

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

**Crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758)
(Hemiptera: Aphididae) em trigo: uma aproximação por simulação**

Roberto Wiest

Passo Fundo 2019

Roberto Wiest

Crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae) em trigo: uma aproximação por simulação

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção de título de Doutor em Agronomia.

Orientador:

José Roberto Salvadori

Coorientador:

José Maurício Cunha Fernandes

Passo Fundo 2019

CIP – Catalogação na Publicação

W652c Wiest, Roberto

Crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi*
(Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae) em trigo: uma
aproximação por simulação /. – 2019.

122 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: José Roberto Salvadori.

Coorientador: José Maurício Cunha Fernandes.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo
Fundo, 2019.

1. Trigo. 2. Afídeo. 3. Insetos nocivos - Controle.
4. Simulação (Computadores). I. Salvadori, José Roberto,
orientador. II. Fernandes, José Maurício Cunha, coorientador.
III. Título.

CDU: 633.11

ATA DE DEFESA DE TESE



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a tese

"Crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae) em trigo: uma aproximação por simulação"

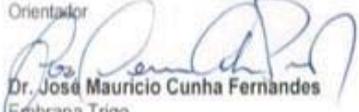
Elaborada por

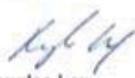
Roberto Wiest

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
"Doutor em Agronomia – Área de Produção e Proteção de Plantas"

Aprovada em: 05/04/2019
Pela Comissão Examinadora


Dr. José Roberto Salvadori
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador


Dr. José Mauricio Cunha Fernandes
Embrapa Trigo
Coorientador


Dr. Douglas Lau
Embrapa Trigo


Dr. Alexandre Tagliari Lazzaretti
Instituto Federal Sul-Rio-Grandense


Dr. Willington Pavan
Embrapa Trigo


Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi
Coordenador PPGAgro


Dr. Eraldo Lourenso Zanella
Diretor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária
Universidade de Passo Fundo

DEDICATÓRIA

À minha filha Gabriela, a rosa do meu jardim, com seus dois anos de idade forneceu excelentes contribuições para este trabalho. Te amo, minha princesa.

À minha esposa Ieda, pelo companheirismo, paciência e incentivo. Amo você.

À minha mãe Lori, pelo apoio incondicional em todos os momentos e pelo exemplo de vida. E ao meu padrasto Nelson, pelo carinho e alegrias.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer à Deus pela saúde e fonte de força.

Ao professor José Roberto Salvadori, por ter aceitado ser meu orientador e agradeço pelos ensinamentos.

Ao professor e amigo José Maurício Cunha Fernandes, pela paciência, incentivo e dedicação do seu tempo em repassar seu conhecimento e experiência de vida. Exemplo de profissional e pessoa. Obrigado pelos ensinamentos e contribuições.

Ao Laboratório de Entomologia da Embrapa Trigo de Passo Fundo, em especial ao pesquisador e amigo Douglas Lau. Sem seu suporte técnico não seria possível a realização deste trabalho. Obrigado pelos ensinamentos e contribuições.

Ao professor Willingthon Pavan, pelas contribuições e suporte na realização deste trabalho. Obrigado por ter cedido o código fonte do modelo DSSAT.

Ao amigo e colega de profissão Alexandre Tagliari Lazzaretti, obrigado pelo incentivo, inspiração e suporte para realização deste trabalho.

Ao colega de profissão Josué Toebe, agradeço a disponibilidade e gentileza de ter cedido o código fonte do ABMPraga.

À equipe do projeto de pesquisa Mosaico da Universidade de Passo Fundo, pelo auxílio técnico. Em especial, ao Fábio Oliveira em contribuir para o acoplamento dos modelos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade de Passo Fundo, em especial, aos professores pelos ensinamentos e funcionários.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense pelo apoio financeiro e pela concessão do afastamento no final de meu trabalho, fator importante para a sua conclusão.

Aos colegas professores dos cursos de Informática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, campus Passo Fundo pelos momentos de descontração.

Por fim, e não tão menos importante, aos meus sogros Pedro e Maria, cunhadas, cunhados e sobrinhos agradeço a compreensão e amizade.

MUITO OBRIGADO!!!

EPIGRAFE

“Carrego nas mãos / As marcas de ontem / Já perdi o medo / Pois aprendi / Aprendi
a ser valente / Neste meu caminho / Muitas vezes sozinho / Mas cheguei aqui”

Primeira estrofe da música Manotaços - Celso Souza

RESUMO

Wiest, Roberto. Crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae) em trigo: uma aproximação por simulação. 122 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2019.

O trigo (*Triticum* spp.) destaca-se como um dos principais alimentos na atualidade. A utilidade deste cereal de inverno é variada, sendo influenciada por fatores como o clima, doenças, pragas, solo, entre outras. Um dos principais problemas enfrentados pelos agricultores são as pragas e doenças que danificam suas plantações. O afídeo *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) é uma das pragas de cereais mais importantes devido à sua ampla distribuição geográfica e abundância. No Brasil, as perdas econômicas associadas a esse pulgão resultam principalmente da transmissão do vírus nanismo-amarelo da cevada. O interesse acadêmico e comercial em criar sistemas especialistas para identificar a população, as taxas de crescimento e os danos decorrentes impulsiona os estudos para o desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão. Os modelos de simulação baseados em agentes são sistemas eficientes, pois podem lidar com os complexos processos envolvidos no comportamento individual em um espaço heterogêneo. Diante disso, o objetivo geral deste trabalho foi verificar se o ajuste e parametrização do modelo de simulação baseado em agentes ABISM (*Agent Based Insect Simulation Model*), examinado pela relação entre temperatura e diferentes épocas de infestação, modifica a simulação do crescimento populacional de *R. padi* e seu efeito no rendimento de grãos de trigo. Especificamente: a) projetar e implementar uma interface gráfica para a execução de simulações e visualização de dados; b) parametrizar os módulos de desenvolvimento e reprodução no ABISM e simular o crescimento populacional do afídeo *R. padi* em plantas de trigo expostas em ambientes com diferentes regimes térmicos e c) desenvolver uma arquitetura para a integração entre um modelo baseado em agentes e o que simula o crescimento e desenvolvimento de uma cultura e parametrizar os modelos para simular a densidade, a incidência e o dano causado pelo afídeo em plantas de trigo para condições de campo. O modelo de simulação ABISM é uma ferramenta apropriada para simular o crescimento populacional de *R. padi* e seu efeito no rendimento de grãos de trigo.

Palavras-chave: 1. Afídeo. 2. Regime térmico. 3. Modelo baseado em agentes. 4. Sistema de apoio à tomada de decisão. 5. Dinâmica populacional.

ABSTRACT

Wiest, Roberto. Population growth of *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae) in wheat: a simulation approach. 122 f. Thesis (Doctor in Agronomy) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2019.

The wheat (*Triticum aestivum*) stands out as one of the main foods at present. Wheat yields are influenced by factors like the weather, diseases, insect pests, soil, among others. One of the main problems faced by the farmers are the insect pests and diseases that damage their crops. The aphid, *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758), is one of the most important insects feeding on cereals due to its wide geographical distribution and abundance. In Brazil, the economic losses associated with this aphid mostly result from the barley yellow-dwarf virus transmission. The academic and commercial interest in building specialized systems to aphid identification, the population growth, and the current damages motivates for the development of decision support systems. Simulation models based on agents can account for complex processes involved in individual behavior in a heterogeneous space. The objective of this work was to parameterize a simulation model based agents (ABISM: Agent-Based Insect Simulation Model). The model simulates *R. padi* population growth on wheat plants with fluctuating temperature and different time of infestation. The effect of *R. padi* on wheat yield was simulated as well. The specific objectives were: a) to develop and implement a graphic interface for the execution of simulations and data visualization. b) to configure the development and reproduction modules in ABISM to respond to different thermal regimes. c) to develop an architecture for the integration of ABISM a wheat simulation model. The coupled simulation models can simulate the population growth of *R. padi* and its effect in the wheat growth and final grain yield.

Key words: 1. Aphid. 2. Thermal regime. 3. Agent-based model. 4. Decision support system. 5. Population dynamics.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	<i>Afídeos</i>	16
2.1.1	Ciclo de vida e características biológicas	16
2.1.2	Dinâmica populacional	20
2.2	<i>Modelos de simulação</i>	21
2.3	<i>Trabalhos relacionados</i>	23
2.3.1	Abordagens de acoplamentos de modelos de simulação	25
2.4	<i>MPI (Message Passing Interface)</i>	27
2.5	<i>O framework Shiny</i>	28
3	CAPÍTULO I	30
3.1	<i>Resumo</i>	30
3.2	<i>Introdução</i>	30
3.3	<i>Visão geral do modelo ABISM (Agent Based Insect Simulation Model)</i>	32
3.4	<i>Prova de conceito</i>	37
3.4.1	Parametrização para <i>Rhopalosiphum padi</i>	38
3.5	<i>Discussão</i>	43
3.6	<i>Conclusões</i>	44
4	CAPÍTULO II	45
4.1	<i>Resumo</i>	45
4.2	<i>Introdução</i>	45
4.3	<i>Material e Métodos</i>	47
4.3.1	Dados experimentais	47
4.3.2	Procedimentos	49
4.3.3	Análise estatística	49
4.4	<i>Resultados</i>	49
4.4.1	Regime térmico constante	49
4.4.2	Regime térmico flutuante	52
4.4.3	Regime térmico variável	56

4.5	<i>Discussão</i>	58
4.6	<i>Conclusões</i>	60
5	CAPÍTULO III	62
5.1	<i>Resumo</i>	62
5.2	<i>Introdução</i>	62
5.3	<i>Material e Métodos</i>	65
5.3.1	Dados meteorológicos	65
5.3.2	Dados experimentais	65
5.3.3	DSSAT/NWheat	66
5.3.4	Interface de acoplamento	67
5.3.5	Procedimentos	70
5.3.6	Análise estatística	74
5.4	<i>Resultados</i>	74
5.4.1	Densidade populacional	76
5.4.2	Incidência	80
5.4.3	Dano direto	84
5.5	<i>Discussão</i>	86
5.6	<i>Conclusões</i>	90
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
7	CONCLUSÃO GERAL	93
	REFERÊNCIAS	94
	ANEXOS	105
	<i>Anexo I Tabela da síntese dos experimentos realizados nos três regimes térmicos sobre o crescimento populacional do afídeo R. padi. Passo Fundo, 2014-2015.</i>	106
	<i>Anexo II Tabela da síntese dos experimentos realizados a campo sobre o período, temperatura, área experimental, infestação, rendimento e número final de afídeos R. padi. Coxilha – RS, 2013-2017.</i>	109
	APÊNDICES	112
	<i>Apêndice I Figura referente a representação das principais classes, métodos e atributos que fazem parte do framework ABISM</i>	113
	<i>Apêndice II Figura referente a representação dos principais métodos e atributos das classes que fazem parte da interface de acoplamento do framework ABISM. Passo Fundo - RS, 2019</i>	115
	<i>Apêndice III Tabela da síntese dos experimentos realizados nos três regimes térmicos sobre o crescimento populacional do afídeo R. padi. Passo Fundo, 2014-2015.</i>	117
	<i>Apêndice IV Tabela da síntese dos experimentos simulados realizados a campo sobre o período, temperatura, área experimental, infestação, rendimento e número final de afídeos R. padi. Coxilha – RS, 2013-2017.</i>	120

1 INTRODUÇÃO

O trigo destaca-se como um dos principais alimentos na atualidade. A utilidade deste cereal de inverno é variada, sendo influenciada por diversos fatores como o clima, doenças, pragas, solo, entre outras. No Brasil, entre as doenças que têm causado maiores perdas está o nanismo-amarelo da cevada. Esta doença é causada por várias espécies de *Barley yellow dwarf virus* – BYDV e *Cereal yellow dwarf virus* - CYDV pertencentes a família Luteoviridae.

Entre as pragas que atacam o trigo destaca-se o afídeo ou pulgão *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae). Os danos causados por esta praga podem ser classificados em dois tipos, direto e indireto. O dano direto é produzido pela sucção da seiva e pela inserção de toxinas na planta, contidas na saliva do inseto. O indireto resulta da transmissão de vírus como o B/CYDVs. As plantas da família Poaceae destacam-se como hospedeiras do B/CYDVs, e as planta voluntárias, como por exemplo, aveia (*Avena* spp.) e trigo (*Triticum* spp.), são um meio alternativo para a epidemiologia desse vírus, oportunizando sua sobrevivência, e do vetor, durante o período de entressafra (IRWIN; THRESH, 1990; VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007; WALLS et al., 2016).

As pragas e as doenças, na maioria das vezes, são controladas com o uso de produtos químicos. Os efeitos dessas substâncias costumam ser prejudiciais para a fauna, flora e saúde humana ou até mesmo sobre a sustentabilidade e produção agrícola através da dizimação dos benefícios dos inimigos naturais. Além disso, quando os produtos químicos são usados sistematicamente, eles perdem eficiência devido a rápida seleção de indivíduos resistentes entre os organismos visados (HOANG et al., 2014).

Os modelos de simulação buscam reproduzir o comportamento de sistemas existentes no mundo real. Um sistema sempre presume uma interação entre as partes que o constitui. Para que estas partes possam interagir de forma adequada é importante identificar os objetivos do sistema. Assim, o processo de modelagem de um sistema é dividido em três categorias de modelos: simbólicos, matemáticos e de simulação. O

primeiro é composto por símbolos gráficos. Um fluxograma, por exemplo, é um modelo simbólico. Os modelos matemáticos, são um conjunto de fórmulas matemáticas, que possuem soluções rápidas e exatas. Por fim, os modelos de simulação executam com mais exatidão os eventos ocorridos em sistemas reais (CHWIF; MEDINA, 2006). A simulação pode ser aplicada em diversas áreas, por exemplo, aeroportos, supermercados e agricultura. Na agricultura pode ser usada para representar fenômenos como o crescimento de culturas, risco de epidemias, ciclo de vida de insetos, dinâmica do nitrogênio e água no solo, manejo da irrigação, etc.

Os modelos de simulações são programas de computador que auxiliam na criação de estratégias de proteção de culturas e também na análise do impacto das pragas sobre estas culturas. Isto tem se tornado importante na criação de ferramentas de apoio para a tomada de decisão (DUFFY; FEALY; FEALY, 2017).

Para que um modelo de simulação de inseto ou de doença possa prever adequadamente os danos causados por estes agentes ele necessita, além dos dados do meio ambiente (climatológicos – meteorológicos) e biológicos (patógeno ou praga), de dados gerados por um modelo de cultura (hospedeiro). Nesse sentido, são poucos os modelos que executam simultaneamente dois modelos ou mais. A utilização de modelos acoplados não é uma tarefa simples e requer profundo conhecimento desde o gerenciamento do experimento até a análise e interpretação dos dados gerados (CHENU et al., 2017).

Atualmente existem modelos desenvolvidos e mantidos, há mais de 40 anos, em linguagens de programação tradicionais, como Fortran e C, ou mais recentemente na linguagem Java. Devido a heterogeneidade envolvida em cada modelo de simulação é custoso, computacionalmente, considerar o desenvolvimento do ciclo de vida de um inseto e em paralelo o crescimento e desenvolvimento de uma cultura ou ainda, concomitante, a simulação das doenças transmitidas pelos insetos e que possam afetar essa cultura.

O modelo proposto por Toebe (2014), denominado ABISM (*Agent Based Insect Simulation Model*), é baseado em agentes e simula a dinâmica populacional de insetos pragas agrícolas. Para que o modelo possa ser executado ele considera diversos

parâmetros e especificidades do ciclo de vida dos insetos, a reprodução, determinação da morfologia, a mortalidade, a alimentação e o desenvolvimento.

Diante disso, o objetivo geral deste trabalho foi verificar se o ajuste e parametrização do modelo de simulação baseado em agentes ABISM, examinado pela relação entre temperatura e diferentes épocas de infestação, modifica a simulação do crescimento populacional do afídeo *Rhopalosiphum padi* e seu efeito no rendimento de grãos de trigo. Especificamente: a) projetar e implementar uma interface gráfica para a execução de simulações e visualização de dados; b) parametrizar os módulos de desenvolvimento e reprodução no ABISM e simular o crescimento populacional do afídeo *R. padi* em plantas de trigo expostas em ambientes com diferentes regimes térmicos e c) desenvolver uma arquitetura para a integração entre um modelo baseado em agentes e o que simula o crescimento e desenvolvimento de uma cultura e parametrizar os modelos para simular a densidade, a incidência e o dano causado pelo afídeo em plantas de trigo para condições de campo.

Este trabalho está organizado da forma que nesta Introdução estão apresentados a problemática, a justificativa, a hipótese e os objetivos. O próximo componente deste trabalho - Revisão da Literatura - apresenta aspectos conceituais sobre o sujeito (*R. padi*) e o objeto da pesquisa (modelos de simulação), com as principais descobertas sobre o assunto ocorridas nos últimos anos. No Capítulo: I) é apresentado e discutido a arquitetura do modelo ABISM e uma interface gráfica para simulação e visualização de dados; II) é simulado e discutido o crescimento populacional do *R. padi* em ambientes com diferentes regimes térmicos e III) é apresentada uma interface para acoplamento entre um modelo baseado em agentes e o que simula o crescimento e desenvolvimento de uma cultura e simulado e discutido a densidade, a incidência e o dano causado pelo afídeo em plantas de trigo para condições de campo. Em seguida, faz-se as Considerações finais e, por fim, apresenta-se a Conclusão geral.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Afídeos

Mundialmente, há aproximadamente 4.700 espécies classificadas na família Aphididae (superfamília Aphidoidea, subordem Sternorrhyncha e ordem Hemiptera). Em meio a essa diversidade de afídeos, ou pulgões, algumas espécies são de importância econômica para a agricultura. Considerados como insetos-praga, podem danificar algumas culturas e causar prejuízos aos produtores se providências de controle não forem aplicadas (VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007).

Nas culturas de cereais de inverno as espécies que se destacam globalmente e no Brasil são: *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758), *Sitobion avenae* (Fabricius, 1775), *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852), *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856), *Rhopalosiphum rufiabdominalis* (Sasaki, 1899) e *Metopolophium dirhodum* (Walker, 1949) (PARRY, 2013; PEREIRA; SALVADORI; LAU, 2009; VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007).

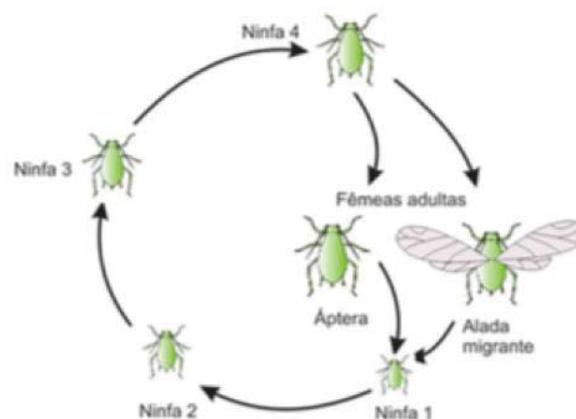
Para que ocorra o controle efetivo destes insetos-praga é fundamental conhecer características, comportamentos e hábitos da praga-alvo, assim como as condições do ambiente que são favoráveis ao rápido crescimento populacional. Assim, a seguir apresenta-se aspectos relacionados à biologia, seleção de plantas hospedeiras, dinâmica populacional e modelagem do efeito da temperatura.

2.1.1 Ciclo de vida e características biológicas

O ciclo de vida dos afídeos é relativamente complexo. Cada ciclo é dividido em vários estádios (ovo, ninfa e adulto), com cada estágio caracterizado por uma ou mais formas especializadas (Figura 1). Dependendo das condições climáticas existem dois principais tipos de ciclo de vida do pulgão (DIXON, 1977; VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007). Em regiões próximas ao ártico, esses insetos apresentam tanto a

reprodução assexuada, por viviparidade, quanto a sexuada, com a produção de ovos que permitem a sobrevivência em épocas críticas (DIXON, 1977). Em regiões de clima mais ameno (invernos menos rigorosos) e estável (com menor oscilação de temperatura e fotoperíodo), como as regiões produtoras de cereais de inverno do Brasil, a reprodução é apenas assexuada (por viviparidade) (SALVADORI; TONET, 2001).

Figura 1 - Ciclo de vida de afídeos em clima tropical e subtropical



Fonte: Salvadori e Tonet (2001).

Ao nascerem, os afídeos passam por quatro instares ninfais até se tornarem adultos. Na fase adulta, ocorrem as formas aladas ou ápteras. As ninfas diferem dos adultos pelo tamanho, por não possuírem asas, por não terem o aparelho reprodutor amadurecido e, ainda, por terem a coloração mais clara (SALVADORI; TONET, 2001).

Entre os fatores que afetam a determinação da forma adulta do afídeo (áptera ou alada) está a densidade populacional (pode ser estabelecida através da quantidade de afídeos por metro quadrado – ou, por área de tecido hospedeiro). Quanto maior o número de insetos por unidade de área, maior a probabilidade desse indivíduo apresentar asas (VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007). A formação de indivíduos alados quando da saturação populacional e exaustão do hospedeiro (que também pode ocorrer por outros fatores fisiológicos e senescência) desencadeia o processo de disseminação, oportunizando a colonização de novas áreas e acesso a novos recursos.

O deslocamento de afídeos alados pode ter dois objetivos: migração (a longa distância) e/ou busca por alimento (curta distância). A primeira, o deslocamento ocorre durante o dia, pelo período de 2,5 e 6,5 horas, utilizando a corrente do vento. A busca por alimento ocorre em direções aleatórias em até 10 metros por dia, sendo que na escassez de alimento pode chegar até 20 metros por dia (LOXDALE et al., 1993).

A alimentação dos afídeos ocorre via um aparelho bucal do tipo sugador labial, composto por dois pares de estiletes mandibulares e maxilares. Eles inserem os estiletes no floema da planta, de onde sugam a seiva. O aparelho digestivo é composto pela câmara-filtro que é responsável por acumular nutrientes e substâncias antes da digestão (GALLO et al., 2002). Assim, como os nutrientes estão diluídos na seiva, o afídeo precisa ingerir grandes quantidades de seiva a fim de obter o suficiente para seu desenvolvimento. O excesso de seiva que passa por seu trato digestivo é eliminado formando o “honeydew”. Essa seiva filtrada pode ser aproveitada por outros insetos, como formigas, que costumam cuidar das colônias de afídeos para delas obter alimento. Geralmente, as gotas da seiva ricas em açúcares se depositam sobre as folhas da planta hospedeira promovendo o crescimento de fungos (fumagina).

Esses insetos possuem uma relação particular com as plantas e a sobrevivência deles está ligada à qualidade da planta hospedeira. O inseto seleciona características como a composição química da seiva, qualidade da superfície do local da alimentação e a estrutura anatômica da planta. A seleção da planta hospedeira pelos afídeos ocorre por vários eventos sucessivos. A planta pode ser rejeitada em qualquer fase do ciclo de vida como resultado da avaliação de características físicas e/ou químicas (ANDERSON, 2015; CARRASCO; LARSSON; VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007).

De acordo com Powell, Tosh e Hardie (2006) e Van Endem e Harrington (2007), alguns eventos podem ocorrer para a seleção da planta hospedeira por parte dos afídeos:

- a) Evento 1: envolve os comprimentos de ondas refletidas pela planta. Essas informações visuais não são capazes de fornecer dados específicos do hospedeiro. Informações de outra natureza, como químicas, podem ser captadas pelas antenas do inseto, como, por exemplo, odores;

- b) Evento 2: contato inicial com a planta e avaliação da superfície antes de inserir os estiletes. Após o pouso, uma variedade de sinais é detectada quando o afídeo caminha pela superfície da planta. A antena permite a detecção de indicadores gustativos. A textura, a topologia e a coloração da planta podem influenciar o comportamento do inseto antes da inserção do estilete;
- c) Evento 3: as primeiras penetrações dos estiletes são iniciadas após contato com a planta e são, geralmente, averiguações breves limitadas à epiderme;
- d) Evento 4: as penetrações dos estiletes ocorrem além da epiderme nos tecidos parenquimáticos;
- e) Evento 5: aceitação e ingestão no floema que ocorre por período mais longo, em muitas vezes por várias horas.

A preferência por uma determinada espécie de planta é utilizada para indicar comportamentos de insetos. Os sinais detectados antes da inserção do estilete desempenham uma parte no processo de seleção do hospedeiro. Os principais fatores que influenciam a preferência das plantas, pelos pulgões, são detectados após a inserção dos estiletes (POWELL; TOSH; HARDIE, 2006). Os afídeos de cereais de inverno têm preferências por diferentes órgãos das plantas (Tabela 1).

Tabela 1 - Espécie de afídeos e localização preferida sobre a planta de trigo. Passo Fundo -RS, 2019

Espécie	Órgão de preferência
<i>Rhopalosiphum padi</i>	Folhas e colmo
<i>Sitobion avenae</i>	Espigas
<i>Metopolophium dirhodum</i>	Folhas
<i>Schizaphis graminum</i>	Folhas e colmo
<i>Rhopalosiphum maidis</i>	Folhas e colmo
<i>Rhopalosiphum rufiabdominalis</i>	Raízes

Fonte: Adaptado de Salvadori e Tonet (2001).

Os afídeos, tanto na forma de ninfa ou adulta, podem afetar a produtividade em cereais de inverno causando danos diretos e indiretos. Diversos fatores podem influenciar

na dimensão do dano direto. A sucção da seiva, resistência do hospedeiro à ação dos afídeos, densidade populacional por planta e o estágio fenológico das plantas. Outro fator é a toxicidade da saliva dos afídeos, por exemplo, o *S. graminum* possui saliva tóxica e está ligada ao secamento e a morte de folhas e plântulas. Ao se alimentar, o inseto injeta a toxina nos tecidos vegetais desencadeando a clorose e necrose do tecido vegetal (SALVADORI; TONET, 2001).

A transmissão de agentes fitopatogênicos, como vírus, é um dano indireto. Uma das principais doenças decorrentes da transmissão de patógenos por afídeos é o nanismo-amarelo da cevada; que é considerada uma das mais frequentes e economicamente impactantes viroses dos cereais de inverno. Várias espécies de vírus podem causar essa doença. São espécies de *Barley yellow dwarf virus* – BYDV e *Cereal yellow dwarf virus* – CYDV pertencentes a família *Luteoviridae* (DIGGLE; JONES, 2009; DÖRING, 2014; FABRE et al., 2005; IRWIN; THRESH, 1990; THACKRAY).

Devido as características específicas do B/CYDVs foram definidas classes virais que a “posteriori” foram reclassificadas como espécies. Para determinar a nomenclatura das espécies foi utilizada a letra inicial do nome científico da principal espécie vetora, assim: BYDV-RPV transmitida preferencialmente por *R. padi*; BYDV-RMV por *R. maidis*; BYDV-MAV por *S. avenae*; BYDV-SGV por *S. graminum* e BYDV-PAV tanto por *R. padi* como por *S. avenae* (SCHONS; DALBOSCO, 1999).

As várias espécies de B/CYDV podem ser encontradas em diversas regiões do mundo, como por exemplo, na América do Norte, Ásia, Europa e América do Sul (THACKRAY; DIGGLE; JONES, 2009; PARIZOTO, 2011; POWER et al., 2011; MAR et al., 2013).

2.1.2 Dinâmica populacional

Controlar os pulgões é vital, uma vez que são as principais pragas de cereais de inverno, bem como de muitas culturas agrícolas no mundo. Para evitar os efeitos adversos da dependência total de inseticidas químicos, de modo a garantir o equilíbrio ecológico dos ecossistemas agrícolas, é necessário ter medidas de controle ecológicas como o

controle biológico. Para isso, compreender como fatores do ambiente, do hospedeiro e inimigos naturais afetam sua dinâmica de população é fundamental.

A dinâmica populacional é o estudo de como e por que a densidade populacional muda no tempo e no espaço. A dinâmica temporal da população é mais estudada. A dinâmica espacial das populações é mais complexa.

A dinâmica populacional dos afídeos pode ser afetada por fatores bióticos (parasitoides, predadores e patógenos) e abiótico (temperatura, umidade, luminosidade, etc.). A temperatura é um dos principais fatores que determina diretamente o desenvolvimento das populações dos afídeos. Este fator afeta as taxas de desenvolvimento, reprodução e sobrevivência refletindo assim na densidade populacional em uma planta (LIMA; FERREIRA; GODOY, 2009; VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007).

2.2 Modelos de simulação

Os sistemas podem ser estudados de diferentes formas, tais como, interação direta sob as rotinas, experimentação com modelos, uso de protótipo, modelagem matemática, soluções analíticas e simulação. A interação direta sob as rotinas significa realizar alterações na forma de funcionamento do sistema com o objetivo de alcançar uma situação ideal. Para realizar esse tipo de tarefa é necessário profundo conhecimento de todos os procedimentos para que não se altere negativamente o funcionamento de todo o sistema (LAW; KELTON, 1991).

