

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

**Otimização do controle de *Diatraea saccharalis*  
(Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) por meio do  
parasitoide *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891)  
(Hymenoptera: Braconidae) visando a redução de custos**

AUTOR – Rubens Gamaliel Bergamo de Souza

ORIENTADOR – Prof. Dr. Alexandre Colato

UFSCar - São Carlos

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

**Otimização do controle de *Diatraea saccharalis*  
(Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) por meio do  
parasitoide *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891)  
(Hymenoptera: Braconidae) visando a redução de custos**

Rubens Gamaliel Bergamo de Souza

Tese submetida ao Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos - DF/UFSCar - como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Física.

ORIENTAÇÃO:

Prof. Dr. Alexandre Colato

UFSCar - São Carlos

2018



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Física

## Relatório de Defesa de Tese

Candidato: Rubens Gamaliel Bergamo de Souza

Aos 26/03/2018, às 14:00, realizou-se na Universidade Federal de São Carlos, nas formas e termos do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Física, a defesa de tese de doutorado sob o título: Otimização do controle da *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Cambriae) através do parasitoide *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891) (Hymenoptera: Braconidae) visando redução de custos, apresentada pelo candidato Rubens Gamaliel Bergamo de Souza. Ao final dos trabalhos, a banca examinadora reuniu-se em sessão reservada para o julgamento, tendo os membros chegado ao seguinte resultado:

### Participantes da Banca

Função	Instituição
Presidente	UFSCar
Titular	UFSCar
Titular	UFSCar
Titular	USP
Titular	USP

### Conceito

APROVADO  
APROVADO  
APROVADO  
APROVADO  
Aprovado

Prof. Dr. Alexandre Colato  
Prof. Dr. Paulo Daniel Emmel  
Prof. Dr. Ricardo Toshio Fujihara  
Prof. Dr. José Roberto Postali Parra  
Prof. Dr. Fernando Fagundes Ferreira

Resultado Final: APROVADO

### Parecer da Comissão Julgadora\*:

O CANDIDATO TEVE UM DESEMPENHO SATISFATORIO SENDO APROVADO NO EXAME DE DEFESA.

Encerrada a sessão reservada, o presidente informou ao público presente o resultado. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada e, para constar, eu, Heloisa Helena Paganelli Meneghelli, representante do Programa de Pós-Graduação em Física, lavrei o presente relatório, assinado por mim e pelos membros da banca examinadora.

Prof. Dr. Alexandre Colato

Prof. Dr. Paulo Daniel Emmel

Prof. Dr. Ricardo Toshio Fujihara

Prof. Dr. José Roberto Postali Parra

Prof. Dr. Fernando Fagundes Ferreira

Representante do PPG: Heloisa Helena Paganelli Meneghelli

Não houve alteração no título da tese ( ) Houve. O novo título passa a ser:

### Observações:

- a) Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.
- b) Para gozar dos direitos do título de Mestre ou Doutor em Física, o candidato ainda precisa ter sua dissertação ou tese homologada pelo Conselho de Pós-Graduação da UFSCar.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida, força e ânimo para que eu chegasse até aqui.

À Inez e Roberto, meus pais, que desde muito cedo incentivaram o estudo em nossa casa e têm encarado com muito bom humor minha decisão de ter ficado na física.

Às minhas irmãs, Ana e Angélica que me apoiaram e me alegraram nos momentos difíceis e pela oportunidade que me deram de fazer parte dessa família que cresce sempre. Aos meus cunhados, Vitor e Werlei, e principalmente às “crias”, Jonathan, Samuel e Alice que sempre me alegraram só por existir.

Ao meu irmão Rodrigo, que efetivamente colocou a mão na massa para ajudar a desenvolver a parte computacional deste trabalho desde a sua origem e por ter ajudado na revisão dele, meu muito obrigado.

Ao professor Alexandre Colato, que esteve participando da minha trajetória acadêmica desde a graduação, seja ensinando, orientando ou apoiando nas oportunidades que surgiram.

Ao colega de grupo Donavam, com quem aprendi muito sobre a cana e controle biológico.

Ao professor Antonio Celani, que me recebeu de forma muito carinhosa no ICTP, e aos membros do grupo QLS, que contribuíram de forma muito significativa para que este trabalho gerasse um resultado muito útil e prático.

Aos amigos de São Carlos, que proporcionaram ótimos momentos de descontração quando isso era mais necessário, e boas comilanças, o que contribuiu para o crescimento do grupo. Agradeço em particular ao Lucas Samorano, que me aturou por vários anos no nosso “lar”, e também participou de forma bem direta da produção deste trabalho, sendo um crítico muito justo e um amigo sempre presente com seu macarrão com molho de mestre.

Aos Francely e Luci, por terem me recebido nesses últimos meses em sua casa, sempre agradáveis e com muita comida boa também.

À minha namorada, Heloisa, um “anjo que Deus me enviou”, por ter estado junto comigo nesses quase cinco anos. Por participar ativamente dos meus debates, dando um feedback se as ideias eram úteis e boas. Por ter resistido bravamente à distância dos intercâmbios nossos. Por ter me ensinado a ser uma pessoa mais gentil e ter me motivado a me tornar um “poliglota amorável”. Por ter e estar sempre procurando a melhor maneira de resolver as dificuldades. Enfim, por ter topado dividir os bons e maus momentos junto comigo. Amo-te!

## Resumo

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. No entanto, esta cultura agrícola é atacada por pragas, em especial a *Diatraea saccharalis*. Seu controle no Brasil é realizado principalmente pela atuação do parasitoide de lagartas, *Cotesia flavipes*. Sendo assim, entender como se dá a interação entre estas duas espécies é vital para aumentar a eficácia deste controle. Este trabalho teve como objetivos aprimorar a descrição da dinâmica entre as populações e transformar estas informações em uma ferramenta para otimização do controle biológico desta praga, visando a redução de custos para o agricultor. Afim de descrever a dinâmica destas duas populações, o modelo Lotka-Volterra e uma simulação multi-agentes foram empregados. Através do primeiro modelo, foram obtidas as características do sistema de equações diferenciais utilizadas, tendo sido apresentadas sugestões de tratamentos a serem testadas no campo, caso a população da praga seja conhecida. A simulação multi-agentes, que por sua construção apresenta características mais realistas comparadas com o modelo Lotka-Volterra, desempenhou um papel crucial para a descrição da praga em suas fases do ciclo de vida, onde comportamentos não observados no primeiro modelo foram obtidos. Então, a otimização do controle biológico foi desenvolvida, considerando o dano financeiro que a praga causa num dado período e o custo de seu tratamento. Para que este procedimento torne-se uma ferramenta útil no campo, foi também proposto um método de levantamento aprimorado. Por fim, o trabalho aqui desenvolvido apresenta novas soluções para que o controle biológico desta principal praga da cana seja realizado de forma mais eficaz, contribuindo para a redução do uso de produtos químicos e aumentando a competitividade desta indústria brasileira.

**Palavras-chave:** Controle biológico, modelo Lotka-Volterra, Simulação multi-agentes, broca da cana-de-açúcar, Otimização de custos.

## Abstract

Brazil is the world's largest producer of sugarcane. However, this agricultural crop is attacked by pests, especially *Diatraea saccharalis*. Its control in Brazil is carried out mainly by the action of the caterpillar parasitoid, *Cotesia flavipes*. Therefore, understanding how the interaction between these two species occurs is vital to increase the effectiveness of this control. This thesis' goals are to improve the description of the dynamics among populations and to transform this information into a tool to optimize the biological control of this pest, focusing at the cost reduction for the farmer. In order to describe the dynamics of these two populations, the Lotka-Volterra model and a multi-agent simulation were employed. Through the first model, the characteristics of the differential equations system were obtained, and treatment suggestions to be field tested were presented, in case the pest population size is known. The multi-agent simulation, which by its construction presents more realistic characteristics compared to the Lotka-Volterra model, played a crucial role in the description of the pest in its life cycle phases, where behaviors not observed in the first model were obtained. Afterwards, biological control optimization was developed, taking into account the financial damage that the pest causes in a given period and the cost of its treatment. In order for this procedure to become a useful tool in the farms, an improved survey method has also been proposed. Finally, the results developed here present new solutions so that the biological control of this main sugarcane pest can be carried out more effectively, contributing to the reduction of the employment of chemical products and increasing the competitiveness of this Brazilian industry.

**Key-words:** Biological control, Lotka-Volterra model, multi-agent simulation, Sugarcane borer, Cost optimization.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Cana-de-açúcar . . . . .	1
1.1.1	Produção mundial . . . . .	3
1.1.2	Produção nacional . . . . .	8
1.2	Biocombustível . . . . .	10
1.3	Broca-da-cana . . . . .	12
1.3.1	Prejuízos da broca-da-cana . . . . .	13
1.3.2	Métodos de controle . . . . .	14
1.4	<i>Cotesia flavipes</i> . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Modelo Lotka-Volterra para a interação de <i>D. saccharalis</i> e <i>C. flavipes</i></b>	<b>23</b>
2.1	Trajectoria do modelo Lotka-Volterra e sua base com população isolada . .	23
2.1.1	Modelo com população isolada . . . . .	24
2.2	Modelo Lotka-Volterra . . . . .	25
2.2.1	Pontos de equilíbrio . . . . .	30
2.2.2	Período de oscilação em torno dos pontos de equilíbrio . . . . .	32
2.2.3	Análise de estabilidade dos pontos de equilíbrio . . . . .	34
2.3	Análise dos resultados do modelo Lotka-Volterra . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Simulação computacional da dinâmica de <i>D. saccharalis</i> e <i>C. flavipes</i></b>	<b>48</b>
3.1	Configuração do início da simulação utilizada . . . . .	48
3.2	Descrição da interação entre parasitoide e hospedeiro na simulação . . . .	49
3.2.1	Parâmetros utilizados para <i>D. saccharalis</i> . . . . .	49
3.2.2	Parâmetros utilizados para <i>C. flavipes</i> . . . . .	49
3.3	Análise dos resultados . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Otimização do custo</b>	<b>71</b>
4.1	Avaliação do custo . . . . .	71
4.1.1	Custo estimado por meio do modelo Lotka-Volterra . . . . .	72
4.1.2	Custo estimado por meio da simulação multi-agentes . . . . .	77
4.2	Inferência Bayesiana . . . . .	79
4.3	Avaliação dos métodos de levantamento de praga no campo . . . . .	85
4.3.1	Eficácia do método tradicional em situação simulada . . . . .	87
4.3.2	Comparação Bayes x método tradicional . . . . .	90
4.4	Otimização de Custo . . . . .	97

4.4.1	Teste de robustez dos dados do campo usados na construção do <i>prior</i> . . . . .	97
4.4.2	Avaliação da recomendação padrão comparada com o modelo Lotka-Volterra para algumas situações específicas . . . . .	98
4.4.3	Avaliação da recomendação padrão comparada com a simulação para alguns casos específicos . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Conclusão e Considerações finais</b>	<b>107</b>

## Lista de Figuras

1.1	Produção agrícola mundial. Dados Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT, 2018). . . . .	4
1.2	Produção de cana-de-açúcar no mundo desde 1994. Dados FAOSTAT 2018. . . . .	4
1.3	Produção de cana-de-açúcar no mundo. Dados FAOSTAT 2018. . . . .	5
1.4	Dez maiores produtores de cana-de-açúcar no mundo. Dados FAOSTAT 2018. . . . .	6
1.5	Produção dos cinco maiores produtores de cana-de-açúcar no mundo. Dados FAOSTAT 2018. . . . .	6
1.6	Valor da produção Brasil e Índia. Dados FAOSTAT 2018. . . . .	7
1.7	Preço da tonelada de cana no Brasil, Índia e EUA. Dados FAOSTAT 2018. . . . .	7
1.8	Produção de cana-de-açúcar no Brasil. Dados UNICA 2018. . . . .	9
1.9	Produção de cana-de-açúcar nos estados mais produtores, sem o estado de São Paulo. Dados UNICA 2018. . . . .	9
1.10	Produção de cana-de-açúcar dos três estados mais produtores na safra 2016/2017. Dados UNICA 2018. . . . .	10
1.11	Ciclo de vida de <i>D. saccharalis</i> . Fonte: RODERO (2016) [28]. . . . .	13
1.12	Ciclo de vida de <i>C. flavipes</i> . Fonte: RODERO (2016) [28]. . . . .	18
2.1	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> e de <i>C. flavipes</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13). . . . .	30
2.2	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> e <i>C. flavipes</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) próximo ao equilíbrio. . . . .	34
2.3	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>C. flavipes</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) e na ausência de <i>D. saccharalis</i> . . . . .	38
2.4	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com 1.000 brocas inicialmente e na ausência de <i>C. flavipes</i> . . . . .	39
2.5	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com 2.500 brocas inicialmente e na ausência de <i>C. flavipes</i> . . . . .	40
2.6	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com 5.000 brocas inicialmente e na ausência de <i>C. flavipes</i> . . . . .	40
2.7	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> e de <i>C. flavipes</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 1.000 brocas e 6.000 vespas. . . . .	42

2.8	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> e de <i>C. flavipes</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 2.500 brocas e 6.000 vespas. . . . .	42
2.9	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> e de <i>C. flavipes</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 5.000 brocas e 6.000 vespas. . . . .	43
2.10	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> e de <i>C. flavipes</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 2.500 brocas e 12.000 vespas. . . . .	44
2.11	Evolução temporal do tamanho das populações de <i>D. saccharalis</i> e de <i>C. flavipes</i> de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 2.500 brocas e 18.000 vespas. . . . .	44
2.12	Plano de fases da interação entre populações de <i>D. saccharalis</i> e de <i>C. flavipes</i> com condição inicial de 2.500 brocas e 6.000 vespas. . . . .	46
2.13	Plano de fases da interação entre populações de <i>D. saccharalis</i> e de <i>C. flavipes</i> com condição inicial de 2.500 brocas e variação na quantidade inicial de vespas. . . . .	47
3.1	Descrição da simulação por meio da técnica de multi-agentes para a interação entre <i>D. saccharalis</i> e <i>C. flavipes</i> . . . . .	50
3.2	Evolução temporal da população de machos e fêmeas da broca com taxa de morte aleatória nula. . . . .	52
3.3	Evolução temporal da população de broca separada nas fases de seu ciclo de vida, com taxa de morte aleatória nula. . . . .	53
3.4	Total de diário de mortes e liberação de novos indivíduos da broca. . . . .	54
3.5	Evolução temporal da população de broca separada nas fases de seu ciclo de vida, com taxa de morte aleatória nula até os primeiros ovos inseridos inicialmente no sistema completarem seus ciclos de vida. . . . .	54
3.6	Evolução temporal da morte das brocas que morreram antes e ao completarem seus ciclos de vida com $P_d = 0,03$ . . . . .	55
3.7	Evolução temporal da população de broca separadas nas fases de seu ciclo de vida, com $P_d = 0,03$ . . . . .	56
3.8	Evolução temporal da população de <i>C. flavipes</i> separadas em machos e fêmeas com taxa de morte aleatória de 5%. . . . .	57
3.9	Evolução temporal da população de <i>C. flavipes</i> considerando os processos de morte, com $P_d = 0,05$ . . . . .	57
3.10	Evolução temporal da simulação com interação das populações de praga e parasitoides com eficiência de parasitismo $E_C = 2$ . . . . .	58

3.11	Evolução temporal da simulação com interação das populações de praga e parasitoides com eficiência de parasitismo: canto superior esquerdo $E_C = 4$ ; superior direito $E_C = 6$ ; inferior esquerdo $E_C = 8$ ; inferior direito $E_C = 10$ .	59
3.12	Evolução temporal da simulação com interação com divisão das mortes dos indivíduos de <i>C. flavipes</i> , com $E_C = 2$ .	60
3.13	Evolução temporal da simulação com divisão das mortes dos indivíduos de <i>C. flavipes</i> : canto superior esquerdo $E_C = 4$ ; superior direito $E_C = 6$ ; inferior esquerdo $E_C = 8$ ; inferior direito $E_C = 10$ .	61
3.14	Evolução temporal da simulação com interação descrevendo a população de lagartas e parasitismo, com $E_C = 2$ .	62
3.15	Evolução temporal da simulação com interação descrevendo a população de lagartas e parasitismo: canto superior esquerdo $E_C = 4$ ; superior direito $E_C = 6$ ; inferior esquerdo $E_C = 8$ ; inferior direito $E_C = 10$ .	62
3.16	Evolução temporal da simulação com interação descrevendo as mortes da população de <i>D. saccharalis</i> , com $E_C = 2$ .	63
3.17	Evolução temporal da simulação com interação descrevendo as mortes da população de <i>D. saccharalis</i> : canto superior esquerdo $E_C = 4$ ; superior direito $E_C = 6$ ; inferior esquerdo $E_C = 8$ ; inferior direito $E_C = 10$ .	64
3.18	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de <i>D. saccharalis</i> , com $E_C = 2$ .	65
3.19	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de <i>D. saccharalis</i> : canto superior esquerdo $E_C = 4$ ; superior direito $E_C = 6$ ; inferior esquerdo $E_C = 8$ ; inferior direito $E_C = 10$ .	66
3.20	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de <i>D. saccharalis</i> , com $E_C = 2$ , 1.000 brocas e 6.000 parasitoides.	67
3.21	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de <i>D. saccharalis</i> , $E_C = 2$ : canto superior esquerdo 2.500 brocas e 6.000 parasitoides; superior direito 5.000 brocas e 6.000 parasitoides; inferior esquerdo 2.500 brocas e 12.000 parasitoides; inferior direito 2.500 brocas e 18.000 parasitoides.	68
3.22	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de <i>D. saccharalis</i> , com $E_C = 10$ , 1.000 brocas e 6.000 parasitoides.	69

