todos os modelos usam os mesmos módulos de simulação do balanço de água no solo e de nitrogênio. Dentre

os modelos de simulação que compõe o DSSAT, destaca-se o CROPGRO, que é um modelo genérico para leguminosas e permite a simulação do crescimento e desenvolvimento da soja, amendoim e feijão, entre outras. A utilização de simulações do modelo CROPGRO na análise dessas variáveis sobre o crescimento, desenvolvimento e produtividade da soja pode contribuir para o manejo mais adequado da cultura e para melhor compreensão das interações entre as condições climáticas e a cultura, bem como, melhorar a qualidade e reduzir o tempo nas tomadas de decisões (JONES et al., 2003).

O modelo CROPGRO consiste de códigos escritos em FORTRAN e todos os atributos relacionados a espécies como a soja e outras são informados em arquivos externo. O modelo CROPGRO é uma nova geração modelo em várias outras formas. Um sub-rotina foi incorporada para expandir a capacidade de o CROPGRO estimar danos no rendimento devido a pragas (BATCHELOR et. al., 1993). O dano da praga é caracterizado de acordo com o efeito causado e a resposta da planta (BOOTE et. al., 1983). Para usar este módulo é necessário monitorar e quantificar a praga, portanto, o dano não é simulado dinamicamente com base nas condições ambientais. Assim, o módulo permite que o modelo CROPGRO contabilize algum tipo de dano devido a certas pragas desde que tenham sido monitoradas e quantificadas no passado.

LOOMIS (1985) e SELIGMAN (1990) observaram que os modelos de culturas hoje existentes são aparentemente o reinvento da roda. Segundo os autores seria melhor que, os modelos existentes fossem mais direcionados para um determinado problema e, então aperfeiçoados pela comunidade científica ao invés dos cientistas criarem novos modelos. As carências encontradas nos modelos epidemiológicos e de crescimento e desenvolvimento de culturas, e a reutilização de modelos lega-

dos, provavelmente foi levada em consideração por KOO (2001), onde trabalhando com o modelo CSM-CROPGRO-TOMATO, modelo de crescimento e desenvolvimento da cultura do tomate, integrou um modelo de doença denominado FODIS-TMEB, o qual simula o progresso de epidemia para o patossistema pinta-preta do tomateiro (*Alternaria solani*). O modelo foi calibrado e validado por KOO(2001), obtendo resultados muito similares aos valores observados.

PAVAN e FERNANDES 2009 desenvolveram um modelo genérico de simulação de doenças de plantas. Este modelo foi parametrizado para para simular o progresso da ferrugem da folha do trigo (*Puccinia triticina*), e acoplado com um modelo de crescimento e desenvolvimento da cultura do trigo (CSM-CROPSIM-WHEAT) presente no sistema DSSAT. O modelo foi validado por MALLMANN (2009), onde foi mostrado que simula corretamente o crescimento da área foliar do trigo e o progresso da ferrugem da folha, apresentando-se como uma excelente alternativa, para o estudo das relações entre o patógeno e o hospedeiro. Uma das vantagens na integração de modelos proposta por PAVAN e FERNANDES (2009), é a capacidade de simular múltiplas doenças de forma que estas pudessem ser parametrizadas a fim de representar o mais realisticamente possível as observações feitas em campo. Nesse sentido, modelos de simulação como os propostos são de grande valia para o entendimento dos processos em funcionamento, como o impacto das doenças no rendimento.

O desenvolvimento de modelos matemáticos e simuladores aplicados à agricultura permitem ao usuário posicionar-se como um experimentador do sistema real. Este pode operar um modelo desse sistema que possibilite a criação de cenários alternativos para o problema em estudo e permita seu entendimento em situações atípicas, ou não vivenciadas na prática. Tais situações permitem a realização de testes

laboratoriais e de campo mais direcionados, reduzindo gastos e assegurando a avaliação dos impactos ambientais decorrentes de práticas agrícolas em estudo. Eventualmente, modelos e simuladores, desde que devidamente validados, podem possuir utilidade prática para a previsão e manejo de risco de doenças de plantas, uma vez que implementados na forma de plataformas tecnológicas.

Um dos principais desafios para a comunidade de desenvolvedores de modelos de simulação de culturas é a integração de diversos modelos científicos criados por diferentes grupos. Em geral, cada modelo simula um determinado processo sendo mantido por especialistas que também foram os responsáveis pelo desenvolvimento do modelo. Portanto, é necessário construir um componente estrutural contendo a definição da interface e os protocolos que permitam a comunicação entre os componentes do sistema. O objetivo do presente trabalho foi integrar diferentes aspectos de dois modelos eficientes para proporcionar a representação do crescimento e desenvolvimento da cultura da soja considerando os efeitos da ferrugem asiática para teste de cenários futuros e análise.

Material e Métodos

Modelos

Os modelos de interesse deste trabalho foram desenvolvidos em linguagens de programação totalmente distintas pelos seus idealizadores, o primeiro modelo, o CSM-CROPGRO-Soybean foi desenvolvido em linguagem FORTRAN e o segundo o modelo genérico de doenças foi desenvolvido em linguagem Java.

Modelo CSM-CROPGRO-Soybean

O modelo CSM-CROPGRO-Soybean, está contido no pacote do sistema DSSAT, que através de alguns parâmetros de entrada como, por exemplo, genótipos de cultivares, datas de semeadura, características do solo, dados climáticos, entre outros, simula o desenvolvimento fenológico da soja, operando em um intervalo de tempo diário, embora alguns processos internos, tais como o cálculo do desenvolvimento e da fotossíntese, são tratadas em um passo a cada hora. O modelo simula o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo em função da temperatura, fotoperíodo e interação com a seca e outros fatores de estresse. O modelo prevê o número de nós na haste principal, a altura do dossel, diâmetro da copa, enraizamento de profundidade, e a ocorrência de cada estágio de crescimento, incluindo a germinação, emergência, a floração, antese, a ocorrência da primeira vagem e primeira semente, maturidade fisiológica, e maturidade de colheita (BOOTE et al., 1998).

Este modelo possui diversas sub-rotinas que são ligadas entre si, onde cada uma contém os códigos dos modelos que efetuam os cálculos do desenvolvimento e crescimento da cultura da soja. Em análises desenvolvidas das sub-rotinas do modelo, uma foi destaque para a integração, a sub-rotina PEST, a qual foi desenvolvida por seus idealizadores para calcular o dano causado por pragas inserindo dados observados sobre população de insetos ou danos em diferentes partes da planta, severidade de doenças em diferentes tecidos da planta e danos físicos a plantas ou seus componentes. Os efeitos da praga e/ou doença no crescimento e produção são determinados de forma empírica, por meio de uma função de dano. Como esta sub-rotina foi desenvolvida para inserir danos causados por pragas e/ou doenças,

algumas variáveis encontradas aqui são utilizadas para a integração com o modelo genérico de doenças. As variáveis são as seguintes:

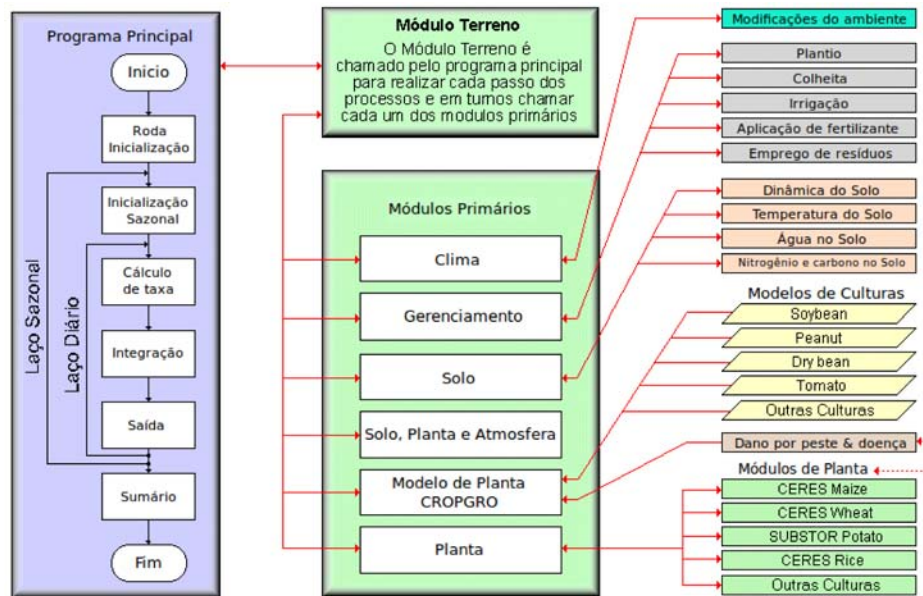


Figura 5: Visão geral dos componentes e da estrutura modular do DSSAT.

Variáveis de saída do modelo CSM-CROPGRO-Soybean:

- DOY, dia corrente da simulação, é o ano com o dia do ano em formato juliano;
- AREALF, é a área foliar sadia remanescente em cm^2 ;
- DYNAMIC, é o estado do simulador, por exemplo, integração, taxa, final, entre outras.

Variáveis de integração:

- DISLA, é a variável utilizada para a atribuição do total de área foliar doente ao modelo cm^2 ;

- WLIDOT, é uma variável de integração, utilizada originalmente para atribuir os danos causados por pestes ou danos causados pelo frio para a massa foliar ($\text{g[massa foliar]}/\text{m}^2[\text{chão}]/\text{dia}$)(BOOTE et al., 1983; BATCHELOR et al.,1993);

As variáveis de saída do modelo CSM-CROPGRO-Soybean são utilizadas como parâmetros de entrada em intervalo diário para o modelo genérico de doenças que atualiza as variáveis de integração (variáveis de dano), que também em intervalo diário são utilizadas pelo modelo CSM-CROPGRO-Soybean, o qual com o uso das variáveis efetua o dano causado pela doença no dia corrente.

Modelo genérico de doenças

PAVAN (2007) criou um modelo para o patossistema ferrugem da folha do trigo, onde o autor incorporou-o ao modelo de crescimento e desenvolvimento do trigo (CSM-CROPSIM-Wheat). Para o desenvolvimento do modelo o autor tomou por base o ciclo de vida do patógeno, criando uma estrutura facilmente parametrizável, buscando, dessa forma, obter os resultados esperados. Todo processamento se dá pela troca de dados sobre o número de folhas criadas e a área disponível sobre cada uma (área sadia) naquele instante e pela informação sobre a área que a doença está utilizando (área infectada).

Sendo a estrutura do modelo da ferrugem da folha do trigo parametrizável é possível utilizar o mesmo modelo para calcular o dano de outras doenças foliares do trigo sendo assim um modelo genérico de doenças.

Para integrar os modelos CSM-CROPSI-Wheat e o modelo gené-

rico de doenças, o autor utilizou-se das mais variadas e heterogêneas tecnologias. Linguagens de programação, tais como Java, R, C e Fortran estão contidas nesta estrutura.

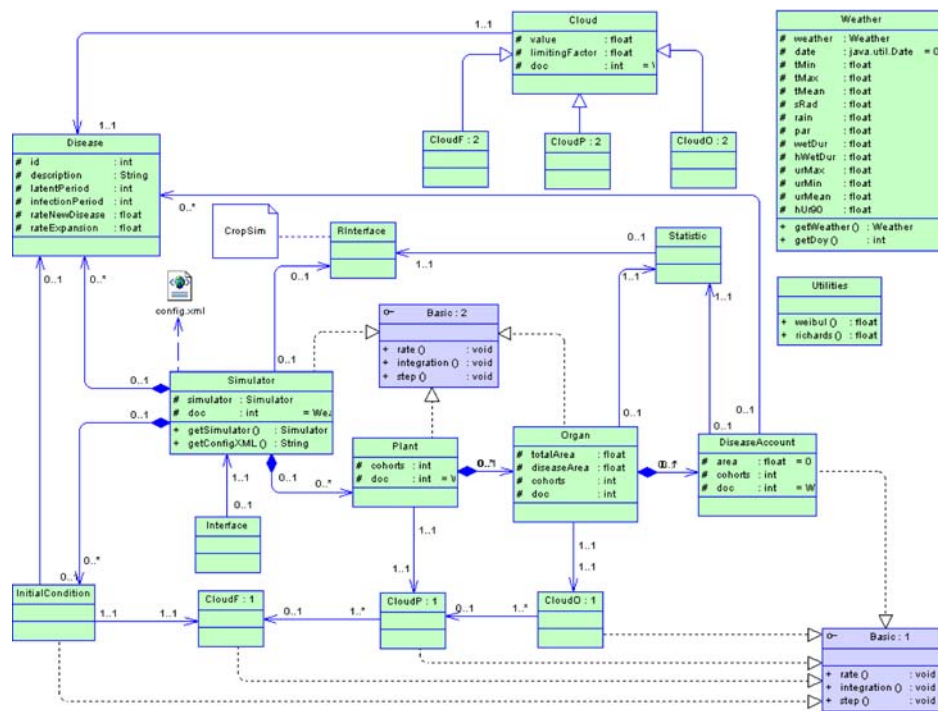


Figura 6: Estrutura do modelo genérico de doenças desenvolvido por Pavan (2007).

Com base na análise do modelo genérico de doenças, e nas semelhanças da estrutura dos modelos CSM-CROPSIM-Wheat e o CSM-CROPGRO-Soybean, a idéia inicial foi integrar o modelo genérico de progresso de doenças e o modelo de crescimento e desenvolvimento da soja para estimar o progresso e o dano causado por doenças foliares em soja, selecionando a ferrugem asiática da soja como o primeiro patógeno a ser utilizado nesta nova estrutura.

A partir desta análise inicial dos modelos, um processo de integração foi necessário. Para isso, utilizou-se de linguagens de programação

e de técnicas que possibilitem a comunicação entre linguagens distintas.

Linguagens de programação

As diferenças entre as linguagens de programação (FORTRAN e Java) base de cada modelo, dificultou qualquer tipo de processo de interação entre os modelos na forma em que estavam desenvolvidos. Portanto, para a integração dos modelos, utilizou-se as linguagens de programação FORTRAN, C e Java.

Linguagem Fortran

A linguagem FORTRAN, segundo MARSHALL (1983), foi à primeira linguagem imperativa a ser desenvolvida. Foi criada visando à resolução de problemas da área científica e de engenharia, através do uso de computadores. Por ter sido desenvolvida para estas áreas ela é ainda uma ferramenta muito poderosa pela velocidade da resposta dos cálculos efetuados e pela quantidade de modelos, negócios e resolução de problemas já desenvolvidos em sua estrutura, tal como, o modelo legado CSM-CROPGRO-Soybean utilizado neste trabalho. Um dos maiores problemas da linguagem FORTRAN concentra-se na entrada e saída de dados, onde os recursos oferecidos são muito limitados, sendo necessário a integração com linguagens tais como C , C++, Java, entre outras, que oferecem maior suporte à recursos para o desenvolvimento de interfaces em padrões atuais.

A análise dos códigos fontes do modelo desenvolvido em FORTRAN mostrou possível a alteração de pontos fundamentais das subrotinas do modelo para a integração. Porém, o modelo não consegue trocar informações diretamente com o modelo escrito em Java, sendo

necessária a utilização de uma ponte para à comunicação entre elas, e na busca de uma alternativa para este fim, surge então, a linguagem C.

Linguagem C

Criada por Dennis Ritchie, em 1972, no centro de pesquisas da Bell Laboratories a linguagem C, é uma das linguagens de programação mais populares no mundo e é ainda muito utilizada.