A experimentação com modelos deve, necessariamente, representar sucintamente a forma de funcionamento do sistema real. Em relação aos protótipos, estes são réplicas do sistema real e são construídos em escala idêntica ao mundo real ou em miniaturas. Já, os modelos matemáticos podem ser soluções analíticas ou soluções numéricas. As soluções analíticas são equações matemáticas, como por exemplo, modelo de regressão linear e equações da física (CHWIF; MEDINA, 2006).

Nas soluções numéricas, emprega-se várias equações a fim de representar o funcionamento de um determinado sistema, o qual origina um modelo matemático de

simulação ou modelo de simulação. Este pode ser implementado com o uso de computadores através de linguagens de programação e linguagens de simulação (CHWIF; MEDINA, 2006).

Ainda de acordo com Law e Kelton (1991), os modelos de simulação podem ser classificados didaticamente em:

- a) Modelos estáticos ou dinâmicos: modelo estático é uma representação de um sistema em um momento específico, ou que pode ser usado para representar um sistema em que a variável tempo desempenha nenhum papel. Por outro lado, um modelo de simulação dinâmico representa um sistema à medida que evolui ao longo do tempo, como um sistema de transporte ou o ciclo de vida de um inseto;
- b) Modelos estocásticos ou determinísticos: modelo determinístico é um modelo no qual nenhuma aleatoriedade está envolvida no desenvolvimento de estados futuros do modelo. Por exemplo, se a temperatura for de 25 °C, a taxa de crescimento de uma população será X e apenas X - com 100% de probabilidade, pois é a única solução possível da equação. Em alternativa, o modelo estocástico utiliza a probabilidade para realizar suas simulações, tendo como apoio resultados de simulações ocorridas no passado (ou mesmo um conjunto de dados experimentais que indicam que se as condições forem X existe uma probabilidade de a resposta ser Y com um nível Z de certeza) e, como consequência, ajusta o modelo para realização de novas simulações;
- c) Modelos discretos ou contínuos: modelos discretos são utilizados quando o estado das variáveis se altera com a ocorrência de algum evento descontínuo, ou seja, sofrem mudanças bruscas. Nos modelos contínuos o estado de uma variável se altera continuamente, ou seja, com o passar do tempo.

De uma forma geral, os modelos de simulações consideram as características do sistema, variáveis de entrada, desempenho do sistema e a relação entre as variáveis com

o meio externo essenciais. Sendo assim, para se desenvolver um modelo de simulação segue-se os seguintes passos (GODOY, 2009; LAW; KELTON, 1991; LIMA; FERREIRA; MARIA, 1997):

- a) **Formulação do problema:** significa determinar todas as informações sobre o sistema a ser estudado. Identificar os componentes que fazem parte desse sistema, definir os objetivos estabelecendo prazos e averiguando exigências do usuário final;
- b) **Análise dos dados:** etapa que define os dados de entrada, quais parâmetros, medidas e qual melhor análise estatística se aplica;
- c) **Desenvolvimento:** definição dos fluxogramas e mapas conceituais referentes, em consequência disto são elaboradas as relações lógicas e matemáticas;
- d) **Validação:** significa obter os dados de saída do modelo e compará-los com os dados reais, a fim de verificar se os métodos computacionais geram os valores esperados. Para realizar essas tarefas são utilizados procedimentos estatísticos;
- e) **Documentação:** durante o processo de desenvolvimento o programador formar relatórios técnicos sobre todas as atividades realizadas. Para tanto, ele deve levar em consideração os objetivos, hipóteses e particularidades do desenvolvimento;
- f) **Experimentação:** o objetivo é definir quais são os padrões para os dados de entrada e parâmetros para melhor execução do modelo.

2.3 Trabalhos relacionados

Os modelos de simulação, através da utilização do computador, buscam reproduzir o comportamento de sistemas existentes no mundo real, devido ao fato de que estes sistemas apresentam uma maior complexidade, alterando o estado de suas variáveis ao

longo do tempo. A simulação pode ser aplicada em diversas áreas, por exemplo, serviços, manufatura e militar (CHWIF; MEDINA, 2006).

Na área entomológica, Carter (1985) desenvolveu um modelo de simulação, na linguagem Fortran, para compreender a dinâmica populacional do afídeo *S. avenae* a fim de desenvolver um sistema de previsão confiável. Thackray, Diggle e Jones (2009) desenvolveram o modelo BYDV PREDICTOR, com o software Stella, com o objetivo de prever a ocorrência *Barley yellow dwarf virus* (BYDV) no sudoeste da Austrália.

Sanchez et al. (2011) apresentam a plataforma computacional de modelagem ambiental DINAMICA EGO que está baseado em autômatos celulares para simulação em múltiplos passos de tempo. Inicialmente, ela foi desenvolvida para simular a dinâmica da paisagem na fronteira agrária da Amazônia. Com o aperfeiçoamento da aplicação, uma série de funcionalidades de modelagem da dinâmica da paisagem foram implementadas (MAEDA et al., 2011). Zhou et al. (2010) implementaram um modelo genérico, baseado em agentes, que simula o ciclo de vida de mosquitos. Para avaliação, utilizaram o mosquito transmissor da malária *Anopheles gambiae* Giles. O modelo proposto por Toebe (2014), denominado ABMPraga (*Agent Based Model Praga*), também é baseado em agentes e simula a dinâmica populacional de insetos pragas agrícolas.

Existem também os modelos que simulam o desenvolvimento de plantas. Esses modelos representam o crescimento e desenvolvimento das plantas em função do ambiente (LAZZARETTI, 2013). Além disso, esses modelos podem auxiliar no entendimento dos fatores que interferem nas plantas, bem como apontar alternativas na sucessão de culturas diante de diferentes cenários de produção (FERNANDES; PAVAN, 2002).

Ainda, pode-se citar como exemplo de modelos para simular o desenvolvimento de plantas, os encontrados no software *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT). Este é amplamente reconhecido como uma das plataformas para esse tipo de simulação (JONES et al., 2003). Diante dos efeitos biótico causados por doenças e pragas e a atuação destes sobre as plantas e a produtividade, Pavan (2007) utilizou em seu trabalho o modelo *CropSim-Wheat* (pacote do DSSAT) para modelar e simular doenças do trigo.

2.3.1 Abordagens de acoplamentos de modelos de simulação

Os modelos de simulações utilizados há mais de 4 décadas têm auxiliado os cientistas na forma em que foram desenvolvidos. No entanto, atualmente existe a necessidade destes modelos serem modificados com o propósito de atender outras necessidades. O acoplamento de modelos vem sendo utilizado no intuito de usufruir de todo o conhecimento herdado dos sistemas de simulações já testados, validados e aceitos pela comunidade científica. Porém, para que os modelos de simulações possam ser acoplados, eles devem ser interoperáveis. Esta é a propriedade, segundo a qual, dois ou mais softwares podem compartilhar e processar informações, independentemente de sua linguagem e plataforma de implementação (JONES et al., 2017a).

A construção de uma estrutura de acoplamento não é uma tarefa simples e requer profundo conhecimento do modelo em estudo com a intenção de identificar os pontos de integração com outros modelos de simulação. Além disso, também requer um completo e detalhado conhecimento de todos os modelos que se planeja acoplar, pois o ambiente desses sistemas é complexo e heterogêneo (HOLZWORTH et al., 2014; SOLANO; MORRIS; BOBASHEV, 2013).

De acordo com Bulatewicz (2006), o acoplamento de modelos de simulações segue algumas abordagens, as quais são descritas a seguir.

Abordagem monolítica

A abordagem monolítica é definida como a junção de dois ou mais códigos de modelos já existente em uma nova versão de um modelo personalizado. Ao realizar o acoplamento dos códigos se obtém uma facilidade, pois se trabalha com uma única linguagem de programação. Em contrapartida, existem algumas dificuldades encontradas ao se utilizar essa abordagem, tais como, íntegro entendimento da organização do modelo, pouca documentação e dificuldade de aplicação de engenharia de software.

Abordagem programada

Nesse tipo de abordagem, não ocorre integração entre dois ou mais modelos em tempo de execução, eles são executados independentemente onde a saída de dados de um

modelo é a entrada de dados de outro. Para que esse tipo de abordagem funcione, é necessária a existência de um componente extra, ou seja, uma interface responsável por realizar a conversão de dados, pois as saídas e entradas de dados não seguem os mesmos padrões.

Abordagem orientada a componentes

Nessa abordagem, o código fonte do modelo é modificado e dividido em módulos reutilizáveis, também chamados de componentes de software. Os módulos podem ser desenvolvidos com pouco conhecimento das demais funcionalidades, e também podem ser substituídos sem consideráveis alterações no restante do modelo.

Abordagem orientada a comunicação

A abordagem orientada a comunicação é comumente utilizada facilitando a integração entre modelos legados com tecnologias atuais propiciando a durabilidade do modelo. A comunicação entre os modelos envolvidos ocorre através da troca de mensagens durante todo o período de execução, e não há a necessidade de os modelos serem desenvolvidos na mesma linguagem de programação.

Pavan (2007) integrou o modelo *CropSim-Wheat* (JONES et al., 2003) ao seu modelo genérico de doenças utilizando a linguagem R e sockets (TEAM R, 2016). Pedrini (2010), utilizando a tecnologia JNI (*Java Native Interface*), acoplou o modelo de simulação CROPGRO-Soybean (JONES et al., 2003) com o modelo genérico de doenças (PAVAN, 2007), com o objetivo de contabilizar o dano que a doença ferrugem asiática causa na cultura da soja. Sartori (2017) utilizou a tecnologia de *WebSocket* (LIU; SUN, 2012) para acoplar o modelo de simulação *CropSim-Wheat* a um modelo genérico de doenças. Peckham e Goodall (2013) utilizam a biblioteca BMI (*Basic Model Interface*) para simplificar o acoplamento dos modelos de simulação CSDMS (*Community Surface Dynamics Modeling System*) e o HIS (*Hydrologic Information System*).

2.4 MPI (*Message Passing Interface*)

Atualmente, uma das grandes adversidades da Ciência da Computação é oportunizar soluções computacionais que diminuam o tempo de processamento e ofereçam respostas precisas sobre diversos problemas em diferentes áreas. A computação paralela e de alto desempenho – HPC (*High Performance Computing*) do inglês – é uma das áreas que se dedica a fornecer tais soluções computacionais (DE BAYSER; CERQUEIRA, 2017).

A MPI (*Message Passing Interface*) é um conjunto de bibliotecas padronizado para utilização de computação paralela e de alto desempenho e o seu funcionamento consiste na troca de mensagens entre processos. Além disso, possui especificações de protocolo e semântica para como seus recursos devem se comportar em qualquer implementação. Assim, como a especificação da biblioteca C, ela define uma API (*Application Programming Interface*) abstrata que permite muitas implementações independentes que são compatíveis umas com as outras. Dessa maneira, um programa escrito para MPI é portátil de uma implementação para outra. Devido a portabilidade e a disponibilidade de bibliotecas, como, por exemplo, para C/C ++, Fortran e Java, a MPI foi rapidamente adotada como o padrão de fato para executar softwares numéricos em arquiteturas HPC (GROPP; DOSS, 1996). Atualmente, encontram-se disponíveis diversas implementações do padrão MPI, onde pode-se citar MPICH (GROPP; DOSS, 1996), Open MPI (GABRIEL et al., 2004) e MPJ Express (JAVED et al., 2016).

Comumente, a MPI possui dois paradigmas de implementação. O primeiro, onde um único programa é executado em múltiplos processos. Neste paradigma, o programa é dividido em seções e em tempo de execução o próprio programa irá escolher qual parte do código ele irá executar com base em uma variável que é informada em tempo de execução (BROWNE; WILSON, 2015).

O segundo paradigma permite que diferentes programas sejam executados para que ambos possam se comunicar. Assim, um programa pode ser escrito utilizando uma linguagem de programação para uma tarefa, e outro ser escrito em uma diferente linguagem para uma tarefa completamente diferente. Quando dois ou mais processos compartilham informações entre si um comunicador/interface pode ser utilizado para

enviar ou receber dados. Dessa forma, a MPI encontra uma estratégia eficiente para trocar as informações dependendo da arquitetura e sem a interferência do usuário (BROWNE; WILSON, 2015).

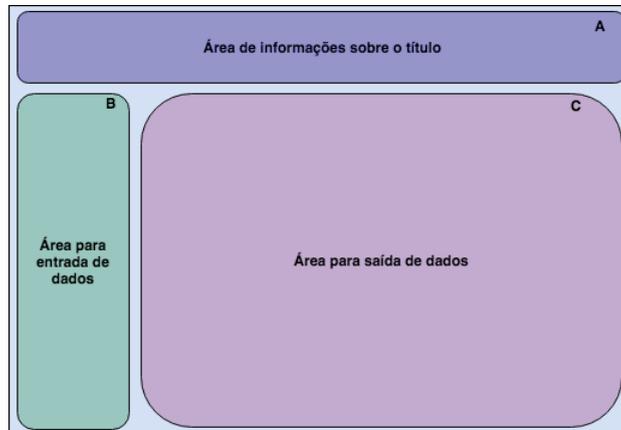
2.5 O *framework Shiny*

A visualização de dados desempenha um papel vital na vida de um cientista, especialmente daqueles que trabalham com biologia de populações, comunidades e ecossistemas e que necessitam encontrar padrões de resposta, de comportamento e relacionamento de variáveis e componentes de sistemas. É mais fácil visualizar dados e relacionamentos complexos do que decifrá-los através de planilhas e/ou tabelas (WOJCIECHOWSKI; HOPKINS; UPTON, 2015).

O *framework shiny* é uma estrutura para o desenvolvimento de ferramentas baseadas na Web com a linguagem R. A estrutura do *framework* é composta basicamente por dois arquivos (*server.R* e *ui.R*). O arquivo do servidor é um conjunto de instruções que cria os componentes R, enquanto o arquivo da interface do usuário é um conjunto de instruções para exibir o aplicativo. O *shiny* fornece uma forma de compartilhar sua análise de maneira interativa e onde não é necessário possuir conhecimento de linguagens de programação como HTML (*Hypertext Markup Language*), CSS (*Cascading Style Sheets*) ou *JavaScript* (CHANG et al., 2017).

O objetivo de uma aplicação *Shiny* é possibilitar um layout organizado para que os usuários possam entender de maneira fácil e rápida como interagir com os componentes de cada aplicação (Figura 2). O arranjo de elementos da aplicação tem um título para diferentes páginas organizado horizontalmente na parte superior da aplicação (Figura 2A). Abaixo dessa região de cabeçalho, um painel na barra lateral esquerda (Figura 2B), contendo os componentes básicos para a entrada de dados e uma região centralizada à direita (Figura 2C) para exibir tabelas e gráficos.

Figura 2 - Layout padrão de uma aplicação em *Shiny* possuindo as áreas para informações sobre o título (A), entrada de dados (B) e saída de dados (C)



Fonte: Adaptado de Wojciechowski, Hopkins e Upton (2015).

O layout padrão de aplicações *Shiny* pode ser modificado conforme a necessidade do usuário. Além disso, o ambiente oferece o benefício de ser relativamente simples de implementar, enquanto, ao mesmo tempo, fornece um design de interface de usuário limpo e intuitivo.

3 CAPÍTULO I

ABISM-GUI – Uma interface gráfica de usuário para o modelo de simulação ABISM (*Agent Based Insect Simulation Model*)

3.1 Resumo

Nos últimos anos, a aplicação da modelagem de sistemas de produção agrícola expandiu-se rapidamente. Os modelos de simulação baseados em agentes são uma ferramenta eficiente para essa finalidade, pois podem lidar com os complexos processos envolvidos no comportamento individual em um espaço heterogêneo. Como consequência, diversas ferramentas foram criadas, aumentando a complexidade das técnicas de simulação. No entanto, ainda é uma dificuldade para usuários não-especialistas utilizarem esses sistemas. O ABISM é um modelo baseado em agentes, genérico, expansível e parametrizável, utilizado para simular a dinâmica populacional de insetos pragas agrícolas. ABISM-GUI foi desenvolvido, utilizando o *framework shiny*, para fornecer uma interface gráfica de usuário baseada na web. Permite configurar, executar e visualizar os dados de simulações. O ambiente web fornece uma plataforma ideal para construir e validar um sistema de modelo utilizando menus interativos. Assim, é possível executar simulações normais ou aquelas onde se possui dados observados e, ainda, caso o usuário encontrar um problema através da visualização dos resultados, pode-se voltar à configuração anterior e reexecutar toda simulação novamente com novos parâmetros. Descrevemos uma aplicação de prova de conceito para uma simulação normal e avaliamos que a abordagem utilizada atende aos objetivos. As futuras orientações do projeto de desenvolvimento ABISM-GUI também são discutidas em conjunto com outros recursos do sistema.

Palavras-chave: 1. Modelos baseados em agentes. 2. *Shiny*. 3. Visualização de dados. 4. Pragas agrícolas. 5. Dinâmica populacional.

3.2 Introdução

A simulação e a modelagem computacional referem-se à utilização de um modelo computacional que visa aperfeiçoar a análise do comportamento dos sistemas existente no mundo real e avaliar estratégias para o seu funcionamento. O modelo representa uma abstração de uma determinada realidade e é frequentemente construído para explicar ou prever fenômenos observados. A simulação computacional é a representação, através de um programa de computador, desse modelo. Desta forma, um modelo de simulação refere-se aos algoritmos de computação, expressões matemáticas e equações que encapsulam o comportamento e o desempenho de um sistema nos cenários do mundo real (ABAR et al., 2017).

A modelagem e simulação baseada em agentes (MBA) é um paradigma onde os seres humanos ou animais são modelados como agentes, interagindo com alguns de seus pares e com seu ambiente. O ambiente, como em muitos sistemas multi-agentes, desempenha um papel fundamental e, portanto, deve ser cuidadosamente considerado. No entanto, os agentes são componentes ativos, sendo modelados e implementados usando conceitos e tecnologias relacionados a agentes. Assim, define-se a modelagem baseada em agentes como uma representação de um sistema real (BONABEAU, 2002; CHAKRABORTI et al., 2011).

Nas últimas décadas, esforços consideráveis foram feitos para generalizar e aprimorar os métodos e técnicas computacionais para modelagem e simulação em diversas áreas do conhecimento (HOLZWORTH et al., 2014; KLÜGL; BAZZAN, 2012). Como resultado, várias ferramentas de simulação foram desenvolvidas e evoluídas para tornar as técnicas de simulação mais avançadas (ABAR et al., 2017).

Na área entomológica, Parry, Evans e Morgan (2006) implementaram um modelo MBA para a simulação da população de afídeos em plantações na Grã-Bretanha. Arrignon et al. (2007) aplicaram o paradigma de MBA para modelar o comportamento de *Episyrphus balteatus* (De Geer, 1776) em escala de paisagem. Zhou et al. (2010) implementaram um modelo genérico, baseado em agentes, que simula o ciclo de vida de mosquitos, para avaliação utilizaram o mosquito transmissor da malária *Anopheles gambiae* Giles. O modelo proposto por Toebe (2014), também é baseado em agentes e simula a dinâmica populacional de insetos pragas agrícolas.

No entanto, ainda é um desafio para os usuários não-especialistas utilizar um pacote de simulação ou ferramentas de modelagem específicas para estudar assuntos do seu próprio interesse (JONES et al., 2017b). Além disso, a maioria dos alunos e pesquisadores enfrentam dificuldades consideráveis para configurar, executar e visualizar resultados dessas simulações. Dessa forma, esse trabalho objetivou implementar uma interface para o modelo proposto por Toebe (2014) denominada ABISM-GUI (*Agent Based Insect Simulation Model - Graphical User Interface*), uma ferramenta para configuração, execução e visualização de resultados baseada no *framework shiny*. Essa ferramenta permite inspecionar interativamente o sistema, de modo que, se um problema

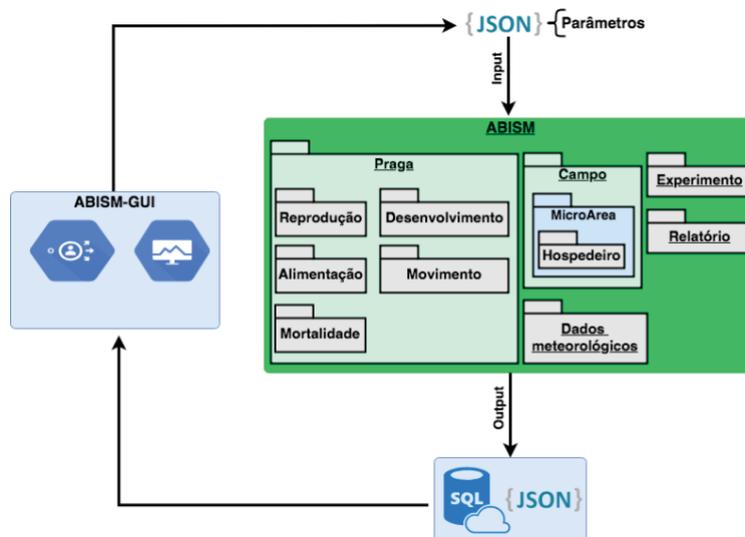
for encontrado, os usuários podem retornar para a configuração anterior e reconfigurar toda a simulação novamente antes de sair do navegador web.

3.3 Visão geral do modelo ABISM (*Agent Based Insect Simulation Model*)

O modelo de simulação baseado em agentes proposto por Toebe (2014) foi modificado e neste trabalho foi denominado de *framework* ABISM (*Agent Based Insect Simulation Model*). O ABISM é genérico, expansível e parametrizável (Figura 1) e pode ser aplicado para diferentes espécies de insetos, com variados ciclos de vida, que atacam inúmeras culturas e em algumas regiões. O modelo foi desenvolvido na linguagem de programação Java (Apêndice I) e foi projetado para o acoplamento de novos módulos. Isso se torna útil à medida que problemas de simulações, não contemplados na modelagem inicial, podem ser implementados.

O modelo é considerado genérico devido a característica de se propor a simular o ciclo de vida de diferentes espécies de insetos pragas de importância econômica na agricultura. A flexibilidade origina-se da viabilidade de parametrização inicial, que é fundamental para a execução do modelo.

Figura 1 - Infraestrutura do *framework* ABISM. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Adaptado de Toebe (2014).

A parametrização inicial do ABISM é baseada em dados meteorológicos, área de realização do experimento, informações biológicas da espécie do inseto, como o ciclo de

desenvolvimento, a reprodução, a alimentação, a movimentação e a mortalidade. Estes parâmetros são constituídos por meio de um arquivo escrito em JSON (*JavaScript Object Notation*) de acordo com padrões próprios (Figura 2).

O módulo "Experimento" (*experiment* (Figura 2A) é responsável por armazenar informações referentes a identificação da simulação (*id*), local da execução do experimento (*local*), datas de semeadura (*sowingDate*), início (*infestationDate*) e término (*harvestDate*) da simulação e quantidade e posição de pragas virtuais que inicializarão no sistema (*amountOfStartingPests*).

O módulo "Relatório" foi modelado para registrar dados sobre o andamento da execução da simulação. Por exemplo, o modelo considera cada indivíduo isoladamente e suas interações com o ambiente e outros indivíduos. Assim, para cada indivíduo são armazenadas, em tempo de execução, informações sobre o seu comportamento e seu estado temporário. Além disso, a execução do processamento é executada diariamente e essas informações podem ser armazenadas em um banco de dados (AgroDB (LAZZARETTI et al., 2016a)) ou em um arquivo (JSON). Na implementação atual esse módulo não faz parte da parametrização inicial.

O módulo "Dados meteorológicos" (*thermalRegime* (Figura 2B) representa os dados e estações meteorológicas. Dados meteorológicos de interesse da simulação são dados de sensores, por exemplo, de temperatura, direção e velocidade do vento, chuva e umidade relativa do ar, entre outros. Na implementação atual, é possível parametrizar esse módulo através de três opções de regimes térmicos (*regime*): 1) fixo (*Fix*), sem variação da temperatura; 2) flutuante (*Flu*), onde é necessário especificar qual temperatura mínima (*minTR*) e máxima (*maxTR*) ou 3) variável (*VarAPI*), para o qual é necessário descrever qual estação meteorológica deverá ser utilizada.

O módulo "Campo" foi modelado na forma de uma matriz de modo que cada submódulo "MicroArea" (*microArea* (Figura 2C) represente uma unidade de localização (metro quadrado, por exemplo). Cada "MicroArea" tem uma posição específica dentro da matriz que compõe o "Campo". Além disso, este submódulo define se a área de simulação irá possuir algum tipo de proteção (*screened*), barreiras que impedem a ação de outros fatores, assim, é possível determinar a ativação de outros submódulos do sistema, por

exemplo, “Movimentação” e “Mortalidade” do módulo “Praga”. As plantas, representadas através do submódulo “Hospedeiro” (cultivar (*crop*) e tipo da cultivar (*growCrops*)), são distribuídos na “Microarea” em linhas de semeadura (linhas (*nRows*) x plantas/linha (*nPlantsRow*)).

O módulo "Praga" define o agente inseto e os atributos que compõem o estado transitório do agente e as relações com o ambiente (por exemplo, número de dias vividos, temperatura acumulada, estágio, forma, estágio reprodutivo, estado do inseto, número de descendentes, quantidade de dias em temperatura mínima ou máxima, causa da morte, caminho percorrido). Além disso, este módulo define submódulos que determinam informações biológicas das espécies de insetos. Na parametrização, é definida a configuração da praga que inicializará o sistema (*initialPest* (Figura 2E), sua fase (*initialPhase*), forma (*initialShape*), estágio de desenvolvimento (*initialStageDev*), temperatura acumulada (*initialAccumulatedTemp*) e dias de vida (*initialDaysAlive*).

O submódulo “Desenvolvimento” determina o crescimento e na mudança da forma do inseto. A troca de fase é determinada a partir da mudança de forma e o número de fases existente irá depender da espécie do inseto. Nesse contexto, foram modeladas duas fases de insetos: ninfa e adulta. Existe a possibilidade de implementar outras fases (ovo, larva e pupa) e a ocorrência ou não de uma dessas fases irá depender da parametrização inicial do modelo.

O submódulo “Movimento” representa a troca de planta hospedeira por um inseto ou emigração do sistema. Os movimentos praticados são busca alimento para ápteros e alados e migração para alado. A ativação de cada um deles irá depender se o módulo “MicroArea” irá possuir algum tipo de proteção (telado (*screened*)) habilitado. O movimento áptero é executado por insetos nas fases em que a movimentação áptera é possível. Além disso, o movimento é estipulado pela probabilidade de ocorrência de determinada movimentação em um dia, pela distância máxima e pela direção.

O submódulo “Reprodução” representa a forma como o inseto se reproduz. Neste trabalho, considerou-se apenas a forma de reprodução assexuada. Entretanto, existe a possibilidade de implementar a forma sexuada, ou seja, quando há a obrigação de fecundação do óvulo para o nascimento de novos embriões. Cada uma dessas formas pode

estar relacionada a algumas características reprodutivas, tais como: viviparidade, oviparidade, pedogênese, poliembrionia e taxa de determinação do sexo. Na reprodução assexuada, denominada partenogênese, o desenvolvimento dos embriões ocorre de modo independente de fecundação. A oviparidade denota a possibilidade da fêmea depositar ovos. A viviparidade é a característica na qual a fêmea deposita larvas ou ninfas ao invés de ovos. A pedogênese é a característica na qual o inseto ainda em fases imaturas tem a capacidade de se reproduzir. A poliembrionia consiste na característica de, a partir de um ovo, ser gestado e eclodir mais de um inseto. A determinação do sexo é uma característica consideravelmente importante, pois tem impacto direto no potencial biótico das espécies (VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007).

O submódulo “Alimentação” determina a forma de sustento do inseto. É durante o processo de alimentação que pragas agrícolas causam os maiores prejuízos às culturas. A forma da alimentação depende do aparelho bucal (mastigador ou sugador) que o inseto apresenta em cada uma das suas fases. Neste trabalho, considerou-se o aparelho bucal sugador, onde ele age de forma indireta, isto é, pela sucção da seiva e pela possível inserção de substâncias tóxicas às plantas presentes em sua saliva. Entretanto, existe a possibilidade de implementar o aparelho bucal mastigador (VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007).

Por fim, o submódulo “Mortalidade” (*mortality* (Figura 2F) abrange fatores bióticos e abióticos que podem ocasionar o fim da vida de um inseto, de acordo com a parametrização do submódulo “MicroArea”, ou seja, se este possuir algum tipo de proteção (*screened*) habilitado. Entre os fatores bióticos, estão a morte por predação e por parasitismo. Entre os fatores abióticos, estão fatores climáticos (meteorológicos) como a amplitude térmica (*lowTemperature*) (Natural) e a intensidade pluviométrica (*rainfallIndex*) (Chuva) que podem influenciar a sobrevivência destes.