3.23	Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de <i>D. saccharalis</i> , $E_C = 10$ : canto superior esquerdo 2.500 brocas e 6.000 parasitoides; superior direito 5.000 brocas e 6.000 parasitoides; inferior esquerdo 2.500 brocas e 12.000 parasitoides; inferior direito 2.500 brocas e 18.000 parasitoides. . . . .	70
4.1	Variação do custo do controle alterando o dano econômico produzido pela broca, $C_{broca}$ , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos, $P_0$ , para um período de 200 dias com custo da vespa fixo, $C_{vespa} = 0,0027$ e $N_0 = 2.500$ . . . . .	73
4.2	Variação do custo do controle alterando o dano econômico produzido pela broca, $C_{broca}$ , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos, $P_0$ , para um período de 550 dias com custo da vespa fixo, $C_{vespa} = 0,0027$ e $N_0 = 2.500$ . . . . .	74
4.3	Variação do custo do controle alterando o valor da vespa, $C_{vespa}$ , em função dos parasitoides inicialmente inseridos, $P_0$ , para um período de 200 dias com dano econômico causado pela broca fixo, $C_{broca} = 0,002$ e $N_0 = 2.500$ . . . . .	75
4.4	Variação do custo do controle alterando o valor da vespa, $C_{vespa}$ , em função dos parasitoides inicialmente inseridos, $P_0$ , para um período de 550 dias com dano econômico causado pela broca fixo, $C_{broca} = 0,002$ e $N_0 = 2.500$ . . . . .	76
4.5	Resultado da simulação multi-agentes com variação do custo do controle alterando o valor do dano econômico produzido pela broca, $C_{broca}$ , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos, $P_0$ , para um período de 200 dias com custo da vespa fixo, $C_{vespa} = 0,0027$ e $N_0 = 2.000$ . . . . .	78
4.6	Resultado da simulação multi-agentes com variação do custo do controle variando o valor da vespa, $C_{vespa}$ , em função dos parasitoides inicialmente inseridos, $P_0$ , para um período de 200 dias com dano econômico causado pela broca fixo, $C_{broca} = 0,002$ e $N_0 = 2.000$ . . . . .	79
4.7	Distribuição de Poisson para $n = 1$ observados numa área $A = 120m^2$ . . . . .	81
4.8	Distribuição de Poisson para alguns levantamentos obtidos do campo, canto superior esquerdo - $n = 7$ , $A = 356m$ , superior direito - $n = 96$ , $A = 315m^2$ , inferior esquerdo - $n = 16$ , $A = 300m^2$ , inferior direito - $n = 21$ , $A = 135m^2$ . . . . .	82
4.9	Histograma dos dados mostrando as densidades de brocas encontradas no campo no ano de 2011 em cada levantamento que não apresentava presença de parasitoides, doados pela empresa SmartBio. . . . .	83

4.10	Representação logarítmica dos dados mostrando a quantidade de brocas encontradas no campo no ano de 2011 em cada levantamento sem a presença de parasitoides, doados pela empresa SmartBio. . . . .	83
4.11	Teorema de Bayes para $n = 1$ brocas observadas para uma área $A = 120m^2$ . . . . .	84
4.12	Teorema de Bayes para os levantamentos realizados no campo, canto superior esquerdo - $n = 7$ , $A = 36m^2$ , superior direito - $n = 96$ , $A = 315m^2$ , inferior esquerdo - $n = 16$ , $A = 300m^2$ , inferior direito - $n = 21$ , $A = 135m^2$ . . . . .	85
4.13	Evolução temporal da simulação utilizada para avaliação das amostragens comercial e acadêmica. . . . .	88
4.14	Histograma de 200 amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 4.3 com cinco repetições a partir do início da dinâmica. . . . .	88
4.15	Histograma de 50 amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 4.3 com cinco repetições a partir do início da dinâmica. . . . .	89
4.16	Histograma comparativo entre 200, 50 canas amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 4.3 com cinco repetições a partir do início da dinâmica e dados reais obtidos do campo. . . . .	90
4.17	Comparação dos métodos de levantamento com 50 amostras por levantamento, com barra de desvio padrão - 1.000 levantamentos realizados. . . . .	92
4.18	Dados com 50 amostras por levantamento - 1.000 levantamentos realizados separados em quartis. . . . .	92
4.19	Dados com 50 amostras por levantamento, comparando os métodos aleatório, Bayes e Bayes sem histórico - 1.000 levantamentos realizados separados em quartis. . . . .	94
4.20	Comparação dos métodos de levantamento com 200 amostras por levantamento, com barra de desvio padrão - 1.000 levantamentos realizados. . . . .	95
4.21	Dados com 200 amostras por levantamento - 1.000 levantamentos realizados separados em quartis. . . . .	96
4.22	Custo para alguns dos levantamentos realizados no campo para 200 dias com <i>priors</i> diferentes. Canto superior esquerdo - 500 primeiros levantamentos eliminados, superior direito - 300 últimos levantamentos eliminados, inferior esquerdo - 500 últimos levantamentos eliminados, inferior direito - levantamentos alternados eliminados. . . . .	98
4.23	Custo estimado através do modelo com Lotka-Volterra para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 200 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$ , $A = 120m^2$ , $\rho = 0,0083$ , superior direito - $n = 0$ , $A = 14m^2$ , $\rho = 0$ , inferior esquerdo - $n = 0$ , $A = 36m^2$ , $\rho = 0$ , inferior direito - $n = 7$ , $A = 36m^2$ , $\rho = 0,19$ . . . . .	100

4.24	Custo estimado através do modelo com Lotka-Volterra para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 550 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$ , $A = 120m^2$ , $\rho = 0,0083$ , superior direito - $n = 0$ , $A = 14m^2$ , $\rho = 0$ , inferior esquerdo - $n = 0$ , $A = 36m^2$ , $\rho = 0$ , inferior direito - $n = 7$ , $A = 36m^2$ , $\rho = 0,19$ . . . . .	101
4.25	Custo estimado através da simulação para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 50 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$ , $A = 120m^2$ , $\rho = 0,0083$ , superior direito - $n = 0$ , $A = 14m^2$ , $\rho = 0$ , inferior esquerdo - $n = 0$ , $A = 36m^2$ , $\rho = 0$ , inferior direito - $n = 7$ , $A = 36m^2$ , $\rho = 0,19$ . . . . .	104
4.26	Custo estimado através da simulação para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 200 dias. Canto superior esquerdo - $n = 1$ , $A = 120m^2$ , $\rho = 0,0083$ , superior direito - $n = 0$ , $A = 14m^2$ , $\rho = 0$ , inferior esquerdo - $n = 0$ , $A = 36m^2$ , $\rho = 0$ , inferior direito - $n = 7$ , $A = 36m^2$ , $\rho = 0,19$ . . . . .	105

# 1 Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura agrícola muito importante no Brasil, auxiliando no crescimento econômico e contribuindo para a geração de muitos empregos. No entanto, sua principal praga, *Diatraea saccharalis*, conhecida como broca-da-cana, é responsável por grandes perdas a cada safra. Seu controle é feito através do parasitoide de lagartas, *Cotesia flavipes*. Este trabalho tem por objetivos principais a descrição da dinâmica entre estas duas populações e o desenvolvimento de ferramental teórico-prático para otimizar o controle da praga, visando a redução de custos.

## 1.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma monocotiledônea pertencente à família Poaceae, gênero *Saccharum*. A nomenclatura original proposta por Linnaeus deste gênero foi revisada e hoje seis espécies compõem o mesmo: *Saccharum spontaneum*, *Saccharum robustum*, *Saccharum officinarum*, *Saccharum sinensis*, *Saccharum edule* e *Saccharum barberi*. As duas primeiras espécies são consideradas selvagens, enquanto as demais são consideradas espécies domesticadas. Entretanto, os clones atualmente cultivados são híbridos obtidos no início do século 20 entre *Saccharum spontaneum* e *Saccharum officinarum*[1].

A cana-de-açúcar é produto agrícola utilizado pelo ser humano desde a antiguidade, sendo os primeiros registros datados entre 3.000 à 3.400 anos atrás na região da Ásia [2]. Durante o século XVI, através das explorações espanholas e portuguesas, ela foi introduzida na América Latina e, particularmente no Brasil, a produção de açúcar derivado da cana foi por muito tempo uma atividade econômica de grande relevância.

No entanto, a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) em 1 de junho de 1933 através do decreto 22.789 para auxiliar a regulamentar a produção da cana pelo governo, entra como um marco dada a importância que o álcool vinha tomando. Em 1925, Henry Ford dá sua contribuição para a cultura da cana, construindo seu primeiro automóvel movido à etanol. Então em 1930 a produção de bioetanol ganha proporção industrial, quando o estado brasileiro implementa política instituindo o etanol como combustível para automóveis [3]. A cana ganhou nova importância quando o governo federal brasileiro instituiu o programa Pró-Álcool em 1973 devido à crise do petróleo que ocorria nesta década.

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de álcool e de açúcar derivado da cana, sendo responsável por mais de 50% do açúcar comercializado no mundo, de acordo com o relatório da safra 2014/2015 da Conab (Companhia Nacional de Abastecimento). Dentre os estados brasileiros, São Paulo se destaca no cultivo da cana, detendo mais de 50% das áreas cultivadas no país.

A safra 2016/2017 produziu cerca de seis 52 milhões de toneladas de cana. Deste total, a parcela destinada à produção de etanol total (anidro e hidratado) chegou a 27,254 bilhões de litros. Já a produção de açúcar atingiu 38,734 milhões de toneladas, sendo que mais de 70% dele foi originado da região sudeste [4]. É interessante notar que a cana pode chegar a ter uma produção diária de biomassa de cerca de 550 kg/ha [3].

Além da grande produção de álcool e açúcar, a cana-de-açúcar ainda produz um segundo efeito importante, que consiste na redução de gases geradores do efeito estufa liberados na atmosfera. Análises da contribuição da cana brasileira no balanço dos gases causadores do efeito estufa tem a muito tempo sido feitas.

Macedo (1998) fez uma análise da safra 96/97, onde a produção brasileira de cana estava na ordem de  $273 \times 10^6$  t de cana, e onde foram produzidos cerca de  $13,7 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de etanol, sendo 31% anidrido, direcionado a mistura na gasolina, e o restante vendido na forma hidratada. Nesta mesma safra também foram produzidas cerca de  $13,4 \times 10^6$  t de açúcar. Neste estudo, o aumento da produtividade da cana, comparado com os 10 anos anteriores, é destacado como um ponto positivo, sendo a média nacional de 80,4t/ha um pouco maior que a anterior de 78t/ha, ambas considerando canas com possibilidade de cinco cortes. É destacada como forma de redução das emissões a evolução das tecnologias de transporte, porém tendo um aumento no consumo de combustíveis fósseis devido a utilização de colheita mecanizada, sendo na época de cerca de 20%. O avanço das tecnologias de recuperação de etanol também são destacadas, tendo gerado um crescimento de 73 l etanol/t sido elevado para 85,4 l etanol/t no período comparado. A produção de etanol gera, através da substituição da gasolina pelo etanol, uma redução de cerca de  $9,13 \times 10^6$  t/ano de  $CO_2$ .

Um outro ponto destacado foi a utilização do bagaço para a cogeração de energia elétrica nas usinas, fazendo estas ficarem sustentáveis e independentes das redes de geração tradicional. No entanto, a queima do canavial antes da colheita entra neste estudo como ponto negativo, porém seu impacto é estimado como contribuindo com cerca de 6,5 kg metano/ha. Ao final das análises, o balanço de  $CO_2$  é estimado como tendo evitado a emissão de  $46,7 \times 10^6$  t/ano, o que em 1998 representava 20% das emissões deste gás através de combustíveis fósseis no país [5].

Um ponto importante a ser notado é a transição da colheita manual de cana queimada para a colheita mecânica. No processo de queima, cerca de 30,3% dos gases emitidos pela cultura da cana eram devido à queima, em estimativas realizadas em 2012, seguido por 29,6% resultantes de aplicações de fertilizantes [6]. Já na colheita mecânica são estimados que os maiores contribuintes para os gases estufa na cultura da cana são o uso de fertilizantes sintéticos e diesel, com cerca de 42 e 33% de participação respectivamente.

Além da não liberação dos gases prejudiciais ao ambiente através da queima, evitar a

queima da cana ainda permite retorno de material orgânico para o solo, o que também melhora a qualidade deste. No processo de colheita mecanizada sem queima, é estimado um sequestro pelo solo de cerca de 1.173 kg de  $CO_2$ /ha anualmente[6]. O manejo adequado dos fertilizantes, redução das áreas queimadas para facilitar a colheita, combustíveis fósseis usados para o transporte entre distâncias pequenas são alguns aspectos que colocam o cenário brasileiro de emissões de gases estufa como sendo melhor do que países que também produzem cana [7].

Apesar da indústria da cana-de-açúcar ser uma atividade que movimenta muitos recursos no Brasil, dentre os trabalhos aplicados ao controle de suas pragas, poucos apresentam parâmetros que tenham sido testados em condições de campo, descrevendo satisfatoriamente a dinâmica da interação. O modelo de Ambrosano et al.[8] é um dos poucos em que o valor de cada parâmetro utilizado é obtido em condição de laboratório e campo para a interação entre a broca e *C. flavipes*, um de seus parasitoides naturais originalmente importado de Trinidad Tobago.

Em outras regiões do mundo, pragas diferentes da cana-de-açúcar são mais destrutivas e, para a África do Sul foram encontrados modelos matemáticos validados com dados obtidos nas propriedades da região [9]. É possível encontrar outros modelos matemáticos que têm como motivação o controle de pragas, mas que não são validados com dados de campo e sim, através de simulação [10, 11, 12, 13, 14, 15].

Existe, no entanto, uma enorme quantidade de estudos empíricos testando a eficácia do controle biológico nas suas mais diversas formas. Podem ser aqui citados como exemplos métodos de controle integrando mais de um parasitoide [16], utilização de fungos [17], eficiência da razão sexual de liberação da *C. flavipes* [18], combinação do parasita e bactérias [19], entre outros.

### **1.1.1 Produção mundial**

A cana-de-açúcar é um produto agrícola muito importante economicamente. Sua produção é expressiva, como pode ser visto na figura 1.1, estando atrás apenas da produção de cereais. Nos últimos 20 anos a produção de cana quase que dobrou, onde pode-se observar na figura 1.2 que a área plantada tem praticamente acompanhado esta ampliação. No entanto, a partir do ano de 2005 pode-se ver que o crescimento da produção mundial teve um aumento maior do que a área plantada, o que retrata uma melhora nas técnicas usadas nesta cultura, e esta tendência tem se mantido desde então.

A produção mundial da cana-de-açúcar está espalhada por quase todos os continentes, com exceção do europeu, onde a cana não encontra um clima favorável ao seu crescimento e a contribuição para a produção é praticamente nula.

A Oceania também apresenta uma produção bem pequena, sendo que neste continente

a Austrália se destaca como o maior produtor, tendo ao longo dos anos sido um dos cinco maiores produtores mundiais. No entanto, a maior parte da produção é encontrada nos continentes Asiático e Americano, como pode-se observar na figura 1.3.



Figura 1.1: Produção agrícola mundial. Dados Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT, 2018).

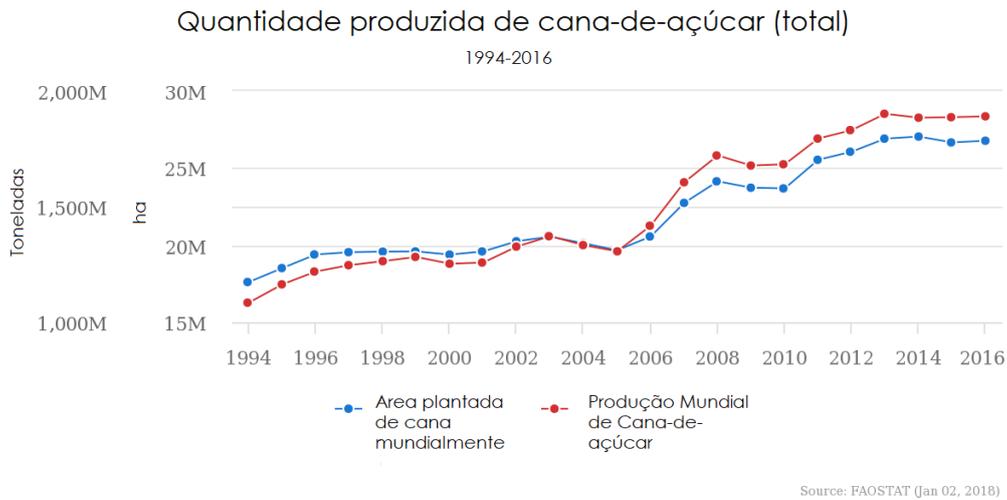


Figura 1.2: Produção de cana-de-açúcar no mundo desde 1994. Dados FAOSTAT 2018.