Entre tantas características desta linguagem, uma que chama atenção é a possibilidade de transformar os códigos fontes '.c' em objetos compartilhados, possibilitando que outras linguagens chamem funções C diretamente. A linguagem FORTRAN também possui esta característica, e possibilitando uma ligação completa entre estas linguagens através da união dos objetos compartilhados de cada linguagem, assim criando uma biblioteca compartilhada, onde o programa C pode efetuar chamadas para sub-rotinas FORTRAN e vice versa.

Porém, ainda há a necessidade de criar uma interface entre a linguagem do modelo genérico(Java) e o meio de comunicação em C. Para este fim, surge na integração à linguagem Java.

Linguagem Java

A linguagem JAVA, uma das mais difundidas linguagens orientadas a objeto, é utilizada como base para organização da integração dos modelos.

Java é dividida em três plataformas: Standard Edition (SE), Enterprise Edition (EE) e Micro Edition (ME). A plataforma SE é voltada para o desenvolvimento de aplicações Desktop, ao passo que a

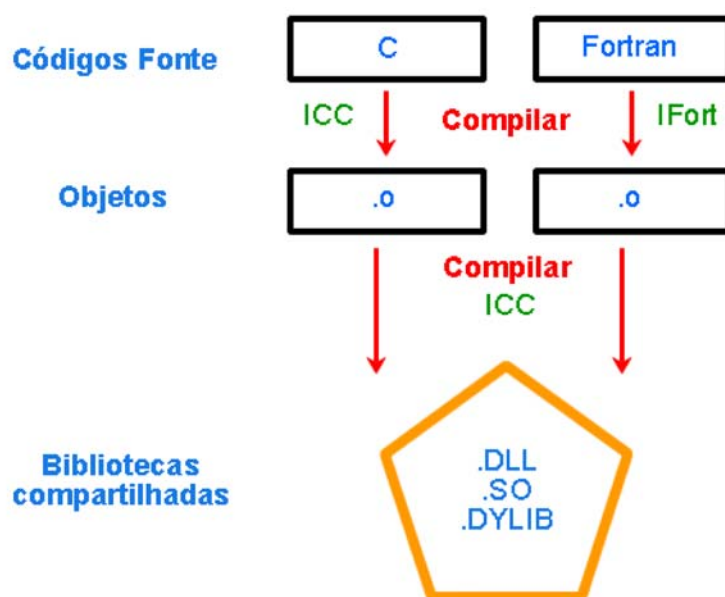


Figura 7: Criação de objetos compartilhados com códigos em C e FORTRAN.

EE é voltada para desenvolvimento Web; já a ME foi criada para o desenvolvimento de aplicações para equipamentos de pequeno porte (ADAMSON, 2006).

Uma plataforma pode ser definida como um ambiente de hardware ou software em que programas são executados, ou seja, uma combinação de sistema operacional e hardware. As plataformas em Java são compostas por dois componentes: a máquina virtual Java(JVM) e a API Java (Java Application Programming Interface). A JVM é a base para as plataformas Java, sendo portada para vários tipos de hardwares, ao passo que a API Java é uma grande coleção de componentes de softwares que fornecem muitas potencialidades úteis, agrupadas em bibliotecas de classes e interfaces, conhecidas como pacotes (packages) (MICROSYSTEMS, 2007).

Java destaca-se entre as demais linguagens pelo fato de ser dinâmica, isto é, por ser uma linguagem interpretada e poder ser carregada a qualquer momento, mesmo quando o interpretador já estiver rodando, permitindo que estas classes sejam carregadas dinamicamente e instanciadas conforme o fluxo de execução. A uniformidade dos conceitos de Java permite a integração de conceitos modernos, como componentes, invocação remota, reflexão/introspecção, validação, conectividade a bancos de dados e muitos outros.

Para que estes benefícios, os quais, o uso da linguagem Java proporciona fossem utilizados na integração dos modelos, uma interface com a linguagem C foi desenvolvida utilizando a JNI (*Java Native Interface*).

JNI é um padrão de programação que permite que a máquina virtual da linguagem Java (JVM) acesse bibliotecas construídas com o código nativo de um sistema, fornecendo uma interface para a programação híbrida. A execução de código nativo dentro do programa Java, busca a interação das linguagens envolvidas de forma completa e e traz para a integração dos modelos uma troca de dados de forma dinâmica.

Linguagem R

R é um ambiente integrado de facilidades de software para a manipulação de dados, cálculos e geração de gráficos; inclui um efetivo tratamento de dados e facilidades de armazenamento, tanto em arquivos como em bancos de dados; pode ser expandido com a adição de novas funcionalidades pelas definições de novas funções. Como em muitas outras linguagens, a maior parte das bibliotecas existentes na linguagem desenvolvida na própria linguagem e disponibilizada na

forma de pacotes, tornando-o dinâmico e muito poderoso (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2010).

Outra interface de comunicação foi desenvolvida, a qual é utilizada como meio de comunicação entre a linguagem Java e a linguagem estatística R. A linguagem R é uma linguagem matemático-estatística assim como um ambiente para a análise de dados e geração de gráficos de cunho estatístico (SILVA JUNIOR, 2005). Dentro deste ambiente criado pela linguagem R, os dados de saída dos simuladores que são em formato texto serão transformados em gráficos, possibilitando uma análise exploratória dos dados, além de possibilitar outras análises estatísticas mais aprofundadas caso necessária.

Integração dos Modelos

Para possibilitar na integração dos modelos a utilização das variáveis citadas anteriormente, foi desenvolvida uma função em C chamada 'Interface' que é utilizada pela sub-rotina em FORTRAN e pelo método Java 'Interface' para atualização destas variáveis compartilhadas:

```

1 void Interface_(int *doy, int *dynamic, float *arealf,
2                float *disla, float *wlidot)
3 {
4     jfloat auxDisla, auxWlidot;
5
6     jclass cls = (*envGlobal)->FindClass(envGlobal, "Main");
7
8     cls = (*envGlobal)->NewGlobalRef(envGlobal, cls);
9
10    jmethodID mid = (*envGlobal)->GetStaticMethodID(envGlobal, cls,
11              "Interface", "(IIFFF)Ljava/lang/Object;");
12
13    jobject Interface = (jobject)(*envGlobal)->
14      CallStaticObjectMethod(envGlobal, cls, mid,

```

```

15     *doy,*dynamic,*arealf,*disla,*wlidot);
16
17     jclass clsR = (*envGlobal)->GetObjectClass(envGlobal,Interface);
18
19     auxDisla= (*envGlobal)->GetFloatField(envGlobal,Interface,
20         (*envGlobal)->GetFieldID(envGlobal,clsR,"disla","F"));
21
22     auxWlidot = (*envGlobal)->GetFloatField(envGlobal,Interface,
23         (*envGlobal)->GetFieldID(envGlobal,clsR,"wlidot","F"));
24
25     *disla = *disla+auxDisla;
26
27     *wlidot = *wlidot+auxWlidot;
28 }

```

Listagem 2.1: Função C 'Interface'

após o desenvolvimento desta interface, as devidas alterações na subrotina PEST foram desenvolvidas, através da adição de uma chamada para a função 'Interface' do código nativo em C anteriormente mencionado:

```

1 CALL INTERFACE_(YRDOY,DYNAMIC,AREALF,DISLA,WLIDOT)

```

Listagem 2.2: Chamada para função C 'Interface' incluída no código do modelo CSM-CROPGRO-Soybean na sub-rotina PEST

A linguagem C, além de ser utilizada para a integração com a subrotina PEST mencionada anteriormente, também é utilizada como o meio de comunicação entre a linguagem JAVA, sendo o principal motivo de sua utilização neste trabalho, ser a ponte para integração entre as linguagens JAVA E FORTRAN, já que o FORTRAN não consegue efetuar chamadas a métodos Java diretamente.

O método Java chamado pela função C descrita anteriormente é a seguinte:

```

1  public static Object Interface(int doy, int dynamic,
2  float arealf, float disla, float wldot) {
3  //Declaracao de variaveis locais
4  double ydefoliated;
5  double yvisible;
6  double ydefg;
7  float areaAnterior = 0;
8
9  //Inicializa dados climaticos para o dia corrente da simulacao
10
11 if (doy != Weather.getInstance().getYYYYDDD()) {
12     main.startsim(yrsim, doy);
13
14     Weather.getInstance().search(doy);
15 }
16 areaAnterior = main.leafArea;
17
18 //Atualiza variaveis globais do modelo generico
19
20 main.doy = doy;
21 main.leafArea = arealf;
22 main.leafAreaSceneced = wldot;
23 main.leafAreaDiseased = disla;
24 main.mainsldot = sldot;
25
26 //Calculo da proporcao de area senescente
27 main.proporcao = 1 - ((sldot * 375) / areaAnterior);
28 //Executa um passo no simulador
29
30 main.step();
31
32 //Calculo da desfolha quando a densidade de doenca
33
34 // for maior que 0.5
35
36 main.plant = (Plant) s.getPlants().get(0);
37
38 main.organ = (Organ) main.plant.getOrgans().get(0);
39
40 if (main.organ.getDensity() > 0.5) {
41
42     main.leafAreaSceneced = 0 + Float.parseFloat(" +
43     (0.0125 * main.organ.getDensity()));
44

```

```
45 }
46
47 //Retorna dados para modelo CSM-CROPGRO-Soybean
48
49 ReturnDataFloats RetData = new ReturnDataFloats (
50     (float) main.leafAreaDiseased ,
51     (float) main.leafAreaScenedecd );
52
53     return RetData;
54 }
```

Listagem 2.3: Método Java 'Interface'

Outra interface de comunicação foi desenvolvida, a qual é utilizada como meio de comunicação entre a linguagem Java e a linguagem estatística R. A linguagem R é uma linguagem matemático-estatística assim como um ambiente para a análise de dados e geração de gráficos de cunho estatístico (SILVA JUNIOR, 2005). Dentro deste ambiente criado pela linguagem R, os dados de saída dos simuladores que são em formato texto serão transformados em gráficos, possibilitando uma análise exploratória dos dados, além de possibilitar outras análises estatísticas mais aprofundadas caso necessária.

Fluxo da Integração

Após esta breve descrição da utilização de cada linguagem um diagrama (Figura 8) foi construído para melhor compreender o fluxo de dados na integração destas linguagens. O fluxo de execução segue dez passos, sendo que alguns desses passos são executados apenas uma única vez, porém outros são executados uma série de vezes durante a simulação.

No primeiro passo da integração, dentro da classe Main, um método com o mesmo nome da classe inicia a execução do modelo ge-

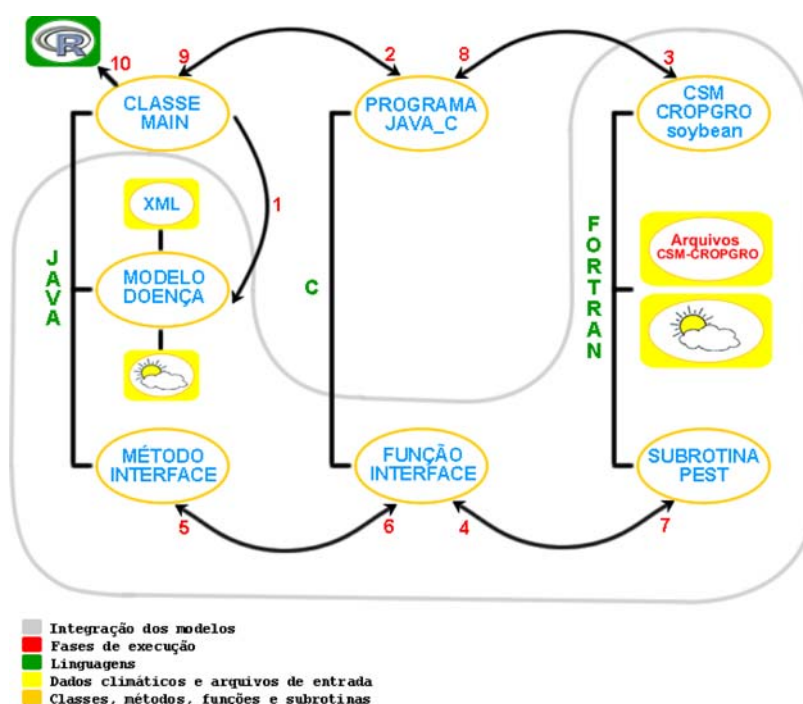


Figura 8: Diagrama de Fluxo da integração dos modelos

nérico de doenças, o qual fica na espera de dados que serão fornecidos mais adiante pelo modelo CSM-CROPGRO-Soybean. Seguindo para o passo 2, o mesmo método Main envia os parâmetros fornecidos pelo usuário para inicializar o modelo CSM-CROPGRO-Soybean através de uma interface JNI. Estes parâmetros são o nome do arquivo de entrada (.SBX) e o número do tratamento que se deseja simular deste arquivo. No passo 3 o simulador CSM-CROPGRO-Soybean é inicializado pela ponte de comunicação em C com os parâmetros anteriores, através da chamada do programa principal CSM do CSM-CROPGRO-Soybean, o qual foi convertido em sub-rotina para tornar possível sua utilização na integração.

Com os simuladores inicializados, em um certo momento da simulação, o modelo CSM-CROPGRO-Soybean executa uma de suas

sub-rotinas chamada PEST, que efetua uma requisição a outra função intermediária em C chamada de INTERFACE (passo 4), passando três variáveis por parâmetro(DOY, AREALF e DYNAMIC), e que dentro desta mesma função utilizando uma interface JNI, desenvolve uma chamada para o método Java INTERFACE que envia os parâmetros do FORTRAN-C do passo atual para C-JAVA (passo 5). Em seguida, o modelo genérico de doenças retorna os valores calculados de área foliar doente e de área senescente, para a função C INTERFACE no passo 6 (JNI), onde nesta mesma função, executa o passo 7 o qual, com o uso de ponteiros, atualiza os valores destas variáveis no modelo CSM-CROPGRO-Soybean.

A interface de comunicação desenvolvida nos passos 4 a 7 é utilizada diversas vezes durante a simulação. Este ciclo de execuções é efetuado seguindo passos diários efetuados pelos modelos, onde ocorrem a troca de dados entre modelos utilizando as seguintes variáveis, DOY, AREALF, DYNAMIC, DISLA, WLIDOT estas já descritas anteriormente.

Após os simuladores encerrarem suas execuções nos passos 8 e 9, é possível fazer uso dos dados gerados utilizando a linguagem R, passo 10, onde são desenvolvidas as análises estatísticas e a geração de gráficos.

Resultados

A integração dos modelos foi possível graças ao uso de diversas técnicas de programação, as quais propiciaram a troca de dados entre as linguagens de programação envolvidas. A interface com ponteiros (FORTRAN-C) e a JNI (JAVA-C) mostraram-se técnicas muito efici-

entes para a integração de código legado (FORTRAN) com linguagens mais atuais como o Java.

Um dos problemas encontrados foi a falta de padronização dos compiladores `icc` e `Ifort` da Intel com os outros compiladores utilizados pelos desenvolvedores do modelo CSM-CROPGRO-Soybean, forçando a mudança de diversas rotinas básicas da linguagem FORTRAN.

Outro problema verificado foi perda da portabilidade do sistema para outras plataformas caso haja o desejo de transformar a aplicação WEB para desktop ou mesmo trocar o servidor que atualmente esta rodando em um sistema MacOSX Leopard para outro como, por exemplo, linux ou windows onde existe a necessitando da recompilação do código nativo para estas plataformas.

A falta de trabalhos relacionados a construção de uma interface completa entre a linguagem Java e FORTRAN, dificultou muito o processo de desenvolvimento da integração, onde na maioria dos trabalhos encontrados a linguagem Java apenas executava o código FORTRAN, como por exemplo, um valor é enviado do Java para o FORTRAN, um cálculo é efetuado e o FORTRAN retorna o resultado deste cálculo ao Java, seguindo esta simples interface simples levou-me muitas vezes a construção errônea da interface. A verdadeira necessidade deste trabalho era desenvolver uma interface dinâmica onde existe uma comunicação durante toda a execução do simulador em FORTRAN e do simulador em Java através de variáveis compartilhadas, onde a variável de área foliar é afetada dinamicamente levando a redução do rendimento conforme os danos causados pela doença assim contabilizando este dano até o término da execução do modelo.