Figura 2 - Exemplo de um arquivo JSON contendo a parametrização inicial do ABISM. Passo Fundo - RS, 2019

```

1
2 "experiment": {
3   "id": "2017_CampoCoxilha",
4   "local": "Passo Fundo",
5   "sowingDate": "2017-06-27",
6   "infestationDate": "2017-08-03",
7   "harvestDate": "2017-11-07",
8   "hourlyExecution": "false",
9   "finalPestReport": 2,
10  "amountOfStartingPests": 1,
11  "thermalRegime": {
12    "regime": "VarAPI",
13    "minTR": 0,
14    "maxTR": 0,
15    "weatherStation": "Passo Fundo"
16  },
17  "microArea": {
18    "idMicro": "MicroArea1",
19    "crop": "Wheat",
20    "growCrops": "Embrapa16",
21    "nRows": 5,
22    "nPlantsRow": 60,
23    "screened": "false",
24    "amountAphidsArea": 1
25  },
26  "developmentThresholds": {
27    "nymphIndex": 1.1,
28    "adultIndex": 1.1,
29    "deadIndex": 2.6,
30    "preReproIndex": 1.1,
31    "reproIndex": 1.16,
32    "posReproIndex": 2.3
33  },
34  "initialPest": {
35    "initialPlant": 150,
36    "initialMicroArea": "MicroArea1",
37    "initialPhase": "Adult",
38    "initialShape": "Apterae",
39    "initialStageDev": "PreRepro",
40    "initialAccumulatedTemp": 1.1,
41    "initialDaysAlive": 5
42  },
43  "mortality": {
44    "rainfallIndex": 10,
45    "lowTemperature": 3
46  }
47 }
48 }

```

Fonte: Dados do autor.

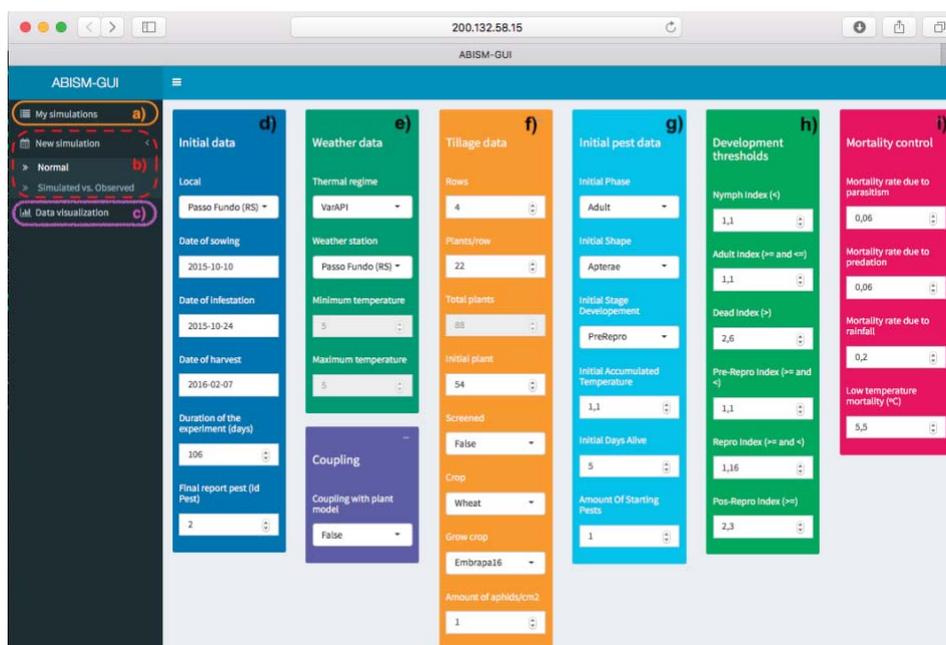
A aplicação baseada na Web denominada de ABISM-GUI (*Agent Based Insect Simulation Model - Graphical User Interface*) permite o usuário criar, executar e visualizar suas simulações via menus interativos oferecidos através de uma aplicação em *shiny*. O ABISM-GUI consiste em 3 (três) partes principais (Figura 3):

- a) A listagem de simulações já executadas (*My simulations*) (Figura 3A);
- b) A parametrização inicial, onde através de menus interativos é possível executar simulações normais (*New simulation/Normal*) ou aquelas onde se

possui dados observados (*New simulation/Simulated vs. Observed*) (Figura 3B);

- c) A exploração de dados que é principalmente suportada pela visualização de tabelas e gráficos (*Data visualization*) (Figura 3C).

Figura 3 - Aparência Web do ambiente de parametrização de uma simulação normal (A) com seus respectivos menus para os dados iniciais (D), meteorológicos (E), área (F), praga inicial (G), índices de desenvolvimento (H) e mortalidade (I). Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

A aplicação para a entrada de dados e a aplicação para a visualização de dados estão funcionais e apresentam uma interface intuitiva de se utilizar.

3.4 Prova de conceito

A seguir, apresentamos uma prova de conceito para representar as adequações realizadas no ABISM para (a) parametrizar os submódulos do módulo “Praga” e (b) construir, executar e visualizar os dados de saída de um experimento. Para a construção do experimento, utilizou-se os parâmetros do experimento 4 (Anexo I) e as características biológicas da espécie do inseto em estudo. O experimento utilizado trata-se apenas de uma prova de conceito e não foi utilizado em cenários de comparação com o interesse de extrair conclusões importantes.

3.4.1 Parametrização para *Rhopalosiphum padi*

O sistema visa simular um experimento para avaliar o crescimento populacional do afídeo *Rhopalosiphum padi*. Para isso, foram configurados os submódulos “Desenvolvimento”, “Movimento”, “Reprodução”, “Alimentação” e “Mortalidade” do módulo “Praga”. Os demais módulos e submódulos do ABISM foram parametrizados conforme descrito na seção 3.3 do Capítulo 1 deste trabalho.

Na configuração do submódulo “Desenvolvimento” foram utilizadas equações propostas por Morgan (2000) (ninfas ápteras [Equação 1], ninfas aladas [Equação 2], adultos ápteros [Equação 3] e adultos alados [Equação 4]) e Barlow e Dixon (1980) [Equação 5]. Segundo a Equação 5, é necessário estimar o desenvolvimento do inseto na temperatura mínima do dia, na temperatura média e na temperatura máxima e, em seguida, calcula-se a média aritmética destes três valores.

$$APDEV = \frac{-0,015 + 0,291}{1 + \exp(-0,138 * (temp - 16,911))} \quad (1)$$

$$ALDEV = \frac{APDEV}{1,5} \quad (2)$$

$$ADAPDEV = 0,0193 + 0,0039 * temp \quad (3)$$

$$ADALDEV = 0,0184 + 0,0037 * temp \quad (4)$$

$$ADAPDEV = \frac{DevTempMin + DevTempMax + DevTempMean}{3} \quad (5)$$

Este submódulo foi parametrizado (*developmentThresholds* (Figura 2D) através de uma ponderação de graus dia, de modo que o desenvolvimento é uma fração entre 0 e 2,6. Essa fração deve ser acumulada diariamente e o limiar para troca da fase de ninfa para adulta foi definida em 1,1 (*nymphIndex*). O limiar para término da fase pré-reprodutiva (*preReproIndex*) foi ajustada em 1,16 (*reproIndex*) e 2,3 para o término do período reprodutivo e início do pós-reprodutivo (*posReproIndex*). O limiar de morte definido foi 2,6 (mortalidade por idade) (*deadIndex*) (Figura 4).

Figura 4 - Limiares de desenvolvimento da fase de ninfa para adulto e períodos pré-reprodutivo, reprodutivo e pós-reprodutivo. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

No submódulo “Movimento” foi configurado a distância e a direção que um afídeo áptero irá percorrer. A distância foi ajustada para a constante 1,0 representando a troca de uma planta por uma outra planta vizinha. A direção é deliberada pelo ângulo de movimentação que pode variar entre valor 1 e 360, de modo que 360 representa o Norte. Como regra, a movimentação por direção busca sempre a planta vizinha com menor população de afídeos. Em cada dia, um afídeo poderá realizar até dois movimentos ápteros, isto é, trocar de planta até duas vezes. Devido a ausência de modelos matemáticos para a definição de movimento áptero foram utilizados dois modelos exponenciais para a probabilidade de ocorrência de movimento de um adulto [Equação 6] e de uma ninfa [Equação 7] em um dia.

$$MOVAD = 11,45 * exp(1,4x) \quad (6)$$

$$MOVNI = 0,58 * exp(0,4x) \quad (7)$$

Onde x representa a população de afídeos na planta em que se encontra o inseto no momento do movimento. Para o movimento “alado busca alimento” ajustou-se para cobrir uma distância e direção aleatória. Considerando que as condições de alimentação no ambiente virtual eram favoráveis, o voo para busca de alimento foi limitado a, no máximo, 5 metros por dia. As configurações que englobam esse submódulo são oriundas da implementação do modelo proposto por Toebe (2014) e elas não alteram os resultados deste trabalho. Entretanto, elas são importantes para simulações futuras que tem por objetivo estudar a dispersão espacial dos insetos.

O submódulo “Reprodução” foi configurado para que os pulgões virtuais se reproduzissem por partenogênese telítica com a característica de viviparidade, onde fêmeas virgens parem somente ninfas. Assim, utilizou-se uma equação adaptada de

Logan et al. (1976) e Morgan (2000) para definir a taxa de fecundidade durante o período reprodutivo. As equações são específicas para cada forma áptera [Equação 8] ou alada [Equação 9].

$$APFEC = \exp(p * temp) - \exp\left((p * tl) - \left(\frac{tl - temp}{delta}\right)\right) + z \quad (8)$$

$$ALFEC = \frac{APFEC}{1,3} \quad (9)$$

Onde, *temp* representa a temperatura média diária, *p* é a taxa alcançada na temperatura ótima, *tl* é a temperatura máxima letal e *delta* é uma faixa de temperatura, na qual a degradação fisiológica é observada.

O submódulo “Alimentação”, em sua parametrização inicial, foi desabilitado. Dessa forma, o modelo ABISM assume que todos os pulgões virtuais (agentes) possuem alimento suficiente.

Devido a configuração do experimento a proteção do submódulo “MicroArea” estava ativado. Assim, no submódulo “Mortalidade” configurou-se apenas a taxa de sobrevivência em temperaturas baixas, ou seja, mortalidade “Natural”, usufruindo do modelo proposto por Morgan (2000). A taxa de sobrevivência diária (SURV) foi calculada de acordo com a Equação 10. DDB (o número de graus de dia) foi parametrizado a 3,0 ° C.

$$SURV = 0,9511 - 0,0173 * DDB \quad (10)$$

Para construção de um experimento utilizou-se a GUI do ABISM e, além disso, utilizou-se a mesma interface para análise e visualização dos dados (Figura 3).

O submenu “Initial data” (Figura 3D) constitui-se dos dados iniciais para a simulação. Esse é composto pelos parâmetros do local onde será executada a simulação (*Local*), data de semeadura (*Date of sowing*), data da infestação (*Date of infestation*), data da colheita ou final do experimento (*Date of harvest*) e duração do experimento (*Duration of the experiment (days)*).

O submenu “*Weather data*” (Figura 3E) é responsável por armazenar as informações sobre o regime térmico utilizado nas simulações (*Thermal regime*). Neste trabalho, foram utilizados três (3) regimes térmicos (constante, flutuante e variável conforme descrito na seção 4.3.1 do Capítulo 2). Ainda, como parâmetros deste submenu, fazem parte a estação meteorológica (*Weather station*) e, dependendo do regime, a temperatura mínima (*Minimum temperature*) e a máxima (*Maximum temperature*) utilizada. O submenu “*Coupling*” refere-se ao acoplamento com modelo de simulação de cultura (*Coupling with plant model*), esse assunto será abordado no Capítulo 3.

O submenu “*Tillage data*” (Figura 3F) refere-se aos dados do módulo “Campo” e nele registram-se os dados referente número de linhas de plantio (*Rows*), número de plantas por linha (*Plants/row*), o identificador da planta inicial que receberá a infestação (*Initial plant*), se a área de simulação irá possuir algum tipo de proteção (*Screened*), o tipo da cultura (*Crop*), a cultivar (*Grow crop*) e a variável que irá controlar a capacidade de suporte de cada planta do sistema de simulação (*Amount of aphids/cm²*).

As informações relacionadas ao primeiro afídeo (Figura 3G) que irá colonizar o sistema, tais como fase inicial (*Initial Phase*), forma inicial (*Initial Shape*), estágio inicial de desenvolvimento (*Initial Stage Development*), temperatura inicial acumulada (*Initial Accumulated Temperature*), dias de vida (*Initial Days Alive*) e a quantidade de pragas iniciais (*Amount Of Starting Pests*) são registradas no submenu “*Initial pest data*”. Ainda, no submenu “*Development thresholds*” (Figura 3H) parametriza-se os índices de desenvolvimento, através de uma ponderação de graus dia, de uma ninfa (*Nymph Index*), de um adulto (*Adult Index*) e o fim da vida (*Dead Index*). Além disso, define-se também os limiares da fase pré-reprodutiva (*Pre-Repro Index*), reprodutiva (*Repro Index*) e pós-reprodutiva (*Pos-Repro Index*).

Por fim, no submenu “*Mortality control*” (Figura 3I) define-se a mortalidade por temperatura baixa (*Low temperature mortality (°C)*), a taxa por parasitismo (*Mortality rate due to parasitism*), por predação (*Mortality rate due to predation*) e por precipitação pluviométrica (*Mortality rate due to rainfall*).

Após a parametrização e como consequência da execução da simulação, o usuário pode visualizar os resultados na forma de tabelas (Figura 5) ou gráficos (Figura 6). Ainda,

através de uma submenu (*Select the file*) o usuário pode selecionar qual tipo de relatório ele deseja visualizar.

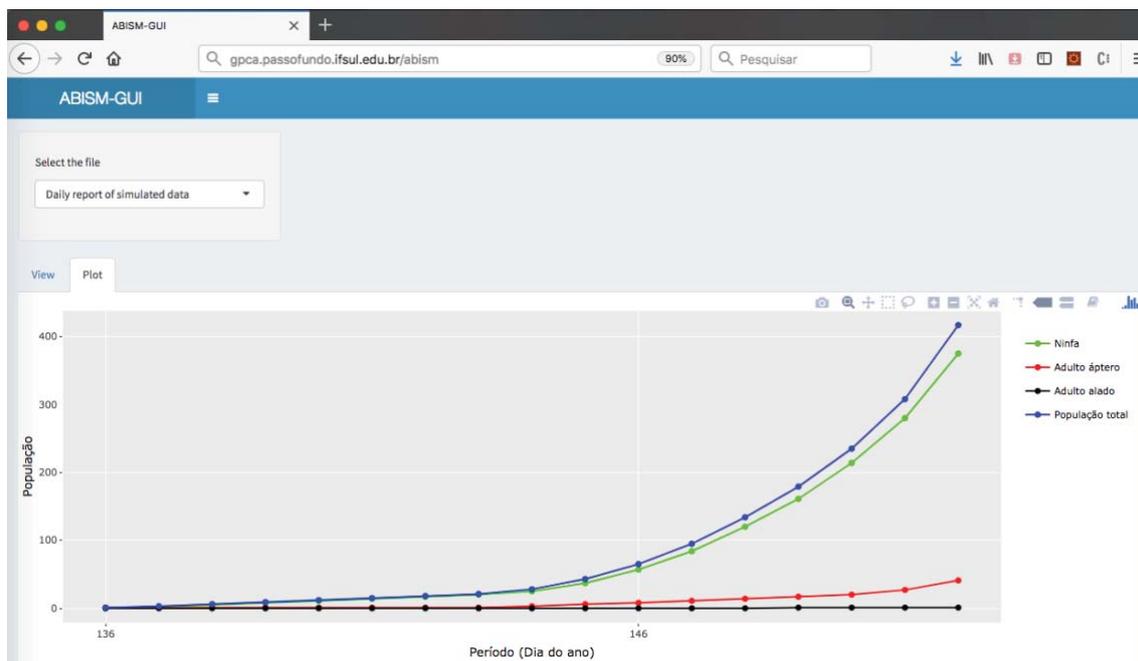
Figura 5 - Resultado de uma simulação com a data, a densidade populacional das fases do afídeo (ninha e adulta), período reprodutivo e mortalidade no formato de tabela. Passo Fundo - RS, 2019

The screenshot shows the ABISM-GUI web interface. At the top, there is a browser window with the URL 'gpca.passofundo.ifsul.edu.br/abism'. Below the browser, the application header 'ABISM-GUI' is visible. A 'Select the file' dropdown menu is set to 'Daily report of simulated data'. Below this, there are 'View' and 'Plot' buttons. The main content area displays a table with 19 columns and 12 rows of data. The columns are: Data, NIAI, NIAP, NI, AdAp, AdAI, Ad, PreRep, Rep, PosRep, Vi, MoAge, MoParas, MoRain, MoPreda, MoEmi, MoNat, TotalMo, and InfesF. The rows represent daily simulation data from 2015136 to 2015147.

	Data	NIAI	NIAP	NI	AdAp	AdAI	Ad	PreRep	Rep	PosRep	Vi	MoAge	MoParas	MoRain	MoPreda	MoEmi	MoNat	TotalMo	InfesF
1	2015136	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2015137	0	2	2	1	0	1	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2015138	0	5	5	1	0	1	0	1	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2015139	1	7	8	1	0	1	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2015140	1	10	11	1	0	1	0	1	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2015141	1	13	14	1	0	1	0	1	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2015142	1	16	17	1	0	1	0	1	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2015143	1	19	20	1	0	1	0	1	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0
9	2015144	1	24	25	3	0	3	0	3	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2015145	1	36	37	6	0	6	0	6	0	43	0	0	0	0	0	0	0	0
11	2015146	3	54	57	8	0	8	0	8	0	65	0	0	0	0	0	0	0	0
12	2015147	6	78	84	11	0	11	0	11	0	95	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Dados do autor.

Figura 6 - Resultado de uma simulação das fases de um inseto (ninfas e adulto) na forma de gráfico. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

3.5 Discussão

No presente trabalho, foi implementada uma interface gráfica, denominada ABISM-GUI, para configurar, executar e visualizar os resultados das simulações para o modelo baseado em agentes proposto por Toebe (2014). Tal interface interativa proporcionará a alunos e pesquisadores a fácil execução de simulações para estudar a dinâmica populacional de insetos pragas agrícolas.

Trata-se de uma ferramenta que oportuniza em cursos que envolvam biologia de populações a rápida visualização das consequências de alterações em parâmetros de desenvolvimento, mortalidade e deslocamento. Professores e estudantes podem criar e testar hipóteses e cenários. Por exemplo, se a temperatura média de uma região aumentar em 2 °C quais seriam as consequências sobre a multiplicação de uma determinada praga? Dadas duas espécies com requerimentos térmicos distintos e uma determinada condição ambiente, qual se sobressairia? Enfim, são inúmeras as possibilidades de testes de hipóteses que podem ser criadas de forma a instigar estudantes e pesquisadores a aprimorar seus conhecimentos sobre a biologia de pragas.

Outra forma de utilizar o modelo para fins didáticos e realizar testes de hipótese é seu uso em cursos teórico-práticos. As turmas poderão conduzir experimentos com insetos que irão fornecer os dados “observados” que serão confrontados com os dados simulados pelo modelo. Os estudantes poderão ir ajustando parâmetros do modelo de forma que a simulação se aproxime dos dados observados.

O projeto do ABISM-GUI está em andamento e continua necessitando de melhorias que irão ocorrer concomitantemente com as simulações com o modelo baseado em agentes. Entretanto, na sua implementação atual, fornece algumas características principais: a) permite o usuário, através de menus interativos, configurar seus experimentos de acordo com sua necessidade; b) analisar os resultados através de tabelas ou gráficos; c) re-configurar sua simulação sem a necessidade de sair do sistema e d) comparar, caso necessite, com dados observados já registrados no ambiente.

Dentre as limitações da interface gráfica desenvolvida, encontram-se a impossibilidade de controlar o acesso ao ambiente por usuários. Além disso, registrar as simulações para cada um desses usuários em um de banco de dados (AGRODB (LAZZARETTI et al., 2016a)) ou em arquivos (JSON) e por fim, comparar os resultados de novas simulações com os já existentes e registrados no sistema.

3.6 Conclusões

A interface gráfica do ABISM favorece a flexibilidade e o desempenho, otimizando velocidade e utilização dos recursos computacionais. A ABISM-GUI está disponível para acesso no endereço <https://goo.gl/PE6Kjc>. Além da sua aplicação nos estudos de modelagem, objetiva-se disponibilizá-lo como instrumento de investigação da dinâmica de populações de afídeos para uso tanto de profissionais da área agrícola, como no treinamento de estudantes em ciências agrárias e biológicas.

A interface gráfica do ABISM oferece ao público que não tem conhecimento sobre programação, uma possibilidade de explorar a flexibilidade do modelo, alterando parâmetros e visualizando suas consequências.

4 CAPÍTULO II

Crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi* em diferentes regimes térmicos: uma aproximação por simulação em modelos baseados em agentes.

4.1 Resumo

Rhopalosiphum padi (Linnaeus, 1758) é uma das pragas de cereais mais importantes devido à sua ampla distribuição geográfica e abundância. No Brasil, as perdas econômicas associadas a esse pulgão resultam principalmente da transmissão do vírus nanismo amarelo da cevada. A tomada de decisão para a adoção de medidas de manejo deve considerar o tamanho inicial da população, seu potencial de aumento e o momento em que essa população atingirá níveis tais que os danos resultantes sejam iguais aos custos das medidas de controle. Consequentemente, o estabelecimento de programas de gestão e sistemas de apoio à decisão deve basear-se em modelos que estimem o potencial de crescimento populacional das espécies-praga. A temperatura é um dos principais fatores que determinam a taxa de crescimento das populações de insetos. Geralmente, experimentos controlados são projetados para examinar a relação de temperatura em intervalos fixos e as fases de desenvolvimento da biologia de insetos. Na natureza, os regimes térmicos não são constantes e o crescimento populacional é o resultado de uma sucessão de eventos combinados. Neste trabalho, os efeitos de diferentes regimes térmicos no crescimento populacional de *R. padi* foram comparados. Um modelo baseado em agentes foi usado para estimar o crescimento populacional e os parâmetros definidos em regimes controlados foram comparados com temperaturas flutuantes sob condições naturais. O modelo apresentado aqui pode servir como uma ferramenta para prever o crescimento populacional e a tomada de decisão para o manejo de pulgões. A estrutura do modelo e o desenho experimental proposto permitem a adição de módulos e camadas de fatores que podem afetar progressivamente as populações de pulgões para melhorar o modelo gradualmente.

Palavras-chave: 1. Modelos de simulação. 2. Afídeos. 3. Tomada de decisão. 4. Regimes térmicos. 5. Dinâmica populacional.

4.2 Introdução

Rhopalosiphum padi (Linnaeus, 1758) é uma das mais importantes pragas de cereais devido à sua ampla distribuição geográfica e abundância (ASIN; PONS, 2001; AUAD et al., 2009; DESCAMPS; CHOPA, 2011; MORGAN, 2000; PARK et al., 2016, 2017; RASTEGARI; TAHERI; RAZMJOU, 2010; SAVARIS et al., 2013). A ampla distribuição e importância econômica de *R. padi*, combinada com um grande número de estudos publicados sobre a ecologia e a biologia desta espécie, a torna um assunto ideal para explorar como certos fatores influenciam o risco apresentado por essa praga (MACFADYEN; KRITICOS, 2012).

Este pulgão, na fase ninfa como na fase adulta, pode afetar a produtividade do cereal de inverno, causando danos diretos e indiretos. Os danos diretos são devidos à sucção da seiva (efeito de drenagem), danos físicos e estruturais devido à inserção dos estiletes e à ação de substâncias injetadas pelo pulgão nos tecidos da planta que alteram a fisiologia da planta. Algumas dessas moléculas têm ação tóxica ou desencadeiam a resposta das células das plantas causando clorose e necrose do tecido vegetal (BORER et al., 2009). O nível de dano depende da densidade populacional do pulgão (determinado pelo nível de resistência da planta hospedeira e condições ambientais favoráveis) e da capacidade da planta de tolerar tais populações. A resistência à multiplicação dos pulgões e a tolerância podem variar de acordo com o estágio fenológico da planta. Os danos indiretos são devidos à transmissão de patógenos que podem infectar a planta. Entre tais agentes fitopatogênicos, estão vírus como o *Barley yellow dwarf virus* (BYDV) e o *Cereal yellow dwarf virus* (CYDV) pertencentes à família Luteoviridae. Estes vírus causam o nanismo-amarelo em cereais, considerada a doença mais frequente e economicamente impactante dos cereais de inverno (DIGGLE; JONES, 2009; DÖRING, 2014; IRWIN; THRESH, 1990; THACKRAY, 2009).

Para o manejo adequado de uma praga, é fundamental estimar a relação entre o nível populacional e os danos diretos e indiretos causados. A tomada de decisão sobre a adoção de medidas de gestão deve considerar, a partir de uma população quantificada (população T0), seu potencial de aumento e quando essa população atingirá níveis em que as perdas resultantes sejam equivalentes aos custos das medidas de controle. Conseqüentemente, o estabelecimento de programas de gestão e sistemas de apoio à decisão deve ser baseado em modelos que estimem o potencial de crescimento da população de pragas (AUAD et al., 2009; DESCAMPS; CHOPA, 2011; RASTEGARI; TAHERI; RAZMJOU, 2010).

A dinâmica populacional dos afídeos é afetada por fatores bióticos (resistência de plantas hospedeiras, inimigos naturais como parasitóides, predadores e patógenos) e fatores abióticos (temperatura, umidade, luminosidade, qualidade nutricional). A temperatura é um dos principais fatores que interferem no desenvolvimento das populações de pulgões. Esse fator afeta as taxas de desenvolvimento, reprodução e sobrevivência, refletindo na densidade populacional em uma planta (LIMA; FERREIRA; GODOY, 2009; VAN EMDEN; HARRINGTON, 2007).

Sistemas de simulação têm sido utilizados para representar uma ampla gama de problemas na área entomológica, como exemplos, o crescimento populacional, dispersão e migração de pulgões (PARRY, 2013; TOEBE, 2014b), ciclo de vida de mosquitos (ISIDORO et al., 2009; ZHOU et al., 2010) e o comportamento de infestações de cigarrinha (PEREZ; DRAGICEVIC, 2010). Em 2014, Toebe desenvolveu um modelo baseado em agentes, neste trabalho chamado ABISM (*Agent Based Insect Simulation Model*), que simula o ciclo de vida de insetos considerados pragas. Este modelo foi parametrizado para *R. padi*. Na arquitetura do modelo, a simulação do crescimento populacional de *R. padi* considera fatores que contemplam a biologia do inseto que precisam ser parametrizados. O ABISM simula processos biológicos de insetos, como desenvolvimento, reprodução, alimentação, movimento e morte. A estimação de parâmetros para modelos de processos complexos utilizados em ciências biológicas é importante porque é um dos principais determinantes do poder preditivo do modelo, e difícil porque os modelos e dados associados são complexos.

Os objetivos deste estudo foram: 1) parametrizar os módulos de desenvolvimento e reprodução do ABISM; e 2) aplicar o modelo para simular o crescimento populacional do pulgão *R. padi* em plantas de trigo expostas em ambientes com diferentes regimes térmicos.

4.3 Material e Métodos

4.3.1 Dados experimentais

Os experimentos foram realizados nas dependências da Embrapa Trigo, Município de Passo Fundo (28º 15' S, 52º 24' W e 684 m). Os experimentos foram realizados em dois tipos de ambiente: câmaras climatizadas e ambiente externo. Nas câmaras climatizadas, o fotoperíodo foi definido em 12 horas de luz e 12 horas de escuro. A intensidade luminosa foi de 10.000 lux. Nesta condição, foram definidos os seguintes regimes térmicos: constante (5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C); e flutuante, com amplitude térmica de 10 °C entre o dia (temperatura máxima) e a noite (temperatura mínima): 5-15 °C; 10-20 °C; 15-25 °C; 20-30 °C; 25-35 °C e 30-40 °C.

No ambiente externo (regime térmico variável), o fotoperíodo e as oscilações de temperatura foram variáveis de acordo com a estação do ano em que o experimento foi realizado. As temperaturas máximas e mínimas diárias foram obtidas a partir da rede automatizada de estações meteorológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). A estação meteorológica automatizada estava localizada a aproximadamente 700 metros do local do experimento do ambiente natural. As temperaturas médias dos testes, que aparecem nas figuras e tabelas, foram obtidas pela média das temperaturas máxima e média das temperaturas mínimas registradas durante cada experimento.

As microparcels, onde os dados foram coletados, estavam dentro de gaiolas de tecido tipo *voil*, que impedia a entrada de inimigos naturais, e sob cobertura plástica transparente, protegidas da chuva (ambiente externo). Cada microparcela era composta por bandejas (30 cm x 50 cm e profundidade de 15 cm) com quatro linhas (22 plantas/linha - densidade e espaçamento de 17 cm conforme recomendação da cultura). Cada microparcela foi infestada com um pulgão *R. padi* na décima planta da terceira linha, com o trigo no estágio de duas folhas. A cultivar de trigo utilizada foi a Embrapa 16 (Hulha Negra/CNT7//Amigo/CNT7) que é mais suscetível ao *R. padi* (SAVARIS et al., 2013).