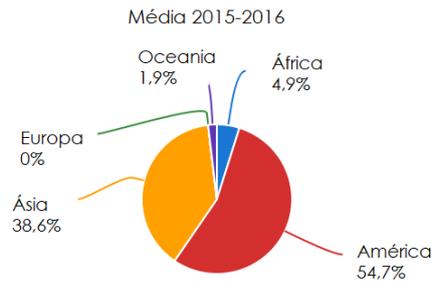


Figura 1.3: Produção de cana-de-açúcar no mundo. Dados FAOSTAT 2018.

Entre os países que mais se destacam, pode-se observar na figura 1.4 que o Brasil é de longe o maior produtor. mesmo combinando a cana gerada por Índia e China, detentores da segunda e terceira posição respectivamente, o total brasileiro ainda é maior. Os outros grandes produtores do continente americano são México, Colômbia, Guatemala e EUA, no entanto com uma participação muito pequena quando combinados ao comparar-se com a produção brasileira.

No entanto este fenômeno não foi sempre assim. Como pode-se ver na figura 1.5, no início do milênio a produção brasileira e indiana eram quase idênticas. No entanto a partir do ano 200 cinco o crescimento na produção nacional, que já acontecia de forma contínua, aumentou substancialmente. Este crescimento gerou um impacto na produção mundial notável, como pode ser visto na figura 1.2 a partir deste ano.

Comparada à produção brasileira, o que pode-se observar é que o crescimento na produção dos outros países tem sido relativamente baixo ao longo do tempo, com exceção da Índia. No período considerado na figura 1.5, este foi o único país que obteve ligeiro aumento entre 200 5-07 e entre 2011-13. Porém o primeiro crescimento na produção não foi associado a um aumento nos lucros, como aconteceu neste segundo período, onde a diminuição no valor arrecadado por tonelada afetou o rendimento final deste país, o que pode ser visto na figura 1.6. pode-se observar que o Brasil, no entanto, apresentou no período avaliado aumento na produção da cana acompanhado também pelo retorno financeiro gerado pela venda desta. Vale ressaltar que, ao observarmos a figura 1.7 vemos o preço da tonelada da cana produzida nos EUA sendo consideravelmente maior que o obtido pela cana brasileira e indiana.

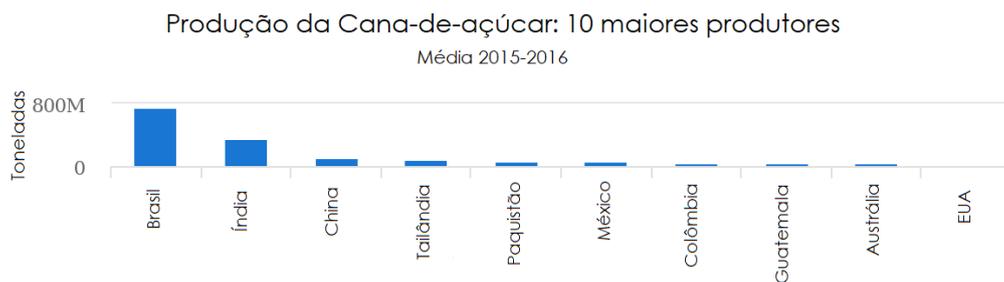


Figura 1.4: Dez maiores produtores de cana-de-açúcar no mundo. Dados FAOSTAT 2018.

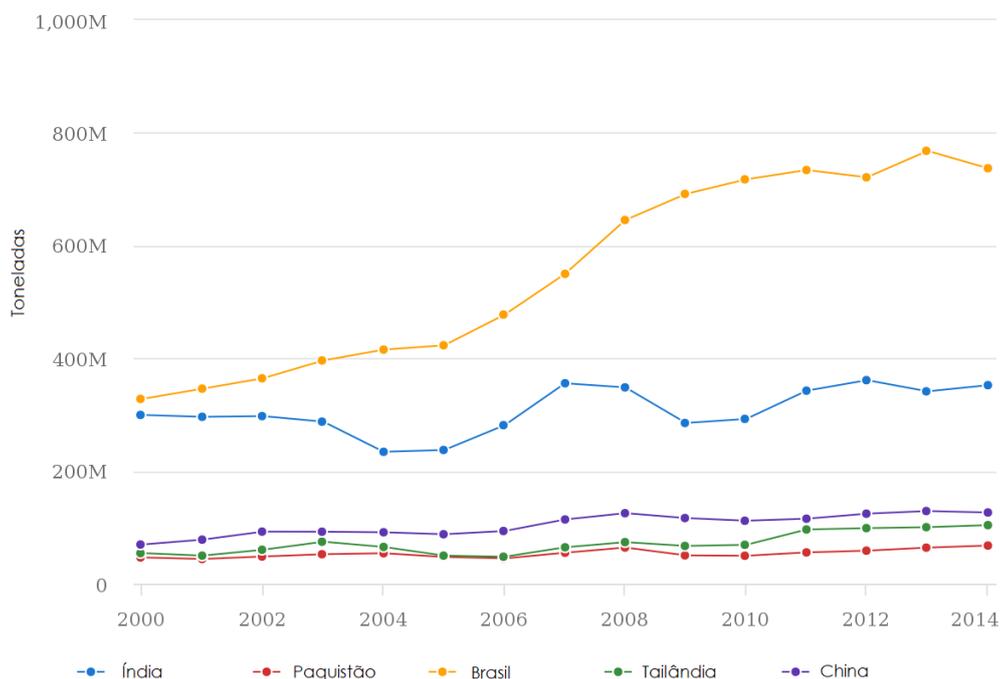


Figura 1.5: Produção dos cinco maiores produtores de cana-de-açúcar no mundo. Dados FAOSTAT 2018.

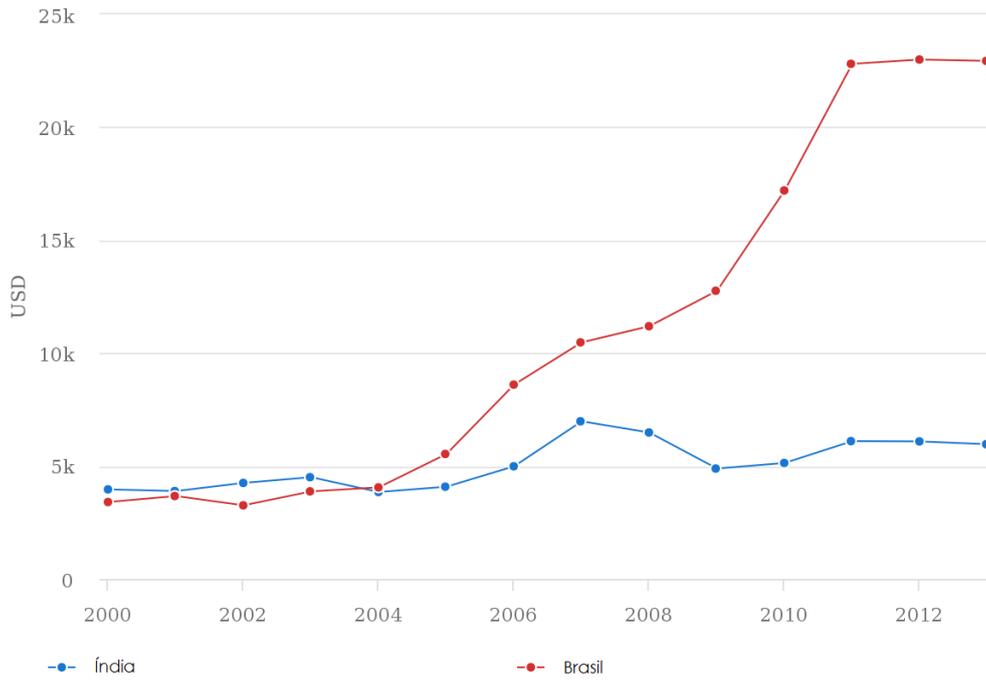


Figura 1.6: Valor da produção Brasil e Índia. Dados FAOSTAT 2018.

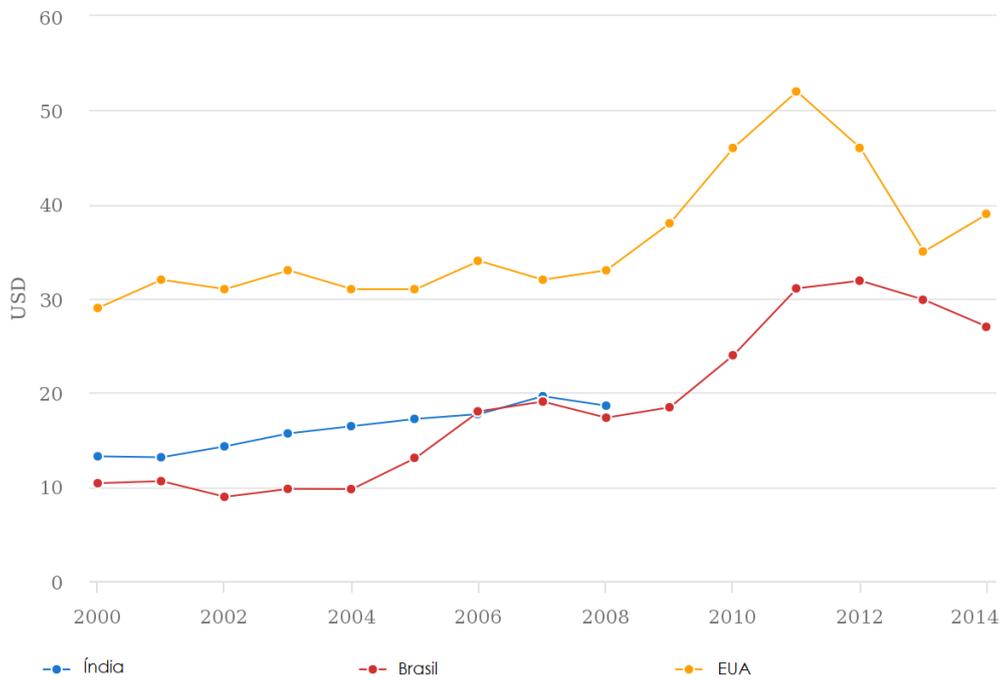


Figura 1.7: Preço da tonelada de cana no Brasil, Índia e EUA. Dados FAOSTAT 2018.

### 1.1.2 Produção nacional

Dentro do Brasil a produção de cana-de-açúcar está principalmente concentrada na região Sudeste, onde o estado de São Paulo se destaca. Uma das principais entidades que registram a produção nacional é a UNICA (União da Indústria de cana-de-açúcar), sendo possível encontrar dados desde 1981 até os dias de hoje de diferentes parâmetros, como a produção, por exemplo.

pode-se observar pela figura 1.8 um histórico da evolução da cana dividido por regiões. A produção nacional de cana em 1981 foi de cerca de 124 milhões toneladas, sendo 83 milhões de toneladas produzidas na região Centro-Sul e 40 milhões de toneladas na região Norte-Nordeste. Entre os estados produtores, São Paulo se destacava como o maior produtor, sendo responsável por 66 mil de toneladas de cana, seguido dos estados de Alagoas com 18 milhões de toneladas e Pernambuco com 17 milhões de toneladas, o que pode ser visto através das figuras 1.9 e 1.10.

É interessante notar que estes estados do nordeste que se apresentavam nas segunda e terceira posições em 1981, na safra 2016/2017 tinham uma produção de 16 milhões de toneladas e 12 milhões de toneladas, respectivamente, enquanto São Paulo apresentou uma produção de 366 milhões de toneladas.

Este grande crescimento em produção também se repetiu em vários estados da região Centro-Sul, onde Goiás apresenta uma produção de 68 milhões de toneladas e Minas Gerais 64 milhões de toneladas, o que lhes confere a segunda e terceira posição em produção nacional de cana.

Curiosamente em 1981, Goiás estava entre os estados com menor produção, com cerca de 300 mil de toneladas enquanto Minas Gerais era o cinco maior produtor, com uma produção de seis milhões de toneladas. É interessante notar também que foi estimado em cerca de 3,56 milhões os trabalhadores empregados direta ou indiretamente no cultivo e produção da cana na safra de 2013/2014, sendo assim um importante mercado empregador da população brasileira [20].

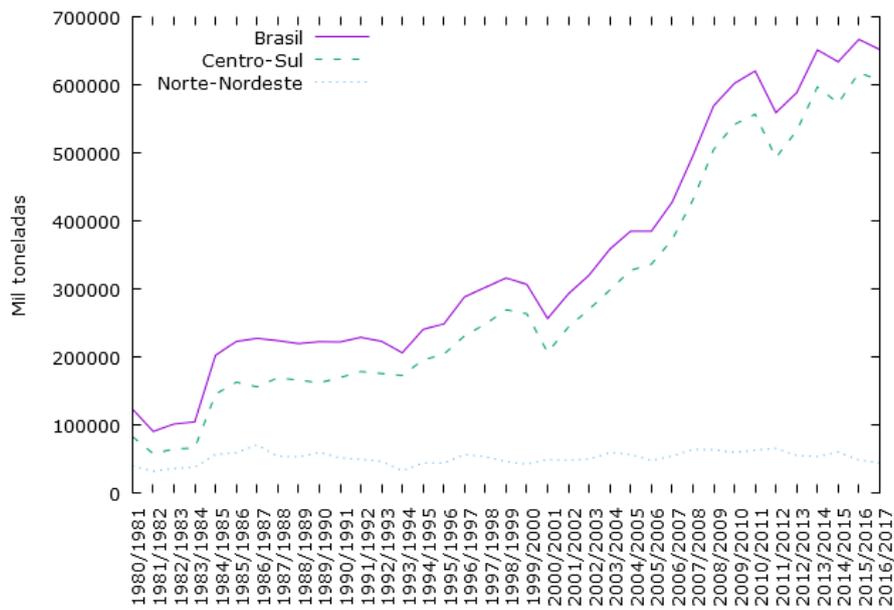


Figura 1.8: Produção de cana-de-açúcar no Brasil. Dados UNICA 2018.

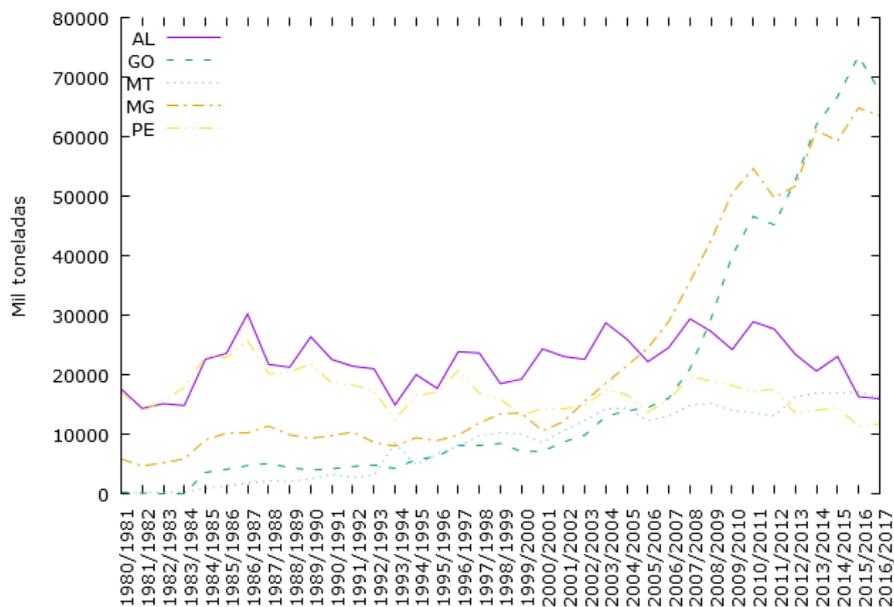


Figura 1.9: Produção de cana-de-açúcar nos estados mais produtores, sem o estado de São Paulo. Dados UNICA 2018.

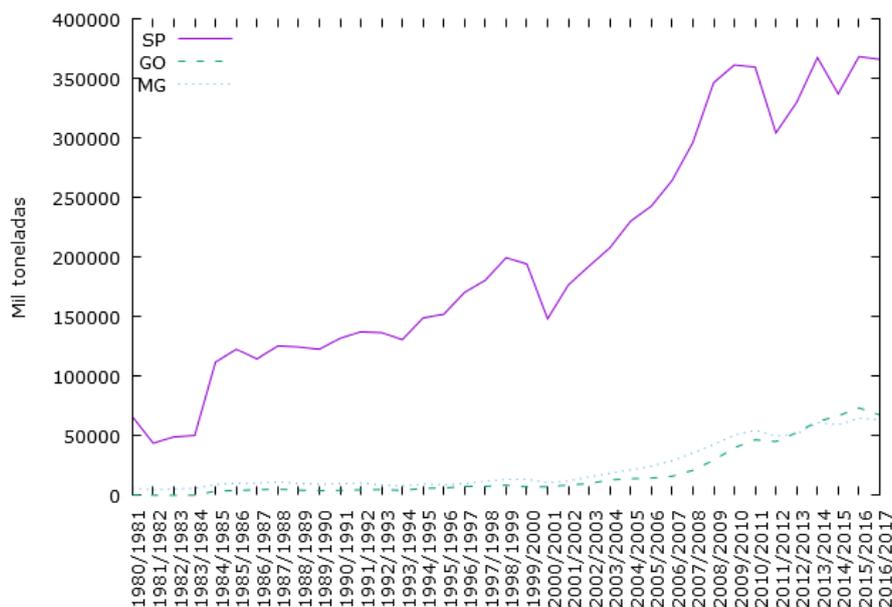


Figura 1.10: Produção de cana-de-açúcar dos três estados mais produtores na safra 2016/2017. Dados UNICA 2018.