Discussão

A modelagem de epidemias de plantas possibilita uma melhor compreensão e representação dos processos envolvidos na dinâmica dos agentes causadores de doenças, tal como ocorre na natureza. Os modelos matemáticos, por sua vez, servem para quantificar o efeito dos fatores que influenciam os diferentes processos que combinados podem estimar o grau de intensidade de uma epidemia de ferrugem asiática, por exemplo. Diversos modelos têm sido desenvolvidos para esta doença, de concepção simples ou complexa e que descrevem, individualmente, de maneira mais ou menos abrangente, os diferentes processos epidêmicos desde parâmetros monocíclicos até dispersão de esporos e da doença em escala regional (DEL PONTE et al., 2006). Por outro lado, os modelos de simulação de cultura são ferramentas que permitem criar cenários, considerando as diversas combinações dos vários elementos que influenciam a produtividade das culturas. Estes são comumente utilizados para a simulação do crescimento de plantas como ferramentas na otimização das práticas de manejo, bem como, para estimar produtividades. O modelo CROPGRO:Soybean têm sido amplamente utilizado na simulação do crescimento e desenvolvimento da cultura da soja. Um novo modelo combinando um modelo de epidemia de ferrugem asiática da soja desenvolvido a partir de parâmetros epidemiológicos ao CROPGRO:Soybean pode ser de grande utilidade para ampliar o entendimento sobre as epidemias de ferrugem asiática e o impacto no rendimento da soja.

O modelo genérico para a simulação de epidemias proposto por PAVAN e FERNANDES (2009) permitiu o rápido desenvolvimento de um modelo de ferrugem asiática da soja configurando os parâmetros epidemiológicos em arquivo externo sem a necessidade de modificar a

codificação.

O acoplamento de modelos permitiu que os modelos CSM-CROPGRO: Soybean e o modelo de ferrugem asiática da soja quando combinados afetassem a simulação de cada um dos modelos durante o tempo de execução. O novo modelo combinado simulou o crescimento da soja e contabilizou os efeitos de um estresse biótico como, por exemplo, a ferrugem asiática da soja. A metodologia "modelos-componentes" para a integração dos modelos desenvolvida neste trabalho, mostrou que utilizando os modelos como partes de um programa principal e o compartilhamento de bibliotecas possibilitou construir uma interface robusta e transparente. Esta metodologia mostrou-se eficiente para acoplar um modelo como o CSM-CROPGRO: Soybean escrito na linguagem FORTRAN e o modelo de ferrugem asiática da soja escrito em JAVA. As boas práticas de programação empregadas pelos cientistas no desenvolvimento destes dois modelos favoreceu a integração dos modelos. No caso dos modelos da família CSM-CROPGRO os cientistas vem há algum tempo se preocupando com a necessidade de modularidade.

PAVAN (2007), seguiu a metodologia "comunicação" para o desenvolvimento do acoplamento entre o modelo CSM-CROPSIM-Wheat e o modelo da ferrugem da folha do trigo, a qual utiliza uma interface de comunicação via Soquete¹, para promover a troca de dados entre modelos em tempo real. Problemas com este tipo interface são comuns, pois interfaces de rede normalmente geram atrasos na comunicação e muitas vezes pacotes transmitidos podem perder-se facilmente, assim comprometendo a execução da aplicação. Por outro lado, uma das grandes vantagens deste tipo de interface é a facilidade para constru-

¹Soquete é uma ligação de redes de computadores para fim de construção de um elo bidirecional de comunicação entre dois programas

ção (BULATEWICZ, 2006).

O CROPGRO foi desenvolvido no início da década de 1990, como um modelo autônomo, mas poderia também ser trabalhado dentro do Sistema de Decisão e Suporte a Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), permitindo que fosse ligado a outro programa de modelagem de culturas, assim como a programas de gráficos para automatizar a apresentação dos resultados. Depois que a versão 3.1 do DSSAT foi liberada em 1996, o código do CROPGRO foi reorganizado em uma estrutura modular. O código para simular processos diferentes da planta e solo foi organizado em sub-rotinas individuais para cada processo. As novas sub-rotinas foram projetadas para serem executadas em quatro etapas comuns (iniciação, cálculo da taxa, integração e final/sumário) organizadas pelo modelo principal. A estrutura modular foi projetada para permitir que o usuário adicione um novo código ou ligue o código a outros programas introduzindo pela inserção de módulos novos na estrutura do CROPGRO (JONES, 2001).

Assim, o módulo PEST existente no CSM-CROPGRO: Soybean foi facilmente identificado para a escolha das variáveis que deveriam servir como pontos de acoplamento (Boote et al., 1983). As variáveis escolhidas foram DISLA (Área Foliar Doente) representando o efeito da ferrugem no na redução da absorção da radiação solar e e WIDOT (Área Foliar Removida) que imita a desfolha prematura.

Ao planejar o acoplamento dos modelos de doenças e modelos de simulação de cultura a organização e a qualidade do código usado para a suplementação deva ser considerado. Processos isolados propiciam uma ligação simples. Já quando os processos de acoplamento são influenciados por vários fatores e um ou ambos os modelos um planejamento mais detalhado é necessário para que a combinação dos

modelos seja feita com sucesso. O processo de acoplamento de modelos independentemente desenvolvidos não é uma tarefa simples e exige habilidade e experiência em programação.

Uma deficiência do CSM-CROPGRO: Soybean é a falta de detalhamento da estrutura do dossel de modo a permitir na comunidade de plantas estimativas dinâmicas do microclima que certamente influencia o estabelecimento e sobrevivência de agentes causais de doença. Por exemplo, a umidade é um dos fatores mais importantes determinando a favorabilidade para o estabelecimento da grande maioria das doenças. A duração do molhamento foliar controla a germinação e a infecção. Além disso, o CSM-CROPGRO: Soybean usa a proposta de uma única grande folha para representar a área foliar. Isto traz dificuldades para distribuir no modelo a incidência das doenças ao longo das camadas das folhas próximo do que acontece no mundo real. No caso da ferrugem asiática da soja o aparecimento dos primeiros sintomas geralmente ocorre na porção inferior e disseminando com o passar do tempo para as camadas superiores. É provável que o ambiente mais favorável em termos de umidade e luz nas camadas inferiores contribui para o sucesso das primeiras infecções. No futuro, modificações no modelo CSM-CROPGRO: Soybean que contemplem um maior detalhamento da estrutura do componente “Arranjo de Folhas” deverá contribuir para que o acoplamento dos modelos como aqui apresentado venha a ter maior realismo.

A utilização de tecnologias e linguagens mais atuais possibilita a utilização de muitos recursos para distribuição dos modelos integrados. Segundo CHENG e FEN (2005), programas baseados em ambiente WEB proporcionam a quebra de barreiras das plataformas de computação e do domínio espacial, assim, oferecem uma ampla possibilidade para colaboração remota, acesso de dados e ensino a distân-

cia. Com a apresentação desta interface com cliente via WEB, usuários em diversas plataformas em diferentes locais poderiam facilmente acessar os serviços oferecidos pelos modelos usando qualquer browser, e o mais importante, possibilitando o trabalho colaborativo na WEB onde diversos membros poderiam trocar idéias sobre o mesmo projeto. Outra possibilidade para a distribuição multi-plataforma seria a criação de pacotes, onde cada pacote é direcionado a um determinado sistema operacional tais como o Linux, Windows, e Mac Os X.

Nas últimas décadas, a agricultura tem se beneficiado significativamente da rápida evolução dos computadores associado a tecnologia da informação. Os modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas juntamente com sistemas de apoio e a decisão se tornaram instrumentos fundamentais para a tecnologia da informação agrícola (Hoogenboom, 2000).

As utilidades práticas de modelos integrados como o proposto neste trabalho abre novas facetas de interesse para a ciência agrônômica. Por exemplo, a habilidade de simular a cultura da soja juntamente a severidade de ferrugem asiática da soja pode ser útil para avaliar em uma determinada região a intensidade das epidemias sob cenários históricos de clima, cenários de variabilidade climática, avaliação de impactos de mudanças climáticas, zoneamento de risco entre outros. Já no decorrer de uma safra, pode ser útil para indicar os locais de maior risco de ocorrência de epidemias orientando as atividades de monitoramento, bem como prever o risco de ocorrência de epidemias e desenvolvimento para níveis severos, gerando um alerta sobre o potencial de inóculo em uma região e orientando medidas de controle. Plataformas tecnológicas para o monitoramento, previsão e comunicação do risco da ferrugem asiática têm sido desenvolvidas nos Estados Unidos, a qual é constituída de um complexo sistema de

multi-camadas que geram mapas de ocorrência e de risco da doença, conectados a bancos de dados e programas que integram os dados, de forma que são gerados mapas de dispersão e de risco de epidemias para o território norte-americano, sendo disponíveis na Internet para visualização por pesquisadores e técnicos. Plataformas como esta serve como exemplo a ser seguido para a utilização da integração dos modelos desenvolvida neste trabalho.

CAPÍTULO II

CALIBRAÇÃO DO MODELO DE FERRUGEM DA SOJA

João Eduardo Pedrini Faculdade de Agronomia e Medicina
Veterinária Universidade de Passo Fundo C.P. 611,99001-970

RESUMO

A determinação de melhores práticas de gerenciamento da cultura da soja para o aumento da produção pode fornecer uma valiosa informação para planos estratégicos no Brasil. Entretanto, este processo consome tempo e é custoso. A utilização de um modelo dinâmico de simulação de culturas, pode ser uma opção alternativa para ajudar na estimativa de níveis de produção sob várias condições de crescimento. O modelo CSM-CROPGRO-Soybean, integrado a um modelo de doença, tem a capacidade de dinamicamente representar o progresso da ferrugem asiática da soja e a sua influência na produção. Para que este modelo seja avaliado, uma calibração deve ser realizada, onde conjuntos de dados devem ser coletados para alimentar as entradas dos modelos. Dados de clima, solo e cultivares, foram utilizados para a calibração do modelo CSM-CROPGRO-Soybean e dados do desenvolvimento da ferrugem asiática, foram utilizados para calibrar o modelo de doença. As simulações desenvolvidas com os modelos integrados conseguem diferenciar anos epidêmicos de não epidêmicos.

Palavras Chave: Soja, Ferrugem Asiática da soja, integração, calibração, simulação.

ABSTRACT

Determining better management practices in order to achieve attainable soybean yield can provide a valuable information for decision making in Brazil and elsewhere. However, by means of traditional experimentation it requires a considerable amount of time and resources. Dynamic simulation models can be an option to estimate yield under varying growing conditions. The CSM-CROPGRO-Soybean model, coupled with a disease model, has the ability to represent dynamically the progress of soybean rust and its influence on yield. Historic weather and soil data from Passo Fundo, RS were used as inputs to run the CSM-CROPGRO-Soybean model. Soybean cultivar genetic coefficients were collected from literature while soybean rust model parameters were either collected from literature or by educated guesses. Data on soybean rust intensity in the region were used to evaluate the complete model. Differences on simulated soybean yield accounted by soybean rust intensity reflected well epidemic and non-epidemic seasons.

Key-words: Soybean, Asian soybean rust, coupling, simulation, evaluation

Introdução

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma leguminosa que se desenvolve em clima tropical, subtropical e temperado, sendo ela um importante produto para consumo humano, alimentação animal e para a produção de biodiesel. O Brasil é o segundo maior produtor de soja no mundo e o primeiro em exportação de soja e seus derivados, produzindo em 2009/2010, mais de 70 milhões de toneladas de soja (CONAB, 2010). Um fator importante na produção mundial de soja é a redução do rendimento potencial devido a presença de doenças. Um elevado número de patógenos incitam doenças nesta cultura (Referência). Entretanto, nos últimos anos, a ferrugem asiática da soja tem despertado grande interesse tanto no setor produtivo como no setor acadêmico.

A ferrugem asiática da soja é incitada por um fungo denominado *Phakopsora pachyrhizi* Syd. & P. Syd e representa a principal ameaça para a produção de soja nas principais regiões produtoras das Américas, onde significativas perdas têm sido relatadas (HARTMAN et al. 1991; BALARDIN, 2004; DORRANCE et al., 2005). Uma característica importante da doença é o rápido progresso observado na presença de uma cultivar suscetível e condições ambientais favoráveis levando a planta a uma desfolha prematura. A perda na produção estimada é de 5 a 95% dependendo da região, do estágio da cultura que teve início a epidemia e das condições do ambiente (HARTMAN et al. 1991). A ferrugem asiática da soja causa a redução da produção via inúmeros mecanismos. Um destes mecanismos é a desfolha, que resulta na redução da absorção da radiação solar incidente no dossel da planta. Um segundo mecanismo que contribui para reduzir rendimento da cultura da soja é a redução na área foliar verde como

consequência direta do surgimento dos sinais do fungo no limbo foliar reduzindo a área verde disponível para a planta absorver a radiação solar. Um terceiro mecanismo pelo qual a ferrugem asiática reduz o rendimento da soja ocorre pela redução da eficiência com a qual a energia de radiação solar absorvida é convertida em produtos da fotossíntese assim reduzindo o acúmulo de matéria seca (KUMUDINI et al., 2008).

Uma demanda crescente para o manejo da cultura da soja é uma melhor previsibilidade dos danos potenciais devido as doenças em especial a ferrugem asiática da soja. Quantificar os fatores que determinam danos expressivos na cultura da soja devido a ferrugem asiática, por exemplo, seria extremamente útil para um manejo mais eficiente visando o controle desta doença. O manejo da ferrugem asiática da soja envolve muitos componentes que estão interligados como a cultivar, a época de semeadura, a sobrevivência e o movimento do inóculo, as condições climáticas e o uso de fungicidas.

Os computadores e a tecnologia da informação tornaram disponível várias ferramentas que podem ser úteis para aliviar os problemas encontrados na agricultura (CANTERI et al., 2004.). Uma destas ferramentas é a simulação do crescimento e desenvolvimento das plantas. Estes são modelos mecanísticos solidamente baseados na quantificação do conhecimento em áreas como a fisiologia vegetal, a meteorologia e a ciência do solo. Os fatores que interferem no crescimento e rendimento das culturas são quantificados integrando os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na atmosfera, no solo e nas plantas. Assim, os modelos são desenvolvidos de forma holísticos com base no conhecimento existente e de natureza genérica servindo tanto para aplicações locais como globais. Associados a outras ferramentas como sistemas especialistas, sistemas de apoio à tomada de decisão,

bancos de dados, sistemas de informação geográfica e sensoriamento remoto constituem-se em poderosa artilharia para a integração do conhecimento visando a utilização de cunho prático pelos diferentes segmentos da sociedade.

A utilização de um modelo dinâmico de simulação de culturas pode ser uma opção alternativa para ajudar na estimativa de níveis de rendimento sob várias condições de crescimento. O modelo CSM-CROPGRO-Soybean contido dentro do pacote agrônomico titulado: Sistema de Tomada de Decisão para a Transferência de Agro-Tecnologia (DSSAT)(JONES et al. 2003, HOOGENBOON et al. 2004), efetivamente integra inúmeros fatores que afetam o ambiente de cultivo e o rendimento. O modelo não somente pode ser utilizado para prever a rendimento, mas pode também ser utilizado para a avaliação da variabilidade e riscos de diferentes estratégias de manejo sob uma gama de locais e condições climáticas.