Os afídeos utilizados nos experimentos foram da espécie *R. padi*, oriundos de exemplares obtidos em Passo Fundo - RS, mantidos em plantas de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) em câmaras (fotoperíodo de 12 horas e temperatura média de 22 °C) no insetário da Embrapa Trigo desde 2006. As colônias, compostas por fêmeas e ninfas geradas por partenogênese telítoca, foram iniciadas a partir de ninfas recém-paridas, sem contato com tecidos de plantas infectadas, gerando, portanto, indivíduos avirulíferos.

Foram conduzidos vinte e cinco experimentos, realizados nos meses de abril a dezembro de 2014 e janeiro a agosto de 2015, com duração entre 13 e 20 dias cada. Ao final de cada experimento, cada planta da microparcela foi coletada separadamente e colocada em tubos Falcon de 50 mL. Adicionou-se uma solução de água com detergente para liberação dos pulgões da planta, os que foram subsequentemente contados, determinando-se assim o número total de pulgões.

4.3.2 Procedimentos

O primeiro passo foi a parametrização inicial do modelo usando os experimentos em ambientes controlados. Cada cenário buscava simular um dos experimentos reais, cujos dados estavam disponíveis (Anexo I).

O módulo “Campo” foi parametrizado para ter apenas uma “MicroArea”. No módulo "MicroArea" habilitou-se o parâmetro de proteção, ou seja, não foi permitida a imigração e emigração de insetos, mortalidade por predação, parasitismo e chuva. Além disso, esse módulo foi parametrizado para ter quatro linhas de plantas, 22 plantas/linha. Os demais módulos e submódulos foram parametrizados conforme descrito na seção 3.3 e 3.4.1 do Capítulo 1 deste trabalho.

4.3.3 Análise estatística

Para calcular a precisão dos resultados estimados pelo ABISM em relação aos resultados observados nos experimentos, foram utilizadas três medidas de erro: *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Squared Error* (MSE) e *Root Mean Squared Error* (RMSE) (CHAI; DRAXLER, 2014). As análises foram realizadas no ambiente para estatística computacional R (TEAM R, 2016), utilizando o pacote QualV (JACHNER; BOOGAART, 2007).

4.4 Resultados

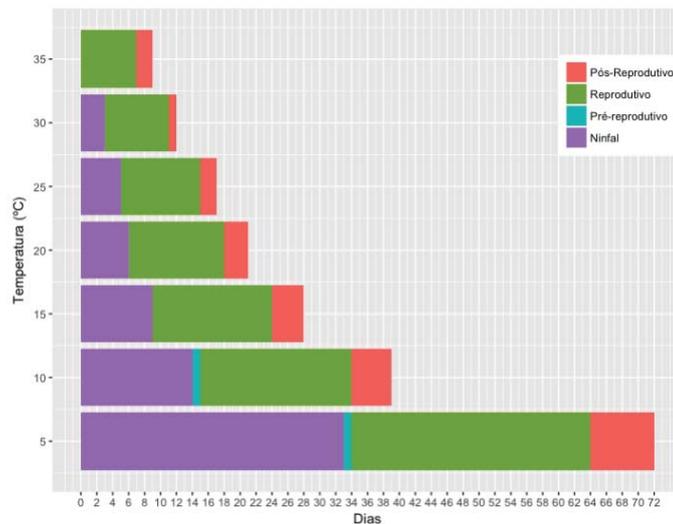
O regime térmico teve efeito sobre a taxa de desenvolvimento, a taxa de fecundidade e, conseqüentemente, sobre o crescimento populacional. Em uma mesma temperatura média, as taxas médias de desenvolvimento, fertilidade e crescimento populacional foram diferentes.

4.4.1 Regime térmico constante

Sob regime térmico constante a vida útil de *R. padi* variou de 9 (35 °C) a 72 dias (5 °C). A 5 °C a fase ninfal é de 33 dias, pré-reprodutiva de 1 dia, reprodutiva de 30 dias e pós-reprodutiva de 8 dias. Por outro lado, a 35 °C o estágio ninfal é de 0 dias, assim

como o estágio pré-reprodutivo. Os períodos reprodutivo e pós-reprodutivo são 7 e 2 dias, respectivamente (Figura 1).

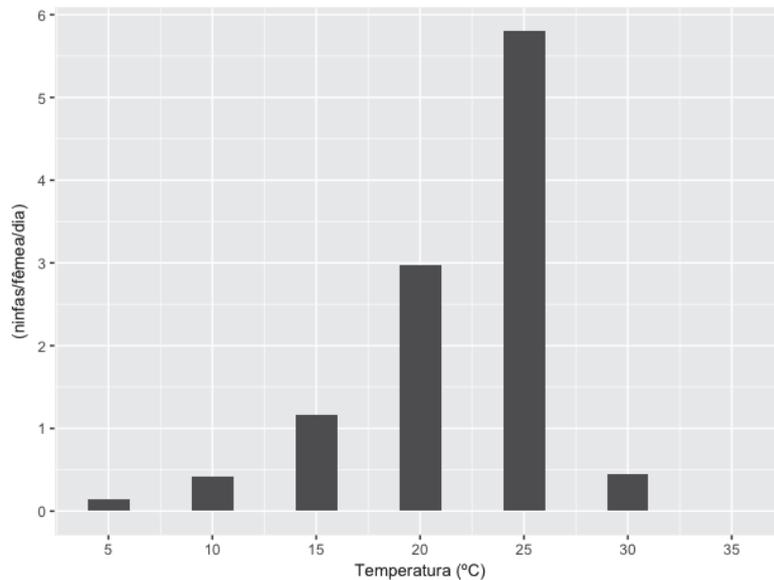
Figura 1 - Duração (dias) das fases de desenvolvimento (Ninfal, Pré-reprodutivo, Reprodutivo e Pós-Reprodutivo) de *R. padi* estimado pela ABISM em regime térmico constante. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

A taxa fecundidade (Figura 2) foi maior a 25 °C, (5,78 ninfas/fêmea/dia). Nas condições mais extremas deste estudo, a taxa de reprodução foi de 0,14 ninfas/fêmea/dia a 5 °C e 0 ninfas/fêmea/dia a 35 °C. De 5 a 25 °C, há um aumento progressivo na taxa de fecundidade. De 25 a 30, há uma queda abrupta na taxa de fecundidade.

Figura 2 - Taxa de fecundidade simulada sob regime térmico constante. Passo Fundo - RS, 2019

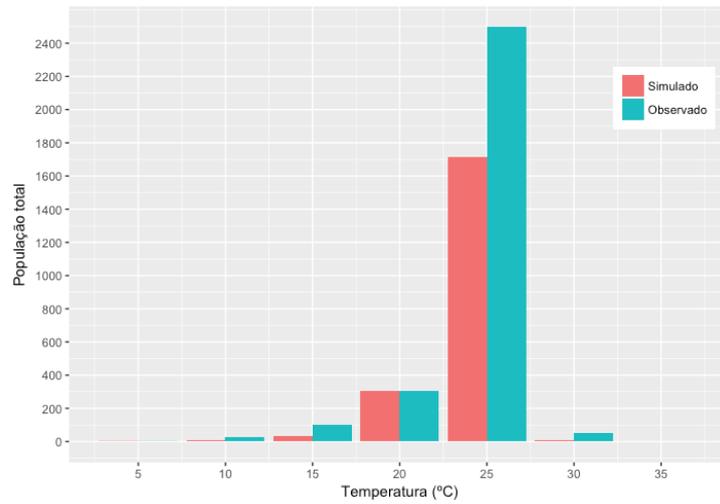


Fonte: Dados do autor.

A curva de resposta do crescimento populacional à temperatura apresentou uma forma muito semelhante à curva de resposta à fecundidade (Figura 3). As maiores populações finais foram registradas a 25 °C. Aos 5 e 35 °C, não houve crescimento populacional. De 5 a 25 °C, houve um aumento progressivo no crescimento populacional e, de 25 para 30 °C, houve uma queda abrupta no crescimento populacional.

Houve um bom ajuste entre dados observados e simulados. Para as maiores populações finais obtidas (25 °C) foram observados 2.496 e simulados 1.714 pulgões, respectivamente. A forma das curvas observadas e simuladas foi muito semelhante. A maior diferença entre os dados observados e simulados foi a 25 °C e menor a 20 °C.

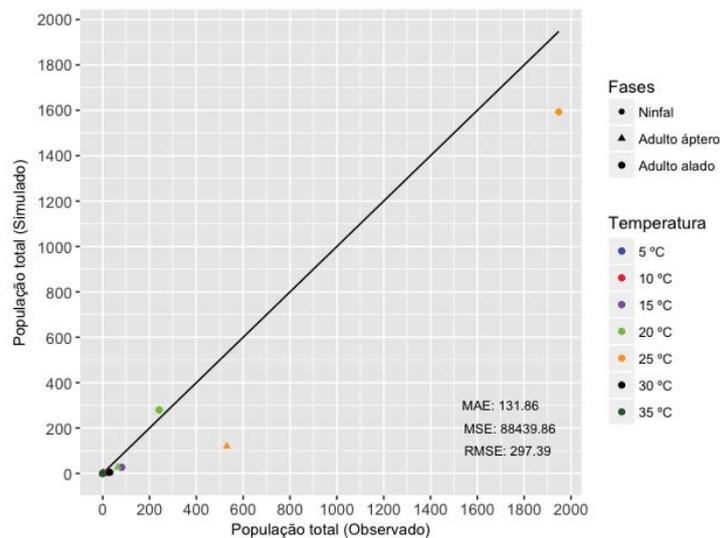
Figura 3 - Número total de afídeos por MicroArea no observado (verde) e simulado (vermelho) após 15 dias sob regime térmico constante. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

Além do bom ajuste na simulação para a população total estimada após 15 dias de simulação, a estrutura populacional também foi adequadamente simulada (Figura 4).

Figura 4 - Dados observados e simulados da estrutura populacional de *R. padi* e medidas de erro sob regime térmico constante. Passo Fundo - RS, 2019



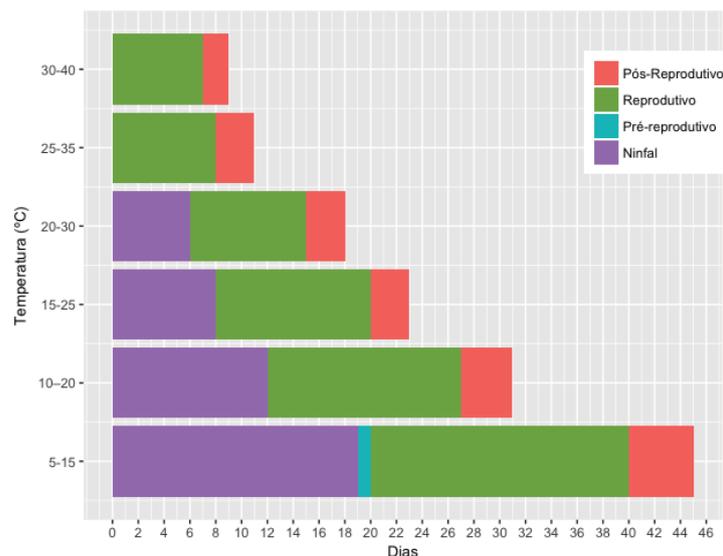
Fonte: Dados do autor.

4.4.2 Regime térmico flutuante

Sob regime térmico flutuante, a vida de *R. padi* variou de 9 (30-40 °C) a 45 dias (5-15 °C). A 5-15 °C, a fase ninfal é de 10 dias, pré-reprodutiva de 1 dia, reprodutiva de

20 dias e pós-reprodutiva de 5 dias. Por outro lado, a 30-40 °C, o estágio ninfal, assim como o período pré-reprodutivo, é de 0 dias. Os períodos reprodutivo e pós-reprodutivo são 7 e 2 dias, respectivamente (Figura 5).

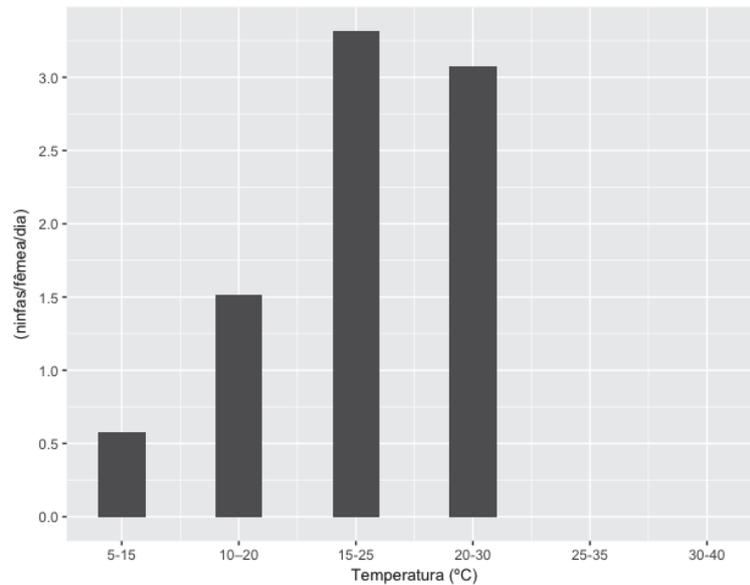
Figura 5 - Duração (dias) das fases de desenvolvimento (Ninfal, Pré-reprodutivo, Reprodutivo e Pós-Reprodutivo) de *R. padi* estimado pela ABISM em regime térmico flutuante. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

A taxa de fecundidade (Figura 6) foi maior a 15-25 °C, (3,3 ninfas/fêmea/dia). Nas condições mais extremas deste estudo, a taxa de fecundidade foi de 0 ninfas/fêmea/dia a 30-40 °C. De 5-15 a 15-25 °C, há um aumento progressivo na taxa de fertilidade. De 15-25 a 20-30 °C há uma ligeira redução na taxa de fecundidade. A 25-35 °C e 30-40 °C não há reprodução.

Figura 6 - Taxa de fecundidade simulada sob regime térmico flutuante. Passo Fundo - RS, 2019



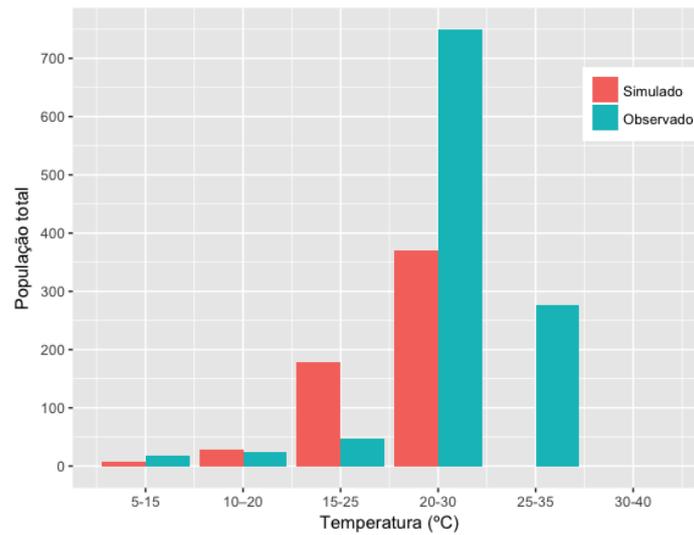
Fonte: Dados do autor.

Sob regime térmico flutuante, as maiores populações finais totais, 370 (simuladas) e 749 (observadas) pulgões, foram registradas na temperatura de 20-30 °C (Figura 7). As diferenças entre os valores observados e simulados foram maiores neste regime do que no regime constante. A maior diferença observada foi a 15-25, com uma diferença de 279% entre os resultados simulados e observados.

Para populações observadas, a curva de resposta da população final em relação à temperatura é muito semelhante a regimes constantes e flutuantes. No entanto, para os valores simulados, a taxa de população para a temperatura ótima (20-30 °C) é menor (Figura 6).

Como descrito anteriormente, a taxa de fecundidade média foi maior a 15-25 °C (3,31 ninfas/fêmea/dia) do que a 20-30 °C. Uma subestimação da taxa de fecundidade pode resultar nas diferenças observadas.

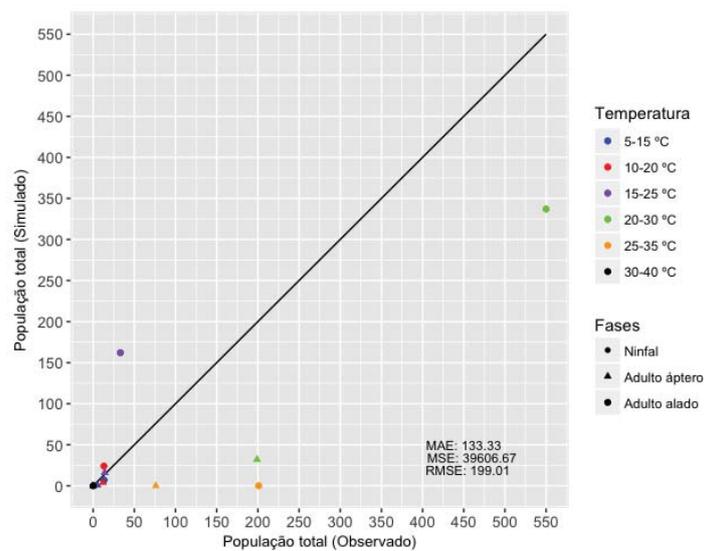
Figura 7 - Número total de afídeos por MicroArea no observado (verde) e simulado (vermelho) após 15 dias sob regime térmico flutuante. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

O experimento a 10-20 °C apresentou o melhor ajuste para a população total. Todos os estágios foram subestimados linearmente. Comparando os dados observados com os simulados, a população adulta áptera apresentou o menor desvio em comparação aos demais resultados (Figura 8).

Figura 8 - Dados observados e simulados da estrutura populacional de *R. padi* e medidas de erro sob regime térmico flutuante. Passo Fundo - RS, 2019

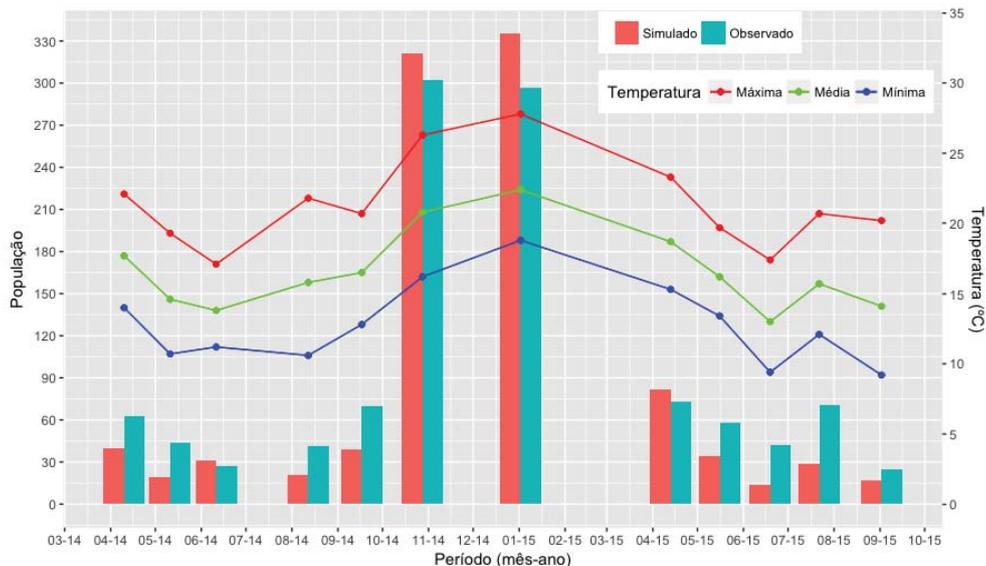


Fonte: Dados do autor.

4.4.3 Regime térmico variável

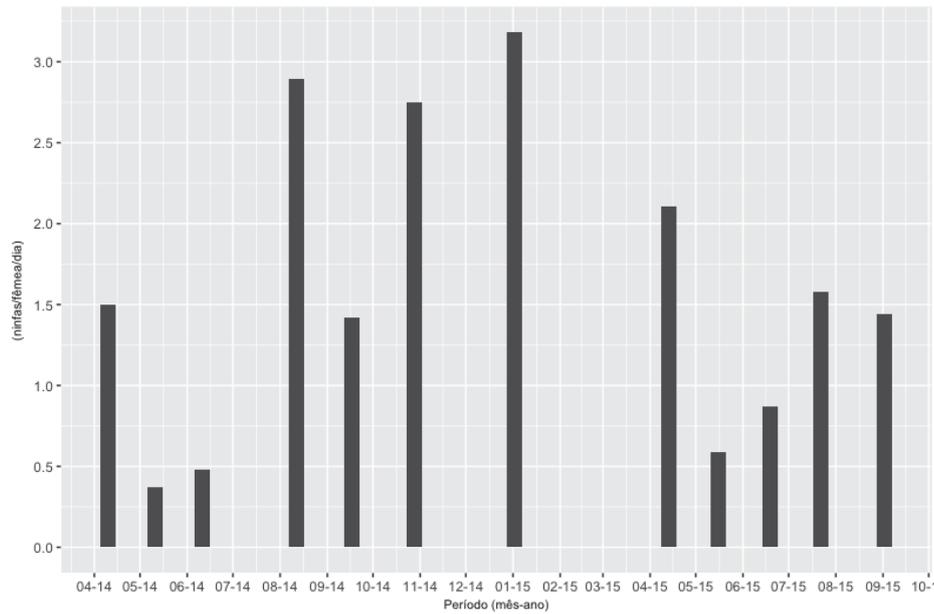
Em regime térmico variável, as maiores populações finais de pulgões, 297 (observadas) e 335 (simuladas), foram registradas no experimento realizado em janeiro de 2015 (verão) (Figura 9). Nesse período, as médias das temperaturas máximas, médias e mínimas foram 27,8, 22,4 e 18,8 °C, respectivamente. A taxa média de fecundidade no período foi de 3,18 ninfas/fêmea/dia (Figura 10). Em contrapartida, a menor população registrada ocorreu no experimento realizado durante o inverno em julho de 2015 (com média das máximas, das médias e das mínimas de 17,4, 13,0 e 9,4 °C, respectivamente). Apenas 42 pulgões foram observados e 14 foram simulados. A taxa média de fecundidade no período foi de 0,87 ninfas/fêmea/dia.

Figura 9 - Número total de afídeos por MicroArea no observado (verde) e simulado (vermelho) após 15 dias sob regime térmico variável. Temperaturas mínima, média e máxima do ensaio. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

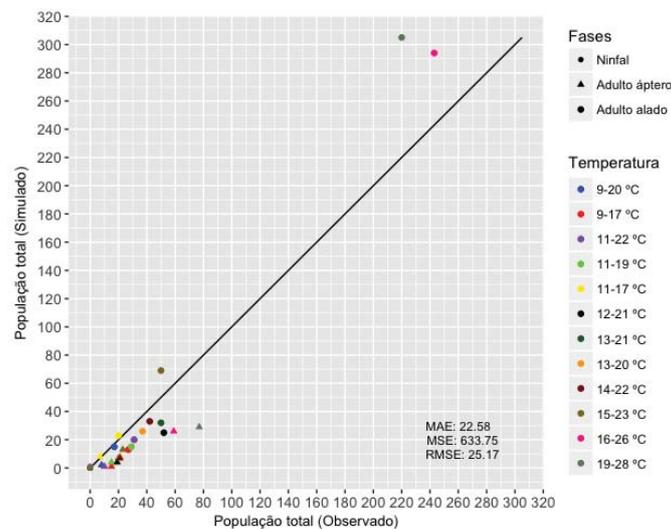
Figura 10 - Taxa de fecundidade simulada sob regime térmico variável. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

Assim como no regime térmico constante, além do bom ajuste na simulação para a população total estimada após 15 dias de simulação, a estrutura populacional também foi adequadamente simulada (Figura 11). O experimento realizado em junho de 2014 foi o que apresentou o melhor ajuste. A população adulta apresentou o menor desvio em relação às demais etapas (Figura 11).

Figura 11 - Dados observados e simulados da estrutura populacional de *R. padi* e medidas de erro sob regime térmico variável. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

4.5 Discussão

Os principais fatores considerados para estimar o crescimento populacional são as taxas de desenvolvimento, reprodução e mortalidade dos indivíduos que compõem a população. Para insetos, as taxas de desenvolvimento e reprodução são altamente determinadas pela temperatura. Geralmente, esses fatores são estudados no nível individual em experimentos de biologia conduzidos em temperatura constante e ambientes controlados (DAVIS; RADCLIFFE; RAGSDALE, 2006; MA; HOFFMANN; MA, 2015, MA; MA, 2012; RASTEGARI; TAHERI; RAZMJOU, 2010).

O tamanho da população dos organismos flutua no tempo e no espaço devido a uma variedade de razões, tais como flutuações nas condições ambientais, disponibilidade de recursos e impacto de inimigos naturais. Neste trabalho, houve disponibilidade de tecido hospedeiro e não houve influência de inimigos naturais. Assim, apenas o efeito do ambiente foi avaliado, basicamente a temperatura.

Foi proposta uma modelagem baseada em agentes para estimar o crescimento populacional. A partir do desenho experimental, uma abordagem populacional foi utilizada para avaliar o efeito da temperatura no crescimento populacional. Diferentemente dos estudos clássicos de biologia, nos quais uma série de parâmetros são tomados em indivíduos, neste trabalho o efeito de temperaturas e regimes térmicos foi avaliado em nível populacional considerando múltiplos processos e interações. O uso de modelos de simulação torna-se útil quando as hipóteses abordadas em um sistema são incitadas quantitativamente e, dependendo do resultado, podem ser usadas para direcionar experimentos subsequentes de maneira mais eficiente.

A parametrização inicial do ABISM foi baseada em dados da literatura. As equações propostas por Barlow e Dixon (1980) e Morgan (2000) foram utilizadas neste estudo. Assim, para estimar o período de cada ponderação de fase de graus dias foi utilizado, via simulação, para que o desenvolvimento fosse uma divisão entre 0 e 2,6. Para o período reprodutivo, uma equação adaptada de Logan et al. (1976) e Morgan (2000) foi utilizada. Por razões de simplificação, a taxa de reprodução foi fixada durante todo o período reprodutivo. Durante os primeiros dias de vida, há crescimento da taxa de fecundidade declina (DEAN; 1974). Quanto à taxa de mortalidade, o modelo é totalmente

determinístico e, uma vez atingida a soma térmica esperada, o inseto morre. No mundo real, há uma gradual decadência de sobrevivência. A equação é baseada em 50% de sobrevivência (DEAN, 1974). Neste trabalho, outros fatores que levam à mortalidade não foram considerados, mas o módulo pode ser parametrizado para chuva, inimigos naturais e parasitismo.

Além de desenvolver e reproduzir, as populações de insetos realizam outras ações que afetam a taxa de crescimento populacional. Por exemplo, os insetos se movimentam e, portanto, gastam tempo e energia nesse processo (IRWIN; KAMPMEIER; WEISSER, 2017). O tamanho da população também afeta as taxas de crescimento populacional. À medida que a população aumenta, a qualidade dos alimentos diminui. A pressão da população de insetos nas plantas hospedeiras também faz com que ela sinalize a população de plantas que precisam produzir compostos de defesa e, assim, diminuindo a taxa de colonização da área (MERRILL et al., 2009).

Com relação aos regimes térmicos, o modelo simulou adequadamente o desenvolvimento, a longevidade, a densidade populacional e a taxa média de reprodução nos regimes térmicos constante e variável. As maiores populações (1714 afídeos/microárea) foram obtidas para o regime térmico constante com máximo a 25 °C. No regime flutuante, também com máximo a 25 °C a população obtida foi de apenas 370 indivíduos. No regime térmico variável, o máximo foi obtido no teste em que a temperatura média foi de 22 °C (janeiro) com 335 indivíduos. Apesar de somas térmicas equivalentes e somas de desvio iguais a zero no regime constante, 125 no regime flutuante e 76 para o regime variável. Portanto, o regime constante é evidentemente aquele que oportuniza o maior tempo na temperatura ótima, seguido pela variável e, finalmente, o flutuante em que todo o tempo é gasto a 5 graus de desvio do ótimo de temperatura.

No regime térmico constante, a densidade populacional permaneceu abaixo ou igual aos dados observados. Assim, nossos resultados foram consistentes com a literatura publicada relatando densidade populacional e fecundidade diária (Figura 3 e Figura 2) a 20 e 25 °C. Estes resultados estão de acordo com os relatados por Auad et al. (2009), Park et al. (2016), Park et al. (2017) e Razmjou e Golizadeh (2013) onde a taxa de fecundidade diária foi de $4,73 \pm 0,14$, $4,92 \pm 0,21$, $5,95 \pm 0,23$ e $4,40 \pm 0,39$, respectivamente. No regime térmico flutuante, o desenvolvimento no período ninfal foi três (3) vezes maior

em temperatura mais baixa (14 °C) quando comparado com temperaturas mais elevadas (22 °C). O efeito deletério das altas temperaturas sobre a longevidade é prevalente em vários afídeos e em temperaturas relativamente baixas (10-15 °C) mostram menos efeitos adversos na longevidade, similar a alguns outros afídeos (ASIN; PONS, 2001; MORGAN; WALTERS; AEGERTER, 2001).