## 1.2 Biocombustível

O bioetanol é uma fonte de energia renovável e pode ser obtido através de vários cultivos agrícolas ao se realizar a fermentação dos açúcares presentes. As principais fontes de bioetanol são a cana-de-açúcar, sorgo, beterraba e milho. O Brasil entra nesse contexto como o principal produtor de etanol proveniente da cana. O modelo de produção brasileiro apresenta preço de produção aceitável economicamente e baixa emissão de gases que contribuem para o efeito estufa. Este modelo é beneficiado graças principalmente ao clima brasileiro, que favorece o crescimento dessa cultura agrícola [21].

A história do etanol combustível no Brasil está intrinsecamente ligada ao conflito entre Israel-Palestina em outubro de 1973, conhecido como guerra do Yom Kippur. Neste conflito, Egito e Síria cruzaram a linha de cessar-fogo no Sinai nas colinas de Golã durante o feriado judaico de Yom Kippur. Como era de se esperar, as duas superpotências da época, EUA e URSS defenderam seus aliados, Israel e países árabes, respectivamente. Isto fez com que a OPAEP (Organização dos Países Árabes Exportadores de Petróleo) impusesse um embargo aos EUA e seus aliados, fazendo o preço do barril quadruplicar nessa década, dando origem à crise do petróleo de 1973 [22]. Com o embargo, o Brasil, que não era um produtor significativo de petróleo no cenário mundial, teve graves problemas devido à sua dependência de importação de combustíveis fósseis.

Nesta época as importações de petróleo no Brasil eram realizadas com dinheiro em-

prestado, o que levou a uma crise econômica nacional no início dos anos 80 [23]. É nesse cenário que em 14 de novembro de 1975 entra em vigor o Decreto 76.593 que institui o Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool). Entre as principais medidas presentes neste decreto, é importante ressaltar, o estímulo à produção de matéria prima, modernização das indústrias de etanol, subsídios para compra e adição de etanol à gasolina [24]. Nesse cenário surgem os primeiros carros completamente movidos a álcool vendidos comercialmente, o que ocorre em 1978 [3]. Porém, é em 2003 que surgem os carros flex, que podem então ser movidos tanto a álcool quanto a gasolina em qualquer proporção. Este fato contribui então para o aumento na produção da cana brasileira apresentado na figura 1.5.

Além da cana-de-açúcar, outras culturas agrícolas podem também gerar etanol, porém entre as opções disponíveis, a cana é a mais interessante para regiões tropicais, gerando etanol com custo de cerca de três vezes menor que a cultura de beterraba e duas vezes menor que o etanol de sorgo [3].

Entre as características desejáveis numa planta destinada à produção de etanol, crescimento rápido com o menor ciclo até a colheita possível e quantidade grande de biomassa utilizável são destacadas. Nos tempos atuais, plantas que façam com que a balança de carbono fique positiva se apresentam como almejavéis, ao considerar os gases retirados e o que é eliminado para o ambiente.

O Brasil, possuindo uma indústria para a cana-de-açúcar muito desenvolvida, tem o bioetanol produzido da forma mais eficiente atualmente. Entre os anos de 1980 e 1998 a produtividade da cana subiu de 73 para 90 t/ha anualmente ao mesmo tempo que a eficiência de extração dos açúcares da cana subiu de 90 para 96% e a fermentação de 84 para cerca de 91%[3].

No entanto existe ainda muito potencial para crescimento da eficiência na produção de etanol, principalmente ao se levar em consideração que apenas 1/3 da fermentação vem dos açúcares solúveis, enquanto 2/3 são mantidos nas biomassas do bagaço e folhas da cana, um processo que gera combustível conhecido como etanol de segunda geração.

Contudo, melhorias nos aspectos biológicos da cana já mostram resultados muito importantes, tendo aumentado a produtividade do bioetanol em cerca de 100% entre os anos de 1980 e 2005. Entre elas se destacam as canas mais resistentes a pragas e doenças, bem como maior produtividade devido a tolerância à secas, uniformidade das plantas e velocidade de crescimento [3].

Utilizando o etanol como matéria prima, o Brasil ainda apresenta o bioplástico, material 100% reciclável. Na safra 2013/2014 este material movimentou cerca de US\$ 300 milhões, sendo estimada a produção em cerca de 120 mil toneladas com preço médio de US\$ 2,50 por quilo. Do total de vendas, 30% ficaram no mercado brasileiro enquanto

70% foi destinada ao mercado externo [20].

### 1.3 Broca-da-cana

De acordo com Shoemaker [25], pragas são grupos de seres que estão em competição direta com o ser humano. A cana-de-açúcar, como a maioria das grandes culturas agrícolas, apresentam várias pragas e doenças, sendo que no caso da cana, pode-se elencar a broca-da-cana (*D. saccharalis*), como a mais importante no Brasil, pois é capaz de causar danos diretos e indiretos à cana. Outras pragas são também encontradas, mas consideradas pragas secundárias, por causarem menos danos que a broca.

*D. saccharalis* é um inseto de desenvolvimento holometabólico, ou seja, passa pelas fases de ovo, larva, pupa e adulto. O ciclo de vida de *D. saccharalis* pode ser visto na figura 1.11. O adulto da broca é uma mariposa com capacidade de gerar, a cada postura, entre cinco e 50 ovos, preferencialmente na parte dorsal das folhas da cana.

Após quatro a nove dias as lagartas recém-nascidas eclodem dos ovos, alimentando-se inicialmente das folhas. A seguir, a lagarta se desloca para regiões mais baixas na cana em busca de abrigo. Nesta região a broca se alimenta da raspagem das folhas ou casca do entrenó em formação durante a primeira ou até segunda semana nesta fase. Posteriormente, após a primeira ou segunda troca de pele (ecdise), penetram pela parte mais mole do colmo da cana, formando galerias internas de baixo para cima.

Durante a fase larval, que dura cerca de 40 dias após a eclosão, pode chegar a atingir de 22 à 25 mm de comprimento. Esta fase pode apresentar até seis instares, sendo a fase mais longa do ciclo de vida da broca, muito influenciada pela temperatura ambiente que pode abreviar um pouco em épocas com clima favorável ou alongá-la caso a broca seja sujeita à intempéries.

A fase seguinte, de pupa, dura entre nove e 14 dias, após os quais emerge a mariposa adulta que vive em torno de cinco dias. Esta fase começa com a lagarta abrindo um orifício na casca e conseguinte oclusão do mesmo através de fios de seda e restos de alimentações realizadas, formando então o casulo. Durante a vida adulta acontece o acasalamento e postura de ovos das fêmeas.

O ciclo de vida completo se dá, em média, entre 53 e 60 dias, podendo ter quatro gerações anuais e, a depender das condições, chegando a ter cinco gerações. Entretanto, na última geração, na época das secas que se dá entre maio e agosto, a lagarta pode ficar viva dentro do colmo por cinco ou seis meses [26]. As variações na velocidade nos ciclos de vida dos indivíduos funcionam então como um mecanismo de autodefesa, defendendo a população de situações adversas que podem acometer alguma das fases,

como a presença de parasitoides <sup>1</sup> que atuam nas fases de ovos, *Trichogramma galloi*, ou a *C. flavipes*, que atua somente na fase de lagarta [27].

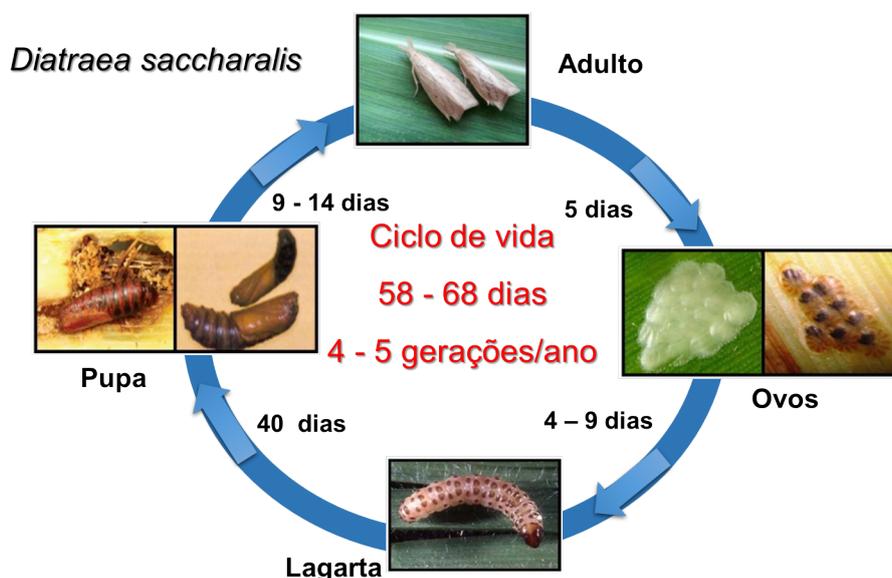


Figura 1.11: Ciclo de vida de *D. saccharalis*. Fonte: RODERO (2016) [28].

### 1.3.1 Prejuízos da broca-da-cana

Os prejuízos da broca são contabilizados através do cálculo do Índice de Infestação (II), obtido através de processo de amostragem no campo onde são contabilizados os entrenós da cana brocados, dividindo esta quantidade pelo número total de entrenós examinados. Devido às condições climáticas favoráveis do país a *D. saccharalis* encontra um ambiente favorável ao seu desenvolvimento, prejudicando o rendimento da cana. Estima-se que a cada 1% de II, ocorre uma perda de 0,49% na produção de açúcar e 0,28% na produção de álcool [67].

A broca-da-cana pode provocar danos diretos bem como possibilitar danos indiretos. Os danos diretos ocorrem na fase de lagarta, que ao abrirem galerias nos colmos causam perda de peso da cana e podem levar à morte das gemas, ocasionando falhas na germinação. Caso a lagarta faça galerias transversais, o vento pode levar a cana a se quebrar e tombar. Nas plantas novas as lagartas podem ainda produzir o secamento dos ponteiros, gerando a morte da gema, também conhecido por coração morto.

Os danos indiretos que a broca produz são causados por fungos que se aproveitam das galerias abertas para penetrar na planta. Isto gera a podridão vermelha do colmo, que pode abranger toda a região das diversas galerias. microrganismos que se aproveitam das gale-

<sup>1</sup> parasitoide é o nomenclatura utilizada para designar os parasitos que exigem um único hospedeiro para completar seu desenvolvimento, o que leva à morte deste último.

rias podem ainda concorrer com as leveduras responsáveis pela fermentação, destinadas à produção de álcool e diminuir sua qualidade [26].

### 1.3.2 Métodos de controle

Plant e mangel [29] relatam que existem três formas de controle de pragas disponíveis para o agricultor: controle químico, biológico e cultural. Entre os métodos químico e biológico, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, através do Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários (AGROFIT) revela que existem 49 produtos cadastrados para o controle de *D. saccharalis* na cana-de-açúcar [30], sendo destes 32 agroquímicos e 17 agentes biológicos (11 *C. flavipes*, três *T. galloi*, três *Bacillus thuringiensis*).

A forma mais comum de controle de pragas é o uso de pesticidas de amplo alcance com pouca especificidade [25]. Este método é barato e de fácil acesso, mas prejudica em grande escala o meio ambiente, destruindo inimigos naturais da praga, contaminando o solo e fontes de água e muitas vezes intoxicando até os próprios responsáveis pela aplicação de forma direta, dentre outros prejuízos. Inseticidas específicos podem também ser utilizados, entretanto são mais caros, e no seu desenvolvimento exigem mais tempo para pesquisas e produção. Essas características diminuem muito o interesse dos agricultores em utilizá-los, e acabam majoritariamente optando pelo método mais barato disponível.

Os pesticidas não específicos, como vários produtos industriais, apresentam algumas mercadorias mais populares, mas utilizar poucas variedades de pesticidas com frequência leva à seleção de linhagens resistentes de pragas, o que pode anular o efeito de controle. Além disso, muitas pragas consideradas secundárias, com a morte de seus predadores pelo uso destes produtos químicos, tornam-se relevantes, trazendo grandes prejuízos às plantações.

No ano de 2017, o setor de agroquímicos gerou um balanço de 9,6 bilhões de dólares no Brasil, o que significou uma redução de 21, 56% comparado com 2014 [31]. Em geral a queda é atribuída a desvalorização do real frente ao dólar, contrabando de pesticidas, dificuldade de obtenção de linhas de crédito rural. As culturas que mais utilizam os produtos químicos no Brasil são soja, cana, milho e algodoeira, respectivamente. Dentre estes, a soja é responsável por 52% da movimentação dos produtos químicos e a cana por 10%. Já os estados que mais fazem uso dos produtos químicos são o Mato Grosso, com 23% do mercado, seguido por São Paulo com 13%.

Entre os defensivos químicos na cultura da cana na safra 2013/2014, o que movimentou cerca de US\$ 1,24 bilhão, seis 5% do faturamento dos produtos comercializados foi através de herbicidas, seguido por 30% de inseticidas, 1% de fungicidas e 4% de outros produtos [20]. Para o controle químico na broca-da-cana os pesticidas mais utilizados no Brasil pertencem aos seguintes grupos químicos: antralinamida, benzoiluréia, diacilhi-

drazina, metilcarbamato de benzofuralina, neonicotinóides, pirazol e piretróide [30]. No entanto, o uso dos inseticidas nas grandes áreas de plantações de cana trazem prejuízos tanto à insetos benéficos [32], quanto a saúde humana [33, 34].

Além dos pesticidas, o controle biológico, definido como o conjunto de técnicas que utilizam outros organismos para controlar uma praga [25], também é encontrado no Brasil, especialmente na cultura de cana-de-açúcar. Este controle pode ser feito usando predadores, parasitoides, liberação de indivíduos estéreis, feromônios, entre outros agentes biológicos.

O uso de populações de predadores para controle de pragas é amplamente estudado e considerado um meio eficaz. Uma grande vantagem do uso de predadores é que estes reagem com o tamanho da população da praga, aumentando sua resposta automaticamente com o aumento da quantidade de presas. Outra grande vantagem está na possibilidade de encontrar estados de equilíbrio entre a praga e a população de predadores para que os danos causados sejam mínimos e sem a necessidade de reaplicação de novos predadores.

Entre os predadores que podem ser usados na cana formigas *Solenopsis* spp. foram testadas no controle de *D. saccharalis*. Seu uso se mostrou economicamente viável, mas devido ao baixo índice de infestação da broca nos lugares testados, as formigas não se mostraram capazes de reduzir a praga comparando com o grupo controle [35].

Outra técnica de controle biológico é a liberação de indivíduos estéreis, que consiste em inundar o ambiente com uma proporção grande de indivíduos que não podem se reproduzir, normalmente 10 vezes maior que a de indivíduos férteis, que entrarão em competição intraespecífica pelos recursos naturais disponíveis [9, 36, 37]. Essa técnica é, particularmente, efetiva para o controle de populações onde as fêmeas copulam uma única vez na vida, já que a chance de encontrar um macho infértil para a cópula é maior do que encontrar um fértil. É importante notar que o controle total da praga não se dá rapidamente com essa técnica, sendo necessárias muitas vezes novas aplicações de indivíduos estéreis até que a praga seja erradicada. Ela foi responsável pela erradicação da *Cochliomyia hominivorax* dos EUA, México, América Central e Líbia [39].

Entre os parasitoides, um com grande destaque é o *Trichogramma galloi*, que é uma pequena vespa que ocorre naturalmente no Brasil e parasita os ovos de *D. saccharalis* [40]. Esta vespa é especialmente eficaz em áreas com baixa predação de ovos da broca, podendo então ser associada com parasitoides de lagartas para uma maior eficácia.

Em 1999 foi testada a associação de *T. galloi* com *C. flavipes*, sendo realizadas liberações múltiplas de *T. galloi*, cada uma com 200 mil indivíduos associados a seis mil indivíduos de *C. flavipes*. Essa associação conseguiu ser cerca de 60% mais efetiva que o grupo não tratado e 3,7 vezes mais eficiente que o tratamento convencional [16]. Vale ressaltar que em 2009 os custos por hectare com controle químico, com *T. galloi* e com

*C. flavipes* eram de R\$ 45,00; R\$ 36,00; R\$ 15,00 respectivamente [41].

Existe também uma grande dificuldade de utilização de *T. galloi* por conta reduzido número de laboratórios produtores, que para a *C. flavipes* é de 11 empresas, comparada com três laboratórios registrados para produção de *T. galloi* [30].

A indústria do controle biológico destinada às pragas da cana movimentou na safra 2013/2014 cerca de US\$ 26,67 milhões, sendo o uso de *C. flavipes* responsável por cerca de 27% do faturamento, o fungo *metarbizium anisopliae* 63% e os outros produtos biológicos usados na cana com os 10% restantes [20].

Por fim, os métodos de controle cultural se utilizam das características da plantação para combater pragas. Esse controle pode se dar através da rotação de plantações, onde alterna-se o cultivo de culturas com pragas em potencial diferentes, tendo como objetivo evitar que alguma praga consiga se instalar no ambiente permanentemente.

Outro método de controle cultural é feito ao se escolher a época da colheita, tendo em vista que as pragas podem ter uma época do ano que são mais destrutivas. Dessa forma, o agricultor evita que a praga tenha acesso à plantação durante o período em que causa mais danos. É possível também considerar a destruição direta das pestes, como no caso do extermínio de insetos por meios físicos.