O modelo CSM-CROPGRO-Soybean, atualmente não simula o estresse biótico determinante no rendimento da cultura. Este estresse biótico contribui para a diferença entre o rendimento potencial e o real. Neste sentido, com a finalidade de expandir o uso dos modelos de simulação de culturas para predizer o impacto no rendimento causado por pragas e doenças foi desenvolvido um módulo específico e incorporado dentro do modelo CSM-CROPGRO (BATCHELOR et al., 1993). Danos por pragas e doenças foram categorizados de acordo com os seus efeitos no crescimento e na resposta da planta (BOOTE et al., 1993). Nesta abordagem, o dano causado por pragas e doenças foi estabelecido com dados observados e não baseados em simulações dinâmicas influenciadas pelas condições ambientais. Esta abordagem permite que o modelo CSM-CROPGRO simule o crescimento das culturas sob certas condições de dano, mas não permite a simulação do

efeito de pragas e doenças de forma dinâmica, resultando na exclusiva dependência do monitoramento para a entrada de dados.

Um modelo de simulação para a cultura soja de grande valia seria aquele que fosse robusto o suficiente para simular o crescimento e rendimento final da cultura em resposta, por exemplo, a colonização pelo fungo que causa a ferrugem asiática da soja nas diferentes fases de crescimento da soja e em diferentes ambientes.

O manejo de doenças também foi influenciado pelo desenvolvimento ocorrido com os modelos de simulação de culturas. Teng em 1985, relata que os primeiros esforços em desenvolver simuladores de doenças de plantas aconteceram no final da década de 60. Entre os primeiros relatos de modelos de simulação de doenças encontra-se o EPIDEM para alternariose em tomate (WAGGONER e HORSFALL, 1969) e o EPIMAY para a queima da folha de milho no sul dos Estados Unidos (WAGGONER et al., 1972). Este modelos foram válidos para avaliar aspectos básicos da epidemiologia e, também, para identificar falhas existentes no conhecimento do sistema (FRY e FOHNER, 1985). Com a evolução do conhecimento, aos modelos de simulação introduziram-se aspectos relacionados ao manejo de doenças e à tomada de decisão. Sistemas de apoio à tomada de decisão variam de um simples limiar econômico até sofisticados sistemas computadorizados e interativos integrando modelos de simulação, banco de dados e algoritmos de decisão (FERNANDES e MAFFIA, 1994).

Infelizmente, a grande maioria dos modelos de simulação de culturas não considera os efeitos prejudiciais impostos às plantas pelas pragas e doenças. Por outro lado, os modelos de simulação de epidemias de doenças raramente estão diretamente ligados ao desenvolvimento e crescimento do hospedeiro (FERNANDES e MAFFIA, 1994).

O acoplamento dos efeitos das doenças sobre as plantas tem sido considerado sob aspectos fisiológico e epidemiológico (BOOTE et al., 1983; ROUSE, 1988; BERGER e JONES, 1985; JOHNSON e TENG, 1990). No aspecto fisiológico, os efeitos das doenças variam da simples generalização em termos de radiação interceptada e de eficiência no uso da radiação (JOHNSON, 1987), até os detalhes do efeito da doença sobre processos específicos (respiração, fotossíntese, alteração na taxa de partição, aceleração da senescência e redução na população) (BOOTE et al., 1983; ROUSE, 1988). No aspecto epidemiológico, surgiram tentativas de acoplar o processo dinâmico da doença ao crescimento do hospedeiro. Nesse contexto, consideram-se certos fatores, como: período latente/incubação, expansão da lesão, limites superiores de severidade, distribuição e disseminação do patógeno no dossel da planta, microclima e efeitos da idade do hospedeiro sobre o desenvolvimento do patógeno (JOHNSON e TENG, 1990).

A epidemia de uma doença de plantas é um processo integrado entre o hospedeiro, o ambiente e o patógeno. Então, um modelo de doença deve considerar a resposta da planta. Combinar os modelos de simulação planta com o da doença com base em processos fisiológicos e ecológicos é essencial para a análise dos múltiplos fatores que prevalecem nos agroecossistemas. O produto que resulta desta combinação certamente vai apresentar potencial para uso no manejo integrado de doenças. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade do modelo CSM-CROPGRO: Soybean acoplado ao modelo de simulação de ferrugem asiática dinamicamente representar o curso de uma epidemia de ferrugem asiática da soja e a sua influência no crescimento e rendimento final da soja.

Material e Métodos

Os modelos de simulação são ferramentas que permitem gerar cenários considerando as diversas combinações dos fatores que influenciam a produtividade das culturas, onde estes fatores necessitam ser estimados empiricamente ou através da busca na literatura e calibrados com dados passados.

Dados de Alimentação dos Modelos

Para a calibração dos modelos foi necessário uma série de conjuntos de dados, os quais serão descritos a seguir.

Dados Climáticos

A estação meteorológica utilizada para coleta de dados climáticos pertence ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada na cidade de Passo Fundo na latitude 28° 10' S, longitude 52° 20' L a altitude de 684m do nível do mar. Os dados utilizados desta estação foram o saldo de radiação, temperaturas máxima e mínima e a precipitação, os quais foram convertidos para o padrão de arquivos do DSSAT conforme encontra-se no anexo A. Outro dado também obtido desta estação, o acúmulo de horas de umidade relativa acima de 90%, foi utilizado para alimentar o modelo do progresso de ferrugem asiática.

Dados de Solo

Os dados de solo são utilizados pelo modelo CSM-CROPGRO-Soybean no módulo solo, onde é representado como um perfil unidi-

mensional, sendo homogêneo horizontalmente e consistindo um número de camadas verticais de solo. O tipo de solo utilizado no experimento é latossolo vermelho escuro distrófico, e os dados das características química e física (retenção de água e granulometria) deste solo, foram obtidas de experimentos anteriores já no formato padrão utilizado pelo modelo.

Dados de Cultivares

Duas cultivares foram utilizadas para o desenvolvimento das simulações, a cultivar Don Mário de ciclo super-precoce (GM 5) e a cultivar Bragg de ciclo médio (GM 7). Estas cultivares não são mais utilizadas atualmente mas já foram muito cultivadas no estado do Rio Grande do Sul na região de Passo Fundo. A utilização destas cultivares é por fim de representatividade, onde a cultivar Bragg representa uma cultivar de ciclo médio e a cultivar Don Mário representa uma cultivar de ciclo precoce, além do fato de seus coeficientes genéticos encontrarem-se dentro do banco de dados do DSSAT.

Alguns coeficientes genéticos destas cultivares são necessários para previsão do crescimento e desenvolvimento utilizando o simulador CSM-CROPGRO-Soybean, estes coeficientes são descritos nas tabelas a seguir:

Coefficiente	Descrição	Unidade	DON MA- RIO	BRAGG
CSDL	Comprimento crítico do dia, acima do qual o processo de desenvolvimento reprodutivo não é afetado	Horas	12.95	12.33
PPSEN	Inclinação da resposta relativa do desenvolvimento para fotoperíodo com o tempo	1/Hora	0.294	0.320
EMFL	Período entre a emergência da planta e o aparecimento da primeira flor (R1)	Dias Fototermais	15.0	19.5
FL-SH	Período entre o aparecimento da primeira flor e o primeiro legume (R3)	Dias Fototermais	9.7	10.0
FL-SD	Período entre o aparecimento da primeira flor e o início da formação de sementes (R5)	Dias Fototermais	19.4	15.2
SD-PM	Período entre o início da formação de sementes e a maturidade fisiológica (R7)	Dias Fototermais	35.10	37.60
FL-LF	Período entre o aparecimento da primeira flor e final da expansão foliar	Dias Fototermais	26.00	19.00
LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese da folha a uma taxa ótima de temperatura (30 graus C)	Taxa	1.200	1.000
SLAVAR	Área foliar específica sob condições padrão de crescimento	Cm ²	390	355
SIZLF	Tamanho máximo da folha completamente expandida	Cm ²	200.0	170.0
XFRT	Máxima fração do crescimento diário que é particionada para a semente mais o legume	Proporção	1.0	1.0

Tabela 1: Coeficientes das cultivares Bragg e Don Mário (parte I).

Coefficiente	Descrição	Unidade	DON MA- RIO	BRAGG
WTPSD	Peso máximo por semente	Gramas	0.19	0.17
SFDUR	Duração do período de enchimento das sementes nas vagens sob condições de crescimento padrão	Dias Fototermais	21.0	24.0
SDPDV	Média de sementes por vagem, sob condições de crescimento padrão	Dias Fototermais	2.10	2.00
PODUR	Tempo necessário para o cultivar alcançar condições ideais de legumes	Dias Fototermais	16.0	10.0

Tabela 2: Coeficientes das cultivares Bragg e Don Mário (parte II).

Dados de Desenvolvimento da Ferrugem Asiática

As tabelas 3, 4 e 5, possuem os parâmetros utilizados no modelo de simulação do progresso da epidemia de ferrugem asiática da soja, cada parâmetro significa algum valor que pode influenciar no desenvolvimento e crescimento do fungo, ou apenas é uma variável descritiva, para fins de documentação ou controle.

Os valores dos parâmetros contidos nas tabelas foram obtidos da literatura ou foram estimados empiricamente, alguns destes valores empíricos foram mantidos do modelo original que estimava a epidemia da ferrugem da folha do trigo de PAVAN (2007), tais como os valores de limites de permanência dos esporos nas nuvens do campo, da planta e do órgão, entre outros.

Nome da variável	Descrição	Unidade	Exemplo	Referências
description	Descrição da doença parametrizada	Descrição	Rust	Empírico
infectionEfficiency	Eficiência da Infecção	Proporção	0.06	Marchetti et al. 1976
environmentFavorability	Interferência do ambiente no desenvolvimento da doença	Proporção	1	Empírico
depositionFrequency	Frequência da deposição de esporos	Proporção	0.05	Barnes et al. 2009
initialInoculum	Valor do inóculo inicial	Unidades	50	Empírico
vectorSizeCloudF	Limite de permanência de esporos na nuvem do campo	Unidades	5	Empírico
vectorSizeCloudP	Limite de permanência de esporos na nuvem da planta	Unidades	7	Empírico
vectorSizeCloudO	Limite de permanência de esporos na nuvem do órgão	Unidades	10	Empírico
maxSporeProduction	Produção máxima de esporos	Unidades/Dia	3000	Empírico
cohortAge	Eficiência na produção de esporos (trapezóide) com relação à idade do cohort	Dias	4, 20, 22, 30	Empírico
scfA, scfB e scfC	Limitante da esporulação baseada na densidade da população	Parâmetros	0.98669, 10.71894, 0.93374	Empírico
maxSporeDensity	Densidade máxima de esporos na nuvem	Unidades	12000	Empírico
sporeProportionToCloud	Proporção de esporos produzidos que alimentam a nuvem do órgão	Proporção	0.05	Empírico

Tabela 3: Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem asiática da soja parte I (modificado de PAVAN, 2007).

Nome da variável	Descrição	Unidade	Exemplo	Referências
proportionFromOrgan ToPlant-Cloud	Proporção de esporos transferidos da nuvem do órgão para a nuvem da planta	Proporção	0.03	Empírico
proportionFromPlant ToField-Cloud	Proporção de esporos transferidos da nuvem da planta para a nuvem do campo	Proporção	0.01	Empírico
infectionTemperature FavorabilitySet	Temperaturas cardinais utilizadas para o cálculo da favorabilidade da temperatura, no período infeccioso (máxima, mínima e ótima)	Temperaturas	29, 10, 22.5	Empírico
latencyTemperature FavorabilitySet	Temperaturas cardinais utilizadas para cálculo da favorabilidade da temperatura no período latente (máxima, mínima e ótima)	Temperaturas	45, 5, 26	Empírico
latentPeriod	Comprimento do período latente	Dias	6	zambenedetti et al. (2006) Empírico
latentGrowthFunction	Função utilizada para o cálculo da expansão da lesão no período latente (lesão visível)	Função	linear	
latentGrowthParameter	Parâmetros da função utilizada no cálculo da expansão da lesão no período latente (lesão visível)	Parâmetros	0.00126, 0.001274	Empírico
infectionPeriod	Comprimento do período infeccioso	Dias	18	Empírico
infectionGrowthFunction	Função utilizada para o cálculo da expansão da lesão no período infeccioso (lesão visível)	Função	linear	Empírico

Tabela 4: Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem asiática da soja parte II (modificado de PAVAN, 2007).

Nome da variável	Descrição	Unidade	Exemplo	Referências
infectionGrowthParameter	Parâmetros da função utilizada no cálculo da expansão da lesão no período infeccioso (lesão visível)	Parâmetros	0.00784, 0.00243	Empírico
initialPustuleSize	Tamanho inicial da pústula	Cm ²	0.00001	Empírico
maxPustuleSize	Tamanho máximo da pústula (vetor: latente e infeccioso) – lesão visível	Cm ²	0.012, 0.018	Empírico
invisibleGrowthFunction	Função utilizada para o cálculo da expansão da lesão (lesão invisível – área total)	Função	Linear	Empírico
invisibleGrowthParameter	Parâmetros da função utilizada no cálculo da expansão da lesão (lesão invisível – área total)	Parâmetros	0.00126, 0.003674	Empírico
wetnessThreshold	Número mínimo de horas de molhamento necessário para criar novas lesões	Horas	6	Tsukahara et al.(2008)
accumulateFavorability	Número de dias fisiológicos necessários para liberação dos primeiros esporos	Dias fisiológicos	35	Empírico
hostFactor	Fator de resistência do hospedeiro (1: sem resistência, 0: imune)	Proporção	1	Empírico
maxOrganNumber	Número máximo de órgãos por planta	Unidades	10	Empírico

Tabela 5: Parâmetros utilizados no simulador da ferrugem asiática da soja parte III (modificado de PAVAN, 2007).

Resultados

O modelo CROPGRO: soybean na sua forma original gera uma série de arquivos no formato de texto que detalha as diferentes fases do crescimento e desenvolvimento da planta de soja. Aqui selecionamos alguns dos resultados do experimento simulado com as duas cultivares Bragg e Don Mário para semeaduras em 03 de novembro e 5 de dezembro em Passo Fundo, RS, nas safras de 2006/2007 até 2009/2010. Na figura 9 são apresentados os dados de precipitação e temperatura para o período de cultivo da soja para os diferentes anos.

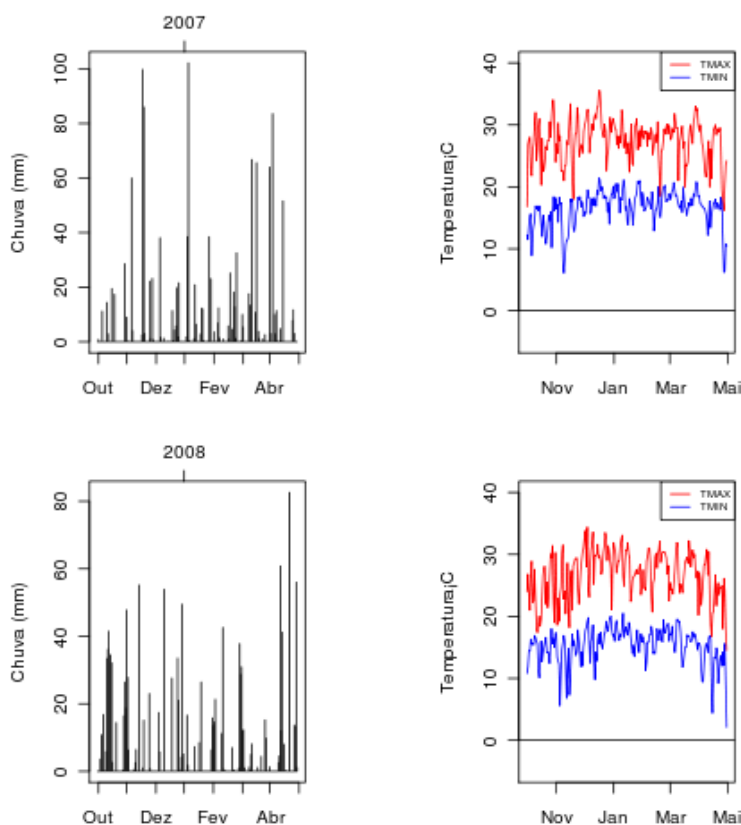


Figura 9: Dados de clima para as safras de 2006/2007 e 2007/2008.