No regime térmico flutuante, os resultados apontam para uma mudança significativa no tamanho das populações finais (Figura 7). Uma explicação para isso pode ser derivada dos experimentos simulados, ou seja, a simulação utilizou as temperaturas mínima, média e máxima diária, mas os dados observados foram obtidos através de um experimento configurado com fotoperíodo de 12 horas de luz e 12 horas de escuro e claro e amplitude térmica de 10 °C entre o dia (temperatura máxima) e noite (temperatura mínima). Para parametrizar corretamente a simulação, sugere-se usar a execução por hora. No regime térmico variável, em dezembro/2014, a temperatura média foi mantida entre 22,4 e 25 °C, temperaturas consideravelmente favoráveis para o desenvolvimento e reprodução de pulgões (AUAD et al., 2009; DEAN, 1974) (Figura 11), que é o fator mais crítico na evolução da densidade populacional. Além disso, em 50% das avaliações, a taxa de fecundidade permaneceu acima de três pulgões, dados que corroboram com os obtidos por (MA; HOFFMANN; MA, 2015).

4.6 Conclusões

As consequências e possibilidades do desenho experimental e a abordagem do modelo baseado em agentes utilizado neste trabalho podem ser utilizadas em duas perspectivas: um dos entendimentos dos vários processos e interações que podem afetar a dinâmica das populações de pulgões; e uso como um sistema para prever o desenvolvimento de epidemias e ser capaz de ser usado em conjunto com plataformas de monitoramento para tomada de decisões. Ainda, pode ser utilizada como uma ferramenta para prever regiões de risco, impactos das mudanças climáticas, impactos de mudanças nos sistemas de produção e paisagens agrícolas. Além disso, os parâmetros utilizados provêm de medições que podem ser realizadas em cenários reais e, nesse sentido, descritos para uso no modelo. A precisão dos resultados da simulação sobre os dados reais pode ser maior ou menor, dependendo da parametrização dada e das funções matemáticas usadas para cada característica biológica presente no modelo. É possível estender o

modelo para permitir a simulação de patossistemas que incluem vírus de plantas e sua influência nas lavouras.

5 CAPÍTULO III

Um framework de acoplamento de modelos de planta e praga para simulação de incidência, densidade e dano de pulgões em trigo.

5.1 Resumo

Pulgões de cereais (Hemiptera: Aphididae) são pragas economicamente importantes em todas as regiões produtoras de trigo do Brasil. Para ter medidas de controle ecologicamente corretas, como o controle biológico e diminuir a utilização de inseticidas se faz necessária a compreensão de sua dinâmica populacional. Para isso, a comunidade acadêmica realizou experimentos para desenvolver modelos de previsão ou sistemas especialistas para identificar a população, as taxas de crescimento e os danos decorrentes. A informática oferece uma maneira eficaz e eficiente de resolver os problemas complexos dos sistemas agrícolas, especialmente na dinâmica populacional. Embora estes sistemas sejam capazes de atender a necessidades específicas, ainda há muito a ser feito para melhorar uma representação mais detalhada da heterogeneidade espacial e seus impactos nas culturas e no desempenho ambiental. Este estudo apresenta uma arquitetura para o acoplamento entre um modelo baseado em agentes e o que simula o crescimento e desenvolvimento de uma cultura e a parametrização destes para simular a densidade, a incidência e o dano direto causado pelo afídeo *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus, 1758) em plantas de trigo. Para isto, utilizou-se dados de experimentos realizados a campo. A integração entre os modelos conseguiu simular a densidade populacional, a quantidade de plantas infestadas como também estimar o efeito do dano direto causado pelo pulgão nas plantas. Entretanto, mais estudos são necessários para implementar o acoplamento entre os modelos para que possam contribuir no entendimento das interações entre o patossistema vetor-vírus-planta e, a partir disto, auxiliar na avaliação do impacto da aplicação de inseticida sobre a população de vetores e constatar a incidência da virose nas culturas.

Palavras-chave: 1. *Rhopalosiphum padi*. 2. Tomada de decisão. 3. Integração entre modelos. 4. Simulação a campo. 5. Crescimento populacional.

5.2 Introdução

Os pulgões ou afídeos (Hemiptera: Aphididae) são importantes pragas do trigo, pois causam danos diretos e indiretos. Os danos diretos resultam da sua alimentação, como danos mecânicos às células e tecidos provocados pela inserção dos estiletes, reação das células à componentes da saliva (toxinas e enzimas) e sucção da seiva. Os danos indiretos ocorrem pela transmissão de vírus, como B/CYDVs (*Barley/Cereal yellow dwarf virus*) que causam o nanismo-amarelo em cereais. Várias espécies de pulgões atingiram o status de potenciais pragas de trigo. Alguns deles são adaptados especificamente para algumas regiões da cultura e para o conjunto de condições

ambientais em que o trigo é cultivado (CARTER; DIXON; RABBINGE, 1982; IRWIN; THRESH, 1990; REBONATTO; SALVADORI; LAU, 2015; SAVARIS et al., 2013). Para evitar os efeitos adversos da total dependência de inseticidas químicos, de modo a garantir o equilíbrio ecológico dos ecossistemas agrícolas, é necessário utilizar medidas de controle ecologicamente corretas, como o controle biológico. Para isso, uma boa compreensão de sua dinâmica populacional é fundamental. Um grande número de experimentos foi realizado para desenvolver modelos de previsão ou sistemas especialistas para identificar a população, as taxas de crescimento e os danos. Eles lidaram com vários aspectos biológicos dos pulgões e com base em modelos matemáticos (determinísticos ou estocásticos). A informática oferece uma maneira eficaz e eficiente de resolver os problemas complexos dos sistemas agrícolas, especialmente na dinâmica populacional (JONES, 2009; KASSIE et al., 2016; JONES et al., 2017b; MORGAN, 2000; PARRY; EVANS; MORGAN, 2006; THACKRAY; DIGGLE).

Embora os modelos que representam sistemas de produção agrícola sejam capazes de atender a necessidades específicas, como, por exemplo, estudos da dinâmica populacional de insetos-praga ou a dispersão de doenças, ainda há muito a ser feito para melhorar uma representação mais detalhada da heterogeneidade espacial e seus impactos nas culturas e no desempenho ambiental. Nestes domínios, é importante que os modelos de culturas se acoplem, por exemplo, a modelos de pragas (HOLZWORTH et al., 2014; JONES et al., 2017a, 2017b).

Ainda que o domínio da aplicação tenha se ampliado e as redes de cientistas que fazem uso da modelagem tenham se expandido, as implementações de software dos principais modelos (por exemplo, DSSAT (JONES et al., 2003), EPIC (IZAURRALDE et al., 2006) e APSIM (KEATING et al., 2003)) permanecem em grande parte como eram há 15 (quinze) anos. O FORTRAN ainda é usado como linguagem de programação para os modelos em DSSAT, EPIC e grande parte da versão atual do APSIM. O FORTRAN permanece dominante, principalmente devido ao seu legado como a linguagem predominante usada por cientistas e programadores desde sua criação nos anos 1950 até os anos 80 e 90, quando grande parte da ciência ou parte biológica dos modelos de simulação de hoje foram inicialmente desenvolvidos.

A maioria desses modelos ainda depende muito de seu código legado. Essa confiança vem de esforços significativos para construir esses componentes de modelo que até o momento ainda estão executando e funcionando bem e são usados por muitos cientistas como partes de pesquisas em andamento. Esse código legado, no entanto, é normalmente escrito usando linguagens procedurais (por exemplo, FORTRAN), o que limita as opções para evoluir o código em direção a uma base de código mais moderna (por exemplo, JAVA). Ao mesmo tempo, a maior parte do código legado é, na melhor das hipóteses, mal documentado e o acesso ao código-fonte é muitas vezes restrito a um grupo limitado de desenvolvedores (JONES et al., 2017a).

Os modelos de simulação em si são normalmente grandes construções, cada uma contendo suas próprias implementações de abordagens muito comuns para modelar diversos tipos de processos. Para que um modelo simule o processo de desenvolvimento do ciclo de vida de uma praga, por exemplo, ele necessita, além dos dados climatológicos e biológicos, de dados gerados por um modelo de cultura. Nesse sentido, poucos são os sistemas que executam simultaneamente dois modelos ou mais. A utilização de modelos acoplados não é uma tarefa simples e requer profundo conhecimento, desde o gerenciamento do experimento, até a análise e interpretação dos dados gerados (JONES et al., 2017b, 2017a).

Devido a heterogeneidade envolvida em cada processo de simulação, é complexo, computacionalmente, considerar o desenvolvimento do ciclo de vida de um inseto e, em paralelo, o crescimento e desenvolvimento de uma cultura ou ainda, concomitante, a simulação das doenças transmitidas pelos insetos e que possam afetar essa cultura.

Dessa forma, esse trabalho objetivou: a) desenvolver uma arquitetura para a integração entre um modelo baseado em agentes e o que simula o crescimento e desenvolvimento de uma cultura e b) parametrizar os modelos para simular a densidade, a incidência e o dano causado pelo afídeo *R. padi* em plantas de trigo para condições de campo.

5.3 Material e Métodos

5.3.1 Dados meteorológicos

A execução das avaliações do modelo utilizou dados meteorológicos disponibilizados pela estação meteorológica da Embrapa Trigo de Passo Fundo, RS (28° 15' S, 52° 24' W e 684 m), integrada à rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esse banco de dados climatológico dispõe de leituras horárias realizadas nos 365 dias do ano de diversas variáveis ambientais.

5.3.2 Dados experimentais

A equipe do Laboratório de Entomologia da Embrapa Trigo realizou uma série de experimentos na área experimental 2, localizada no município de Coxilha – RS (28° 11' 42,8" S e 52° 19' 30,6" W, com altitude de 710 m), entre os anos de 2013 e 2017. Para a condução destas atividades foram instalados ensaios experimentais contendo quatro (2013 (T1, T2, T3 e T5)) e cinco (2014-2017 (T1, T2, T3, T4 e T5)) tratamentos em parcelas subdivididas com quatro repetições. As parcelas receberam os tratamentos, sistemas de manejo do complexo afídeos nanismo-amarelo com inseticidas, que consistiram em: T1: tratamento total (tratamento de sementes e aplicação de inseticida na parte aérea semanalmente); T2: apenas com tratamento de sementes; T3: apenas inseticida na parte aérea, ao atingir o nível de controle; T4: tratamento de sementes com a aplicação de inseticida na parte aérea, ao atingir o nível de controle; e T5: sem inseticida (controle). Os produtos utilizados para controle de pulgões constam nas Informações Técnicas para Cultura do Trigo (SILVA; BASSOI; FOLONI, 2017). As sete subparcelas continham os genótipos, linhagens e cultivares de trigo (*Triticum aestivum*). Os genótipos usados variam com o ano, incluindo sempre dois padrões, BRS Timbaúva (resistente a *R. padi* e tolerante ao BYDV-PAV) e Embrapa 16 (suscetível ao *R. padi* e intolerante ao BYDV-PAV). A subparcela era composta por 18 linhas espaçadas em 0,2 m e 4,5 m de comprimento. A área útil colhida variou entre os anos e o peso de grãos colhidos foi estimado para kg/ha.

Foram realizadas leituras semanais de pulgões (*R. padi*) em plantas para determinar o nível populacional, atingimento do nível de ação e estimativa da eficiência

do controle químico diretamente sobre as populações de afídeos. Semanalmente, foi realizada a da contagem de afídeos em plantas, avaliando-se ao acaso 30 (2013-2015) e 18 (2016-2017) plantas em cada subparcela (840 e 510 plantas por tratamento respectivamente). Também, ao final do ciclo da cultura foi feita a estimativa média da produtividade (kg/ha) entre as cultivares e os tratamentos, peso de mil sementes (Anexo II).

5.3.3 DSSAT/NWheat

DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) é uma suíte de modelos de simulação de culturas que tem sido utilizada por pesquisadores em todo mundo e que facilita a aplicação para diferentes finalidades (JONES et al., 2003). Dentre os diversos modelos de simulações que fazem parte dessa suíte, o modelo *NWheat* foi escolhido para simular o crescimento e desenvolvimento de trigo. Esse modelo foi desenvolvido para avaliar os impactos de várias estratégias de manejo agrônomico e decisões em sistemas de cultivo de trigo sob mudanças climáticas. Além disso, pode ser empregado para explorar os efeitos integrados da temperatura, concentrações atmosféricas de CO₂, água, nutrientes e práticas de manejo agrônomico em uma variedade de ambientes de cultivo de trigo (KASSIE et al., 2016).

Os parâmetros de entrada para execução do modelo compreendem dados de clima, aspectos da planta, dados de solo e manejo. Todos esses parâmetros são incluídos em arquivos textuais com extensões pré-definidas, evitando assim, a inclusão destes em arquivos de código fonte do modelo. A seguir, são descritos quais são as extensões desses arquivos bem como a funcionalidade de cada um:

- a) .WTH: responsável por armazenar informações sobre dados meteorológicos. Por exemplo, radiação solar, temperatura, precipitação pluvial;
- b) .SOIL: contém informações sobre dados de solo. Por exemplo, textura, profundidade, entre outros;

- c) .WHX: controla a execução, onde são descritos os tratamentos, identificação de arquivos utilizados e condições iniciais;
- d) .CUL: responsável por armazenar informações peculiares da cultivar utilizada na simulação, por exemplo, sensibilidade ao fotoperíodo, características fenológicas, área foliar, etc.;
- e) .ECO: contém os níveis de resposta da planta. Possui algumas particularidades que permite identificar e diferenciar tipos de cultivares;
- f) .CFG: possui as configurações de execução do modelo. Por exemplo, diretórios, programas, módulos;
- g) .SOM: os parâmetros para simulação da matéria orgânica são inseridos neste arquivo;
- h) .SPE: as características da espécie são inseridas nesse arquivo. Descreve a composição básica dos tecidos e processos da planta: fotossíntese, respiração, assimilação de nitrogênio, etc.

Por fim, os arquivos com extensão .OUT armazenam as informações de saída do modelo. Resultados das simulações, dados de rendimento, distribuição das folhas, área doente e senescente.

5.3.4 Interface de acoplamento

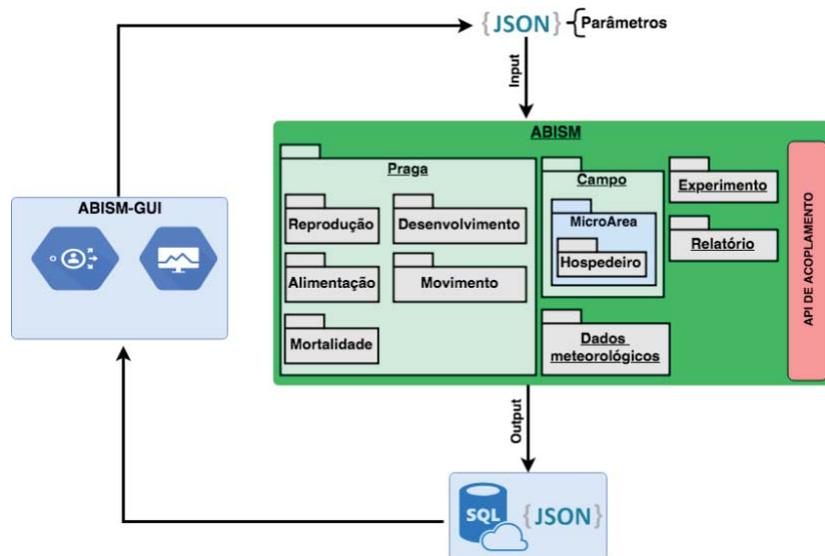
O modelo DSSAT/*NWheat* possui diversas sub-rotinas que são responsáveis por realizar cálculos de crescimento e desenvolvimento das culturas. Entre essas sub-rotinas está o módulo denominado PEST, no qual este é responsável por viabilizar pontos de acoplamento. Os pontos de acoplamento no módulo PEST que são associados a danos na planta são variáveis expressas de quatro maneiras: (1) taxa diária de dano absoluto, (2) taxa de dano observado, (3) taxa diária de dano, (4) taxa diária de dano absoluto com efeitos de competição da praga e preferência de comida. Alguns exemplos de pontos de acoplamento são índice de área foliar, caule, raiz e semente, número de sementes,

densidade de plantas, assimilados, índice de área foliar necrótico, número de vagens, nós vegetativos, etc. (BATCHELOR et al., 1993, 2000).

O grupo de pesquisa MOSAICO/UPF desenvolveu uma interface de acoplamento para o modelo DSSAT/*NWheat* que tem por objetivo integrar sistemas agropecuários vinculados dinamicamente e fornecendo uma estrutura consistente sob medida para simular múltiplos modelos. Esta interface utiliza o padrão de bibliotecas MPI e foi desenvolvida na linguagem Fortran e C++, que utiliza a estrutura de programação em módulos, o qual consiste em um conjunto de variáveis e sub-rotinas que podem ser importadas por outros programas e sub-rotinas (OLIVEIRA, 2018).

Assim, para realizar o gerenciamento dos recursos computacionais, da comunicação e da sincronização dos dados, desenvolveu-se uma API (*Application Programming Interface*) de acoplamento para o ABISM (Figura 1) utilizando o padrão de bibliotecas MPI. Essa interface foi desenvolvida em Java e utiliza uma estrutura de programação em classes (Apêndice II) onde estas consistem em um conjunto de métodos que podem ser importados por outras classes.

Figura 1 - Nova infraestrutura do framework ABISM com a API de acoplamento. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

Desta forma, foram adicionadas três configurações na parametrização inicial. A primeira trata do acoplamento (*coupling* (Figura 2A)) com modelos de planta (*plant*) ou

vírus (*virus*). A segunda, destina-se a configuração de dano (*damage* (Figura 2B)) que o afídeo virtual irá causar através da sucção (*suck*) de assimilados na planta e a última, refere-se a taxa de emigração do sistema, ou seja, quando o acúmulo de afídeos ultrapassar a capacidade de suporte da planta (índice de área foliar) (Figura 2).

Figura 2 - Novo exemplo de um arquivo JSON contendo a parametrização inicial do ABISM. Passo Fundo - RS, 2019

```

11  "thermalRegime": {
12    "regime": "VarAPI",
13    "minTR": 0,
14    "maxTR": 0,
15    "weatherStation": "Passo Fundo"
16  },
17  "microArea": {
18    "idMicro": "MicroArea1",
19    "crop": "Wheat",
20    "growCrops": "Embrapa16",
21    "nRows": 5,
22    "nPlantsRow": 60,
23    "screened": "false",
24    "amountAphidsArea": 1
25  },
26  "developmentThresholds": {
27    "nymphIndex": 1.1,
28    "adultIndex": 1.1,
29    "deadIndex": 2.6,
30    "preReproIndex": 1.1,
31    "reproIndex": 1.16,
32    "posReproIndex": 2.3
33  },
34  "initialPest": {
35    "initialPlant": 150,
36    "initialMicroArea": "MicroArea1",
37    "initialPhase": "Adult",
38    "initialShape": "Apterae",
39    "initialStageDev": "PreRepro",
40    "initialAccumulatedTemp": 1.1,
41    "initialDaysAlive": 5
42  },
43  "coupling": {
44    "plant": "true",
45    "virus": "false"
46  },
47  "damage": {
48    "suck": 0.0004
49  },
50  "emigration": {
51    "emigrationIndex": 0.02
52  },
53  "mortality": {
54    "rainfallIndex": 10,
55    "lowTemperature": 3
56  }
57 }
58 █

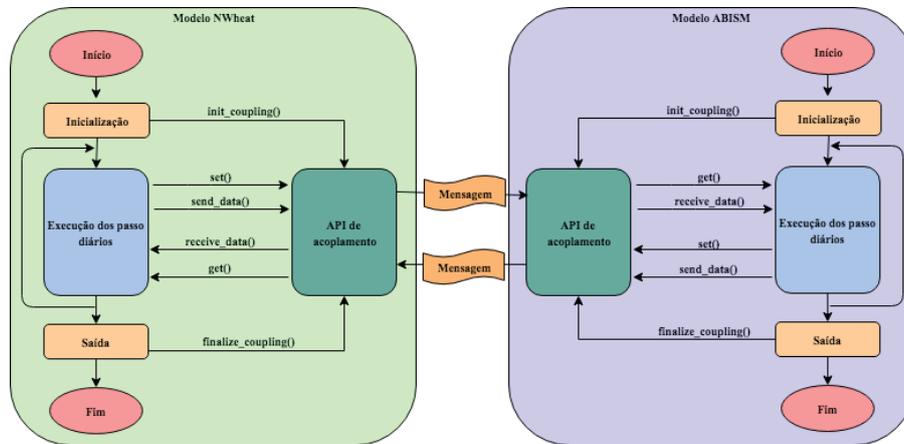
```



Fonte: Dados do autor.

O fluxo e controle, implementados por ambos os modelos, é independente (Figura 3). Para tanto, a troca de dados no processo de interação entre os modelos é realizada utilizando um padrão de mensagens para a inicializar/finalizar as configurações do ambiente, formatar os dados para envio/recebimento e enviá-los através da interface de acoplamento.

Figura 3 - Representação diagramática dos modelos (DSSAT/NWheat e ABISM) e funções para inicialização, execução dos passos diários, comunicação com a interface de acoplamento e saída. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

No início do processamento o modelo DSSAT/*NWheat* e ABISM realizam seus registros de inicialização (*init_coupling*) junto à interface de acoplamento, enviando uma mensagem específica e armazenando seus identificadores únicos. Posteriormente, o modelo da cultura executa seu passo e armazena os dados que serão enviados utilizando a função *set()*. Apenas valores inteiros, pontos flutuante e caracteres podem ser armazenados. Após, ocorre a transferência dos dados para o modelo acoplado com a chamada da função *send_data()*, realizando a serialização e transferência dos dados. No momento em que os dados são recebidos pela função *receive_data()* do ABISM ocorre a desserialização e armazenamento dos dados através da função *get()*. Em seguida, o modelo acoplado faz uso dos dados para afetar seus pontos de acoplamento e ao chegar no final da execução diária passa a vez para o modelo de praga para a execução de suas tarefas. Assim, ambos devem trocar mensagens até que finalize o processamento. Ao final, cada modelo finaliza sua conexão através da função *finalize_coupling()* enviando uma mensagem específica à interface de acoplamento.

5.3.5 Procedimentos

Para fins de parametrização e validação dos dados simulados, neste trabalho foram utilizados dados das safras de trigo dos anos 2013-2017 da área experimental 2 da Embrapa Trigo (Anexo II). Utilizou-se o tratamento total (T1) com aplicação semanal de inseticidas para estimar o potencial produtivo do ano e o tratamento sem aplicação de

inseticidas (T5) para estimar os danos causados pelos afídeos em cada ano. Ainda, foram considerados os parâmetros biológicos do afídeo *R. padi* sobre a cultivar de trigo Embrapa 16 (definidas nos capítulos anteriores).

Devido a variação no formato e dimensões das subparcelas, foi necessário converter os dados observados para representar os resultados referente a 1 (um) metro quadrado (Anexo II). Para representar as leituras de afídeos em planta (m^2) foi realizada uma razão entre a população total semanal observada e o total de plantas de cada tratamento. Da mesma forma, para representar a incidência em plantas (m^2) realizou-se uma razão entre o número de plantas observadas com afídeos e o total de plantas de cada tratamento. Para ambos os casos, multiplicou-se o resultado dessas razões pelo total de plantas da “MicroArea”.

No modelo ABISM, o módulo “Campo” foi parametrizado para ter apenas uma “MicroArea”. No módulo "MicroArea" desativou-se a proteção da área (*screened*), ou seja, foi permitida a imigração e emigração de insetos, mortalidade por predação, parasitismo e precipitação pluviométrica. O parâmetro que define a quantidade de pragas virtuais que inicializarão o sistema (*amountOfStartingPests*) foi definido em 1 (um). Além disso, esse módulo foi parametrizado para ter cinco linhas de plantas, 60 plantas/linha, ou seja, 300 plantas por “MicroArea”.

No submódulo “Movimento” configurou-se a movimentação por emigração (*emigration* (Figura 2C)), ou seja, os afídeos migram quando o acúmulo de afídeos ultrapassar a capacidade de suporte da planta (*amountAphidsArea*). Este parâmetro é definido através da variável AREALF (área foliar (um lado) por área de solo (cm^2 [folha]/ m^2 [solo]) recebida a passo diário, através da interface de acoplamento do modelo DSSAT/NWheat. Foi definido que a emigração somente irá ocorrer quando o acúmulo de afídeos ultrapassar um pulgão/ cm^2 (*amountAphidsArea*). A quantidade de pulgões que migrarão foi definida em uma taxa fixa de 2% (*emigrationIndex*) (PARRY; EVANS; MORGAN, 2006; PARRY; EVANS, 2008).

No submódulo “Alimentação”, parametrizou-se o efeito do pulgão na produtividade do trigo (*damage* (Figura 2B)). Considerou-se o aparelho bucal sugador, agindo de forma direta, pela sucção da seiva. Diariamente, o modelo DSSAT/NWheat

envia, através da interface de acoplamento, a variável TPSR (dano diário de assimilado absoluto (g [CH₂O]/m²/d) que será afetada pelo pulgão virtual. Configurou-se o dano causado (*suck*) em 0,0004 g [CH₂O]/m²/dia por afídeo (CHANDER et al., 2006).

No submódulo “Mortalidade” parametrizou-se, além da mortalidade por idade e temperaturas baixas (capítulo 1, sessão 3.4.1), a mortalidade por predação, parasitismo e precipitação pluviométrica. Na ausência de modelos para definir essas características, ajustou-se empiricamente funções lineares trapezoidais (predação [Equação 1 e 2] e parasitismo [Equação 3 e 4]) e exponenciais (precipitação pluviométrica [Equação 5]) para a probabilidade de ocorrência dessas mortes em um dia.

$$MORTPREDA = \frac{-18.75 + 1.875 * temp}{100} \quad (1)$$

$$MORTPREDA = \frac{63.75 + (-1.875) * temp}{100} \quad (2)$$

$$MORTPARAS = \frac{-10 + 1.111 * temp}{100} \quad (3)$$

$$MORTPARAS = \frac{34 + (-1) * temp}{100} \quad (4)$$

Onde *temp* representa a temperatura média (°C) diária. No caso da predação, se o sistema registrar temperatura inferior a 18 °C aplica-se a Equação 1, se o sistema registrar temperatura superior a 26 °C emprega-se a Equação 2, caso contrário a probabilidade será 0,15. No caso do parasitismo, se o sistema registrar temperatura média diária inferior a 18 °C utiliza-se a Equação 3, se a temperatura for excedente a 24 °C adota-se a Equação 4, senão a probabilidade será 0,1.

Quanto a mortalidade por precipitação pluviométrica determinou-se que as mortes por precipitação irão iniciar quando esta for superior a 10 mm ao dia. O parâmetro *rain* no modelo representa a quantidade em milímetros (mm) de precipitação diária. O modelo considera que quanto maior a precipitação, maior a taxa de mortalidade por esse motivo [Equação 5].

$$MORTPREC = 0,089760 * (\exp(0.023875 * rain)) \quad (5)$$

Os demais módulos e submódulos do ABISM foram parametrizados conforme descrito na seção 3.3 e 3.4.1 do Capítulo 1 deste trabalho.

A parametrização do DSSAT/NWheat foi realizada através da criação de um arquivo de configuração (.WHX) para cada ano das simulações. Os parâmetros inseridos em cada arquivo foram modificados contendo diferentes tratamentos para avaliar a performance da interface de acoplamento. Além disso, foi habilitado o parâmetro da variável DISES que compreende o módulo PEST. O primeiro tratamento denominado “*NWH_ABM (with damage)*” simula o crescimento e desenvolvimento de trigo com acoplamento ao ABISM através da parametrização “*D*”. A partir disso, é possível a troca de informações entre ambos modelos utilizando a interface de acoplamento. O segundo tratamento chama-se “*NWH_ABM (normal)*” que simula o crescimento e desenvolvimento de trigo, para este tratamento utilizou-se o parâmetro “*N*” desabilitando assim o módulo PEST com o objetivo de não ocorrer perdas por danos causados por pragas na cultura (Figura 4).

Figura 4 - Exemplo do arquivo de configuração (.WHX) contendo os tratamentos para as simulações com e sem acoplamento através do controle com a variável DISES. Passo Fundo - RS, 2019

```
*TREATMENTS -----FACTOR LEVELS-----
@N R O C TNAME..... CU FL SA IC MP MI MF MR MC MT ME MH SM
1 1 1 0 NWH_ABM (with damage) 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1 1
2 1 1 0 NWH_ABM (normal) 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1 2

*SIMULATION CONTROLS
@N GENERAL NYERS NREPS START SDATE RSEED SNAME..... SMODEL
1 GE 1 1 S 14189 2150 DEFAULT SIMULATION CONTR WHAPS
@N OPTIONS WATER NITRO SYMBI PHOSP POTAS DISES CHEM TILL CO2
1 OP Y Y N N N D N N M

*SIMULATION CONTROLS
@N GENERAL NYERS NREPS START SDATE RSEED SNAME..... SMODEL
2 GE 1 1 S 14189 2150 DEFAULT SIMULATION CONTR WHAPS
@N OPTIONS WATER NITRO SYMBI PHOSP POTAS DISES CHEM TILL CO2
2 OP Y Y N N N N N N M
```

Fonte: Dados do autor.