Na cana os métodos de controle cultural se constituem da escolha da época de plantio e colheita, bem como escolha de variedades resistentes a pragas e a rotação com culturas menos susceptíveis as pragas da cana, tais como hortaliças, amendoim e outras leguminosas [42, 43]. Outros métodos menos utilizados incluem a inundação dos campos por 48h bem como a queima dos resíduos, ambos após a colheita [44].

No Brasil, a queima da cana vem sendo substituída pela colheita mecanizada, sendo que no Estado de São Paulo existe legislação sobre a substituição gradual da queima pela colheita mecanizada, apresentando por limite o ano de 2031 [45]. No entanto, de forma voluntária, os produtores se propuseram a realizar esta transição já em 2017, recebendo assim o certificado emitido pelo estado de “etanol verde” [46].

## 1.4 *Cotesia flavipes*

Para o caso específico da cana-de-açúcar e sua praga mais relevante, o método de controle mais utilizado é o biológico, dentre os quais, com o uso do parasitoide de lagartas *C. flavipes*, originário da Ásia, é o mais encontrado no Brasil [47, 48].

*C. flavipes* é um endoparasitoide larval gregário, o que significa que as fêmeas depositam múltiplos ovos dentro das larvas hospedeiras, os quais se desenvolvem dentro das mesmas. É um inseto que apresenta desenvolvimento holometabólico, passando então pelas fases de ovo, larva, pupa e adulto, com ciclo de vida em torno de 20 dias, dependendo

da temperatura e idade do hospedeiro, que pode ser observado na figura 1.12.

Os machos de *C. flavipes* são gerados por partenogênese, sendo um inseto haplóide, já que nascem de ovos não fertilizados. As fêmeas por sua vez, são geradas de ovos fertilizados, onde a cópula é bastante influenciada pela presença de luz forte.

Após ocorrer a oviposição, em até quatro dias a larva eclodirá e a partir de então, num período entre quatro e 12 dias passará por três instares, onde chegará a medir três mm de comprimento. Quando atinge o 3º instar, a larva permanece no hospedeiro por mais um ou duas dias e então emerge deste, começando o processo onde formará a pupa, protegida por um casulo construído com fios de seda.

Em geral, os insetos advindos de uma mesma lagarta se agrupam formando uma massa. Esta fase é sensível à temperatura, fazendo com que sua duração aumente quando mantida no frio. Após se transformar num adulto, a vespa pode sobreviver por cerca de 24 h em condições de laboratório. O adulto irá então procurar o hospedeiro através de seu sistema de localização mediado por uma substância presente nas fezes da lagarta, sendo seu alcance cerca de três cinco m [27]. Este alcance foi reavaliado em 2014 por HAROLDO et al. [51] onde encontraram que fêmeas estavam voando cerca de 18m enquanto machos conseguiam percorrer cerca de 22m. Porém o parasitismo decrescia para mais de 50% após 10m do ponto de liberação do parasitoide.

A substância presente nas fezes de *D. saccharalis* é solúvel em água e faz com que a vespa, ao entrar em contato com as fezes diminua sua locomoção e apresente palpitação destas com sua antena. No entanto, se as fezes não são frescas, a resposta da vespa à substância não é iniciada. Porém, ao se reidratar as fezes a atratividade nas vespas é reativada [49].

É importante observar que a *C. flavipes* apresenta maior atração pelas fezes de *D. saccharalis* quando existe opção entre esta e a *Sorghum halepense* [49]. A própria planta infestada pode também apresentar voláteis atrativos à *C. flavipes*, incluindo folhas sadias de plantas infectadas, como no estudo realizado em milho por Potting et al (1995) [50].



Figura 1.12: Ciclo de vida de *C. flavipes*. Fonte: RODERO (2016) [28].

A qualidade dos insetos encontrados comercialmente pode variar bastante, podendo ser os fatores influenciadores a diferença nos ingredientes da dieta, quantidade de insetos por placa de Petri, temperatura do ambiente, escolha dos parasitoides mantidos no laboratório para procriação, entre outros. Variações nesses fatores podem aumentar os lucros dos laboratórios que produzem as vespas, porém a qualidade destas pode cair drasticamente, causando diferenças nas quantidades de indivíduos gerados, alterações na razão entre os sexos e duração do ciclo de vida dos insetos.

Cenários com grande maioria de fêmeas (acima de 60% da população), alta mobilidade e ciclo de vida curtos apresentam-se como desejáveis [52]. Ao escolher dietas para os hospedeiros baseada em grandes quantidades de germe de trigo, seus ciclos de vida são acelerados e os parasitoides obtidos posteriormente apresentam maior longevidade [53]. É importante observar que ao escolher lagartas grandes para a produção de parasitoides, maiores quantidades de vespas são obtidas [53].

Uma característica importante a ser avaliada na produção de *C. flavipes* é a presença de doenças nos hospedeiros utilizados. No estudo de Simões et al. (2012) [54] foi observado que o patógeno *Nosema* sp., que infecta colônias de broca são transmitidos à vespas no processo de parasitismo. Estas por sua vez podem então transmitir o patógeno para *D. saccharalis*.

Brocas altamente infectadas não podem suportar o parasitismo, porém ao ser infectada com *C. flavipes*, esta exibe aumento na duração das fases larval e de pupa, diminuição na longevidade da fase de adulto, bem como quantidade de prole gerados[54]. Além de patógenos, características de controle cultural, como queimadas, bem como a liberação de

espécies competidoras para o controle de *D. saccharalis* [55] também podem influenciar negativamente o parasitismo [56].

Entre as técnicas de liberação, destaca-se a liberação de adultos recém emergidos, onde aguarda-se até que 80% da população tenha emergido ainda no laboratório, anteriormente à aplicação no campo. A liberação no campo é então realizada em pontos distando cerca de 50 - 60 m um do outro. Isto é feito levando em consideração o alcance da vespa de cerca de 34 m. Entretanto, Santos e mihsfeldt (2014) observaram que o alcance de *C. flavipes* pode ter caído para 10 m. Esta observação foi feita através de experimento em laboratório, onde 80 entrenós brocados artificialmente foram colocados distando cinco m entre eles a cada avaliação e 2.000 vespas liberadas a partir de 24h após a emergência dos adultos [57].

Resultado similar de redução no alcance das vespas foi observado por Haroldo et. al. (2014). Neste trabalho, 1.000 entrenós brocados foram liberados no campo, agrupados em grupos de 10 entrenós por ponto distando cerca de 10 m uns dos outros. Foi observado que apesar do alcance ter atingido 25 m, o parasitismo só era eficaz até 10 m do ponto de liberação. Esta variação no alcance quando comparado com os primeiros estudos é apontada como sendo resultado de isolamento reprodutivo que ocorre nos laboratórios produtores [51].

No entanto, outras técnicas como a liberação massal são possíveis, porém, podem sofrer predação [58]. Em condições de laboratório foi também avaliada a influência da idade de *C. flavipes* no parasitismo e observado que indivíduos com até 24 h de idade apresentam-se melhores, porém o parasitismo pode ocorrer com vespas de até 120 h de idade [57].

No continente americano, a primeira tentativa de introdução de *C. flavipes* foi feita em Trinidad, no Caribe, porém sem sucesso [59]. De acordo com o Bennett, o fracasso de *C. flavipes* em Trinidad poderia ser explicada por sua origem asiática, com condições ecológicas e climáticas diferentes do continente americano, hospedeiros diferentes e experimentos fracassados. Isto, na visão de Bennett, tornava o parasitoide *C. flavipes* pouco promissor para o controle da broca.

No entanto, resultados advindos de outras localidades, onde diversos métodos de controle biológico para a broca estavam sendo testados, tais como *Lixophaga diatraea*, *metagonistylum minense* e *Trichogramma japonicum* em Barbados [60], apontaram o grande potencial de *C. flavipes*. A broca estava presente no estado da Flórida desde 1923, com tentativa de controle biológico datando desde 1926.

Entretanto a liberação com sucesso de *C. flavipes* nos EUA só ocorreu em 1963, após estudos laboratoriais para definir parâmetros biológicos desta quando o hospedeiro era a broca [61]. Foram introduzidas cerca de 28 mil *C. flavipes* e após quatro meses da

liberação foram encontrados os primeiros parasitoides no campo. Isto significava que a *C. flavipes* tinha passado por cerca de quatro gerações, sendo que foram encontradas cinco brocas parasitadas, onde todas geraram entre 26 e 48 parasitoides.

A introdução de *C. flavipes* no Brasil se deu no início da década de 70. Os primeiros testes para liberação do parasitoide foram realizados pela Copersucar e pelo Departamento de Entomologia da Esalq/USP. A abordagem adotada inicialmente por estas entidades foi limitada a algumas liberações isoladas e observações em laboratório [27].

No nordeste brasileiro a *C. flavipes* foi introduzida através do Programa Nacional de Controle biológico de *Diatraea* spp. desenvolvido pelo IAA/Planalsucar em 1974. Nesta introdução o uso do parasitoide mostrou-se promissor na região, já que em 16 dias já foram recuperadas massas de casulos, porém em lagartas de *D. flavipenella*.

Em outubro de 1980 é então iniciado um estudo para avaliar a eficiência do número de *C. flavipes* inseridas no canavial para o controle de *D. saccharalis*. O estudo foi realizado no estado de São Paulo em sete usinas de três regiões diferentes, Piracicaba, Ribeirão Preto e Jaú por pesquisadores do IAA/Planalsucar e Esalq/USP.

Como método de tratamento foram propostos cinco quantidades de liberação, além de um tratamento controle, onde não seria liberada nenhuma vespa. Os tratamentos foram distribuídos dentro de talhões de áreas diferentes, onde as quantidades liberadas de *C. flavipes* foram 0, 2.500, 5.000, 10.000, 20.000 e 40.000.

O método de avaliação utilizado foi de lagartas encontrada por hora/homem mensalmente, e o tratamento era implementado toda vez que 10 ou mais lagartas eram encontradas no campo. Ao final do experimento, em abril de 1981, realizou-se uma última avaliação da percentagem de intensidade de infestação, com coleta de *D. saccharalis* para avaliação posterior do estágio de desenvolvimento e espécies presentes.

Os autores observaram um incremento significativo na intensidade de infestação entre outubro e abril das áreas controle e um decréscimo significativo no tratamento com 10 mil *C. flavipes*. Ao considerarem o número de lagartas encontradas, os tratamentos se mostraram eficazes na sua redução, sendo mais significativa no passar dos meses em todas as regiões estudadas. Observou-se também que as maiores taxas de parasitismo ocorreram com tratamentos utilizando 10, 20 e 40 mil vespas, sendo que estes apresentaram valores muito próximos.

A taxa de parasitismo foi também mais alta entre os meses de fevereiro e abril, atingindo valores de até pouco mais de 40%. Com base nesses dados, os autores recomendaram que o tratamento da broca fosse feito com 10 mil indivíduos de *C. flavipes* [62]. A quantidade mínima para tratamento também pode ser estimada em lagartas/hectare e o controle indicado quando se estimar uma população de 2.500 lag/hec [27].

Atualmente entretanto, o que se encontra comercialmente são outras recomendações

de quantidades de *C. flavipes* a serem liberadas. Uma das empresas pesquisadas recomenda a introdução de 6.000 parasitoides por hectare quando for constatada a presença de 800 a 1.000 lagartas de *D. saccharalis*. A venda dos parasitoides nesse caso ocorre em embalagens contendo sete 50, 1.000 e 1.500 pupas por copo [63].

Uma segunda empresa recomenda a aplicação de 6.000 indivíduos de *C. flavipes* quando forem identificadas de 800 a 3.000 brocas, duas indivíduos para cada broca identificada entre 3.000 e 10 mil brocas, três *C. flavipes* por lagarta identificada entre 10 mil e 1 cinco mil brocas e quatro vespas para cada broca em quantidades identificadas acima de 1 cinco mil brocas, sendo os parasitoides vendidos apenas em copos de 1.500 vespas [64]. Cada embalagem com cerca de 1.500 indivíduos apresentou um custo de produção de cerca de duas reais em 2011 [65], e atualmente sendo comercializado por cerca de cinco reais [66].

De acordo com Veiga et al, o uso de *C. flavipes* para combater a *D. saccharalis* é o maior programa de controle biológico de pragas do mundo, com cerca de três milhões de hectares sendo controlados por cerca de 18 bilhões de vespas [47]. O uso do controle biológico, em especial de *C. flavipes* quando comparado com métodos químicos, encontra nas ciências grandes aliados. Seu uso não polui o ambiente e também não cria resistências na praga, como no caso de inseticidas, ao mesmo tempo promove uma produção maior para a plantação do que usando métodos químicos de controle de praga [67]. Desde sua introdução no Brasil em 1970, as infestações de *D. saccharalis* caíram de 8-10% para uma média de 3% em 2012 [67], o que representou uma economia de oito bilhões de reais que deixaram de ser perdidos anualmente.

O trabalho aqui apresentado utiliza modelos matemáticos para descrição da interação entre as populações de hospedeiros e parasitoides através de equações diferenciais no segundo capítulo, utiliza simulações multi agentes para essa descrição no terceiro capítulo e por último uma abordagem de otimização de custos utilizando estatística bayesiana é apresentada. Este trabalho se apresenta então como uma ferramenta com o potencial de diminuir drasticamente custos com danos de pragas, especificamente da broca, na cana-de-açúcar, aumentando os ganhos desta que é uma das culturas agrícolas mais rentáveis do Brasil. Tão importante quanto a otimização dos recursos empregados é o potencial na diminuição dos produtos químicos utilizados nessas plantações, resultado indireto da maior competitividade do controle biológico com relação aos métodos químicos, minimizando danos ao solo e à saúde da população. Este trabalho está dividido neste capítulo de introdução, sendo seguido por outros quatro capítulos. No segundo capítulo, o modelo Lotka-Volterra, baseado em equações diferenciais, será adaptado e estudado para a interação das duas populações. No terceiro capítulo, a técnica de simulação multi agentes será empregada para avaliar a influência das diversas fases do ciclo de vida dos indivíduos

envolvidos. No quarto capítulo, os métodos de previsão abordados nos dois capítulos anteriores serão utilizados para avaliar o custo da broca na plantação. Neste capítulo será abordado um método para aprimorar o levantamento realizado no campo para a estimativa da população da praga. De posse dos custos e o levantamento melhorado, a otimização do controle será obtido e estudado para várias situações particulares. Por fim, no último capítulo serão encontradas as conclusões deste trabalho.

## 2 Modelo Lotka-Volterra para a interação de *D. saccharalis* e *C. flavipes*

Neste capítulo o modelo Lotka-Volterra será adaptado para a interação de *D. saccharalis* e seu parasitoide, *C. flavipes*, afim de descrever a dinâmica entre eles. Posteriormente, as propriedades deste sistema de equações diferenciais serão apresentadas. Por fim, resultados para cenários particulares de interesse para o controle biológico serão obtidos.

### 2.1 Trajetória do modelo Lotka-Volterra e sua base com população isolada

O primeiro modelo da dinâmica entre populações utilizado foi proposto de forma independente por Alfred J. Lotka (1920) [68] e Vito Volterra (1928) [69], a fim de compreender o comportamento de diferentes espécies. Este modelo, denominado hoje em dia como Lotka-Volterra, tem sido usado para explicar o controle biológico devido à sua simplicidade para estudar a relação entre presas e predadores, ou parasitas e hospedeiros [15, 71, 72].

Hoje em dia, o controle biológico é considerado um dos melhores métodos de diminuição de pragas devido ao seu baixo impacto ambiental. Ele é particularmente útil no cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, sendo o principal programa de controle biológico do mundo, considerando a quantidade de área que o utiliza [54].

No entanto, como a maioria dos modelos matemáticos, esse método enfrenta o mesmo problema, eles não possuem os extensos dados de campo para verificar completamente sua validade [11, 73]. Um dos aspectos mais importantes para um modelo matemático é ser útil para explicar novos fenômenos, apesar desse retrato não ser completamente fidedigno [38]. Contudo, essa conquista só é obtida com quantidade suficiente de dados adequados, o que significa que ele deve ser preciso, relevante e imparcial.

Os dados do campo podem ser utilizados tanto para motivar a construção de um novo modelo como para validá-lo. Vários modelos já foram propostos para explicar os fenômenos biológicos na agricultura. Um fenômeno interessante a ser entendido está relacionado à *D. saccharalis*, que pode ser encontrada em todo o continente americano e é considerada a praga de cana-de-açúcar mais destrutiva no Brasil. A *D. saccharalis* pode danificar os talos da cana-de-açúcar perfurando-os, o que pode, entre outros efeitos, matar a planta [74].

Para a obtenção dos dados de campo, Hensley (1961) propôs um método de amostragem que permitiu a avaliação da população de pragas no campo escolhendo aleatoriamente 10 pontos por hectare onde cortava canas longitudinalmente e realizando a con-

tagem das lagartas presentes [75]. Este método de seleção aleatória de talos de cana-de-açúcar, coletando as brocas e extrapolando para o tamanho de sua população ainda é usado hoje em dia [76, 77].

Nesta seção, temos por objetivo adotar o modelo Lotka-Volterra para descrever a interação entre a broca da cana e *C. flavipes*. A partir deste modelo faremos uma avaliação dos parâmetros presentes afim de buscar estratégias novas para aprimorar o controle biológico. No entanto, os dados do campo registrados na literatura serão utilizados apenas para a construção dos modelos. Isto será feito já que os métodos atuais de levantamento não permitem obtenção diária de dados, para que a situação modelada possa ser observada no campo sem interferência significativa no comportamento das populações envolvidas.