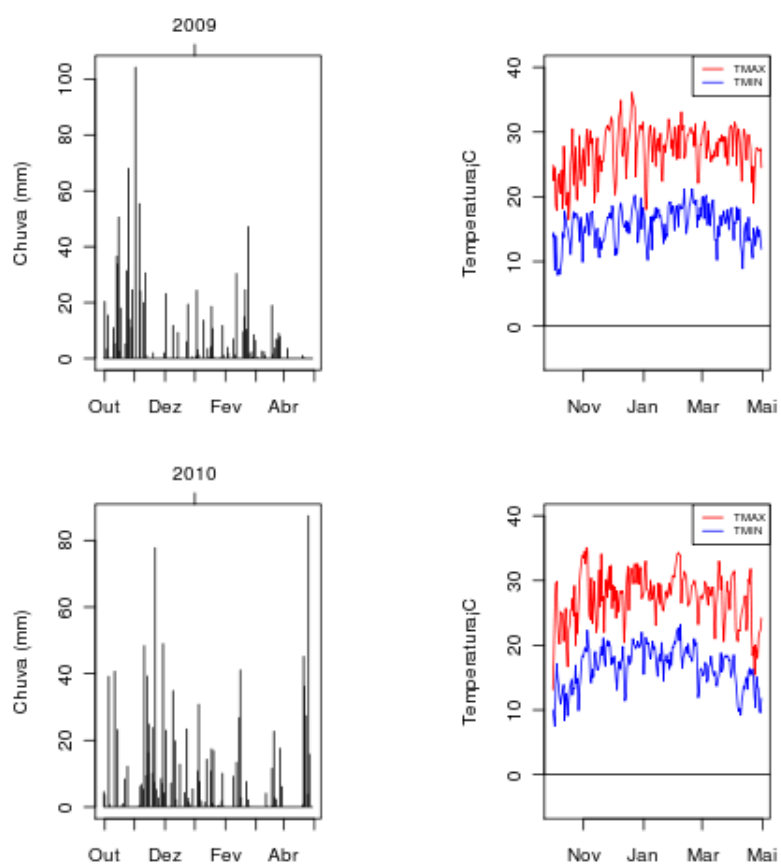


Figura 10: Dados de clima para as safras de 2008/2009 e 2009/2010.

Neste experimento, o modelo CROPGRO: soybean foi executado com o modelo de epidemia de ferrugem asiática ligado e desligado, respectivamente.

Diversas simulações foram rodadas, onde foram levados em consideração as cultivares Bragg e Don Mário, sendo que para cada cultivar foram rodadas duas épocas de semeadura (05/11 e 03/12), 4 safras (2006/2007 à 2009/2010) e o fator doença ligado e desligado, isto totalizando 32 rodadas. Os resultados das simulações são mostrados nas tabelas a seguir:

Safra	Época	CD (Kg/Ha)	SD (Kg/Ha)	Severidade	EF-ID
2006/2007	05/11	3074	4270	44%	R2
2006/2007	03/12	3185	3971	36%	R2
2007/2008	05/11	2609	2950	17%	R2
2007/2008	03/12	2222	2419	12%	R2
2008/2009	05/11	2248	2380	8%	R3
2008/2009	03/12	2269	2312	4%	R2
2009/2010	05/11	1018	1904	36%	R1-R2
2009/2010	03/12	730	1245	48%	R1-R2

Tabela 6: Produções simuladas para a cultivar Bragg, com doença (CD) e sem doença (SD), e o estágio fenológico de início da doença (EF-ID) para as safras de 2006/2007 à 2009/2010

Safra	Época	Floração	Maturação
2006/2007	05/11	56	146
2006/2007	03/12	51	131
2007/2008	05/11	61	149
2007/2008	03/12	57	130
2008/2009	05/11	65	155
2008/2009	03/12	59	131
2009/2010	05/11	52	142
2009/2010	03/12	51	124

Tabela 7: Dias da emergência após a floração e a maturação para a cultivar Bragg, para as safras de 2006/2007 à 2009/2010

Safra	Época	CD (Kg/Ha)	SD (Kg/Ha)	Severidade	EF-ID
2006/2007	05/11	3234	3537	14%	R2
2006/2007	03/12	3240	3506	15%	R2
2007/2008	05/11	2472	2699	7%	R2
2007/2008	03/12	2606	2690	5%	R2
2008/2009	05/11	1232	1232	3%	R3
2008/2009	03/12	2497	2557	3%	R2
2009/2010	05/11	2185	2699	18%	R1-R2
2009/2010	03/12	1566	1618	28%	R1

Tabela 8: Produções simuladas para a cultivar Don Mário, com doença (CD) e sem doença (SD), e o estágio fenológico de início da doença (EF-ID) para as safras de 2006/2007 à 2009/2010

Safra	Época	Floração	Maturação
2006/2007	05/11	35	117
2006/2007	03/12	31	103
2007/2008	05/11	40	118
2007/2008	03/12	34	109
2008/2009	05/11	38	119
2008/2009	03/12	37	112
2009/2010	05/11	31	110
2009/2010	03/12	32	100

Tabela 9: Dias da emergência após a floração e a maturação para a cultivar Don Mário, para as safras de 2006/2007 à 2009/2010

Os padrões climáticos são fatores determinantes que controlam o rendimento e desenvolvimento da soja na região norte do estado do Rio Grande do Sul. Neste estudo simulado que envolveu quatro safras de soja desde 2006/2007 até 2009/2010, o clima apresentou um efeito único sobre o crescimento e desenvolvimento da planta de soja e o desenvolvimento da ferrugem asiática da soja.

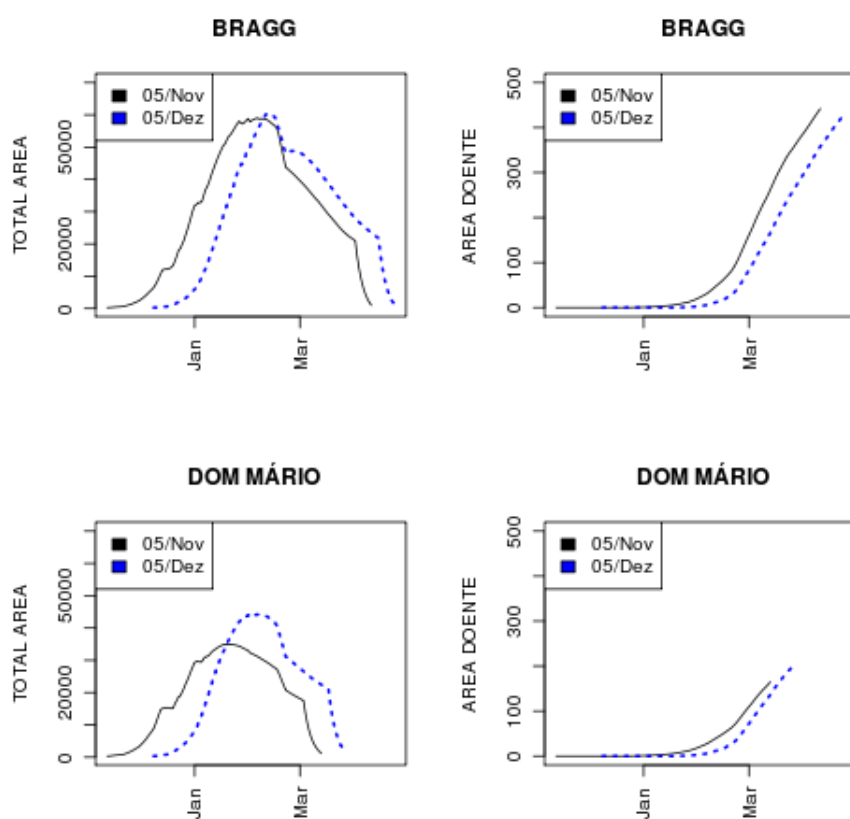


Figura 11: Valores simulados (cm^2/m^2) pelo modelo CROP-GRO:Soybean acoplado ao modelo de ferrugem asiática da soja, da área foliar total e da área doente para as cultivares Bragg e Don Mário em duas épocas de semeadura (5 de novembro e 5 de dezembro) nas condições clima e solo de Passo Fundo-RS, na safra 2006/2007.

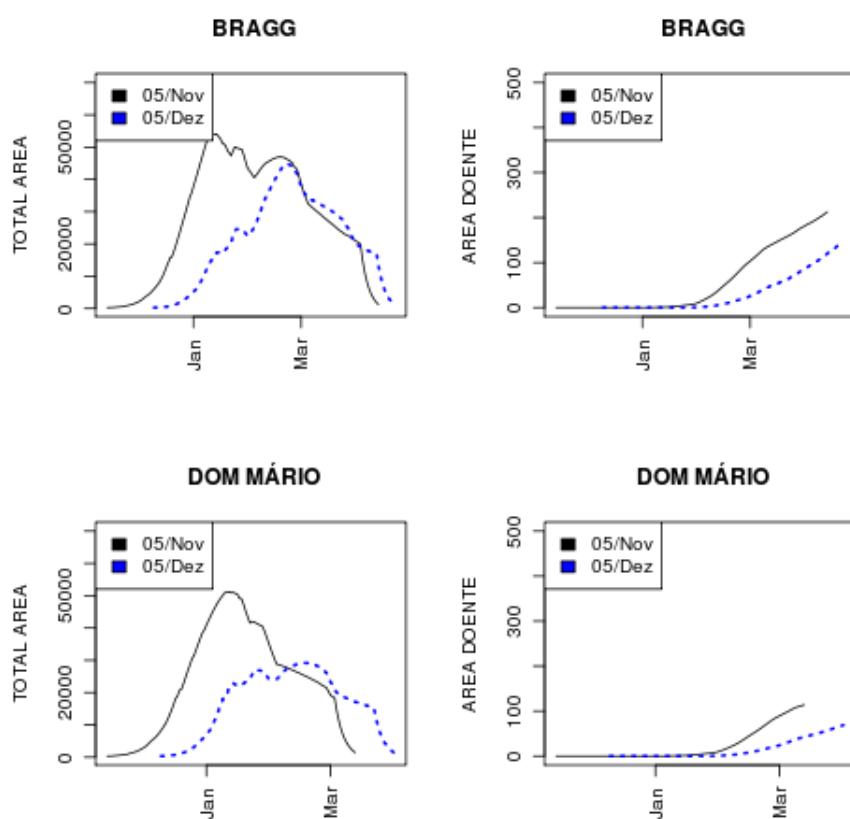


Figura 12: Valores simulados (cm^2/m^2) pelo modelo CROP-GRO:Soybean acoplado ao modelo de ferrugem asiática da soja, da área foliar total e da área doente para as cultivares Bragg e Don Mário em duas épocas de semeadura (5 de novembro e 5 de dezembro) nas condições clima e solo de Passo Fundo-RS, na safra 2007/2008.

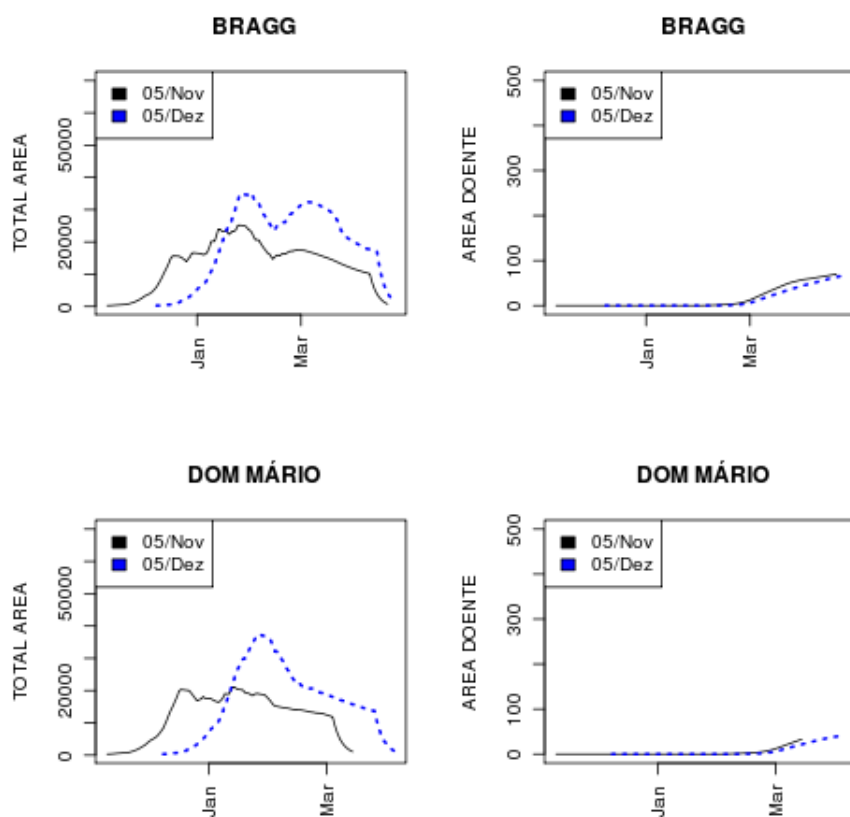


Figura 13: Valores simulados (cm^2/m^2) pelo modelo CROP-GRO:Soybean acoplado ao modelo de ferrugem asiática da soja, da área foliar total e da área doente para as cultivares Bragg e Don Mário em duas épocas de semeadura (5 de novembro e 5 de dezembro) nas condições clima e solo de Passo Fundo-RS, na safra 2008/2009.

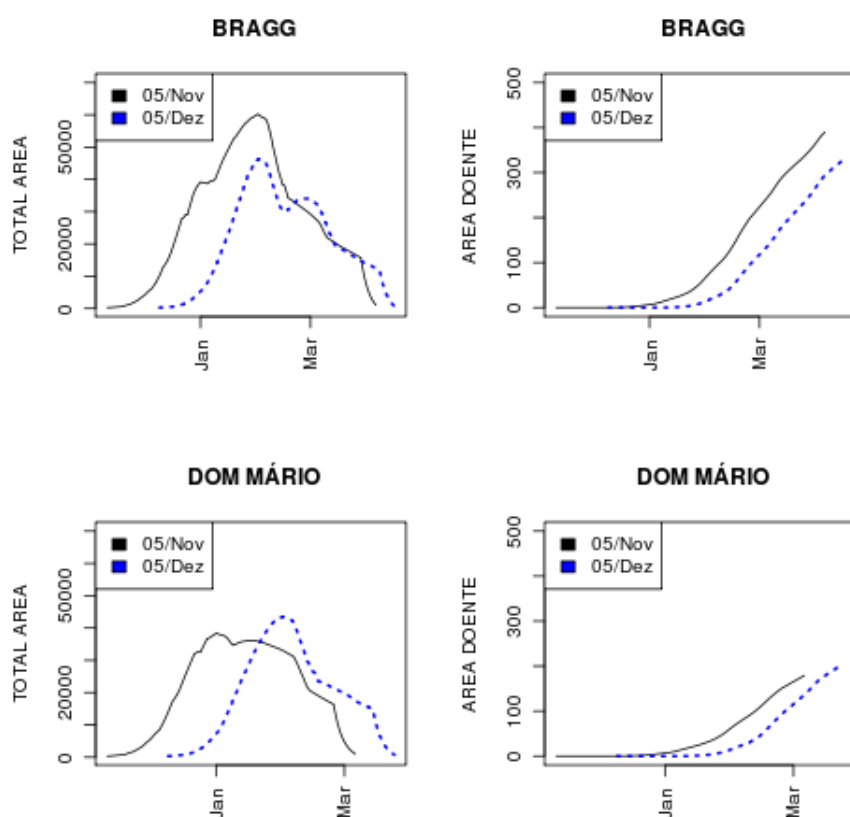


Figura 14: Valores simulados (cm^2/m^2) pelo modelo CROP-GRO:Soybean acoplado ao modelo de ferrugem asiática da soja, da área foliar total e da área doente para as cultivares Bragg e Don Mário em duas épocas de semeadura (5 de novembro e 5 de dezembro) nas condições clima e solo de Passo Fundo-RS, na safra 2009/2010.