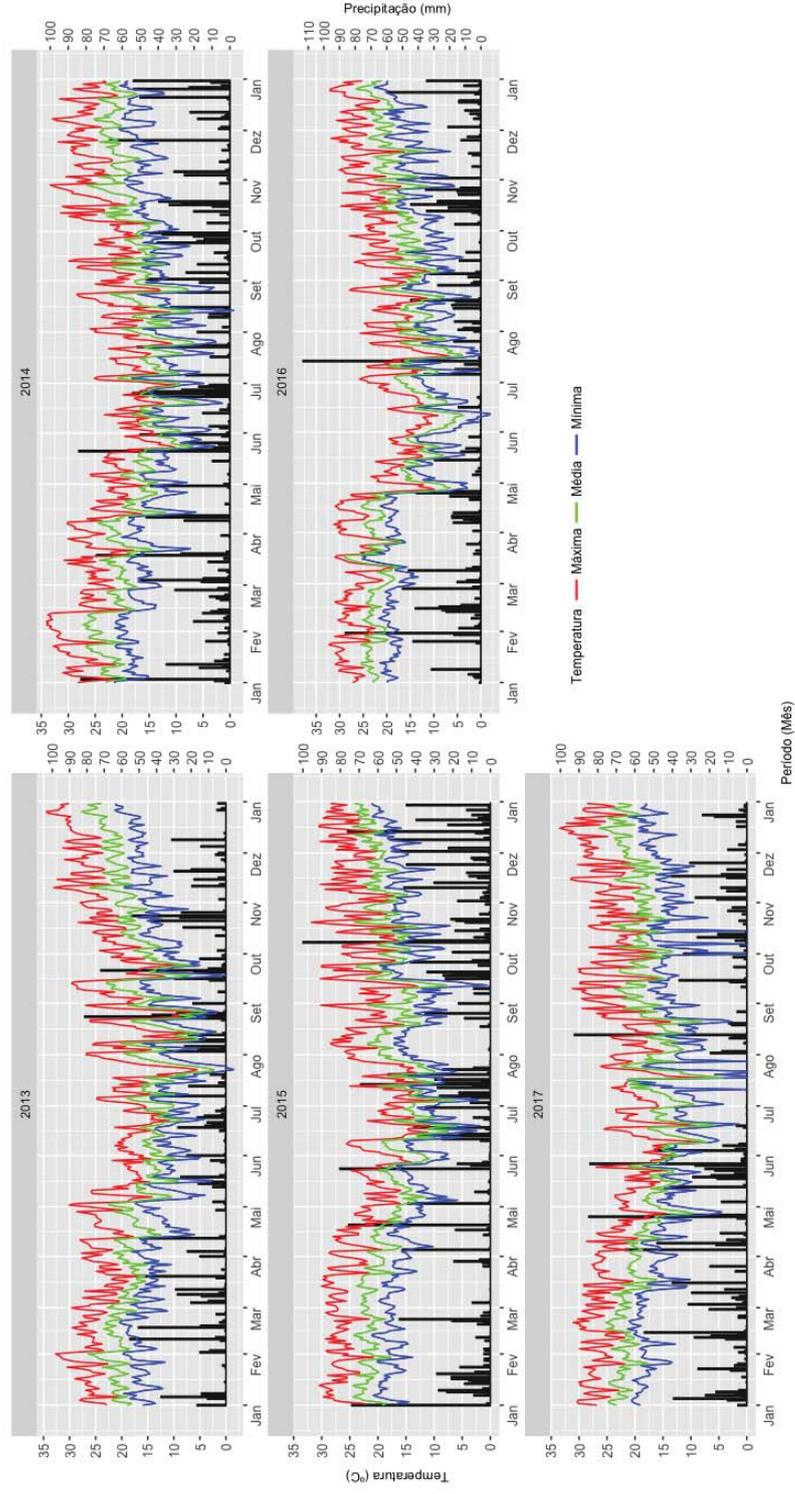
5.3.6 Análise estatística

Para calcular a precisão dos resultados estimados pelo ABISM em relação aos resultados observados nos experimentos, foram utilizadas três medidas de erro: *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Squared Error* (MSE) e *Root Mean Squared Error* (RMSE) (CHAI; DRAXLER, 2014). As análises foram realizadas no ambiente para estatística computacional R (TEAM R, 2016), utilizando o pacote QualV (JACHNER; BOOGAART, 2007).

5.4 Resultados

As condições meteorológicas foram muito distintas nos quatro anos sob análise. No período de duração do experimento de 2013, a menor temperatura registrada foi negativa (-1,5 °C), a média ficou abaixo de 15 °C, a maior temperatura assinalada foi 33 °C e também se registrou elevada precipitação pluviométrica (802,6 mm). Em 2014, a menor temperatura registrada foi negativa (-0,7 °C), a média ficou acima de 15 °C, a maior temperatura assinalada foi 33,4 °C e as precipitações (639 mm) não foram intensas até a segunda semana de setembro. Em 2015, a menor temperatura registrada foi 0,6 °C, a média ficou acima de 15 °C, a maior temperatura assinalada foi 31,9 °C e as precipitações (639,4 mm) foram intensas até o final da primeira quinzena de outubro. Em 2016, a menor temperatura registrada foi negativa (-0,1 °C), a média ficou em 15 °C, a maior temperatura assinalada foi 30,1 °C e houve elevada precipitações no experimento (711,2 mm). Por fim, em 2017 a menor temperatura registrada foi 0 °C, a média ficou acima de 18 °C, a maior temperatura assinalada foi 31,2 °C e houve elevada precipitações (389,8 mm) (Figura 5). As variações das condições meteorológicas resultaram em diferenças no desenvolvimento do hospedeiro e seu potencial produtivo, assim como no desenvolvimento das populações de afídeos e dos danos de decorrentes.

Figura 5 - Dados climáticos observados de temperatura (mínima, máxima e média) (°C) e precipitação pluviométrica (mm) para os experimentos realizados a campo. Passo Fundo - RS, 2013-2017



Fonte: Estação meteorológica INMET.

5.4.1 Densidade populacional

A densidade populacional variou a cada ano. Os anos de maiores populações de afídeos acumulados em plantas (m^2) foram 2016 e 2017. Entretanto, 2013 e 2016 apresentaram as maiores populações acumuladas simuladas (Tabela 1).

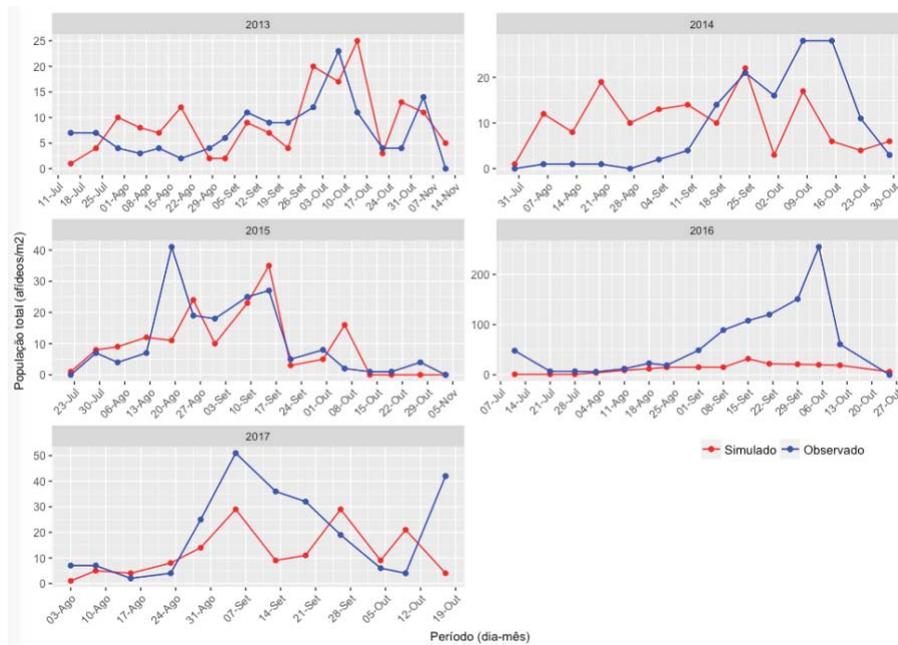
Tabela 1 - População acumulada em plantas (m^2) e simulada ao final de cada experimento. Coxilha - RS, 2013-2017

Ano	População acumulada	
	Observado	Simulado
2013	134	160
2014	130	145
2015	169	157
2016	955	193
2017	235	144

Fonte: Dados do autor.

Para os experimentos simulados em 2013 e 2015 a flutuação sazonal da população se manteve próxima do observado. Em 2014, a população total de afídeos entre os meses de agosto e setembro apresentou uma diferença significativa entre o observado e simulado, onde ABISM superestimou a população. Entretanto, em 2016 e 2017 essa diferença expressou-se entre os meses de setembro e outubro, porém o modelo subestimou os resultados (Figura 6).

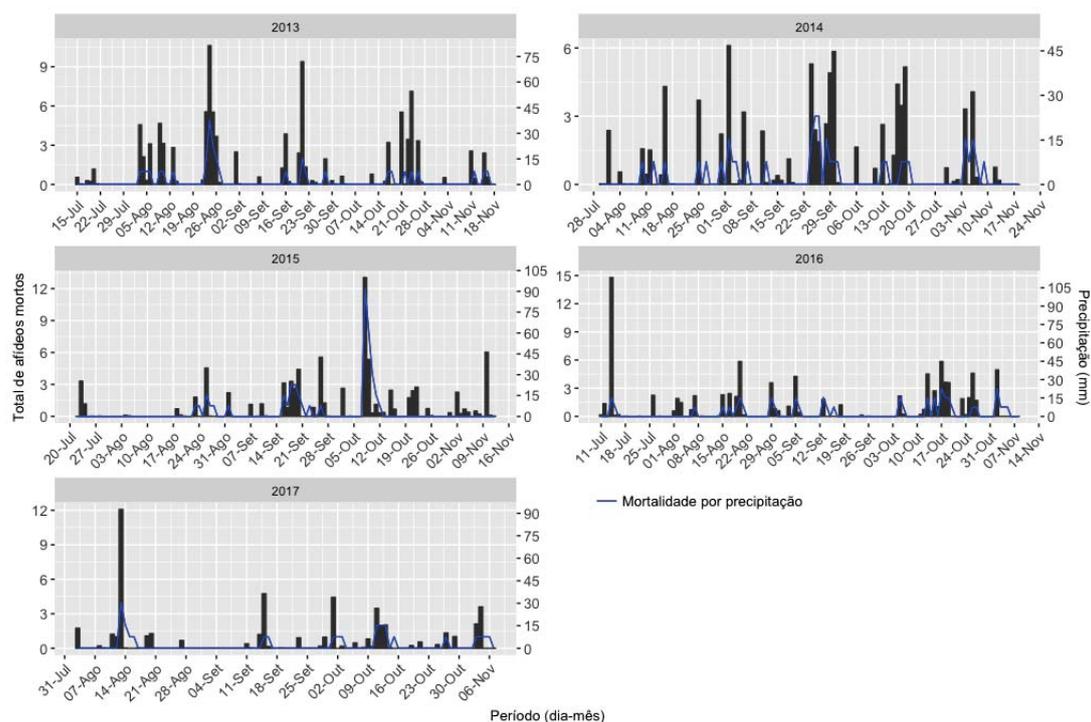
Figura 6 - População média de afídeos/m² de *R. padi* (Observado vs. Simulado) para os experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017



Fonte: Dados do autor.

Além da temperatura determinar a densidade populacional, a precipitação pluviométrica também reduz a população dos afídeos nos períodos de maior precipitação. Essa variação demonstra como a parametrização definida resulta na mortalidade decorrente da chuva (Tabela 3). Durante o período do experimento de 2013, registrou-se elevada precipitação pluviométrica na última quinzena dos meses de agosto, setembro e outubro. Em 2014, as precipitações foram acima de 30 mm semanalmente a partir do final de agosto até outubro, já em 2015 não foram intensas até o final da primeira quinzena de outubro. Por fim, em 2016 e 2017 houve elevada precipitações na primeira quinzena do experimento (113,4 e 92,6 mm) (Figura 7).

Figura 7 - Predição de mortalidade diária de afídeos *R. padi* em função da precipitação pluviométrica (mm) pelo modelo ABISM para os experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017



Fonte: Dados do autor.

Tabela 2 - Número de afídeos *R. padi* mortos acumulados e percentual em relação à população total em função da precipitação pluviométrica (mm) estimado pelo modelo ABISM para os experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017

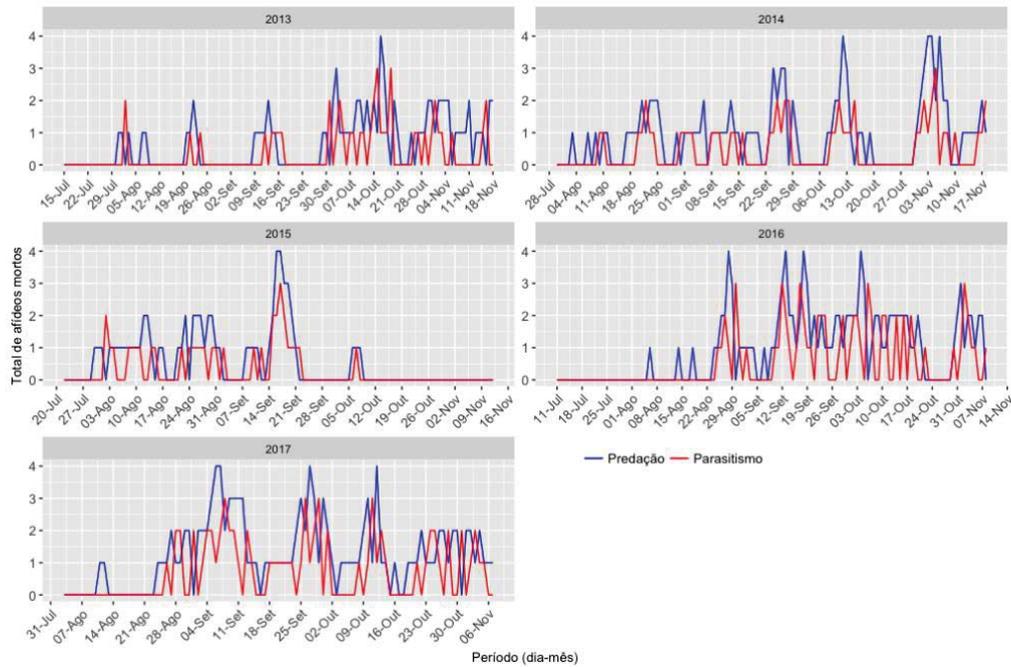
Ano	Mortalidade acumulada	% em relação à população total
2013	33	3%
2014	37	3%
2015	48	5%
2016	43	3%
2017	25	2%

Fonte: Dados do autor.

Outros fatores que determinaram a mortalidade foram o parasitismo e a predação. Nestes casos, e conforme parametrizado no modelo, à medida em que houve variação na temperatura a taxa de mortalidade também variou (Figura 8) afetando assim a população de afídeos (Tabela 3). O ABISM em suas simulações não registrou emigração do sistema

e mortalidade por temperatura baixa (Natural). Entretanto, para os experimentos um (1) (2013), três (3) (2014) e quatro (4) (2015) o modelo registrou uma morte por idade (tempo de desenvolvimento) (Apêndice IV).

Figura 8 - Predição da mortalidade diária de afídeos *R. padi* por predação e parasitismo pelo modelo ABISM para os experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017



Fonte: Dados do autor.

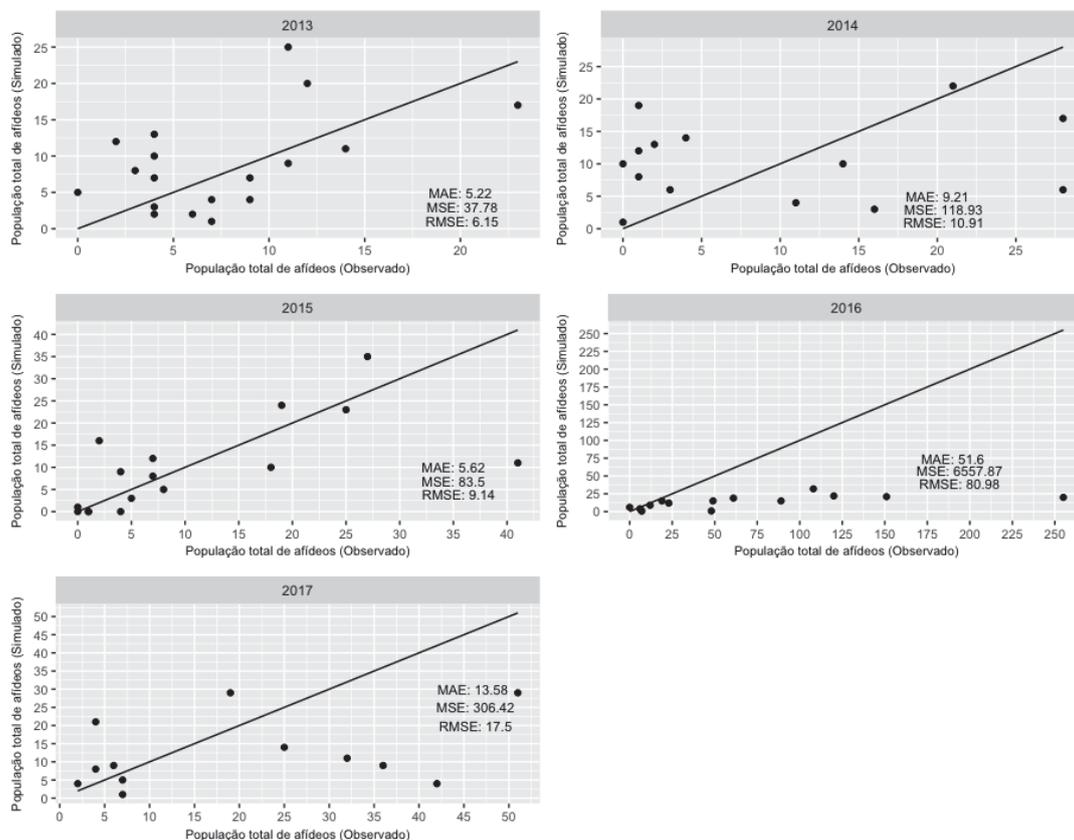
Tabela 3 - Número de afídeos *R. padi* mortos acumulados e percentual em relação à população total em função da predação e parasitismo estimado pelo modelo ABISM para os experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017

Ano	Mortalidade acumulada			
	Parasitismo	% em relação à população total	Predação	% em relação à população total
2013	43	4%	82	7%
2014	53	4%	104	8%
2015	35	4%	63	6%
2016	68	4%	116	7%
2017	69	6%	120	10%

Fonte: Dados do autor.

Além do razoável ajuste na simulação para a população total semanal de afídeos *R. padi*, a densidade populacional (número de afídeos por unidade de área em um dado momento) também foi aproximadamente simulada. Os experimentos realizados em 2013 e 2015 foram os que apresentaram o melhor ajuste e o menor desvio em relação aos demais anos. O experimento realizado em 2014 apresentou um ajuste razoável. No entanto, os experimentos realizados em 2016 e 2017 foram o que apresentaram o pior ajuste (Figura 9).

Figura 9 - Dados observados e simulados da população total semanal de afídeos *R. padi* e medidas de erro para os experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017



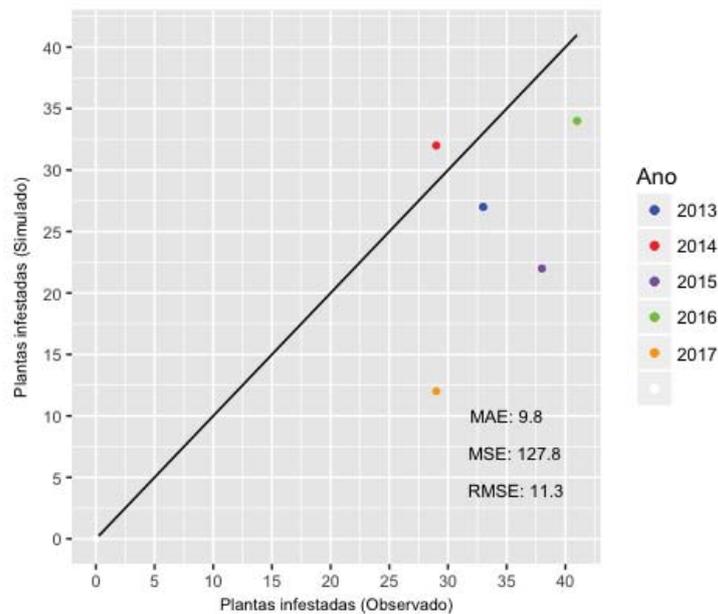
Fonte: Dados do autor.

5.4.2 Incidência

Considerando o número de plantas infestadas com afídeos, um comparativo foi traçado entre os dados observados e os dados simulados na data em que pela primeira vez a população nas subparcelas sem inseticidas (T5) atingiu o nível de ação ou controle, ou

seja, 10% das plantas infestadas com afídeos (SILVA; BASSOI; FOLONI, 2017). Cada ponto na figura representa o desvio entre os dados observados e os dados estimados para uma das medições. Para o ano de 2013, foi obtida a melhor estimativa de incidência de plantas com pulgões e o ano de 2017 apresentou o maior desvio (Figura 10).

Figura 10 - Dados observados e simulados do número de plantas infestadas e medidas de erro para os experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017

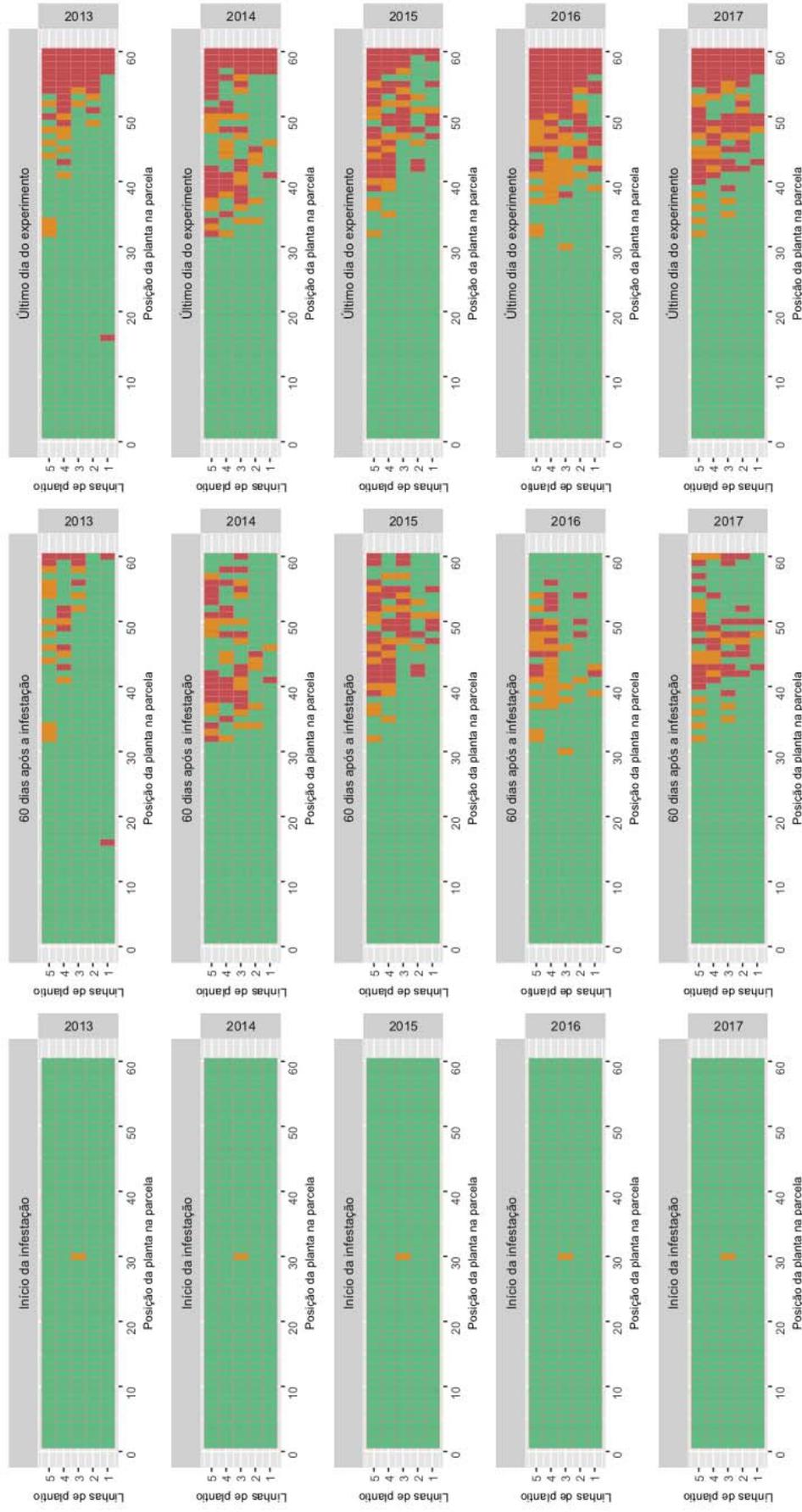


Fonte: Dados do autor.

A distribuição espaço-temporal da incidência de afídeos *R. padi* se mostrou um evento que desempenha um papel significativo na evolução dos indivíduos. A distribuição das plantas foi realizada conforme parâmetros definidos na “MicroArea” (5 linhas de plantio x 60 plantas por linha). No início da infestação, a planta assinalada em laranja representa a primeira planta a receber o afídeo inicial. Após 60 dias da infestação, em 2013, 5,6% das plantas continham apenas um afídeo (laranja) e 4,3% continham mais de um pulgão (vermelho) e ao final do experimento, 5,3% das plantas continham apenas um afídeo e 13% continham mais de um pulgão. Em 2014, após 60 dias da infestação, 8% das plantas continham apenas um afídeo e 11% continham mais de um pulgão e ao final do experimento, 8,3% das plantas continham apenas um afídeo e 16% continham mais de um pulgão. Em 2015, após 60 dias da infestação, 8% das plantas continham apenas um afídeo e 12,3% continham mais de um pulgão e ao final do experimento, 7,6% das plantas continham apenas um afídeo e 15,6% continham mais de um pulgão. Em 2016, após 60

dias da infestação, 9,3% das plantas continham apenas um afídeo e 5,3% continham mais de um pulgão e ao final do experimento, 11,6% das plantas continham apenas um afídeo e 20,3% continham mais de um pulgão. E em 2017, após 60 dias da infestação, 6,3% das plantas continham apenas um afídeo e 11,3% continham mais de um pulgão e ao final do experimento, 7,7% das plantas continham apenas um afídeo e 19,2% continham mais de um pulgão (Figura 11).

Figura 11 - Evolução espaço-temporal da incidência de afídeos (zero indivíduos (verde), um indivíduo (laranja) e mais de um indivíduo (vermelho)) em plantas para os experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017

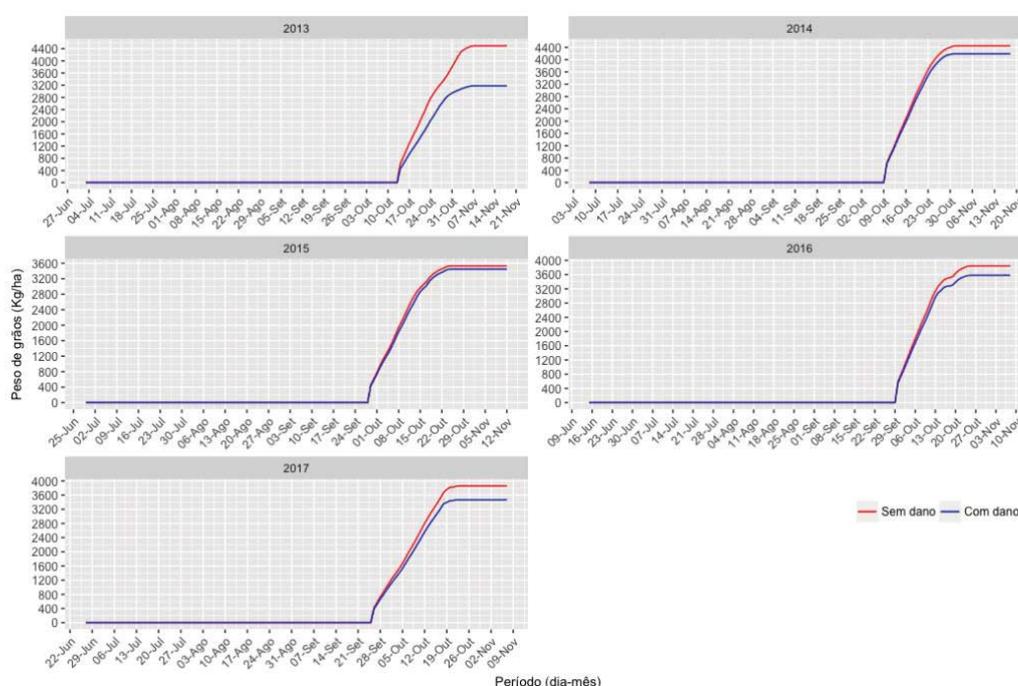


Fonte: Dados do autor.