### 2.1.1 Modelo com população isolada

Plant e mangel [29] delineiam três pontos nos quais os modelos matemáticos podem ser usados para o controle de pragas: seleção de estratégia, seleção da tática e estimação do estado da praga. A seleção de estratégia é a etapa onde deve ser determinada qual a combinação de métodos de controle, químico, biológico e culturais serão usadas no controle da praga. A seleção da tática segue a anterior e determina a forma como aplicar a estratégia adotada em resposta ao estado atual da praga. A estimação do estado da praga é o estágio onde é feito um esforço para se determinar o ponto onde o controle ativo deve ser implementado. O estágio onde é necessário fazer controle ativo da praga é chamado de limite econômico e é o ponto onde os danos da praga trarão mais prejuízos do que seu controle [70]. Os modelos comumente estudados são os de seleção de estratégia e o objetivo desta seção é também estudar qual estratégia adotar para controlar a broca da cana-de-açúcar.

O primeiro modelo matemático para descrever o crescimento de uma população segue as ideias que malthus propôs em 1798, mas foi sugerido muito antes por Euler [78]. Esse modelo de um sistema determinístico (não aleatório) fechado, onde não existe imigração ou emigração, é escrito como

$$\frac{dN(t)}{dt} = bN(t) - dN(t), \quad (2.1)$$

onde  $b$  é a taxa de nascimento per capita,  $d$  a taxa de morte per capita e  $N$  é o tamanho da população. Definindo o crescimento líquido per capita como

$$r = b - d, \quad (2.2)$$

a equação (2.1) é reescrita como

$$\frac{dN(t)}{dt} = rN(t).$$

A solução da equação (2.1) é

$$N(t) = N_0 e^{rt}. \quad (2.3)$$

pode-se observar alguns casos limite simples para esse modelo visando melhor entendê-lo. No instante inicial, onde  $t = 0$ ,  $N(0) = N_0$ . Conforme o tempo passa, se a taxa de crescimento líquido for positiva,  $r > 0$ , a população cresce exponencialmente, e  $t \rightarrow \infty$ ,  $N \rightarrow \infty$ . Caso  $r = 0$ , não existe alteração no tamanho da população. Sendo a taxa de crescimento líquido negativa,  $r < 0$ , a equação nos diz que em  $t \rightarrow \infty$ ,  $N \rightarrow 0$ .

Esse modelo considera uma população isolada, contínua, sem diferenças etárias e onde todos os indivíduos são iguais. O ambiente, nesse modelo, não influencia o crescimento da população, assim como os indivíduos não mudam hábitos importantes que podem variar as taxas de nascimento e morte. É importante notar que nesse sistema os indivíduos se reproduzem de forma contínua, o que não acontece em todas as espécies. Esse modelo apresenta muitas limitações e tem pouca aplicação real, ainda assim, sua importância histórica e como ponto de partida para muitos outros modelos o torna relevante.

## 2.2 Modelo Lotka-Volterra

Por apresentar aplicações econômicas, sistemas de equações considerando interações entre populações começaram a ser criados e estudados. O primeiro destes modelos ficou conhecido como modelo presa predador, ou parasita hospedeiro, de Lotka-Volterra, e desde seu desenvolvimento eles se tornaram poderosos auxílios para ajudar na tomada de decisões nesse contexto. Neste primeiro sistema, a população de presas,  $N$ , cresce exponencialmente na ausência de predadores,  $P$ , seguindo a taxa de crescimento líquido (mortes subtraídas dos nascimentos) per capita  $a$ . Os predadores, na ausência de presas, têm sua população diminuída de forma exponencial, com uma taxa  $d$ . Na presença de predadores, as presas são mortas proporcionalmente à população destes, considerando ainda o fator de captura de presas,  $b$ . As presas mortas são então convertidas em predadores, na equação (2.5), através do fator de aproveitamento  $c$ .

$$\frac{\partial N}{\partial t} = N(a - bP) \quad (2.4)$$

e

$$\frac{\partial P}{\partial t} = P(cN - d). \quad (2.5)$$

Apesar de útil, esse modelo desconsidera muitos aspectos importantes na interação entre duas populações. Como exemplo, vale ser citado que não existe diferença etária entre os indivíduos, ou diferença sexual, bem como os recursos disponíveis para a população de presas são infinitos [79, 80, 81].

Outros modelos utilizando equações diferenciais para descrição da interação de *D. saccharalis* e *C. flavipes* já foram propostos. Entre estes, Rafikov e Agelelli (2009) apresentam uma variação do modelo presa-predador adaptado com termo para efeito de superpovoamento das brocas. Neste trabalho os autores utilizam o modelo para propor um método de controle ótimo por feedback linear para manter a população abaixo do nível de dano econômico, adotado como 2.500 lagartas/hectare [82]. Foi apresentado como exemplo uma situação onde 5.000 lagartas/hectare seriam levadas abaixo do limite econômico, o que foi obtido através da liberação de 20.000 parasitoides/hectare após 35 dias e aplicando conjuntamente o controle com feedback linear, após 45 dias não seria mais necessária a introdução de novos parasitoides. Este modelo foi também utilizado por Campos et al (2016) trabalhando com intervalos para lidar com incertezas das avaliações das populações iniciais e então poder introduzir controle ótimo para manter a praga abaixo do limite de dano econômico, porém com introduções diárias de 16,4 de parasitoides/hectare [73]. Isto de um ponto de vista prático é problemático, já que as vespas são vendidas comercialmente em copos de 1.500 indivíduos, sendo produzidas em massas com pelo menos 50 indivíduos que viram adultos aproximadamente ao mesmo tempo.

Um outro modelo derivado do Lotka-Volterra é utilizado por Rafikov e Silveira (2014), onde a capacidade do ambiente é considerada, bem como uma terceira equação para descrever especificamente a população de brocas infectadas [83]. É então utilizada a técnica de controle por feedback linear, de onde é observado nos resultados numéricos obtidos que quantidades de até 40.000 parasitoides/hectare não eram suficientes para manter a população da praga, inicialmente acima do limite de dano econômico, controlada. Porém, considerando como exemplo a presença de 2.500 brocas/ha e que a condição ideal seria a presença de 2.000 lagartas/ha, 3.158 massas/ha e 19.441 parasitoides/ha, 1.826 parasitoides/ha por dia deveriam ser inseridos.

As equações diferenciais parciais (2.4) e (2.5) podem se tornar ferramentas úteis na previsão tanto do tamanho da população da broca-da-cana como medir a eficácia do controle utilizando o parasitoide *C. flavipes*. O primeiro parâmetro que deve ser encontrado é a taxa de crescimento líquido para a população da broca,  $a$ . Supondo que a população de mariposas tenha alimento abundante, como a equação (2.4) sugere, e na ausência de parasitoides, a população da praga vai crescer exponencialmente, como retratado na equação (2.1)

$$\frac{dN}{dt} = aN, \quad (2.6)$$

que tem por solução

$$N(t) = N(0) e^{at}. \quad (2.7)$$

De acordo com Gallo et al. [26], uma broca vive entre 53 e 60 dias, e apenas na fase adulta acontece o acasalamento e postura dos ovos. Vamos supor que o acasalamento aconteça, em média, após 54 dias de vida,  $\tau_1 = 54$ . Vale ressaltar que este resultado é uma aproximação inicial. Um modelo mais realista pode utilizar-se de uma distribuição de probabilidades para melhor representar as condições encontradas na natureza. Neste trabalho usaremos o valor médio para a expectativa de vida

$$\frac{53 + 60}{2} = 56,5$$

e que o acasalamento e postura de ovos só acontece em algum dos cinco últimos dias de vida (adotaremos que isso ocorre com 2.5 dias da fase adulta). O número de indivíduos gerados a cada geração varia entre cinco e 50 indivíduos. Adotaremos que em média são gerados  $R = 20$  indivíduos a cada geração. Assim, a equação (2.7), após a primeira geração de indivíduos alcançar o período fértil, pode ser escrita como

$$N(\tau_1) = RN(0) = N(0) e^{a\tau_1}.$$

Substituindo os valores adotados, obtemos a taxa de crescimento líquido

$$a = \frac{\ln 20}{54} = 0,056. \quad (2.8)$$

Para encontrar o valor da taxa de captura das brocas por um parasitoide, representado pelo parâmetro  $b$  na equação 2.4, vamos considerar dois instantes:  $t = 0$  onde os predadores são inseridos e  $t = \tau_2$  onde as vespas já são adultas e podem predar a broca. A aplicação de *C. flavipes* no campo se dá através da liberação de seus adultos em alguns pontos estratégicos dentro do canavial a depender do tamanho da população da praga. Araújo et al. (1984) [62] recomendam que sejam liberados seis mil parasitoides quando são encontrados até mil brocas no canavial. Considerando que no instante da liberação não existe nenhum indivíduo da população de *C. flavipes* presente e o tamanho da população só vai alterar após  $\tau_2$ , que se dá em média 10 dias após a liberação, poderemos tomar nesse intervalo  $P$  como sendo constante, assim a equação 2.4, dada por

$$\frac{dN}{dt} = N(a - bP) \quad (2.9)$$

tem por solução

$$N(t) = N_0 e^{(a-bP)t}. \quad (2.10)$$

Assumindo que a população da vespa reduza a praga em  $\tau_2$  com um fator  $f$ , teremos

$$N(\tau_2) = fN_0 = N_0e^{(a-bP)\tau_2},$$

que pode ser arrumada da seguinte maneira

$$b = \frac{-\ln f + a\tau_2}{P\tau_2}.$$

Assumindo que seis mil parasitoides consigam reduzir a população da praga em  $\tau_2$  à 40% do seu tamanho original,  $f = 0.4$ , teremos que a taxa de captura será  $b = 0,000025$ .

A taxa de mortalidade das vespas pode ser encontrada considerando que o ciclo de vida delas é de cerca de 20 dias e que até 24 dias a população inicial vai ter sido reduzida à 5%,  $g = 0,05$ , do seu tamanho inicial. Considerando que nesse período não existe a possibilidade de surgirem novos parasitoides, a equação 2.5 se reduz ao modelo de crescimento exponencial. Assim

$$P(24) = 0,05P_0 = P_0e^{-24d},$$

que após algumas manipulações mostra que o valor da taxa de mortalidade para as vespas é

$$d = 0,1248. \quad (2.11)$$

Para descobrir o valor da taxa de reprodução das vespas,  $c$ , que é dependente do tamanho da população da broca, consideraremos que cada vespa pode gerar 26 indivíduos que completarão o ciclo. Sendo assim, após a oviposição dos indivíduos liberados, em  $t = 18$ , considerando que a broca até esse instante tem sua população constante e inalterada, pode-se fazer

$$\frac{dP}{dt} = P(cN_0 - d),$$

que tem como solução

$$P(18) = 26P_0 = P_0e^{(cN_0-d)18},$$

de onde tiramos que, se inicialmente  $N_0 = 2.500$ ,  $c = 0,00012$ . Assim as equações 2.4 e 2.5 parametrizadas para retratar a interação broca-cotesia são reescritas como

$$\frac{\partial N}{\partial t} = N(0,056 - 0,000025P) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = P(0,00012N - 0,1248). \quad (2.13)$$

É importante ressaltar que as características biológicas de ambas as populações podem sofrer variações, tanto por região, quanto com o passar do tempo. Em ambos os casos, antes da aplicação prática das estratégias que podem surgir deste modelo, uma avaliação das populações locais deve ser feita para poder propor qualquer medida.

A dinâmica apresentada nas equações (2.12) e (2.13) pode ser obtida numericamente, o que foi feito neste trabalho através do método Runge-Kutta de 4º ordem. Isto é observado na figura 2.1, onde as oscilações características desse tipo de sistema estão presentes.

No entanto, o modelo Lotka-Volterra desconsidera vários aspectos biologicamente importantes, dentre os quais pode-se referir a falta de uma estrutura etária, sendo que todos os indivíduos são tratados como idênticos. Isto também implica que todos os indivíduos apresentam mesmas características fisiológicas e genéticas, não apresentando nem mesmo diferença entre sexo entre os indivíduos.

O modelo também desconsidera a capacidade de suporte do ambiente para as populações, não limitando o crescimento destas onde se atinjam as condições para as quais os recursos começariam a ser escassos. A população de parasitoides é considerada como super especialista, não podendo aumentar na ausência dos hospedeiros, o que pode não ocorrer no campo se houver algum outro hospedeiro alternativo em algum ambiente específico.

A consideração de encontros aleatórios no campo também pode ser uma aproximação que não se retrate fielmente no campo. Esta consideração implica que não existem refúgios espaciais ou temporais contra os parasitoides. Também não são considerados movimentos migratórios, sendo o modelo de descrição de um sistema fechado. Muitas outras limitações também poderiam ser citadas, tais como não dependência do sistema à temperatura. No entanto, esta forma de descrever esse tipo de dinâmica, apesar de possuir uma estrutura bem simples e limitada, pode gerar resultados bem interessantes, o que será discutido a seguir.

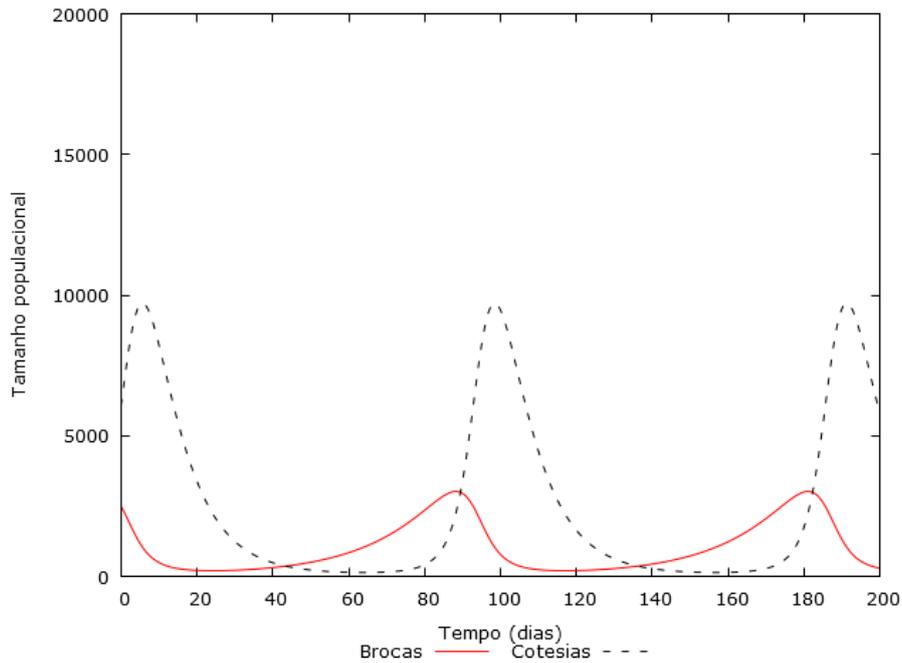


Figura 2.1: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* e de *C. flavipes* de acordo com as equações (2.12) e (2.13).

### 2.2.1 Pontos de equilíbrio

Encontrar os pontos de equilíbrio é uma tarefa importante para melhor compreender a dinâmica do sistema. Para tanto deve-se definir o que queremos dizer por equilíbrio, e aqui consideraremos que as populações estão em equilíbrio quando a variação temporal do tamanho de suas populações é nulo. Sendo assim, para encontrar o ponto de equilíbrio do sistema parasita-hospedeiro, deve-se inicialmente fazer  $\frac{\partial N}{\partial t} = 0$  e  $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$ . Nesta seção vamos apenas analisar o ponto de equilíbrio com populações não nulas e na seção posterior analisaremos com mais detalhes todas as situações possíveis. Ao aplicar a condição para obtenção do ponto de equilíbrio para o caso geral, apresentado nas equações 2.4 e 2.5 obtemos

$$\frac{\partial N}{\partial t} = 0 = N^* (a - bP^*) \quad (2.14)$$

e

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 0 = P^* (cN^* - d), \quad (2.15)$$

sendo  $N^*$  a população de hospedeiros no equilíbrio e  $P^*$  a população de parasitoides no equilíbrio. Da equação 2.14, ao considerar que a população de hospedeiros é não nula pode-se fazer

$$a - bP^* = 0 \rightarrow P^* = \frac{a}{b}. \quad (2.16)$$

Isto significa que o equilíbrio na população dos hospedeiros é obtido quando a população de parasitoides atinge o valor igual à razão entre a taxa de crescimento das brocas,  $a$ , e o coeficiente de captura de hospedeiros por parasitoides,  $b$ . Sendo assim, quanto maior a taxa de crescimento líquido dos hospedeiros, mais parasitoides são necessários para se atingir o equilíbrio. Por outro lado quanto maior o coeficiente de captura de hospedeiros por parasitoides, menos destes últimos são necessários para atingir o ponto de equilíbrio.

Um exemplo disso acontece com a interação entre zooplânctons e baleias, já que o coeficiente de captura desses indivíduos minúsculos por baleias é grande, significando que uma única baleia tem o potencial de capturar vários indivíduos de uma só vez. Sendo assim, se a taxa de reprodução destas presas for baixa, a quantidade necessária de baleias para se atingir o equilíbrio entre as populações é pequena também.