A execução do modelo CROPGRO: soybean com o modelo de ferrugem asiática acoplado mostram que a área foliar doente variou conforme a cultivar, a época de semeadura e o ano. Na safra 2006/2007, a área foliar total foi semelhante para a cultivar Bragg nas duas épocas de semeadura enquanto na cultivar Don Mário a área foliar foi maior para a época de semeadura de 5 de dezembro. A área foliar afetada por ferrugem para a cultivar Bragg alcançou nas duas épocas,

ao redor de $400 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ praticamente o dobro que na cultivar Don Mário (Figura 11). Na safra 2007/2008, a área foliar total foi semelhante para as duas cultivares com diferenças marcantes para a época de semeadura, sendo que na época de 5 de dezembro a área foliar foi bastante reduzida em comparação a semeadura de 03 de novembro. Já a área doente alcançou o máximo de aproximadamente $200 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ na cultivar Bragg para a primeira época e ao redor de $150 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ para a segunda época. Já na cultivar Don Mário a área doente alcançou ao redor de 110 e $60 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ para a primeira e segunda épocas, respectivamente (Figura 12). Na safra 2008/2009, tanto a cultivar Bragg quanto a Don Mário apresentaram uma menor área foliar total para a primeira época de semeadura em relação a segunda época. Já a quantidade de área foliar doente foi semelhante para as duas épocas de semeadura com valores baixos $70 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ e $40 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ para as cultivares Bragg e Don Mário, respectivamente (Figura 13). Na safra 2009/2010, houve um maior crescimento vegetativo da cultivar Bragg na primeira época quando comparado com a segunda época. Já para a cultivar Don Mário esta diferença não foi acentuada. Em relação a área doente a progressão foi similar para as duas épocas de semeadura e para as duas cultivares. Entretanto, para a cultivar Bragg os valores máximos foram ao redor de $400 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ enquanto que na cultivar Don Mário foram a metade deste valor (Figura 14).

Discussão

O modelo CROPGRO: soybean simulou o ciclo das cultivares adequadamente conforme o esperado para a região do município de Passo Fundo, RS (J.M. Fernandes, comunicação pessoal). Os resultados de rendimento, severidade final e início da epidemia são apresentados na

tabela X. De uma maneira geral a cultivar de ciclo médio (Bragg) apresentou a tendência de expressar rendimentos (Kg ha⁻¹) mais altos durante o período simulado na ausência de doenças. Já a cultivar precoce (Don Mário) embora tenha mostrado a tendência expressar rendimento inferiores a de ciclo médio mostrou um menor efeito no rendimento pela presença da ferrugem asiática.

Os dados de rendimento de cultivares de soja e da severidade final de ferrugem asiática ainda que preliminares e exploratórios talvez sirvam para ajudar a explicar a grande aceitação que os produtores de soja tem manifestado em relação a cultivares de soja de ciclo mais precoce. O controle da ferrugem asiática em cultivares de ciclo médio, segundo a interpretação dos resultados da simulação, exigiria , principalmente, nas safras 2006/2007 e 2009/2010 um maior número de aplicações de fungicidas o que certamente elevaria o custo de produção. É evidente que este tipo de análise só poderá ser feita no momento em que este modelo modificado do CROPGRO: soybean venha a ser validado para um maior número de situações frente a observações medidas e comparadas com o que foi simulado pelo modelo. Assim mesmo, esta análise preliminar é bastante promissora e mostra as possibilidades que esta ferramenta poderia ter para a agricultura no Brasil.

Uma deficiência do CSM-CROPGRO: Soybean é a falta de detalhamento da estrutura do dossel de modo a permitir na comunidade de plantas estimativas dinâmicas do microclima que certamente influencia o estabelecimento e a sobrevivência de agentes causais de doença. Por exemplo, a umidade é um dos fatores mais importantes determinando a favorabilidade para o estabelecimento da grande maioria das doenças. A duração do molhamento foliar controla a germinação e a infecção. Além disso, o CSM-CROPGRO: Soybean usa a proposta de

uma única grande folha para representar a área foliar. Isto traz dificuldades para distribuir no modelo a incidência das doenças ao longo das camadas das folhas próximo do que acontece no mundo real.

No caso da ferrugem asiática da soja o aparecimento dos primeiros sintomas geralmente ocorre na porção inferior e disseminando com o passar do tempo para as camadas superiores (SCHMITZ & GRANT, 2009). É provável que o ambiente mais favorável em termos de umidade e luz nas camadas inferiores contribui para o sucesso das primeiras infecções. Além disso, em alguns patosistemas a idade dos tecidos exerce uma influência na dinâmica da formação de novas lesões. Na ferrugem do amendoin, por exemplo, a suscetibilidade do tecido diminui a medida que o tecido envelhece (WANG & LIN, 2000). No futuro, modificações no modelo CSM-CROPGRO: Soybean que contemplem um maior detalhamento da estrutura do componente “Arranjo de Folhas” deverá contribuir para que o acoplamento dos modelos como aqui apresentado venha a ter maior realismo.

Um passo importante para a validação do modelo CSM-CROPGRO: Soybean acoplado ao modelo de ferrugem asiática será uma melhor determinação sobre a favorabilidade das variáveis micrometeorológicas que influenciam o processo de colonização por *P. pachirizy* em plantas de soja. Os esporos do fungo são depositados nas folhas da parte inferior do dossel via eventos de chuva ou vento ou uma combinação de ambos, de plantas hospedeiras vizinhas já infectadas com o patógeno (DEL PONTE, 2006). Para que a colonização por *P. pachyrizi* no trifólios de planta de soja venha a ter sucesso é necessário que a presença de água livre nesta superfície por um período de 6 a 12 horas de forma contínua (SCHMITZ & GRANT, 2009). A origem da água na superfície dos trifólios em cultivos de soja não irrigados pode ser por orvalho ou chuva. DEL PONTE (2006) encon-

trou uma forte relação entre anos epidêmicos e números dias chuva. Neste estudo, foi usado horas de umidade relativa acima 90 % como indicador de molhamento foliar que nem sempre é um bom indicativo de água livre na superfície das folhas (KIM et al.,2010).

Um outro grande desafio para validar o modelo aqui apresentado é a estimativa do momento do aparecimento dos primeiros sinais da ferrugem asiática da soja. Na natureza o fungo da ferrugem asiática da soja sobrevive na entressafra em plantas de soja voluntárias em outros hospedeiros como o Kudzu, por exemplo. Durante o inverno na região de Passo Fundo. A ocorrência de geadas elimina uma grande parte das plantas voluntárias de soja mas certamente não todas. É comum encontrar plantas de soja que sobrevivem as baixas temperaturas do inverno por estarem protegidas por vegetação ou edificações ao longo das estradas. Neste estudo, presumiu-se que o inóculo estava presente em todos os anos a uma densidade muito baixa e que necessitava de uma certa quantidade de períodos favoráveis até atingir um valor que seria capaz de causar as primeiras infecções caso houvesse a presença de água livre. A premissa aqui é bastante simplista devido a lacuna que existe no conhecimento sobre a sobrevivência do patógeno durante o período de entressafra. Na prática sabemos que a sobrevivência do patógeno é muito importante para o aparecimento precoce da doença. Por isso no Brasil, em alguns estados foi estabelecido na forma de lei o vazio sanitário (Godoy ...).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, uma integração de dois modelos foi desenvolvida utilizando como base o modelo CSM-CROPGRO-SOYBEAN. Este último foi desenvolvido em linguagem FORTRAN, e da forma que estava implementado não possibilitava uma interação com modelos desenvolvidos em outras linguagens de programação, por esta razão, uma interface foi desenvolvida com outras linguagens de programação como o C, JAVA e a R. Um estudo foi realizado sobre abordagens de acoplamento mostrando que para esta interface de integração a abordagem comunicação é a ideal devido a diferença de linguagens entre os modelos.

A interface desenvolvida possibilitou integrar o modelo CSM-CROPGRO-Soybean a um modelo genérico de doenças assim possibilitando simular o dano que algum patossistema tal como, a ferrugem asiática possa causar na cultura da soja.

As interface JNI traz diversos benefícios para o modelo legado CSM-CROPGRO-Soyben, pois com a aplicação desta técnica de programação é possível estender a vida útil da aplicação através da reutilização do modelo sem precisar reescrever o código em alguma linguagem mais atual (abordagem de comunicação), fornecendo maior flexibilidade e facilitando o acréscimo novos módulos para o modelo, além da possibilidade de disponibilizar o seu uso pela WEB, valorizando a difusão de conhecimento.

Com o uso das características da linguagem Java, foi possível criar

um módulo central que controla os processos envolvidos na integração, desta forma facilitando a acoplação de novos módulos em ambos modelos e, por fim, ao trabalhar com as várias plataformas Java, surge a possibilidade de criação diversas formas de interface para a utilização dos modelos, podendo disponibilizar o seu uso tanto para Desktop, WEB e dispositivos móveis.

A integração de linguagens também é um ponto forte na integração com o uso da JNI pois através dela, módulos podem ser escritos em diferentes linguagens de programação .

Esta interface também proporciona o desenvolvimento de análises estatísticas e criação de gráficos dos dados gerados pelos modelos através do ambiente da linguagem R e a publicação destes modelos via WEB através do uso de um servidor WEB, assim possibilitando a portabilidade do modelo para qualquer sistema operacional pois seria executado partir de qualquer WEB browser.

A integração entre os modelos demonstrou-se possível e algumas alterações nos códigos dos modelos foram desenvolvidas para trabalhar com o mesmo padrão de dados. Alterações no código do modelo genérico de doenças foram desenvolvidas, pois o modelo CSM-CROPGRO-Soybean não trabalha com conjunto de órgãos, mas sim como uma única grande folha dificultando o uso da variável de desfolha causada pela doença, a qual foi desabilitada na execução das simulações até que o modelo CSM-CROPGRO-Soybean seja atualizado ou outra forma de trabalhar com este sistema seja implementada.

Os resultados das simulações desenvolvidas foram razoáveis, demonstrando que o modelo consegue distinguir anos epidemicos de anos não epidemicos. Os Uma futura validação da integração dos modelos deve ser desenvolvida, para complementar este estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMSON, C. What Is Java. 2006. Disponível em: <<http://www.onjava.com/pub/a/onjava/2006/03/08/what-is-java.html?page=1>> Acesso em 25 de maio. 2010.
- ALVES, S.A.M.; FURTADO, G.Q.; BERGAMIN FILHO, A. Influência das condições climáticas sobre a ferrugem da soja. In: Zambolim, L. (Org.). Ferrugem Asiática da Soja, Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora. p. 37-59, 2006.
- BALARDIN, R.S. A ferrugem asiática da soja. Fitopatologia Brasileira, Brasília, v.29, supl., p.19, 2004.
- BARNES, C.W.; SZABO, L.J.; BOWERSOX, V.C. Identifying and Quantifying Phakopsora pachyrhizi Spores in Rain. Phytopathology 99:4, 328-338, 2009.
- BERGER, R.D. & JONES, J.W. A general model for disease progress with functions for variable latency and lesion expansion on growing host plants. Phytopathology 75:792-797. 1985.
- BONDE, M.R.; BERNER, D.K.; NESTER, S.E.; & FREDERICK, R. D. Effects of temperature on urediniospore germination, germ tube growth, and initiation of infection in soybean by Phakopsora isolates. Phytopathology, 97:997-1003, 2007.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; MISHOE, J.W.; BERGER, R.D. Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions. Phytopathology, v. 73, p. 1581-1587, 1983.
- BOOTE, K. J.; GRIMM, S. S.; JONES, J. W.; HESKETH, J. D. Parameter estimation for predicting flowering date of soybean cultivars. Crop Science, v.33, p.137-144, 1993.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM G.; & N.E. Pickering. The CROPGRO model for grain legumes. In G.Y. Tsuji et al. (ed.) Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, the Netherlands, p. 99-128, 1998.
- BROOKS, R.J.; SEMENOV, M.A.J.P.D. Simplifying Sirius: sensiti-

vity analysis and development of a meta-model for wheat yield prediction. *European Journal of Agronomy.*, ed 14, p 43-60, 2001.

BULATEWICZ, Thomas Francis. Support for model coupling : an interface-based approach. Tese PhD, 2006.

CANTERI, M. G. ; GODOY, Cláudia Vieira ; PONTE, Emerson Medeiros Del ; FERNANDES, José Maurício Cunha ; PAVAN, Willingthon . Aplicações da computação na fitopatologia. *Revisão Anual de Patologia de Plantas, Passo Fundo*, v. 12, p. 243-285, 2004.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <www.conab.gov.br> Acesso em: 10 de abril. 2010.

COSTAMILAN, L. M.; BERTAGNOLLI, P.F.; YORINORI, J.T. Avaliação de danos em soja causados por ferrugem asiática. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 5 p. html (Embrapa Trigo. Comunicado Técnico Online, 96). Disponível: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co96.htm> Acesso em: 15 de fevereiro. 2010.

DEL PONTE, E.M.; FERNANDES, J.; PIEROBOM, C. & BERGSTROM, G. Giberela do trigo: aspectos epidemiológicos e modelos de previsão *Fitopatologia Brasileira*, scielo, 2004, 29, 587-605.

DEL PONTE, E.M.; LI, X.; YANG, X.B. Assessing the rainfall suitability of Asian soybean rust epidemics in the US soybean regions. *Proceedings, National Soybean rust symposium, Nashville, TN, USA.* 2005.

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

DEL PONTE, E.M. & YANG, X.B. Estratégias de modelaje para la predición e comunicación del riesgo de epidemias de la roya asiática de la soja. In: Popler, L.D. (Ed.) *Roya Asiática de la Soja en América – El libro.* Las Talitas, Tucumán, Estación Experimental Obispo Colombres. 2006, p. 49-62.

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

DEL PONTE, E.M.; TIBOLLA, G.; PAVAN, W.; GODOY, C.; CAMPANINI, S.M.S; RUFINO, C.G.; SEIXAS, C.D.S; SOARES, R.M. Nova plataforma para o mapeamento da dispersão da ferrugem asiática da soja no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Ferrugem Asiática, Londrina, 2007. In press.

Del Ponte, E.M., Martins, E.J., Esker, P.D., Godoy, C.V. Modelagem e previsão de epidemias de ferrugem asiática da soja – avanços na teoria e aplicação. In: Anais do II Workshop de Epidemiologia de Doenças de Plantas, Campos do Jordão, SP, 2007. pp. 28-35.

DORRANCE, A.E.; LIPPS, P.E.; MILLS, D. & VEGA-SÁNCHEZ, M. Soybean Rust. Ohio State University Extension Fact Sheet AC-0048-04, 2005.