5.4.3 Dano direto

Neste experimento, o modelo DSSAT/NWheat foi executado com acoplamento desativado (sem dano) e ativado (com dano). Com o acoplamento ativado, o dano por sucção de seiva estimado sobre peso de grãos (Kg/ha) variou ano a ano. Para 2013 a diferença do peso de grãos final foi de 41,3%. Na safra de 2014, foi de 6,2%. Em 2015 e 2017 a diferença foi de 2,4% na produção de grãos. Em 2016, a diferença foi de 7,4% e na safra de 2017 essa diferença foi de 11,3% (Figura 12).

Figura 12 - Dados simulados, com e sem dano, do peso de grãos (Kg/ha) para os experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017



Fonte: Dados do autor.

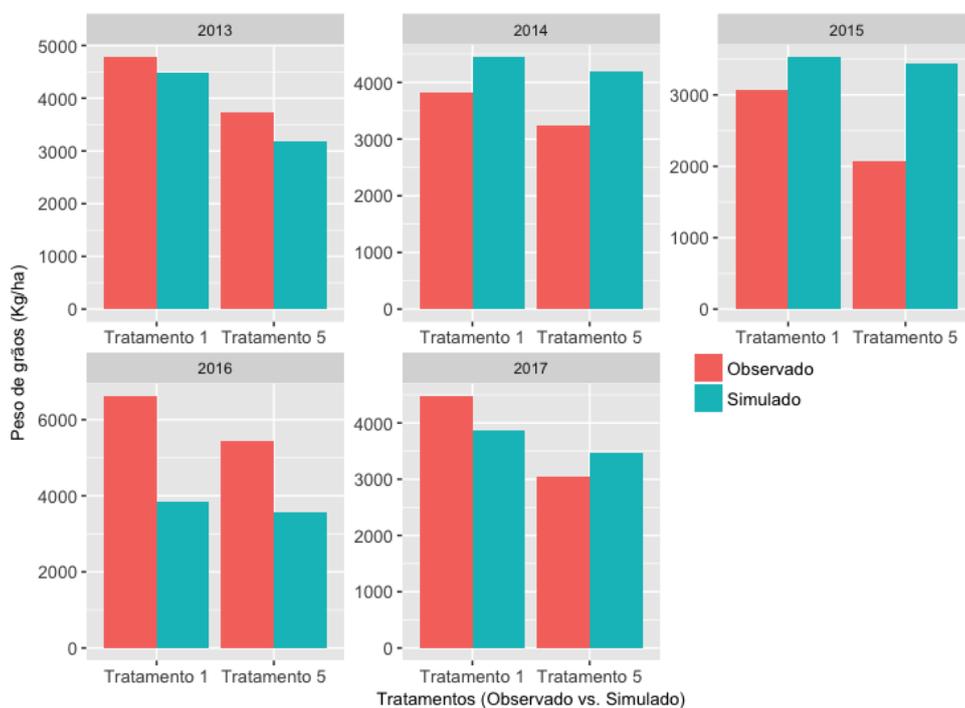
Considerando o dano direto causado pelos afídeos nas plantas de trigo, um comparativo foi traçado entre os dados observados e os dados estimados pelo DSSAT/NWheat referente ao peso de grãos (Kg/ha) total final. Para isso, comparou-se os dados obtidos no Tratamento 1 (um) com os dados simulados sem acoplamento (sem dano) e os do Tratamento 5 (cinco) com os resultados da simulação com acoplamento (com dano). Para 2013 e 2016, o simulador subestimou o peso de grãos em ambos os casos (Tratamento 1 e 5). O simulador superestimou os resultados nos anos de 2014 e

2015 e para a safra de 2017 o DSSAT/NWheat subestimou o Tratamento 1 e superestimou o Tratamento 5 (Figura 13).

Com acoplamento desativado, para a safra de 2013 a diferença do peso de grãos final entre observado versus simulado foi de -6%. Na safra de 2014, foi de 16,4%. Em 2015 a diferença foi de 15,2% na produção de grãos. Em 2016, a diferença foi de -42,4% e na safra de 2017 essa diferença foi de -13,9% (Figura 13).

Com o acoplamento ativado, o dano por sucção de seiva estimado sobre o peso de grãos (Kg/ha) variou ano a ano. Para 2013 a diferença do peso de grãos final entre observado versus simulado foi de -14,8%. Na safra de 2014, foi de 29,2%. Em 2015 e diferença foi de 65,7% na produção de grãos. Em 2016, a diferença foi de -34% e na safra de 2017 essa diferença foi de 13,6% (Figura 13).

Figura 13 - Dados observados e simulados (com e sem dano) do peso de grãos (Kg/ha) para os Tratamentos 1 (um) e 5 (cinco) referente aos experimentos realizados a campo. Coxilha - RS, 2013-2017



Fonte: Dados do autor.

5.5 Discussão

A simulação da densidade, incidência e dano causado pelo afídeo *R. padi* em plantas de trigo vem sendo objeto de vários estudos. Os modelos de simulação são ferramentas que podem auxiliar na compreensão da dinâmica dessas pragas em cultivos de trigo. Através do acoplamento de modelos realizado neste trabalho foi possível simular a densidade populacional (afídeo/m²), a quantidade de plantas infestadas (% de plantas com pulgões) como também estimar o efeito do dano direto causado pelo pulgão nas plantas.

O método utilizado para o acoplamento entre o DSSAT/NWheat e o ABISM propiciou a integração entre dois modelos de simulação heterogêneos quanto às suas tecnologias, sem a necessidade de alterações significativas em suas implementações originais. A utilização da MPI como agente de comunicação entre os modelos e do desenvolvimento de uma interface padronizada propiciaram esse êxito. Entretanto, destaca-se a necessidade de utilização de funções matemáticas para simular a interação do patossistema vetor/vírus/hospedeiro, pois os parâmetros utilizados foram para o dano direto no hospedeiro (sem vírus). Assim, o modelo na forma utilizada precisa de melhores ajustes e serve apenas para o domínio da pesquisa e acadêmico.

Em alternativa para determinar o dano causado pelos afídeos através da introdução do vírus no hospedeiro seria a utilização de uma regra simples (empírica) em definir uma probabilidade de infecção em função da população de afídeos e definir uma curva de dano em função do momento que a planta foi infectada. O potencial de dano de B/CYDVs à produção de trigo resulta da interação entre o nível de tolerância/resistência das cultivares e a incidência da doença. Essa última sob a forte influência de condições meteorológicas sobre as populações de afídeos vetores. Estima-se que a atual redução do potencial prático (potencial atingível considerando a genética e ferramentas de manejo disponíveis) seja ao redor de 20% (PEREIRA; LAU; MARSARO JÚNIOR, 2016). A análise do grupo de cultivares de trigo atualmente empregadas indica que o dano potencial médio varia entre 40% e 50%, se as plantas forem infectadas em início de ciclo (LAU et al., 2017).

A parametrização inicial do ABISM foi baseada nas configurações utilizadas no Capítulo 2. Ainda assim, parametrizou-se novamente os módulos de mortalidade,

alimentação e movimentação. A mortalidade por chuva, predação e parasitismo são relevantes e podem ter impacto significativo na densidade populacional (ARAYA; FERERES, 1991; DEAN; WILDING, 1971). O efeito da alimentação direta na planta pode ser definido como processo fisiológico. Diferentes tipos de mecanismos de dano podem ser definidos, tais como: redução da germinação; roubo de luz e redução de assimilados. A taxa diária de assimilação de sucção depende da taxa de sucção por inseto por dia e a população de pulgões por unidade de área (m^2) (CHANDER et al., 2006). A movimentação também afeta as taxas de crescimento populacional. À medida que a população aumenta, a capacidade de suporte do hospedeiro diminui. A pressão da população de insetos nas plantas hospedeiras também faz com que os pulgões se movimentem (PARRY; EVANS; MORGAN, 2006; PARRY; EVANS, 2008). Entretanto, devido a dificuldade de definir modelos que representem as características de mortalidade, alimentação e movimentação foram ajustados modelos empiricamente para dar suporte às simulações.

Com relação a densidade populacional, o ABISM simulou adequadamente os anos de 2013 e 2015 (Figura 6). Na safra de 2014, o modelo superestimou a população simulada em relação a observada entre agosto e setembro. As populações de afídeos geralmente apresentam flutuações temporais e essa variação é causada por fatores bióticos e abióticos (BRABEC et al., 2014; REBONATTO; SALVADORI; LAU, 2015). Condições meteorológicas são consideradas as principais variáveis que afetam a dinâmica das populações de afídeos (WALKER; NAULT; SIMONET, 1984). Altos níveis de precipitação limitam as populações de pulgões a baixas densidades (DIXON, 1977; GASSEN, 1984; KAAKEH; DUTCHER, 1993; LESLIE et al., 2009). Analisando a precipitação ocorrida, entre junho e julho, houve um acúmulo de 381,4 mm (Figura 5). Isto sugere que tais condições de precipitação foram desfavoráveis às populações de afídeos observadas, ou pelo menos as limitaram.

Ainda sobre a densidade populacional, na safra de 2016 e 2017, ABISM subestimou a população de afídeos. Presume-se que a mortalidade por precipitação tenha afetado drasticamente os resultados simulados (Figura 7) devido a parametrização em 10 mm como fator para início da taxa de mortalidade. Analisando a precipitação acumulada por dia, entre setembro e primeira quinzena de outubro de 2016, observa-se que na maioria dos dias (90%) a precipitação estava abaixo de 10 mm. Para o mesmo período de

2017 a precipitação ficou abaixo desse fator em 95% dos dias. Rebonatto, Salvadori e Lau (2015) relatam que as populações de afídeos foram predominantemente encontradas quando a precipitação permaneceu entre 0-20 mm.

A utilização de taxas fixas para a predação, parasitismo e precipitação requererem melhores ajustes. As taxas fixas podem ter colaborado para aumentar os desvios nos resultados das simulações, uma vez que principalmente esses fatores de mortalidade não obedecem a taxas fixas nos ecossistemas reais. Nesse sentido, para uma correta calibração de ABISM será necessário fazer uma série de experimentos em camadas para averiguar passo a passo a precisão do modelo, por exemplo, a) sistema somente sob efeito da temperatura; b) sistema sob efeito da temperatura e precipitação; c) sistema sob efeito da temperatura e parasitismo; d) sistema sob efeito da temperatura, predação e parasitismo e e) sistema totalmente aberto com efeito de todos os fatores. Ou ainda, a utilização de outras metodologias, por exemplo, que levam em conta o número de presas em relação ao número de predadores precisam de estudos mais elaborados (VOLTERRA, 1926). Mesmo assim, o fato deste trabalho considerar efeitos de parasitismo, predação e ação da precipitação sobre a mortalidade de *R. padi* consiste um avanço em relação aos trabalhos de Morgan (2000), Parry, Evans e Morgan (2006) e Toebe (2014).

Considerando a aplicabilidade do ABISM como sistema de suporte para tomada de decisão para manejo de afídeos e considerando que os critério de tomada de decisão são baseados na distribuição dos afídeos na lavoura (% de plantas com afídeos) (SILVA; BASSOI; FOLONI, 2017), a validação da capacidade do ABISM de prever a distribuição dos afídeos em campo demonstrou-se satisfatória para os anos de 2013, 2014 e 2016 (Figura 10 e 11). Apesar disso, outro ponto que precisa ser enfatizado é que os parâmetros das funções matemáticas foram, principalmente para o dano direto no hospedeiro, determinados empiricamente, sem levar em consideração o efeito do vírus sobre a planta. Ainda que os agentes virais B/CYDVs apresentam efeito significativo sobre a produtividade de grãos (AGHNOUM et al., 2017; CATHERALL, 1966; ZHOU et al., 2015), neste trabalho não foram considerados afídeos virulíferos. Assim, essa característica pode ter influenciado os resultados de incidência e peso de grãos (Figura 12 e 13).

Uma alternativa para estimar a taxa diária do número de pulgões infecciosos seria através da coleta de dados de armadilhas de sucção de insetos (MORGAN, 2000). A relação histórica entre as capturas de pulgões no outono/inverno em armadilhas de sucção e a incidência de vírus no verão seguinte também seria uma possibilidade para inferir o provável risco de B/CYDV (TEULON; STUFKENS; FLETCHER, 2004). Um outra opção seria relacionar fatores climáticos, número de afídeos migrantes, propagação de B/CYDV entre plantas dentro de uma cultura de trigo e o efeito subsequente no rendimento da safra (THACKRAY; DIGGLE; JONES, 2009).

Sob outra perspectiva, a utilização de simulação em escala de paisagem seria uma outra alternativa para melhor entender a dinâmica populacional de *R. padi* (Figura 11). Esse tipo de simulação tem por objetivo identificar os fatores que influenciam a distribuição espacial de pragas e, conseqüentemente, de doenças (PLANTEGENEST; LE MAY; FABRE, 2007). Do ponto de vista aplicado, esse estudo poderia auxiliar na identificação de paisagens terrestres que impactam em riscos de doenças com duas finalidades: a primeira, criar estratégias de proteção a cultura, e segunda, possuir um desenho da paisagem com a estratégia de cultura com o objetivo de reduzir os riscos de doenças (PARRY; EVANS; MORGAN, 2006; THIERRY et al., 2017). Em ambos os casos, deve-se esperar redução na necessidade de intervenções curativas.

Por fim, o *framework* ABISM pode ser utilizado de duas formas: a primeira, através da sua interface web acessível no endereço <https://goo.gl/PE6Kjc>. A segunda, é baixando o código fonte do *framework* e seguindo os passos de utilização do modelo disponíveis no endereço <https://goo.gl/wmwNUS>. Em alternativa, propõe-se integrar o ABISM à plataforma de monitoramento de afídeos TRAPSYSTEM (LAZZARETTI et al., 2016b) permitindo a determinação mais precisa do nível de ação para controle dos insetos pragas-vetores, estimativas quantificadas das regiões de maior risco epidemiológico e impactos de diferentes medidas de manejo sobre o desenvolvimento das epidemias.

5.6 Conclusões

O acoplamento entre os modelos DSSAT/NWheat e ABISM se mostrou satisfatório e o objetivo deste capítulo foi atingido. A integração entre ambos os modelos auxilia a compreensão das interações entre vetor e plantas. Foi possível causar o declínio virtual no peso de grãos das plantas em virtude da ação dos insetos. Vislumbra-se implementar o acoplamento entre os modelos que possam contribuir no entendimento das interações entre o patossistema vetor-vírus-hospedeiro. Assim, essa integração poderá auxiliar na avaliação do impacto da aplicação de inseticida sobre a população de vetores e constatar a incidência da virose nas culturas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo mostra que é possível, a partir do conhecimento legado, realizar o acoplamento, para execuções simultâneas, entre diferentes modelos de simulação. Como resultado, foi possível a obtenção de um modelo baseado em agentes denominado *framework* ABISM, que através da parametrização mostra-se apropriado para a simulação do ciclo de vida do afídeo *Rhopalosiphum padi*.

Estas características foram inicialmente avaliadas através da criação de uma interface gráfica baseada na Web denominada ABISM-GUI. Esta favorece simplicidade, flexibilidade e desempenho, otimizando velocidade e utilização dos recursos computacionais. Além disso, permite ao usuário que não tem conhecimento sobre programação, uma possibilidade de explorar a flexibilidade do modelo, alterando parâmetros e visualizando suas consequências.

A característica de aplicabilidade do modelo foi testada através da parametrização dos módulos de desenvolvimento e reprodução. Aplicando o modelo para simular o crescimento populacional do pulgão em plantas de trigo expostas em ambientes com diferentes regimes térmicos. Como resultado, o modelo permite entendimento dos vários processos e interações que podem afetar a dinâmica das populações de pulgões e seu uso como um sistema para prever o desenvolvimento de epidemias e ser capaz de ser usado em conjunto com plataformas de monitoramento para tomada de decisões gerenciais.

Em consequência, a característica de integração do modelo foi avaliada com a construção de uma interface de acoplamento com um modelo de cultura, e assim, parametrizando ambos para simular a densidade, a incidência e o dano direto causado pelo *R. padi* em plantas de trigo para condições de campo. Dessa forma, foi possível observar o declínio virtual no peso de grãos das plantas em virtude da ação dos insetos.

Uma série de trabalhos futuros e melhorias podem ser realizadas. Adicionar a característica para que o agente assuma o papel de vetor de vírus. Possibilitar que o

modelo simule outras espécies de insetos e/ou espécies virais. Incorporar a característica de simulação espacial em escala de paisagem considerando sucessão e rotação de culturas. Além disso, utilização de técnicas de processamento paralelo e distribuído permitindo superar limitações de hardware para simulações em escala de paisagem.

7 CONCLUSÃO GERAL

Conclui-se que o modelo de simulação ABISM é uma ferramenta apropriada para simular o crescimento populacional de *Rhopalosiphum padi* e seu efeito no rendimento de grãos de trigo através da associação entre a temperatura e diferentes épocas de infestação. Além disso, os parâmetros utilizados são oriundos de medições que podem ser realizadas em cenários reais e, nesse sentido, descritas para utilização no modelo. A acurácia dos resultados das simulações em relação aos dados reais pode ser maior ou menor, dependendo da parametrização realizada e das funções matemáticas utilizadas para cada característica biológica presente no modelo.

REFERÊNCIAS

ABAR, S.; THEODOROPOULOS, G. K.; LEMARINIER, P.; O'HARE, G. M. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-the-art software. **Computer Science Review**, v. 24, n. 1, p. 13–33, 2017.

AGHNOUM, R.; NAZERI, M.; MOAYEDI, A. A.; KOUHESTANI, B. Effect of Sowing Date on Occurrence and Severity of Barley Yellow Dwarf Virus (Bydv) in Different Wheat Cultivars. **Scientific Papers. Series A. Agronomy**, v. 1, p. 191–196, 2017.

ARAYA, J.; FERERES, A. Cereal aphid survival under flooding conditions. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 1, n. 1, p. 168–173, 1991.

ARRIGNON, F.; DECONCHAT, M.; SARTHOU, J. P.; BALENT, G.; MONTEIL, C. Modelling the overwintering strategy of a beneficial insect in a heterogeneous landscape using a multi-agent system. **Ecological Modelling**, v. 205, n. 3–4, p. 423–436, 2007.

ASIN, L.; PONS, X. Effect of High Temperature on the Growth and Reproduction of Corn Aphids (Homoptera: Aphididae) and Implications for Their Population Dynamics on the Northeastern Iberian Peninsula. **Environmental Entomology**, v. 30, n. 6, p. 1127–1134, 2001.

AUAD, A. M.; ALVES, S. O.; CARVALHO, C. A.; SILVA, D. M.; RESENDE, T. T.; VERISSIMO, B. A. The impact of temperature on biological aspects and life table of *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae) fed with signal grass. **Florida Entomologist**, v. 1, n. 1, p. 569–577, 2009.

BARLOW, N.; DIXON, A. **Simulation of lime aphid population dynamics**. The Nether ed.: Centre for Agricultural Publishing and Documentation. 1980.

BATCHELOR, W. D.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J.; PINNSCHMIDT, H. O. Extending the use of crop models to study pest damage. **Transactions of the ASAE**, v. 36, n. 1, p. 551–558, 1993.

BATCHELOR, W. D.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J.; PORTER., C. H. **Pest and Disease Damage Module, in DSSAT v.4.0 Documentation and Source Code Listing.** Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida, Gainesville, Florida, US, n. 00-1205, 2000

BONABEAU, E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 3, n. 1, p. 7280–7287, 2002.

BORER, E. T.; ADAMS, V. T.; ENGLER, G. A.; ADAMS, A. L.; SCHUMANN, C. B.; SEABLOOM, E. W. Aphid fecundity and grassland invasion: Invader life history is the key. **Ecological Applications**, v. 19, n. 5, p. 1187–1196, 2009.

BRABEC, M.; HONĚK, A.; PEKÁR, S.; MARTINKOVÁ, Z. Population dynamics of aphids on cereals: Digging in the time-series data to reveal population regulation caused by temperature. **PLoS ONE**, v. 9, n. 9, 2014.

BROWNE, P. A.; WILSON, S. A simple method for integrating a complex model into an ensemble data assimilation system using MPI. **Environmental Modelling and Software**, v. 68, n. 1, p. 122–128, 2015.

BULATEWICZ, T. **Support for model coupling: an interface-based approach.** 2006. University of Oregon, 2006.

CARRASCO, D.; LARSSON, M. C.; ANDERSON, P. Insect host plant selection in complex environments. **Current Opinion in Insect Science**, v. 8, n. June, p. 1–7, 2015.

CARTER, N. Simulation modelling of the population dynamics of cereal aphids. **Biosystems**, v. 18, n. 1, p. 111–119, 1985.

CARTER, N.; DIXON, A. F. G.; RABBINGE, R. **Cereal aphid populations: aiology, simulation and prediction.** [s.l.] Wageningen Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1982.

CATHERALL, P. L. Effects of barley yellow dwarf virus on the growth and yield of single plants and simulated swards of perennial rye-grass. **Annals of Applied Biology**, v. 57, n. 1, p. 155–162, 1966.

CEZARE, D.; SCHONS, J.; LAU, D. Análise da resistência / tolerância da cultivar de trigo BRS Timbaúva ao Barley yellow dwarf virus - PAV. **Tropical Plant Pathology**, v. 36, n. 4, p. 249–255, 2011.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 2014.

CHAKRABORTI, A.; TOKE, I. M.; PATRIARCA, M.; ABERGEL, F. Econophysics review : II . Agent-based models. **Quantitative Finance**, v. 11, n. 7, p. 1013–1041, 2011.

CHANDER, S.; AHUJA, L. R.; PEAIRS, F. B.; AGGARWAL, P. K.; KALRA, N. Modeling the effect of Russian wheat aphid, *Diuraphis noxia* (Mordvilko) and weeds in winter wheat as guide to management. **Agricultural Systems**, v. 88, n. 2–3, p. 494–513, 2006.

CHANG, W.; CHENG, J.; ALLAIRE, J. J.; XIE, Y.; MCPHERSON, J. Shiny: web application framework for R. **R package version 0.11**, v. 1, n. 4, p. 106, 2015.

CHENU, K.; PORTER, J. R.; MARTRE, P.; BASSO, B.; CHAPMAN, S. C.; EWERT, F.; BINDI, M.; ASSENG, S. Contribution of Crop Models to Adaptation in Wheat. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 6, p. 472–490, 2017.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 294 p.

DAVIS, J. A.; RADCLIFFE, E. B.; RAGSDALE, D. W. Effects of High and Fluctuating Temperatures on *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). **Environmental Entomology**, v. 35, n. 6, p. 1461–1468, 2006.

DEAN, G. J. Effect of temperature on the cereal aphids *M. dirhodum*(Wlk.), *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Macrosiphum avenae* (F.) (Hem., Aphidiidae). **Bulletin of Entomological Research**, v. 3, n. 63, p. 401–409, 1974.

DEAN, G. J. W.; WILDING, N. Entomophthora Infecting dirhodum the cereal Sitobion aphids avenae. **Annals of Applied Biology**, v. 74, n. 1971, p. 169–176, 1971.

DESCAMPS, L.; CHOPA, C. Population growth of *Rhopalosiphum padi* L. (Homoptera: Aphididae) on different cereal crops from the semiarid pampas of argentina under laboratory conditions. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 71, n. 3, p. 390–394, 2011.

DIXON, A. F. G. Aphid Ecology: Life Cycles, Polymorphism, and Population Regulation. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 8, n. 1, p. 329–353, 1977.

DÖRING, T. F. How aphids find their host plants, and how they don't. **Annals of Applied Biology**, v. 165, n. 1, p. 3–26, 2014.

DUFFY, C.; FEALY, R.; FEALY, R. M. An improved simulation model to describe the temperature-dependent population dynamics of the grain aphid, *Sitobion avenae*. **Ecological Modelling**, v. 354, p. 140–171, 2017.

FABRE, F.; PLANTEGENEST, M.; MIEUZET, L.; DEDRYVER, C. A.; LETERRIER, J. L.; JACQUOT, E. Effects of climate and land use on the occurrence of viruliferous aphids and the epidemiology of barley yellow dwarf disease. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 106, n. 1, p. 49–55, 2005.

FERNANDES, J. M. C.; PAVAN, W. A phenology-based predictive model for Fusarium Head Blight of Wheat. **2002 National Fusarium Head Blight Forum Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 154–158, 2002.

GABRIEL, E.; FAGG, G. E.; BOSILCA, G.; ANGSKUN, T.; DONGARRA, J. J.; SQUYRES, J. M.; SAHAY, V.; KAMBADUR, P.; BARRETT, B.; LUMSDAINE, A.; CASTAIN, R. H.; DANIEL, D. J.; GRAHAM, R. L.; WOODALL, T. S. Open MPI: Goals, Concept, and Design of a Next Generation MPI Implementation. **European Parallel Virtual Machine/Message Passing Interface Users' Group Meeting**, v. 1, n. 1, p. 97–104, 2004.

GALLO, D.; NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R. P. L.; BAPTISTA, G. C. D. **Entomologia agrícola**. Piracicaba: Fundacao de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 2002.

GASSEN, D. N. **Insetos associados à cultura do trigo no Brasil**. Passo Fundo, EMBRAPA - CNPT, 1984. 39p. (Circular Técnica, 3).

GROPP, W.; DOSS, N. A High-Performance , Portable Implementation of the MPI Message Passing Interface Standard. **Parallel Computing**, v. 22, n. 1, p. 789–828, 1996.

HOLZWORTH, D. P.; SNOW, V.; JANSSEN, S.; ATHANASIADIS, I. N.; DONATELLI, M.; HOOGENBOOM, G.; WHITE, J. W.; THORBURN, P. Agricultural production systems modelling and software: Current status and future prospects. **Environmental Modelling and Software**, v. 72, n. 1, p. 276–286, 2014.

IRWIN, M. E.; KAMPMEIER, G. E.; WEISSER, W. W. Aphid movement: process and consequences. VAN EMDEN, H. F.; HARRINGTON, R. **Aphids as crop pests**. 1 ed. Cabi, 2017. p. 153–186.

IRWIN, M. E.; THRESH, J. M. Yellow dwarf: a study in ecological complexity. **Annual Review of Phytopathology**, v. 28, n. 1, p. 393–424, 1990.

ISIDORO, C.; FACHADA, N.; BARATA, F.; ROSA, A. Progress in Artificial Intelligence. **In Portuguese Conference on Artificial Intelligence**, v. 1, n. 1, p. 53–64, 2009.

IZAURREALDE, R. C.; WILLIAMS, J. R.; MCGILL, W. B.; ROSENBERG, N. J.; JAKAS, M. C. Q. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. **Ecological Modelling**, v. 192, n. 3–4, p. 362–384, 2006.

JACHNER, S.; BOOGAART, K. G. van den. Statistical Methods for the Qualitative Assessment of Dynamic Models with Time Delay. **Journal of Statistical Software**, v. 22, n. 8, p. 1479–1481, 2007.

JAVED, A.; QAMAR, B.; JAMEEL, M.; SHAFI, A.; CARPENTER, B. Towards Scalable Java HPC with Hybrid and Native Communication Devices in MPJ Express. **International Journal of Parallel Programming**, v. 44, n. 6, p. 1142–1172, 2016.

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; MUNOZ-CARPENA, R.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, n. 1, p. 240–254, 2017a.

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; MUNOZ-CARPENA, R.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. **Agricultural Systems**, v. 155, n. 1, p. 269–288, 2017b.

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**, Elsevier, v. 18, n. 3-4, p. 235–265, 2003.

KAAKEH, W.; DUTCHER, J. D. Effect of Rainfall on Population Abundance of Aphids (Homoptera: Aphididae) on Pecan. **Journal of Entomological Science**, v. 28, n. 3, p. 283–286, 1993.

KASSIE, B. T.; ASSENG, S.; PORTER, C. H.; ROYCE, F. S. Performance of DSSAT-Nwheat across a wide range of current and future growing conditions. **European Journal of Agronomy**, v. 81, p. 27–36, 2016.

KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; MCLEAN, G. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 267–288, 2003.

KLÜGL, F.; BAZZAN, A. L. Agent-based modeling and simulation. **AL Magaazine**, v. 1, n. 1, p. 29–40, 2012.