Ao aplicar a segunda condição,  $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$ , como o feito na equação 2.15, considerando que a população de predadores é não nula, obtemos

$$cN^* - d = 0 \rightarrow N^* = \frac{d}{c}. \quad (2.17)$$

A partir deste resultado vemos que, similarmente com o que aconteceu na equação 2.16, o equilíbrio para a população de parasitoides depende de uma quantidade fixa de hospedeiros presentes no sistema. Esta quantidade é diretamente proporcional à taxa de morte dos parasitoides,  $d$ , e inversamente proporcional ao coeficiente de conversão de hospedeiros em parasitoides,  $c$ .

Para a situação particular da interação entre a população de *D. saccharalis* e a *C. flavipes*, as condições apresentadas nas equações 2.16 e 2.17 são então respectivamente

$$P^* = \frac{a}{b} \rightarrow \frac{0,056}{0,000025} = 2.240$$

e

$$N^* = \frac{d}{c} \rightarrow \frac{0,1248}{0,00012} = 1.040.$$

Assim, se houver 2.240 vespas presentes no sistema com 1.040 brocas, o modelo Lotka-Volterra aplicado a esta situação apresenta um ponto de equilíbrio, onde as duas populações manteriam seus tamanhos indefinidamente. Esta situação é uma aproximação idealizada, já que fatores externos poderiam facilmente tirar qualquer uma das populações de seu ponto de equilíbrio. Esses e outros fatores, como variações na temperatura, geografia do ambiente, ventos etc., não são considerados nesse modelo.

### 2.2.2 Período de oscilação em torno dos pontos de equilíbrio

Em torno dos pontos de equilíbrio é possível encontrar o período de oscilação ao propor a seguinte mudança de variáveis nas equações 2.4 e 2.5

$$n = N - N^*, \quad p = P - P^*,$$

que nas variáveis anteriores era escrita como

$$N = n + N^*, \quad P = p + P^*, \quad (2.18)$$

onde  $n$  e  $p$  são pequenas oscilações em torno do ponto de equilíbrio.

Ao fazer a substituição das variáveis na equação 2.4 e sabendo que  $\frac{dN}{dt} = \frac{dn}{dt}$  obtemos

$$\frac{dn}{dt} = (n + N^*)(a - bp - bP^*)$$

que pode ser rearrumado como

$$\frac{dn}{dt} = a(n + N^*) - b(n + N^*)(p + P^*).$$

Ao substituírmos as condições obtidas para os pontos de equilíbrio, descritas nas equações 2.16 e 2.17,  $N^* = \frac{d}{c}$  e  $P^* = \frac{a}{b}$

$$\frac{dn}{dt} = a\left(n + \frac{d}{c}\right) - b\left(n + \frac{d}{c}\right)\left(p + \frac{a}{b}\right)$$

e rearranjando a equação anterior

$$\frac{dn}{dt} = an + \frac{ad}{c} - bnp - an - \frac{bd}{c}p - \frac{ad}{c},$$

lembrando que  $n \ll N^*$  e  $p \ll P^*$ , o termo  $bnp$  se torna muito pequeno, podendo ser desconsiderado. Assim, esta última equação se torna

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{bd}{c}p. \quad (2.19)$$

De forma análoga, a equação 2.5 se torna

$$\frac{dp}{dt} = (p + P^*)(cn + cN^* - d)$$

e então

$$\frac{dp}{dt} = -d(p + P^*) + c(p + P^*)(n + N^*).$$

Ao usarmos as condições impostas pelo ponto de equilíbrio nas equações 2.16 e 2.17 obtemos

$$\frac{dp}{dt} = -d \left( p + \frac{a}{b} \right) + c \left( p + \frac{a}{b} \right) \left( n + \frac{d}{c} \right)$$

e assim

$$\frac{dp}{dt} = -dp - \frac{da}{b} + c p n + dp + \frac{ca}{b} n + \frac{da}{b}$$

o que ao considerarmos novamente  $n \ll N^*$  e  $p \ll P^*$ , o termo  $c p n$  se torna muito pequeno e pode ser desprezado. Com isso

$$\frac{dp}{dt} = \frac{ca}{b} n. \quad (2.20)$$

Ao tomarmos uma segunda derivada temporal nas equações 2.19 e 2.20, temos que

$$\frac{d^2 p}{dt^2} = \frac{ca}{b} \frac{dn}{dt} = -adp \Rightarrow \frac{d^2 p}{dt^2} + adp = 0$$

e

$$\frac{d^2 n}{dt^2} = -\frac{bd}{c} \frac{dp}{dt} = -adn \Rightarrow \frac{d^2 n}{dt^2} + adn = 0$$

o que apresenta a forma  $\frac{d^2 r}{dt^2} + \omega_0^2 r = 0$ , a qual pode ser identificada com a equação do oscilador harmônico, cujo período é dado por

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \approx \frac{2\pi}{\sqrt{ad}}. \quad (2.21)$$

No caso particular da interação entre brocas e vespas, cujos parâmetros para a taxa de crescimento líquido das brocas e de morte das vespas foram estimados nas equações 2.8 e 2.11 como  $a = 0,056$  e  $d = 0,1248$ ,  $\omega_0$  pode ser então estimado como  $\omega_0 = \sqrt{ad} = \sqrt{0,1248 \cdot 0,056} = 0,0836$  e então  $T = 21,7$  dias. É interessante notar que este tempo é muito próximo ao que foi considerado para o ciclo de vida da *C. flavipes*. Este comportamento próximo ao ponto de equilíbrio pode ser visto na figura 2.2 onde as condições iniciais continham  $N = 1.050$  brocas e  $P = 2.250$  *C. flavipes*. É importante notar que esta condição só pode ser usada para valores próximos ao ponto de equilíbrio e para outros pontos ela não deve ser usada. Na figura 2.1 pode-se ver que o período de oscilação das populações não se mantém e para qualquer valor longe do ponto de equilíbrio o período de oscilação aumenta.

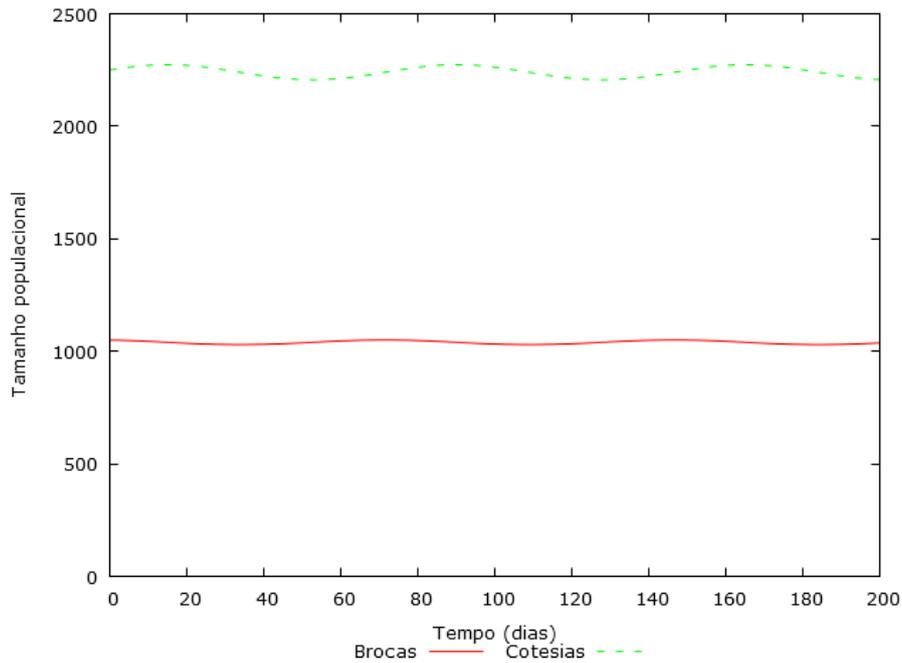


Figura 2.2: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* e *C. flavipes* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) próximo ao equilíbrio.

### 2.2.3 Análise de estabilidade dos pontos de equilíbrio

Afim de facilitar a análise de estabilidade dos pontos de equilíbrio, faremos as seguintes transformações

$$u(\tau) = \frac{cN(t)}{d}, \quad v(\tau) = \frac{bP(t)}{a}, \quad \tau = at, \quad \gamma = \frac{d}{a}. \quad (2.22)$$

Assim a equação representativa da população das presas é reescrita como

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} \frac{c}{d} \frac{dN(t)}{dt},$$

e usando a equação 2.4

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{c}{d} \frac{N(a - bP)}{a}$$

que ao aplicarmos as transformações propostas em 2.22, pode-se reescrevê-la como

$$\frac{du}{d\tau} = u(1 - v) = f(u, v). \quad (2.23)$$

Similarmente a equação representativa da população de predadores se torna

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} \frac{b}{a} \frac{dP(t)}{dt},$$

que, ao se substituir a equação 2.5, toma a forma

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{1}{a} \frac{bP(cN - d)}{a}$$

e usando as transformações presentes em 2.22, obtém-se

$$\frac{dv}{d\tau} = \gamma v(u - 1) = g(u, v). \quad (2.24)$$

O novo sistema de equações representativo da dinâmica apresenta os seguintes pontos de equilíbrio

$$\begin{cases} u(1 - v) = 0 \\ \gamma v(u - 1) = 0. \end{cases}$$

Este sistema apresenta como solução as seguintes situações  $(u^*, v^*) = [(0, 0), (1, 1)]$

Em posse dessas soluções, analisar o comportamento no entorno delas pode ser feito propondo a seguinte mudança de variáveis para acrescentar uma pequena perturbação em torno do ponto de equilíbrio:

$$\tilde{u} = u - u^*, \quad \tilde{v} = v - v^*$$

ou

$$u = \tilde{u} + u^*, \quad v = \tilde{v} + v^*.$$

Ao considerarmos pequenas variações,  $\tilde{u}$  e  $\tilde{v}$ , em torno dos pontos de equilíbrio,  $u^*$  e  $v^*$ , pode-se então expandir as equações 2.23 e 2.24 em séries de Taylor, lembrando que  $f(u^*, v^*) = g(u^*, v^*) = 0$ :

$$f(u, v) = f(u^*, v^*) + \frac{\partial f(u^*, v^*)}{\partial u} \tilde{u} + \frac{\partial f(u^*, v^*)}{\partial v} \tilde{v} + \dots \quad (2.25)$$

$$g(u, v) = g(u^*, v^*) + \frac{\partial g(u^*, v^*)}{\partial u} \tilde{u} + \frac{\partial g(u^*, v^*)}{\partial v} \tilde{v} + \dots \quad (2.26)$$

Ignorando os termos superiores e tendo que

$$\frac{du}{dt} = \frac{d\tilde{u}}{dt}, \quad \frac{dv}{dt} = \frac{d\tilde{v}}{dt},$$

obtemos o seguinte sistema linearizado

$$\frac{d\tilde{u}}{dt} = \frac{\partial f(u^*, v^*)}{\partial u} \tilde{u} + \frac{\partial f(u^*, v^*)}{\partial v} \tilde{v} = a\tilde{u} + b\tilde{v} \quad (2.27)$$

e

$$\frac{d\tilde{v}}{dt} = \frac{\partial g(u^*, v^*)}{\partial u} \tilde{u} + \frac{\partial g(u^*, v^*)}{\partial v} \tilde{v} = c\tilde{u} + d\tilde{v}. \quad (2.28)$$

pode-se então construir a matriz Jacobiana utilizando os coeficientes do sistema anterior fixada no ponto de equilíbrio. pode-se então escrever as equações 2.27 e 2.28 na sua forma vetorial

$$\dot{\vec{x}}(t) = J\vec{x}(t).$$

Sendo  $\vec{x}(t) = (\tilde{u}(t), \tilde{v}(t))$  e  $\dot{\vec{x}}(t) = (\dot{\tilde{u}}(t), \dot{\tilde{v}}(t))$  e admitindo como solução

$$\vec{x}(t) = e^{\lambda t} \vec{x}_0$$

que também pode ser escrita na forma

$$\vec{x}(t) = e^{Re(\lambda)t} e^{iIm(\lambda)t} \vec{x}_0 \quad (2.29)$$

obtemos

$$(J - \lambda I) \vec{x}_0 = 0.$$

Desta forma é possível obter os autovalores da matriz jacobiana, o que permitirá analisar a estabilidade dos pontos de equilíbrio. Para tanto, calcularemos o determinante da equação anterior

$$\det |J - \lambda I| = 0.$$

Neste ponto é possível explicitar o que é definido como estabilidade das soluções de equilíbrio. Ao usarmos uma pequena perturbação em torno do ponto de equilíbrio, caso a solução não tenda ao infinito, dizemos que a solução é estável. Sendo assim, de posse da solução 2.29 é possível ver que  $e^{iIm(\lambda)t}$  é uma função limitada e não fará a solução tornar-se instável.

No entanto, quando  $Re(\lambda) > 0$  a solução  $\vec{x}(t) \rightarrow \infty$  quando  $t \rightarrow \infty$ , o que pode ser caracterizado como um ponto de equilíbrio não estável, já que usando uma pequena perturbação, conforme o tempo aumenta a solução distancia-se cada vez mais do ponto de equilíbrio. Já para a situação onde  $Re(\lambda) < 0$ ,  $\vec{x}(t) \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$  caracterizando um ponto de equilíbrio estável.

Ao usarmos uma pequena perturbação em torno do ponto  $(u^*, v^*) = (0, 0)$  no sistema linearizado composto pelas equações 2.27 e 2.28 obtemos as seguintes expressões

$$\frac{d\tilde{u}}{dt} = \tilde{u} + 0\tilde{v}, \quad \frac{d\tilde{v}}{dt} = 0\tilde{u} - \gamma\tilde{v},$$

cuja matriz Jacobiana é

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\gamma \end{bmatrix}$$

e assim

$$\det|J - \lambda I| = \lambda^2 + \lambda(\gamma - 1) = 0,$$

de onde tiramos que os autovalores são então  $\lambda_1 = 1$ ,  $\lambda_2 = -\gamma$ , caracterizando uma solução instável do tipo sela.

Esta solução aponta que uma pequena perturbação na população de parasitoides quando esta está no ponto  $(u^*, v^*) = (0, 0)$  faz  $\tilde{v}(t) \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$ . Porém nesta situação, uma pequena perturbação no tamanho da população de presas, quando  $(u^*, v^*) = (0, 0)$  faz com que  $\tilde{u}(t) \rightarrow \infty$  quando  $t \rightarrow \infty$ .

No segundo ponto de equilíbrio, onde  $(u^*, v^*) = (1, 1)$  o sistema linearizado se torna

$$\frac{d\tilde{u}}{dt} = 0\tilde{u} - \tilde{v}, \quad \frac{d\tilde{v}}{dt} = \gamma\tilde{u} + 0\tilde{v},$$

de onde construímos a matriz Jacobiana

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \gamma & 0 \end{bmatrix}$$

e assim obtemos os autovalores através da equação

$$\det|J - \lambda I| = \lambda^2 + \gamma^2 = 0$$

como sendo  $\lambda_1 = i\sqrt{\gamma}$  e  $\lambda_2 = -i\sqrt{\gamma}$ , o que caracteriza uma solução estável do tipo centro, já que os autovalores não apresentam parte real. Sendo assim, uma pequena perturbação em torno do ponto de equilíbrio  $(u^*, v^*) = (1, 1)$  faz com que o sistema oscile indefinidamente para  $t \rightarrow \infty$ .

### 2.3 Análise dos resultados do modelo Lotka-Volterra

Com relação à dinâmica populacional, é importante notar alguns pontos. Primeiramente pode-se observar pela figura 2.3 que, na ausência de hospedeiros, a população de parasitoides decresce de forma exponencial e atinge tamanho nulo em cerca de 40 dias, sendo que com 20 dias a população já está com valores muito pequenos. É importante notar que esta situação acontece por estarmos considerando a população de *C. flavipes* como sendo especialistas, sem outro hospedeiro disponível presente no ambiente.

Outro ponto importante de se observar é que, ao contrário do que aconteceria na rea-

lidade, com o sistema de equações utilizadas não é possível garantir que no momento de introdução dos indivíduos todos estejam na fase adulta. Para tanto, um conjunto maior de equações poderia ter sido utilizado, porém neste estudo, com o objetivo de verificar comportamentos qualitativos, isto não é necessário. Lembrando que a taxa de morte,  $d$ , foi obtida considerando que no período de 24 dias a população inicial, na ausência de hospedeiros, é reduzida à 5% da população inicial, pode-se confirmar visualmente com este gráfico este comportamento.

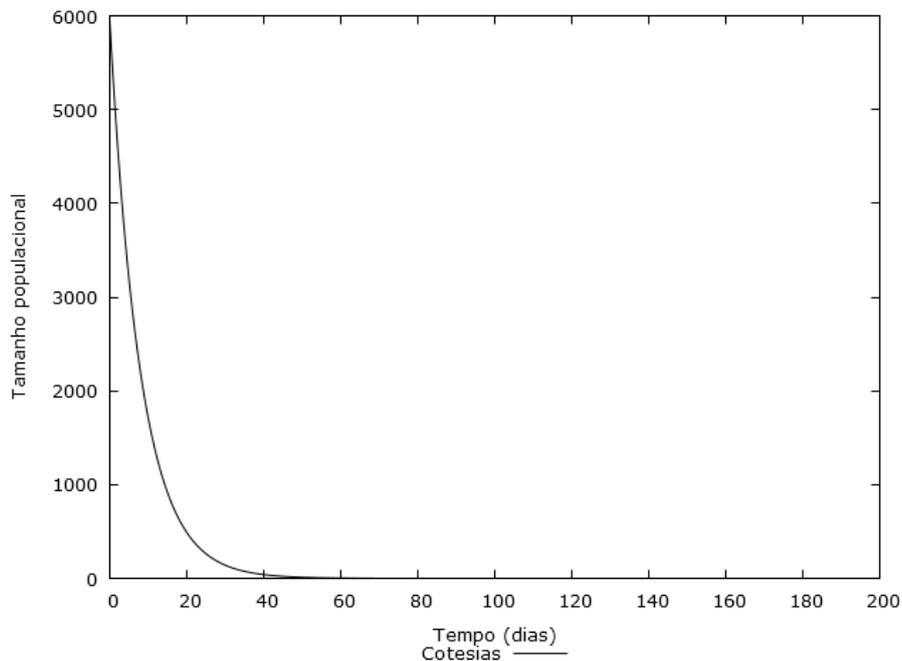


Figura 2.3: Evolução temporal do tamanho das populações de *C. flavipes* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) e na ausência de *D. saccharalis*.