ESKER, P.D.; DEL PONTE, E.M.; MARTINS, M. ; KATO, M.; SIQUERI, F.V.; SILVA, L.H.; GODOY, C.V. Effects of location and year on the temporal disease progress of Asian soybean rust in Brazil. In: 2007 APS/SON joint meeting, 2007, San Diego. Phytopathology, 2007. v. 97. p. S33.

FARIA, R.T.D. & BOWEN, W.T. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. Brazilian Archives of Biology and Technology, scielo, 2003, 46, 489-498.

FERNANDES, J.M.C.; MAFFIA, L.A. IN: LUZ, W.D.; FERNANDES, J.; A.M., P. & PICININI, E. O. Simulação de Epidemias Revisão Anual de Patologia de Plantas, RAP, 1994, 2.

GODOY, C.V. Resultados da rede de ensaios para controle químico de doenças na cultura da soja. Safra 2003/2004. Londrina PR. Embrapa Soja (Embrapa Soja. Documentos 251), 2005.

GODOY, C.V.; BOARD, J.E.; OMIELAN, J. & TOLLENAAR, M. Mechanisms Involved in Soybean Rust-Induced Yield Reduction S. Kumudini, 2008.

HARTMAN, G.L.; WANG, T.C.; & TCHANZ, A.T. Soybean rust development and the quantitative relationship between rust severity and soybean yield. Plant Disease, v.75, 1991, p.596-600.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications, Agric. Forest Meteorol. 103, pp. 137–157, 2000.

ICASA. ICASA - International Consortium for Agricultural Systems Applications. 2008. Disponível em: <http://icasa.net>. Acesso em 22/07/2010.

JONES, J.W.; KEATING, B.A. & PORTER, C.H. Approaches to modular model development Agricultural Systems, Elsevier Science Ltd, 2001, 70, 421-443.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, Oxford, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, 2003.

JOHNSON, K.B. & TENG, P.S. Coupling a disease progress model for early blight to a model of potato growth. Phytopathology 80:416-425. 1990.

KING, J.E.; COOK, R.J. & MELVILLE, S.C. A review of septoria diseases of wheat and barley Analls of applied biology, 1983, 2, 345-373.

KOCHMAN, J.K. The effect of temperature on development of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*). Australian Journal of Agricultural Research, Victoria, v. 30, 1979, p. 273-277.

KUMUDINI, S.; GODOY, C. V.; BOARD, J. E.; OMIELAN, J.; & TOLLENAAR, M. Mechanisms Involved in Soybean Rust-Induced Yield Reduction, 2008.

MCCLAY, A. CLIMEX models to predict the potential naturalised range of the european bumblebee *bombus terrestris* (L.) in Australia (Report), 2005.

MADDEN, L. V., & NUTTER, F. W., Jr. Modeling crop losses at the field scale. Can. J. Plant Pathol. 17: 124-137, 1995.

MADDEN, L. V.; G. Hughes, and M. E. Irwin. 2000. Coupling disease-progress-curve and time-of-infection functions for predicting yield loss of crops. Phytopathology 90: 788-800.

MAGAREY, R.; FOWLER, G.; BORCHERT, D.; SUTTON, T.; COLUNGA-GARCIA, M. & SIMPSON, J. NAPPFAST: An Internet System for the Weather-Based Mapping of Plant Pathogens Plant

- Disease, The American Phytopathological Society, 2007, 91, 281-299.
- MARCHETTI, M.A., MELCHING, J.S., BROMFIELD, K.R. The effects of temperature and dew period on germination and infection by urediospores of *Phakopsora pachyrhizi*. *Phytopathology* 66: 461-463, 1976.
- 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* 73: 117-122, 1989.
- MICROSYSTEMS, S. Designing Enterprise Applications with the J2EE Platform, Second Edition. 2002. Disponível em: <http://java.sun.com/blueprints/guidelines/designing_enterprise_applications_2e> Acesso em 25 de maio. 2010.
- NOAA, N.O.A.A. Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model 2007.
- PAVAN, W. Técnicas de Engenharia de Software Aplicadas à Modelagem e Simulação de Doenças de Plantas. Universidade de Passo Fundo, 2007.
- REIS, E.M.; SARTORI A.F.; & CAMARA, R.K. Modelo climático para a previsão da ferrugem da soja. *Summa Phytopathologica*, 30:290-92, 2004.
- ROSSI, R.L. First report of *Phakopsora pachyrhizi*, the causal organism of soybean rust in the Province of Misiones, Argentina. *Plant-Disease* 87:102, 2003.
- ROUSE, D.I. Use of crop growth-models to predict the effects of disease. *Annual Review of Phytopathology* 26:183-201. 1988.
- KIM, K. S.; TAYLOR S. E.; GLEASON, M. L.; NUTTER JR, F. W.; COOP, L. B.; PFENDER, W. F.; SEMM, R.C.; SENTELHAS. P.C.; GILLESPIE, T.J.; DALLA MARTA, A.; ORLANDINI, S.. Spatial portability of numerical models of leaf wetness duration based on empirical approaches, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 150, Issues 7-8, 15 July 2010, Pages 871-880.
- SCHERM H.; CHRISTIANO, R.S.C.; ESKER, P.D.; DEL PONTE, E.M.; GODOY, C.V. Quantitative review of fungicide efficacy trials for managing soybean rust in Brazil, *Crop Protection*, Volume

28, Issue 9, September 2009, Pages 774-782, ISSN 0261-2194, DOI: 10.1016/j.cropro.2009.05.006.

SCHNEIDER, R.W.; HOLLIER, C.; WHITAM, H.K.; PALM, M.E.; MCKEMY, J.M.; HERNANDEZ, J.R.; LEVY, L; & DEVRIES-PATERSON, R. First report of soybean rust caused by *Phakopsora pachyrhizi* in the continental United States. *Plant Disease*. 89:773, 2005.

SCHIMITZ, H.F. & GRANT, R.H. Precipitation and dew in a soybean canopy: Spatial variations in leaf wetness and implications for *Phakopsora pachyrhizi* infection. *Agricultural and forest Meteorology*. 149, p 1621-1627 2009.

SHAW, R. Yield loss estimation. [S.l.]: St. Paul: APS Press, 1997. 143.

SIQUERI, F.V. Ocorrência da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) no estado do Mato Grosso – safra 2004/2005. In: Juliatti FC, Polizel AC, Hamawaki OT (Eds.) I Workshop Brasileiro sobre a ferrugem asiática. Uberlândia MG. EDUFU. 2005, p. 93-100

SUTHERST, R.W. & MAYWALD, G.F. A computerised system for matching climates in ecology. *Agricultural Ecosystem Enu.*, 1985, 13, 281-299.

VERHAGEN, A.; CONIJN, S. & SCHAPENDONK, A. (ed.) Quicks-can of simulations models Plant Research International, 2001.

YANG, X.B.; DOWLER, W.M. & TSCHANZ, A.T. A simulation model for assessing soybean rust epidemics. *Journal of phytopathology*, Blackwell, Berlin, ALLEMAGNE (1986) (Revue), 1991, 133, 187-200.

YORINORI J.T.; PAIVA W.M.; FREDERICK R.D.; COSTAMILAN L.M.; BERTAGNOLI P.F.; HARTMAN G.L.; GODOY C.V.; NUNES J.J. Epidemics of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003, 2005, *Plant Disease* 89: 75-677.

WANG, Z.Z. & LIN, K.H. Modeling leafage-related susceptibility and rust eruption dynamics in peanut. *Peanut Science*, 27:7-10. 2000.

WAGGONER, P. & HORSFALL, J. EPIDEM a simulator of plant disease written for a computer. *Conn. Agric. Exp. Stn. Bull.*, 1969, 698, 1-80.

WAGGONER, P.; HORSFALL, J. & LUKENS, R. EPIMAY, a Simulator of southern corn leaf blight, Conn. Agric. Exp. Stn. Bull., 1972, 729.

WILLOCQUET, L; & SAVARY, S. An epidemiological simulation model with three scales of spatial hierarchy. *Phytopathology*, 2004, 94, 883-891.

ANEXO A - DADOS CLIMÁTICOS

PASSO FUNDO 2009

*WEATHER:EBPF PASSO FUNDO, BRAZIL

@ INSI	LAT	LONG	ELEV	TAV	TAMP	REFHT	WNDHT
EBPF	-28.250	-52.400	684	18.4	4.6	1.5	10.0
@DATE	SRAD	TMAX	TMIN	RAIN			
09001	26.1	29.0	17.5	0.0			
09002	11.2	23.5	16.2	0.8			
09003	10.1	18.0	13.2	24.4			
09004	10.5	18.3	11.9	3.1			
09005	29.0	25.7	10.2	1.3			
09006	27.8	28.9	13.7	0.0			
09007	29.0	30.8	14.9	0.0			
09008	26.3	31.0	16.9	0.0			
09009	18.6	27.6	11.8	0.0			
09010	14.2	25.4	17.0	13.7			
09011	24.7	29.5	16.3	0.0			
09012	24.1	30.6	17.3	0.0			
09013	10.1	24.7	18.3	0.0			
09014	20.1	27.9	16.7	3.5			
09015	23.9	29.0	17.7	0.0			
09016	12.7	27.1	18.1	0.5			
09017	18.5	27.0	16.9	4.2			
09018	24.5	29.8	17.1	18.6			
09019	10.1	22.7	15.8	10.7			
09020	13.6	22.4	14.9	0.5			
09021	28.1	27.7	12.8	0.0			
09022	28.7	28.0	15.8	0.0			
09023	28.8	26.9	13.4	0.0			
09024	28.7	28.7	14.2	0.0			
09025	18.5	29.3	14.0	0.0			
09026	27.2	32.0	18.7	0.0			
09027	23.4	31.0	19.1	0.2			
09028	23.0	29.6	19.2	0.0			
09029	21.0	27.5	17.4	11.8			
09030	28.2	28.8	18.5	1.2			
09031	18.5	26.3	18.5	0.0			
09032	25.0	30.8	14.8	0.0			
09033	16.6	30.7	17.1	0.0			
09034	13.7	25.8	18.6	4.0			
09035	23.3	28.2	18.2	1.8			

09036	26.7	31.0	15.4	0.0
09037	10.0	25.9	18.8	0.0
09038	24.0	30.8	18.1	0.0
09039	26.0	33.1	18.2	0.0
09040	12.9	30.4	18.2	7.0
09041	21.6	31.0	19.0	0.0
09042	11.9	25.9	21.2	1.3
09043	22.1	26.3	16.8	30.4
09044	25.4	28.2	14.3	0.0
09045	25.1	29.4	15.5	0.0
09046	25.9	29.6	16.4	0.0
09047	19.1	30.0	18.6	0.0
09048	23.9	30.6	19.0	0.0
09049	13.1	30.6	20.1	0.0
09050	10.8	29.8	21.2	9.5
09051	15.4	30.0	19.2	14.9
09052	14.3	27.8	19.0	24.6
09053	18.9	31.2	18.8	10.4
09054	14.6	28.0	19.5	0.0
09055	9.6	22.5	15.3	47.2
09056	9.3	22.1	17.1	1.6
09057	9.9	22.5	16.5	0.0
09058	16.9	28.0	18.3	2.3
09059	22.6	28.0	16.9	0.4
09060	14.5	29.7	19.9	0.3
09061	12.7	30.1	20.0	8.5
09062	21.0	31.0	16.6	6.4
09063	22.6	31.6	19.8	0.0
09064	12.3	25.9	20.2	0.0
09065	16.7	27.0	15.7	0.4
09066	22.0	30.2	15.7	0.0
09067	21.8	27.5	19.0	0.0
09068	14.8	26.7	15.5	0.0
09069	15.4	25.4	17.2	2.6
09070	12.4	26.3	18.6	0.0
09071	15.4	25.9	19.5	2.4
09072	19.1	27.1	16.2	1.0
09073	22.6	26.2	13.3	0.0
09074	22.6	27.4	13.3	0.0
09075	23.0	28.4	10.2	0.0
09076	16.6	26.3	15.5	0.0
09077	21.3	29.0	13.9	0.0
09078	17.7	28.8	16.8	0.0
09079	14.5	28.5	17.1	19.0
09080	22.5	29.5	15.5	1.5
09081	16.7	28.6	16.8	0.0
09082	19.1	29.2	17.8	3.7
09083	18.7	26.1	16.7	6.9
09084	18.4	29.2	15.9	0.0
09085	11.7	28.0	16.8	6.8
09086	8.6	24.9	18.0	9.0
09087	22.2	28.1	14.9	7.9
09088	22.6	30.6	16.8	0.0
09089	14.6	31.0	17.7	0.0
09090	21.5	30.6	18.3	0.0
09091	15.7	26.3	15.2	0.0
09092	18.3	30.4	13.3	0.0
09093	17.3	31.5	16.1	0.0
09094	16.6	31.0	15.9	0.0
09095	6.8	24.9	18.4	3.6

09096	17.7	29.9	16.4	0.0
09097	16.4	30.5	18.1	0.0
09098	18.1	28.8	18.1	0.0
09099	18.2	26.5	12.6	0.0
09100	18.9	22.4	11.5	0.0
09101	19.0	26.1	8.9	0.0
09102	18.7	30.4	13.4	0.0
09103	18.5	30.0	15.1	0.0
09104	18.2	28.7	15.9	0.0
09105	18.2	25.7	13.1	0.0
09106	18.9	28.8	13.5	0.0
09107	19.0	29.6	16.8	0.0
09108	6.6	29.0	13.3	0.0
09109	13.5	27.4	13.5	0.0
09110	15.1	22.3	11.9	1.0
09111	10.9	24.7	10.5	0.0
09112	6.6	19.0	15.1	0.2
09113	13.5	23.5	14.5	0.0
09114	18.2	26.3	12.5	0.0
09115	18.4	27.6	14.0	0.0
09116	18.3	27.4	15.3	0.0
09117	18.7	27.2	13.8	0.0
09118	19.1	27.1	14.8	0.0
09119	18.4	27.4	13.3	0.0
09120	18.9	24.5	11.9	0.0
09121	14.2	26.7	12.1	0.0
09122	10.1	24.9	12.5	0.0
09123	13.2	24.9	12.1	0.0
09124	12.6	26.5	13.3	0.0
09125	14.8	25.1	13.3	3.4
09126	15.5	19.5	11.1	0.0
09127	14.5	25.3	7.1	0.0
09128	5.3	18.6	10.9	0.0
09129	15.1	26.3	11.7	0.1
09130	12.3	27.3	12.5	0.0
09131	13.3	29.8	13.9	0.0
09132	5.4	23.1	16.4	0.6
09133	8.8	27.8	15.4	28.4
09134	5.3	18.2	9.4	51.8
09135	7.3	12.0	6.9	21.4
09136	15.2	15.5	3.1	0.0
09137	15.4	22.5	6.9	0.0
09138	9.7	24.7	9.9	0.0
09139	14.1	24.6	13.5	4.0
09140	14.4	26.9	13.8	0.0
09141	15.5	26.4	12.7	0.0
09142	15.3	26.2	13.8	0.0
09143	13.6	25.8	12.1	0.0
09144	7.9	24.5	12.3	0.0
09145	10.1	24.5	14.9	2.0
09146	7.1	21.5	15.9	0.0
09147	6.8	18.5	13.0	5.7
09148	10.6	17.5	11.3	0.2
09149	5.3	15.1	7.7	0.0
09150	5.3	15.1	11.4	29.0
09151	5.6	14.0	6.2	38.4
09152	4.6	7.5	5.3	1.4
09153	10.5	9.7	4.5	0.3
09154	13.4	14.3	-0.2	0.0
09155	10.6	17.5	2.7	0.0