LAU, D.; PEREIRA, P. D. S.; CASTRO, R. L.; STEMPKOWSKI, L. Ensaio estadual de cultivares de trigo do Rio Grande do Sul 2016-reação ao BYDV-PAV. **11 Reunião Da Comissão Brasileira De Pesquisa De Trigo e Triticale**, v. 2, p. 302, 2017.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LAZZARETTI, A. T. **Integração de Banco de Dados e Modelos de Simulação de Culturas para estimar o impacto de mudanças do clima do rendimento de grãos e na severidade da Giberela em Trigo**. 2013. 192f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013.

LAZZARETTI, A. T.; FERNANDES, J. M. C.; PAVAN, W.; TOEBE, J.; WIEST, R. AgroDB – Integration of Database Management Systems with Crop Models. **8Th International Congress on Environmental Modelling and Software, Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 194–201, 2016a.

LAZZARETTI, A. T.; LAU, D.; MAURÍCIO, J.; FERNANDES, C.; WIEST, R.; LUIS, J.; BAVARESCO, B.; SCHAEFER, F. Trapsystem-uma aplicação para gerenciamento de dados coletados a partir de armadilhas de insetos. **210 Reunião Da Comissão Brasileira De Pesquisa De Trigo e Triticale**, v. 1, n. 1, p. 1–5, 2016b.

LESLIE, T. W.; VAN DER WERF, W.; BIANCHI, F. J. J. A.; HONĚK, A. Population dynamics of cereal aphids: Influence of a shared predator and weather. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 11, n. 1, p. 73–82, 2009.

LIMA, E. A. B. F.; FERREIRA, C. P.; GODOY, W. A. C. Ecological modeling and pest population management: a possible and necessary connection in a changing world. **Neotropical Entomology**, v. 38, n. 6, p. 699–707, 2009.

LIU, Q.; SUN, X. Research of web real-time communication based on web socket. **Int. J. Communications, Network and System Sciences**, v. 2012, n. December, p. 797–801, 2012.

LOGAN, J. A.; WOLLKIND, D. J.; HOYT, S. C.; TANIGOSHI, L. K. An Analytic Model for Description of Temperature Dependent Rate Phenomena in Arthropods. **Environmental Entomology**, v. 5, n. 6, p. 1133–1140, 1976.

LOXDALE, H. D.; HARDIE, J. I. M.; HALBERT, S.; FOOTITT, R.; KIDD, N. A.; CARTER, C. I. The relative importance of short-and long-range movement of flying aphids. **Biological Reviews**, v. 68, n. 2, p. 291–311, 1993.

MA, G.; HOFFMANN, A. A.; MA, C.-S. Daily temperature extremes play an important role in predicting thermal effects. **Journal of Experimental Biology**, v. 218, n. 14, p. 2289–2296, 2015.

MACFADYEN, S.; KRITICOS, D. J. Modelling the geographical range of a species with variable life-history. **PLoS ONE**, v. 7, n. 7, 2012.

MAEDA, E. E.; DE ALMEIDA, C. M.; DE CARVALHO XIMENES A., A.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; PELLIKKA, P. Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 3, p. 435–446, 2011.

MARIA, A. Introduction to modeling and simulation. **Proceedings of the 29th conference on Winter simulation - WSC '97**, v. 1, n. 1, p. 7–13, 1997.

MERRILL, S. C.; HOLTZER, T. O.; PEAIRS, F. B.; LESTER, P. J. Modeling spatial variation of Russian wheat aphid overwintering population densities in Colorado winter wheat. **Journal of Economic Entomology**, v. 102, n. 2, p. 533–541, 2009.

MORGAN, D. Population dynamics of the bird cherry-oat aphid during the autumn and winter. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 2, n. 1, p. 297–304, 2000.

MORGAN, D.; WALTERS, K. F. A.; AEGERTER, J. N. Effect of temperature and cultivar on pea aphid, *Acyrtosiphon pisum* (Hemiptera: Aphididae) life history. **Bulletin of entomological research**, v. 91, n. 1, p. 47–52, 2001.

OLIVEIRA, F. A. A. de. **Acoplamento Dinâmico de Modelos de Simulação usando Docker e MPI para o DSSAT**. 2018. 14f. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciência da Computação) – Instituto de Ciência e Geociência, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2018.

PARIZOTO, G. **Flutuação Sazonal De B/CYDV e Características Biológicas De Isolados De BYDV-PAV**. 2011. 125f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011.

PARK, C. G.; CHOI, B. R.; CHO, J. R.; KIM, J. H.; AHN, J. J. Thermal effects on the development, fecundity and life table parameters of *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus) (Hemiptera: Aphididae) on barley. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, v. 20, n. 3, p. 767–775, 2017.

PARK, J. H.; KWON, S. H.; KIM, T. O.; OH, S. O.; KIM, D. Temperature-dependent Development and Fecundity of *Rhopalosiphum padi* (L .) (Hemiptera : Aphididae) on Corns. **Korean Journal of Applied Entomology**, v. 55, n. 2, p. 149–160, 2016.

PARRY, H. R. Cereal aphid movement: General principles and simulation modelling. **Movement Ecology**, v. 1, n. 1, p. 14-, 2013.

PARRY, H. R.; EVANS, A. J. A comparative analysis of parallel processing and super-individual methods for improving the computational performance of a large individual-based model. **Ecological Modelling**, v. 214, n. 2–4, p. 141–152, 2008.

PARRY, H. R.; EVANS, A. J.; MORGAN, D. Aphid population response to agricultural landscape change: A spatially explicit, individual-based model. **Ecological Modelling**, v. 199, n. 4, p. 451–463, 2006.

PAVAN, W. **Técnicas de engenharia de software aplicadas à modelagem e simulação de doenças de plantas**. 2007. 207f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2007.

PECKHAM, S. D.; GOODALL, J. L. Driving plug-and-play models with data from web services: A demonstration of interoperability between CSDMS and CUAHSI-HIS. **Computers and Geosciences**, v. 53, n. 1, p. 154–161, 2013.

PEDRINI, J. E. **Acoplando um modelo de doenças ao modelo CROPGRO-SOYBEAN: Ferrugem Asiática da Soja**. 2010. 128f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.

PEREIRA, P. da S.; LAU, D.; MARSARO JÚNIOR, A. L. Considerações sobre o manejo do complexo afídeos/viroses em trigo. **10 Reunião Da Comissão Brasileira De Pesquisa De Trigo e Triticale**, v. 1, n. 2, p. 131–139, 2016.

PEREIRA, P. R. V. da S.; SALVADORI, J. R.; LAU, D. **Identificação de adultos ápteros e alados das principais espécies de afídeos (Hemiptera: Aphididae) associadas a cereais de inverno no Brasil.** Passo Fundo: Embrapa Trigo (Embrapa Trigo. Comunicado Técnico online, 258), 2009.

PEREZ, L.; DRAGICEVIC, S. Modeling mountain pine beetle infestation with an agent-based approach at two spatial scales. **Environmental Modelling and Software**, v. 25, n. 2, p. 223–236, 2010.

PLANTEGENEST, M.; LE MAY, C.; FABRE, F. Landscape epidemiology of plant diseases. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 4, n. 16, p. 963–972, 2007.

POWELL, G.; TOSH, C. R.; HARDIE, J. Host plant selection by aphids: behavioral, evolutionary, and applied perspectives. **Annu. Rev. Entomol.**, v. 51, n. 2, p. 309–330, 2006.

POWER, A. G.; BORER, E. T.; HOSSEINI, P.; MITCHELL, C. E.; SEABLOOM, E. W. The community ecology of barley/cereal yellow dwarf viruses in Western US grasslands. **Virus Research**, v. 159, n. 2, p. 95–100, 2011.

RASTEGARI, N.; TAHERI, S.; RAZMJOU, J. Fecundity and development rate of the bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi* (L) (Hom.: Aphididae) on six wheat cultivars. **Plant Protection Science**, v. 46, n. 2, p. 72–78, 2010.

RAZMJOU, J.; GOLIZADEH, A. The Effect of Wheat Cultivars on Biological Attributes of Bird Cherry-Oat Aphid, *Rhopalosiphum padi* (Homoptera : Aphididae). **Journal of Crop Protection**, v. 2, n. 3, p. 331–341, 2013.

REBONATTO, A.; SALVADORI, J. R.; LAU, D. Temporal Changes in Cereal Aphids (Hemiptera: Aphididae) Populations in Northern Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 7, n. 10, p. 71–78, 2015.

SALVADORI, J. R.; TONET, G. E. L. **Manejo Integrado dos Pulgões de Trigo.** Passo Fundo: Embrapa Trigo (Embrapa Trigo. Comunicado Técnico online, 34), 2001.

SANCHEZ, A.; VOJINOVIC, Z.; PRICE, R.; WALY, M. Towards an Approach to the Evolution of Urban Drainage Networks Using Agent-Based Models. **12nd International Conference on Urban Drainage**, v. 1, n. 1, p. 11–16, 2011.

SARTORI, J. **Uma plataforma para acoplamento de modelos de simulação utilizando WebSockets.** 2017. 71f. Dissertação (Mestre em Computação Aplicada) – Instituto de Ciência e Geociência, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

SAVARIS, M.; LAMPERT, S.; SALVADORI, J. R.; LAU, D.; PEREIRA, P. R. V. S.; SMANIOTTO, M. A. Population Growth and Damage Caused by *Rhopalosiphum padi* (L.) (Hemiptera, Aphididae) on Different Cultivars and Phenological Stages of Wheat. **Neotropical Entomology**, v. 42, n. 5, p. 539–543, 2013.

SCHONS, J.; DALBOSCO, M. Identificação das estirpes do vírus do nanismo amarelo da cevada. **Revista Brasileira de Fitopatologia**, v. 24, n. 1, p. 359-, 1999.

SILVA, S. R.; BASSOI, M. C.; FOLONI, J. S. S. **Informações técnicas para trigo e triticale - safra 2017**. v. 91. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

SOLANO, E.; MORRIS, R.; BOBASHEV, G. Coupling models by routing communication through a database. **RTI International**, p. 19, 2013.

TEAM, R. D. C. R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**, v. 1, n. 2.11.1, p. 409, 2016.

TEULON, D. A. J.; STUFKENS, M. A. W.; FLETCHER, J. D. Crop infestation by aphids is related to flight activity detected with 7.5 metre high suction traps. **New Zealand Plant Protection**, v. 57, p. 227–232, 2004.

THACKRAY, D. J.; DIGGLE, A. J.; JONES, R. A. C. BYDV PREDICTOR: A simulation model to predict aphid arrival, epidemics of Barley yellow dwarf virus and yield losses in wheat crops in a Mediterranean-type environment. **Plant Pathology**, v. 58, n. 1, p. 186–202, 2009.

THIERRY, H.; VIALATTE, A.; CHOISIS, J. P.; GAUDOU, B.; PARRY, H.; MONTEIL, C. Simulating spatially-explicit crop dynamics of agricultural landscapes: The ATLAS simulator. **Ecological Informatics**, v. 40, n. 1, p. 62–80, 2017.

TOEBE, J. **Um modelo baseado em agentes para o ciclo de vida de insetos: aplicação na interação afídeo-planta-vírus**. 2014. 167f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

VAN EMDEN, H. F.; HARRINGTON, R. **Aphids as crop pests**. 1 ed. Cabi, 2017.

VOLTERRA, V. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. **Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei Ser**, v. 2, n. 1, p. 31–113, 1926.

WALKER, G. P.; NAULT, L. R.; SIMONET, D. E. Natural Mortality Factors Acting on Potato Aphid (*Macrosiphum euphorbiae*) Populations in Processing-Tomato Fields in Ohio. **Environmental Entomology**, v. 13, n. 3, p. 724–732, 1984.

WALLS, J. T.; CACIAGLI, P.; TOOKER, J. F.; RUSSO, J. M.; RAJOTTE, E. G.; ROSA, C. Modeling the decision process for barley yellow dwarf management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, n. 1, p. 775–786, 2016.

WOJCIECHOWSKI, J.; HOPKINS, A. M.; UPTON, R. N. Interactive pharmacometric applications using R and the Shiny package. **CPT: Pharmacometrics and Systems Pharmacology**, v. 4, n. 3, p. 146–159, 2015.

ZHOU, M.; LARKIN, P.; SCHWINGHAMER, M.; COUTTS, B.; BIRCHALL, C.; JOHNSON, P.; DAVEY, B. Studies on barley yellow dwarf virus (BYDV) in wheat. **17th Australian Society of Agronomy Conference**, v. 1, n. September, p. 1–4, 2015.

ZHOU, Y.; ARIFIN, S. M. N.; GENTILE, J.; KURTZ, S. J.; DAVIS, G. J.; WENDELBERGER, B. A. An agent-based model of the *Anopheles gambiae* mosquito life cycle. **2010 Summer Simulation Multiconference**, p. 201–208, 2010.

ANEXOS

Anexo I Tabela da síntese dos experimentos realizados nos três regimes térmicos sobre o crescimento populacional do afídeo *R. padi*. Passo Fundo, 2014-2015.

(Continua)

Experimento	Data da semeadura	Data da infestação	Duração (dias)	Regime térmico	Temp. média	Ninfas	Adultos ápteros	Adultos alados	População total (Ninfas + Adultos)
1	26/08/2015	02/09/2015	15	Constante	5,0	0	1	0	1
2	12/06/2015	19/06/2015	15	Constante	10,0	24	4	0	28
3	06/05/2015	16/05/2015	15	Constante	15,0	81	23	0	104
4	06/05/2015	16/05/2015	16	Constante	20,0	241	65	0	306
5	12/06/2015	19/06/2015	16	Constante	25,0	1948	530	18	2496
6	26/02/2015	09/03/2015	15	Constante	30,0	30	24	0	54
7	02/04/2015	13/04/2015	15	Constante	35,0	0	0	0	0
8	15/07/2015	22/07/2015	15	Flutuante	10,0	13	5	0	18
9	26/01/2015	03/02/2015	16	Flutuante	15,0	13	12	0	25
10	06/05/2014	11/05/2014	16	Flutuante	20,0	33	14	0	47
11	26/01/2015	03/02/2015	15	Flutuante	25,0	550	199	0	749
12	02/04/2015	13/04/2015	15	Flutuante	30,0	201	76	0	277
13	26/08/2015	02/09/2015	15	Flutuante	35,0	0	0	0	0
14	04/04/2014	10/04/2014	14	Variável	17,7	42	21	0	63
15	06/05/2014	11/05/2014	15	Variável	14,6	29	15	0	44

Experimento	Data da semeadura	Data da infestação	Duração	Regime térmico	Temp. média	Ninfas	Adultos ápteros	Adultos alados	(Conclusão)
									População total (Ninfas + Adultos)
16	03/06/2014	11/06/2014	13	Variável	13,8	20	7	0	27
17	05/08/2014	12/08/2014	16	Variável	15,8	31	10	0	41
18	10/09/2014	17/09/2014	15	Variável	16,5	50	20	0	70
19	16/10/2014	28/10/2014	19	Variável	20,8	243	59	0	302
20	23/12/2014	02/01/2015	15	Variável	22,4	220	77	0	297
21	02/04/2015	13/04/2015	15	Variável	18,7	50	23	0	73
22	06/05/2015	16/05/2015	16	Variável	16,2	37	21	0	58
23	12/06/2015	19/06/2015	20	Variável	13,0	27	15	0	42
24	15/07/2015	22/07/2015	16	Variável	15,7	52	19	0	71
25	26/08/2015	02/09/2015	15	Variável	14,1	17	8	0	25

Fonte: Embrapa Trigo
Nota: Dados não publicados

Anexo II Tabela da síntese dos experimentos realizados a campo sobre o período, temperatura, área experimental, infestação, rendimento e número final de afídeos *R. padi*. Coxilha – RS, 2013-2017.

Experimento	Data da semeadura	Data da Colheita	Tratamento	Temperatura			Área				Máximo de plantas infestadas	Peso médio de grãos (Kg/ha)	População total
				Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Plantas por parcela	Cultivares	Repetições	Total de plantas			
1	03/07/2013	18/11/2013	1	-1,5	33,0	16,2	30	7	4	840	4,782	49	
1	03/07/2013	18/11/2013	5	-1,5	33,0	16,2	30	7	4	840	3,733	374	
2	08/07/2014	18/11/2014	1	-0,7	33,4	17,8	30	7	4	840	3,823	25	
2	08/07/2014	18/11/2014	5	-0,7	33,4	17,8	30	7	4	840	3,343	368	
3	29/06/2015	12/11/2015	1	0,6	31,9	17,5	30	7	4	840	3,064	74	
3	29/06/2015	12/11/2015	5	0,6	31,9	17,5	30	7	4	840	2,080	477	
4	15/06/2016	08/11/2016	1	-0,1	30,1	15,4	18	7	4	504	6,626	87	
4	15/06/2016	08/11/2016	5	-0,1	30,1	15,4	18	7	4	504	5,427	1,605	
5	27/06/2017	07/11/2017	1	0,0	31,2	18,2	18	7	4	504	4,481	30	
5	27/06/2017	07/11/2017	5	0,0	31,2	18,2	18	7	4	504	3,054	393	

Fonte: Embrapa Trigo

Nota: Dados não publicados

Síntese dos experimentos realizados a campo (m²) sobre o período, temperatura, área experimental, infestação, rendimento e número final de afídeos *R. padi*. Coxilha – RS, 2013-2017.

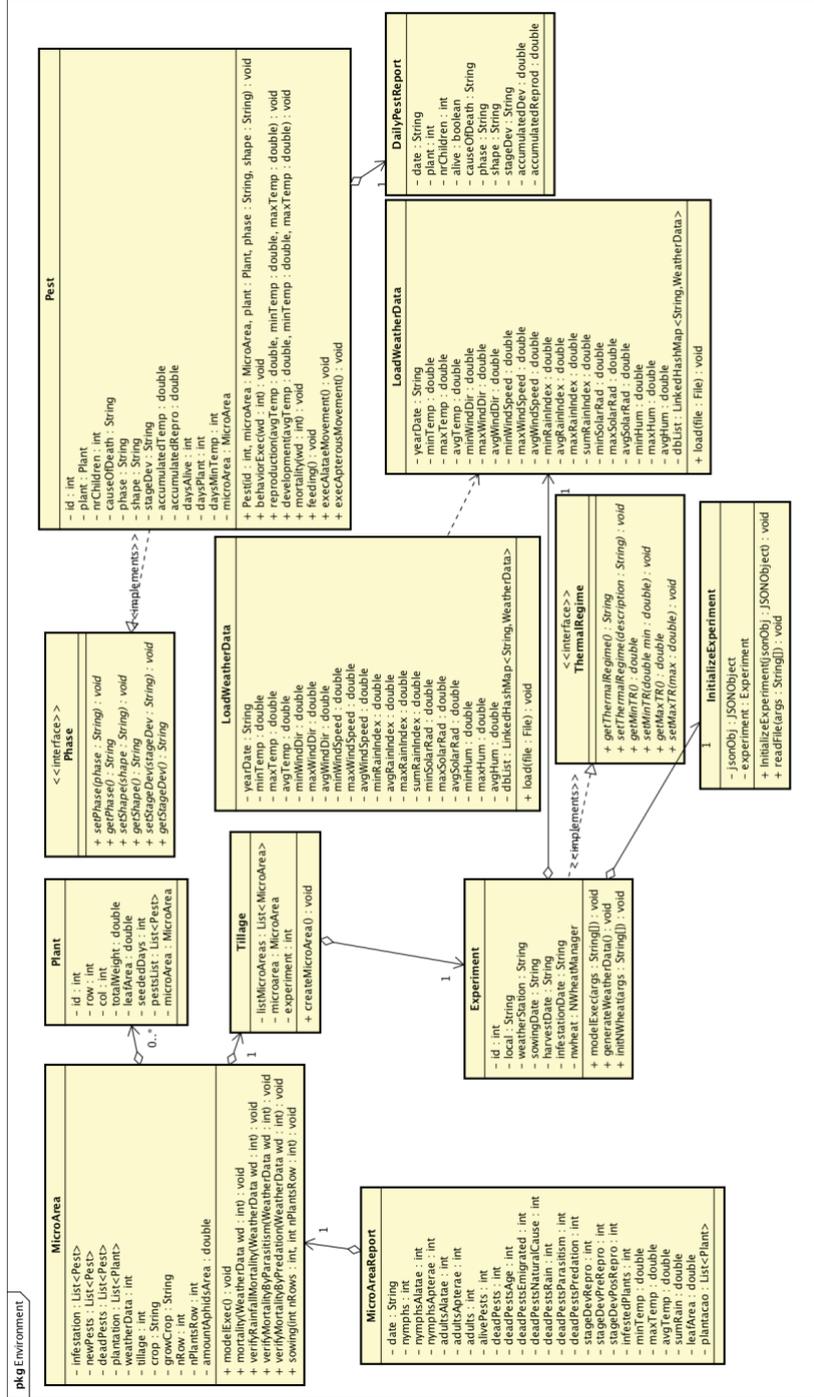
Experimento	Data da semeadura	Data da Colheita	Tratamento	Temperatura			Área			Máximo de plantas infestadas	População total
				Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Linhas	Plantas/linha	Total de plantas		
1	03/07/2013	18/11/2013	1	-1,5	33,0	16,2	5	60	300	39	18
1	03/07/2013	18/11/2013	5	-1,5	33,0	16,2	5	60	300	140	134
2	08/07/2014	18/11/2014	1	-0,7	33,4	17,8	5	60	300	21	9
2	08/07/2014	18/11/2014	5	-0,7	33,4	17,8	5	60	300	156	131
3	29/06/2015	12/11/2015	1	0,6	31,9	17,5	5	60	300	39	26
3	29/06/2015	12/11/2015	5	0,6	31,9	17,5	5	60	300	131	170
4	15/06/2016	08/11/2016	1	-0,1	30,1	15,4	5	60	300	23	52
4	15/06/2016	08/11/2016	5	-0,1	30,1	15,4	5	60	300	152	955
5	27/06/2017	07/11/2017	1	0,0	31,2	18,2	5	60	300	21	18
5	27/06/2017	07/11/2017	5	0,0	31,2	18,2	5	60	300	118	234

Fonte: Embrapa Trigo

Nota: Dados não publicados

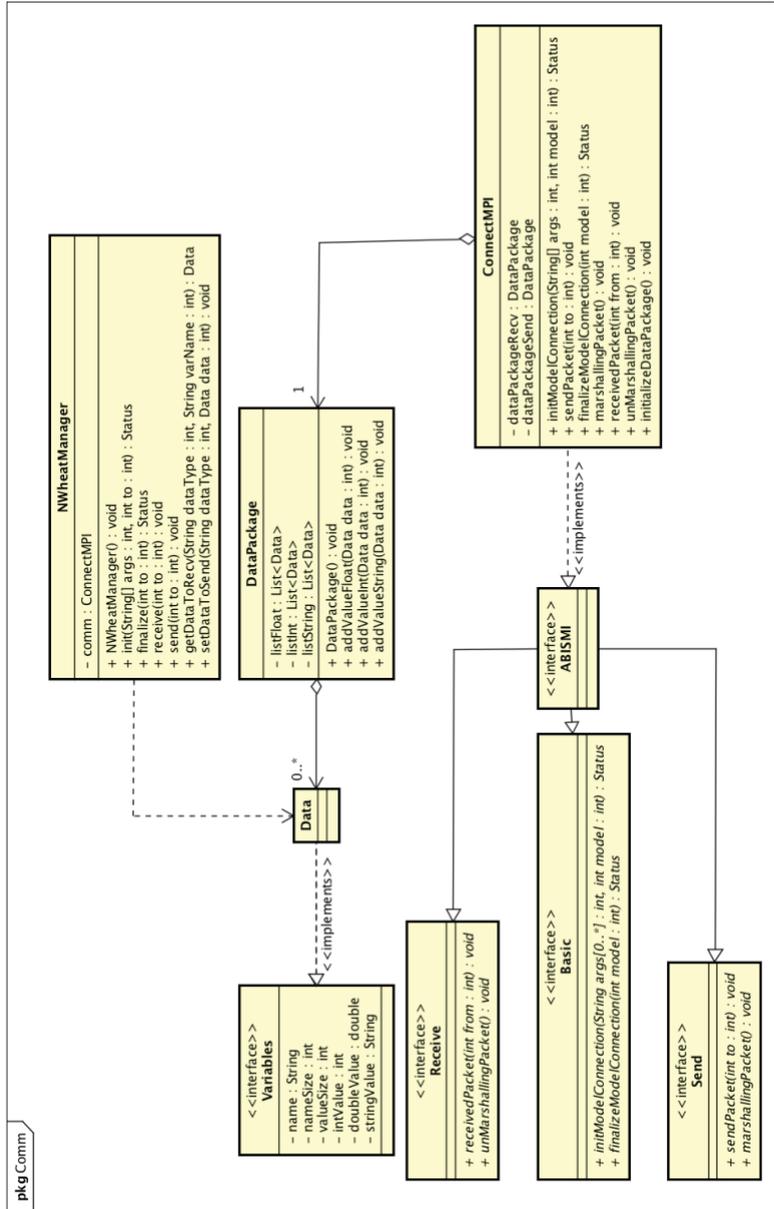
APÊNDICES

Apêndice I Figura referente a representação das principais classes, métodos e atributos que fazem parte do *framework* ABISM



Fonte: Dados do autor.

Apêndice II Figura referente a representação dos principais métodos e atributos das classes que fazem parte da interface de acoplamento do *framework* ABISM. Passo Fundo - RS, 2019



Fonte: Dados do autor.

Apêndice III Tabela da síntese dos experimentos realizados nos três regimes térmicos sobre o crescimento populacional do afídeo *R. padi*. Passo Fundo, 2014-2015.

(Continua)

Experimento	Data da semeadura	Data da infestação	Regime térmico	Temp. média	Ninfas	Adultos ápteros	Adultos alados	População total (Ninfas + Adultos)
1	26/08/2015	02/09/2015	Constante	5,0	1	1	0	2
2	12/06/2015	19/06/2015	Constante	10,0	5	1	0	6
3	06/05/2015	16/05/2015	Constante	15,0	27	6	0	33
4	06/05/2015	16/05/2015	Constante	20,0	280	27	1	308
5	12/06/2015	19/06/2015	Constante	25,0	1593	120	1	1714
6	26/02/2015	09/03/2015	Constante	30,0	6	3	0	9
7	02/04/2015	13/04/2015	Constante	35,0	0	0	0	0
8	15/07/2015	22/07/2015	Flutuante	10,0	7	1	0	8
9	26/01/2015	03/02/2015	Flutuante	15,0	24	4	0	28
10	06/05/2014	11/05/2014	Flutuante	20,0	162	16	0	178
11	26/01/2015	03/02/2015	Flutuante	25,0	337	32	1	370
12	02/04/2015	13/04/2015	Flutuante	30,0	0	0	0	0
13	26/08/2015	02/09/2015	Flutuante	35,0	0	0	0	0
14	04/04/2014	10/04/2014	Variável	17,7	33	7	0	40
15	06/05/2014	11/05/2014	Variável	14,6	15	4	0	19

(Conclusão)

Experimento	Data da semeadura	Data da infestação	Regime térmico	Temp. média	Ninfas	Adultos ápteros	Adultos alados	População total (Ninfas + Adultos)
16	03/06/2014	11/06/2014	Variável	13,8	23	8	0	31
17	05/08/2014	12/08/2014	Variável	15,8	20	1	0	21
18	10/09/2014	17/09/2014	Variável	16,5	32	7	0	39
19	16/10/2014	28/10/2014	Variável	20,8	294	26	1	321
20	23/12/2014	02/01/2015	Variável	22,4	305	29	1	335
21	02/04/2015	13/04/2015	Variável	18,7	69	13	0	82
22	06/05/2015	16/05/2015	Variável	16,2	26	8	0	34
23	12/06/2015	19/06/2015	Variável	13,0	13	1	0	14
24	15/07/2015	22/07/2015	Variável	15,7	25	4	0	29
25	26/08/2015	02/09/2015	Variável	14,1	15	2	0	17

Fonte: Dados do autor.

Apêndice IV Tabela da síntese dos experimentos simulados realizados a campo sobre o período, temperatura, área experimental, infestação, rendimento e número final de afídeos *R. padi*. Coxilha – RS, 2013-2017.

Experimento	Tratamento	Máximo de plantas infestadas	Peso médio de grãos (Kg/ha)	Mortalidade					Emigração	População total	
				Idade Natural	Parasitismo	Predação	Precipitação	Total			
1	1	NA	4,494	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
1	5	27	3,179	1	0	43	82	33	159	0	160
2	1	NA	4,449	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	5	40	4,064	0	0	84	150	24	258	0	197
3	1	NA	3,531	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
3	5	22	3,191	1	0	78	129	18	226	0	233
4	1	NA	3,845	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
4	5	57	3,531	1	0	109	177	17	304	0	282
5	1	NA	3,860	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
5	5	11	3,488	0	0	70	116	7	193	0	140

Fonte: Dados do autor.

Nota: NA (Não Avaliado)



PPGAgro

Programa de Pós-Graduação em Agronomia

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - FAMV