09156	10.8	18.3	4.9	0.0
09157	13.5	16.2	3.1	0.0
09158	12.8	16.9	3.1	0.0
09159	10.1	19.5	7.5	0.0
09160	9.3	18.3	12.9	14.3
09161	11.4	19.6	9.9	0.4
09162	10.7	16.0	3.3	0.2
09163	9.1	17.5	3.8	0.0
09164	12.1	17.5	5.2	0.0
09165	13.8	18.2	6.3	0.0
09166	9.7	17.4	7.0	0.0
09167	5.7	11.8	11.0	20.6
09168	10.1	14.7	7.2	7.1
09169	11.4	19.5	6.4	0.0
09170	13.4	21.1	8.1	0.0
09171	13.7	21.9	7.9	0.0
09172	10.5	21.6	8.2	0.0
09173	6.5	22.6	12.7	0.0
09174	4.7	18.2	14.5	21.4
09175	4.6	15.7	7.6	5.3
09176	9.8	14.7	7.2	0.0
09177	10.8	18.3	7.8	0.0
09178	8.9	19.3	8.5	0.2
09179	11.1	21.1	8.9	0.0
09180	9.4	25.6	13.3	0.0
09181	11.8	15.5	7.7	4.0
09182	13.4	17.0	3.0	0.0
09183	14.3	17.9	4.7	0.0
09184	14.5	19.7	5.9	0.0
09185	13.7	21.1	5.1	0.0
09186	4.9	16.0	10.5	0.0
09187	10.8	24.1	11.3	0.0
09188	4.9	16.1	14.3	15.0
09189	4.9	15.7	14.3	60.2
09190	5.0	14.9	12.2	18.2
09191	5.0	16.3	12.1	1.6
09192	4.9	13.4	6.6	4.2
09193	11.7	11.5	0.5	7.9
09194	11.7	18.2	6.1	0.0
09195	11.7	14.3	6.1	0.0
09196	5.1	12.6	6.3	0.0
09197	4.9	15.3	10.3	67.2
09198	11.8	16.7	10.0	23.3
09199	10.6	14.4	4.2	0.2
09200	10.1	16.7	7.5	0.0
09201	11.0	18.5	7.4	0.0
09202	9.6	22.3	11.1	0.0
09203	7.9	17.0	10.3	22.2
09204	11.4	10.5	2.6	0.0
09205	13.5	6.4	-1.9	0.0
09206	13.5	12.5	-2.8	0.0
09207	13.3	16.2	0.3	0.0
09208	5.8	16.4	4.3	0.0
09209	5.5	15.7	8.8	1.8
09210	14.4	15.0	6.3	0.5
09211	13.8	14.5	1.8	0.0
09212	5.3	14.5	6.1	0.0
09213	10.5	21.0	10.3	4.2
09214	6.3	16.5	9.6	24.4
09215	9.5	13.9	7.8	1.4

09216	17.5	20.9	5.8	0.2
09217	8.4	26.7	11.9	0.0
09218	6.2	21.0	11.0	10.0
09219	5.9	17.0	10.5	40.8
09220	5.9	17.9	14.6	30.4
09221	5.9	15.6	11.6	42.9
09222	9.0	13.5	8.5	31.0
09223	13.4	16.7	3.3	1.1
09224	17.0	20.7	7.3	0.0
09225	17.4	24.9	9.3	0.0
09226	17.1	26.3	12.8	0.0
09227	17.0	26.4	12.8	0.0
09228	16.4	28.2	13.1	0.0
09229	5.9	22.0	14.8	12.4
09230	6.3	16.5	11.3	15.2
09231	10.6	20.5	11.7	51.3
09232	8.5	15.0	9.6	2.7
09233	7.6	12.0	7.0	0.8
09234	17.5	18.7	5.1	0.0
09235	12.4	18.7	8.9	0.0
09236	9.3	20.7	10.4	0.0
09237	17.4	23.1	10.7	0.0
09238	17.5	23.7	10.5	0.0
09239	17.4	24.7	11.3	0.0
09240	17.4	25.9	11.7	0.0
09241	17.3	27.1	12.1	0.0
09242	17.5	28.4	13.7	0.0
09243	17.2	28.4	13.9	0.0
09244	18.3	29.3	15.1	0.0
09245	7.4	19.0	15.2	13.0
09246	7.4	18.2	15.9	66.0
09247	14.3	21.5	14.7	19.3
09248	19.7	21.8	11.8	0.0
09249	14.0	25.4	11.8	0.0
09250	12.2	20.7	13.9	0.0
09251	7.4	17.8	10.0	55.0
09252	7.4	10.0	9.3	5.3
09253	7.4	10.6	7.9	18.1
09254	7.4	14.5	10.0	12.0
09255	7.4	14.5	12.3	74.4
09256	9.9	17.9	11.3	4.3
09257	18.4	21.3	11.5	0.2
09258	20.8	27.6	13.1	0.0
09259	7.4	21.5	14.9	0.0
09260	7.4	22.9	16.3	0.3
09261	7.4	17.0	14.0	65.8
09262	18.6	16.8	10.0	16.2
09263	21.1	17.5	4.9	0.0
09264	21.2	23.6	6.9	0.0
09265	12.2	23.5	13.1	0.0
09266	7.7	17.4	10.2	19.0
09267	16.8	16.6	7.5	5.4
09268	20.7	21.5	6.7	0.0
09269	12.8	24.7	12.8	0.0
09270	8.6	21.0	16.6	11.1
09271	7.4	17.4	10.8	102.8
09272	13.2	13.5	6.4	1.5
09273	16.9	17.7	3.5	0.0
09274	8.8	13.1	10.0	4.6
09275	18.5	18.1	8.9	3.6

09276	25.1	25.5	7.5	0.0
09277	22.4	29.5	13.6	0.0
09278	21.3	29.8	17.1	0.0
09279	8.8	23.8	14.9	39.2
09280	9.0	20.7	13.7	0.7
09281	11.3	20.2	11.9	0.0
09282	21.3	25.1	10.9	0.0
09283	24.4	25.0	12.1	0.0
09284	16.7	24.7	12.9	0.0
09285	18.8	20.6	13.9	40.7
09286	25.3	23.2	8.4	0.1
09287	17.4	25.7	12.5	0.0
09288	11.1	19.0	12.4	23.2
09289	9.0	16.7	9.1	0.0
09290	13.1	22.4	11.2	0.0
09291	17.6	23.1	13.3	0.2
09292	22.3	25.4	13.9	0.0
09293	25.0	25.5	14.7	1.0
09294	14.4	27.2	12.3	0.0
09295	22.7	24.6	13.4	8.4
09296	26.0	29.2	13.3	0.0
09297	11.5	20.0	16.9	0.0
09298	18.4	25.0	14.1	12.2
09299	16.8	21.8	14.8	0.0
09300	18.0	25.8	9.9	0.0
09301	23.4	29.6	13.2	0.0
09302	24.9	31.6	14.9	0.0
09303	21.4	33.0	17.4	0.0
09304	24.4	33.9	18.4	0.0
09305	27.8	33.5	18.2	0.0
09306	27.8	34.5	19.3	0.0
09307	14.2	32.6	19.6	0.0
09308	29.7	35.1	19.0	0.1
09309	23.5	34.6	22.3	0.0
09310	10.9	27.2	20.0	0.5
09311	9.8	24.6	19.4	6.2
09312	18.0	24.0	14.6	6.8
09313	27.4	30.4	14.2	0.0
09314	9.8	23.4	16.2	5.3
09315	16.4	26.4	15.1	48.4
09316	13.6	29.8	18.2	0.0
09317	11.8	25.5	19.0	9.4
09318	9.8	22.0	17.2	39.3
09319	9.9	23.0	16.2	16.2
09320	23.9	28.8	16.3	24.8
09321	27.2	31.6	17.3	0.0
09322	9.8	25.9	18.4	0.0
09323	22.9	34.1	19.8	10.1
09324	9.8	26.9	18.5	23.8
09325	14.0	27.5	21.1	7.4
09326	9.8	22.0	17.8	77.8
09327	11.4	28.2	16.8	5.2
09328	12.5	30.1	19.7	0.0
09329	11.6	27.4	20.7	2.7
09330	20.5	30.3	19.9	0.5
09331	22.1	32.2	20.5	0.0
09332	15.2	28.6	19.8	8.5
09333	27.4	32.3	17.0	7.0
09334	14.4	25.7	18.0	49.0
09335	24.5	29.2	17.2	4.2

09336	15.1	27.0	18.3	0.0
09337	24.1	29.0	17.0	23.0
09338	27.7	24.2	14.7	0.0
09339	28.6	28.4	13.1	0.0
09340	15.1	26.4	16.4	0.0
09341	15.7	25.2	17.4	0.0
09342	21.1	28.3	16.3	7.2
09343	18.6	28.0	17.5	0.2
09344	19.5	28.4	17.8	34.9
09345	15.2	28.0	19.8	0.0
09346	11.1	20.4	14.6	19.8
09347	26.2	23.0	11.4	2.2
09348	29.3	28.0	12.1	0.0
09349	28.6	30.5	16.5	0.0
09350	25.5	32.2	17.5	0.0
09351	20.0	25.4	18.4	12.8
09352	27.5	30.4	17.1	0.0
09353	28.4	31.9	17.5	0.0
09354	19.5	31.0	19.1	0.0
09355	13.5	29.5	21.0	0.0
09356	21.0	31.6	20.2	4.3
09357	19.7	32.6	20.0	0.0
09358	22.5	29.6	19.5	23.4
09359	20.1	29.6	19.8	2.6
09360	23.5	32.6	20.6	1.4
09361	17.0	29.4	20.0	0.6
09362	28.9	32.0	19.7	0.0
09363	28.1	32.0	20.3	0.0
09364	10.7	27.2	22.0	5.4
09365	23.8	27.8	19.5	0.0
10001	20.5	28.1	15.5	0.0
10002	24.3	31.5	18.4	0.0
10003	21.6	33.0	21.2	0.0
10004	10.3	28.7	20.2	10.8
10005	12.4	28.6	20.2	30.8
10006	13.0	27.8	20.4	7.6
10007	17.7	26.9	18.3	1.8
10008	24.1	30.0	17.9	0.0
10009	10.1	27.8	19.4	0.0
10010	10.6	27.1	20.6	0.0
10011	18.0	29.2	19.4	1.4
10012	14.0	27.6	19.8	0.0
10013	10.1	23.1	18.2	14.3
10014	25.0	26.8	16.6	0.2
10015	24.5	27.4	15.2	0.0
10016	22.3	29.6	17.9	0.0
10017	14.5	26.4	18.5	10.8
10018	21.0	29.4	17.5	17.4
10019	10.1	27.6	20.4	1.1
10020	15.1	25.5	18.6	16.9
10021	25.8	25.3	14.5	0.2
10022	19.1	26.8	17.6	0.0
10023	18.5	28.2	17.7	0.0
10024	21.1	28.3	18.5	0.2
10025	15.5	27.3	17.3	0.4
10026	25.2	28.7	17.7	0.5
10027	25.4	29.6	16.3	0.0
10028	17.7	27.8	18.9	1.8
10029	27.0	28.8	16.9	10.1
10030	27.9	30.8	19.8	0.2

10031	23.0	30.6	19.6	0.0
10032	20.2	30.5	20.5	0.0
10033	24.5	32.0	20.3	0.0
10034	26.5	33.1	21.8	0.0
10035	26.1	34.1	22.4	0.0
10036	22.4	34.3	22.7	0.0
10037	25.0	34.0	20.7	0.0
10038	23.5	33.9	23.2	0.0
10039	10.5	26.5	18.4	0.0
10040	21.4	30.0	16.5	9.2
10041	20.3	30.2	18.2	0.0
10042	23.4	31.4	18.5	0.0
10043	27.1	31.0	19.4	13.4
10044	18.9	30.5	19.7	0.0
10045	11.5	27.6	18.7	0.4
10046	10.2	26.1	20.2	26.8
10047	16.1	26.5	18.3	41.1
10048	22.3	26.8	18.2	2.8
10049	26.4	28.6	18.0	0.0
10050	27.2	29.3	17.5	0.0
10051	16.7	29.4	19.7	0.0
10052	19.2	30.0	21.0	0.0
10053	12.5	29.6	20.0	7.6
10054	12.3	28.4	20.4	0.0
10055	15.9	26.1	17.4	2.1
10056	26.9	23.2	11.9	0.2
10057	22.7	25.5	13.1	0.0
10058	24.3	27.6	16.2	0.0
10059	26.5	27.6	16.4	0.0
10060	22.7	27.2	16.1	0.0
10061	22.9	27.8	15.3	0.0
10062	22.9	28.0	15.5	0.0
10063	15.7	29.8	17.3	0.0
10064	20.4	29.4	17.2	0.0
10065	21.4	27.3	14.3	0.0
10066	20.1	26.2	14.8	0.0
10067	18.6	29.0	16.8	0.0
10068	21.3	28.4	17.0	0.0
10069	15.7	27.6	18.3	0.0
10070	21.1	28.6	16.9	0.0
10071	22.8	29.0	15.8	0.0
10072	8.1	24.5	15.3	0.0
10073	8.1	21.0	15.9	4.1
10074	14.7	25.7	13.8	0.2
10075	22.5	27.4	13.7	0.0
10076	22.0	29.9	14.7	0.0
10077	22.2	33.0	15.4	0.0
10078	16.2	31.2	16.8	0.0
10079	16.2	28.6	18.8	11.6
10080	19.0	30.6	15.9	0.4
10081	8.1	23.2	16.4	22.7
10082	8.1	20.6	18.0	2.8
10083	8.1	24.0	18.4	2.2
10084	12.0	25.0	18.1	0.3
10085	14.9	29.8	18.3	0.0
10086	11.0	28.4	18.4	0.0
10087	14.8	28.2	17.6	17.6
10088	12.6	25.5	17.8	0.0
10089	22.5	29.2	15.1	6.1
10090	21.5	30.8	15.7	0.0

10091	17.8	31.0	16.8	0.0
10092	17.8	31.4	18.5	0.0
10093	17.7	31.4	16.2	0.0
10094	6.8	22.4	14.6	0.0
10095	13.8	21.2	13.0	0.0
10096	18.5	20.6	10.5	0.0
10097	17.0	22.4	9.8	0.0
10098	15.8	22.2	10.1	0.0
10099	18.9	23.9	9.2	0.0
10100	18.8	25.1	11.4	0.0
10101	18.4	25.6	12.3	0.0
10102	15.7	26.4	13.7	0.0
10103	17.0	27.6	13.2	0.0
10104	14.9	27.6	14.8	0.0
10105	9.1	22.3	15.0	0.0
10106	14.4	24.5	13.2	0.0
10107	15.2	30.2	15.9	0.0
10108	10.3	29.6	16.4	0.0
10109	18.3	31.8	15.4	0.0
10110	6.7	22.8	15.9	0.6
10111	6.6	18.4	16.3	45.2
10112	6.6	19.8	15.0	36.2
10113	6.6	15.4	12.0	27.4
10114	7.5	20.0	10.4	0.0
10115	6.6	19.0	15.1	3.8
10116	6.6	18.0	13.6	87.4
10117	15.3	21.2	13.2	15.8
10118	19.2	22.0	9.7	0.0
10119	16.8	22.4	9.6	0.0
10120	17.8	24.2	11.8	0.0
10121	15.2	23.8	10.1	0.0
10122	12.5	25.7	9.1	0.0
10123	5.4	23.4	13.2	0.0
10124	5.5	19.6	13.1	9.2
10125	5.3	17.4	12.3	0.6
10126	15.0	24.5	11.1	0.0
10127	5.3	17.9	13.8	1.2
10128	6.3	14.2	10.6	10.8
10129	8.6	16.0	7.4	0.0
10130	6.7	15.3	9.5	0.0
10131	6.7	15.4	10.0	1.4