A figura 2.4 mostra a situação oposta ao cenário apresentado anteriormente. Nesta situação é apresentada o comportamento da população de brocas na ausência dos parasitoides. Vemos nesta figura uma explosão populacional. Esta situação idealizada seria impossível de ocorrer no campo, já que recursos naturais, tais como espaço e alimentos, limitariam o crescimento populacional. Predadores naturais encontrados no campo também poderiam ter sua atuação potencializada na presença de uma grande população de brocas, o que alteraria a taxa de crescimento líquido,  $a$ , tornando-a dependente do tamanho populacional ou sendo descrita por outro conjunto de equações dedicadas à esta situação.

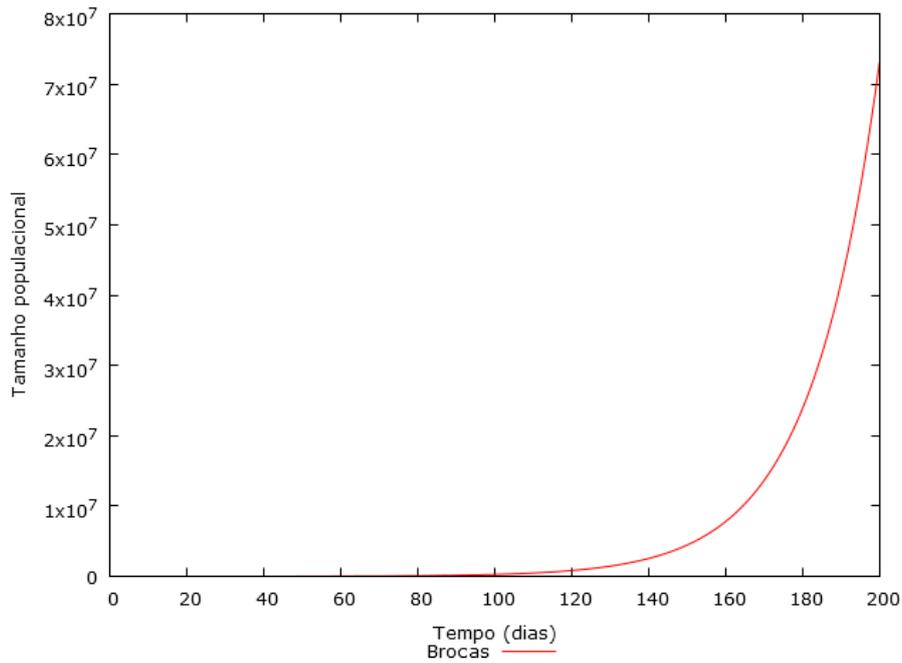


Figura 2.4: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com 1.000 brocas inicialmente e na ausência de *C. flavipes*.

As figuras 2.5 e 2.6 podem então ser contrastadas com a figura 2.4 e assim analisarmos o impacto do tamanho populacional inicial com o passar do tempo. Vemos nas condições com 2.500 e 5.000 brocas iniciais que a duplicação da população inicial é refletida no tamanho da população com o passar do tempo. Uma situação similar é observada com a situação com 1.000 brocas iniciais, já que a população ao passar do tempo se mantém cinco vezes menor que o caso com 5.000 brocas iniciais. Este comportamento era de se esperar pela estrutura usada para simular este comportamento, já que a regra do múltiplo constante diz que se  $f$  é uma função diferenciável em  $x$  e  $c$  for um número real.

$$\frac{d}{dx}[cf(x)] = c \frac{df(x)}{dx}. \quad (2.30)$$

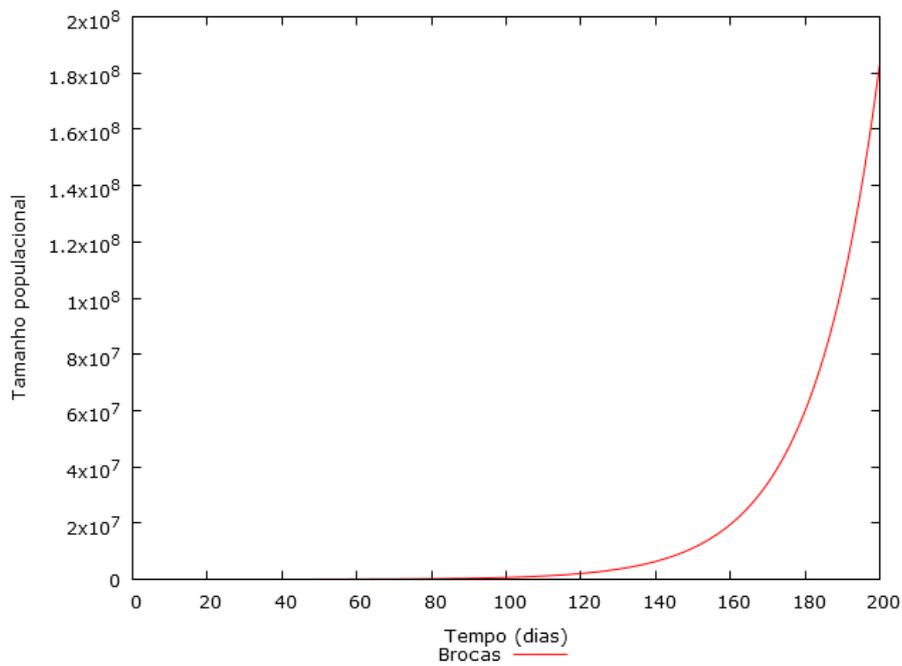


Figura 2.5: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com 2.500 brocas inicialmente e na ausência de *C. flavipes*.

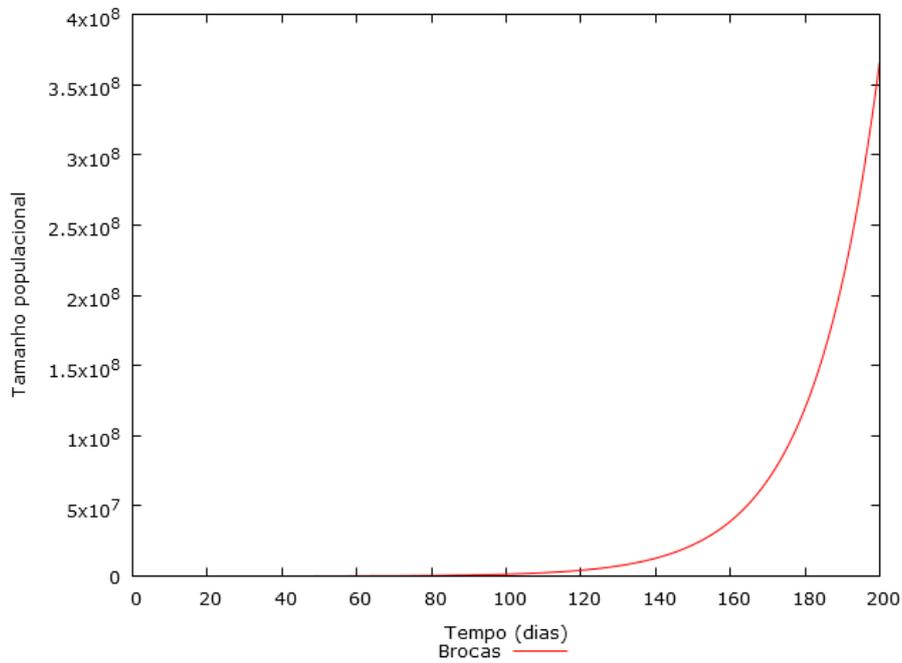


Figura 2.6: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com 5.000 brocas inicialmente e na ausência de *C. flavipes*.

A figura 2.7 apresenta uma das situações onde as duas populações apresentam valores

não nulos. As populações de *C. flavipes* e *D. saccharalis* foram iniciadas com populações de 6.000 e 1.000 indivíduos respectivamente. É possível observar que as populações oscilam com uma defasagem entre as populações de hospedeiros e parasitoides. Isto ocorre devido à resposta de uma população a segunda.

Quando existe uma abundância de hospedeiros presentes no sistema, a população de parasitoides cresce livremente. Conforme esta segunda população cresce, a broca começa a sair rapidamente do sistema, o que começa a gerar escassez de recursos para a população de parasitoides, fazendo com que ela comece então a diminuir. Com a diminuição de seus parasitoides, a broca encontra novamente um ambiente propício ao seu crescimento. Isto faz com que após a retomada do crescimento das brocas, os parasitoides que ainda estavam no sistema possa se reproduzir e aumentar novamente sua população, até atingir o valor onde o crescimento da população dos hospedeiros não seja mais viável, fechando então este ciclo de evolução de crescimento populacional.

Também é possível observar aqui um primeiro exemplo das limitações impostas para a obtenção do período de oscilação próximo ao ponto de equilíbrio. Este foi definido previamente como sendo de 21,7 dias para a situação onde as populações estão próximas à condição de equilíbrio, com 1.040 brocas e 2.240 parasitoides.

Na situação apresentada na figura 2.7, onde a população de brocas está próxima ao equilíbrio inicialmente, porém a de parasitoides está distante, o período de oscilação observado é de cerca de 80 dias. Este período de oscilação aumenta conforme as populações distanciam-se do equilíbrio, o que pode ser observado nas figuras 2.8 e 2.9. Nesta duas figuras o período de oscilação chega a cerca de 100 e 140 dias respectivamente.

Estas situações ocorrem devido a estrutura adotada para descrever a dinâmica, já que uma vez atingido um tamanho populacional alto, o tempo para atingir valores baixos novamente vai depender de quão grande for o pico anterior. Isto porém só ocorre quando existe interação entre as duas populações, já que independentemente do tamanho da população *C. flavipes*, ela será extinta do sistema no mesmo tempo na ausência de brocas, o único meio na estrutura adotada para crescimento dos parasitoides.

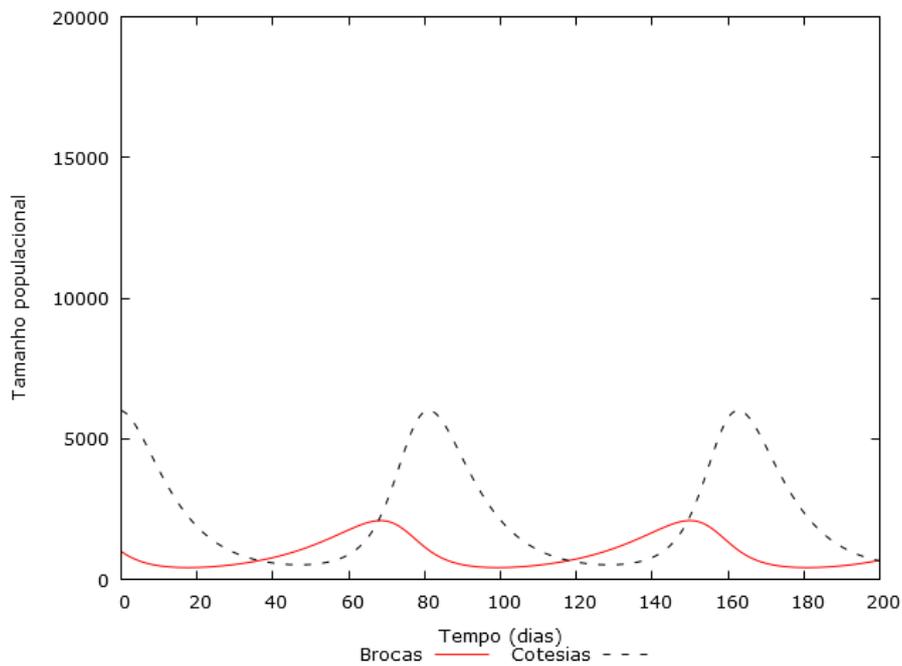


Figura 2.7: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* e de *C. flavipes* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 1.000 brocas e 6.000 vespas.

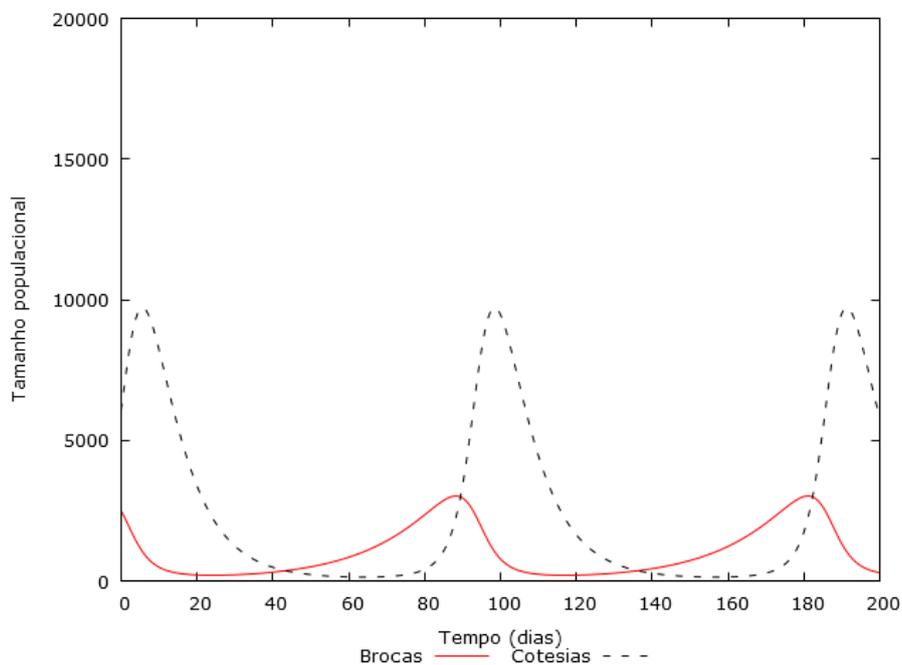


Figura 2.8: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* e de *C. flavipes* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 2.500 brocas e 6.000 vespas.

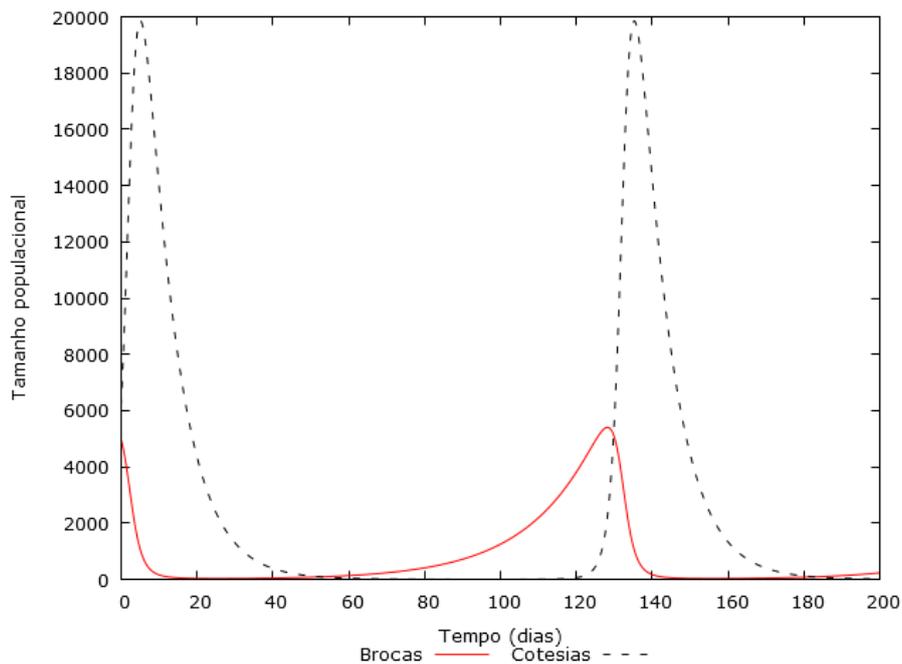


Figura 2.9: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* e de *C. flavipes* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 5.000 brocas e 6.000 vespas.

Ao retomar a condição onde a população inicial de brocas é de 2.500 indivíduos, como na figura 2.8 e aumentando a população de parasitoides, obtemos as figuras 2.10 e 2.11. Nestas condições, analogamente com o que foi observado anteriormente, o período de oscilação também aumenta conforme é aumentada a população de *C. flavipes*. Outro ponto interessante a ser observado é o aumento do valor do pico em ambas as populações. Aumentar a quantidade de parasitoides do sistema tem impacto direto no valor máximo que será atingido de indivíduos na população da praga, apesar de isso ocorrer após decorrido um tempo maior também.

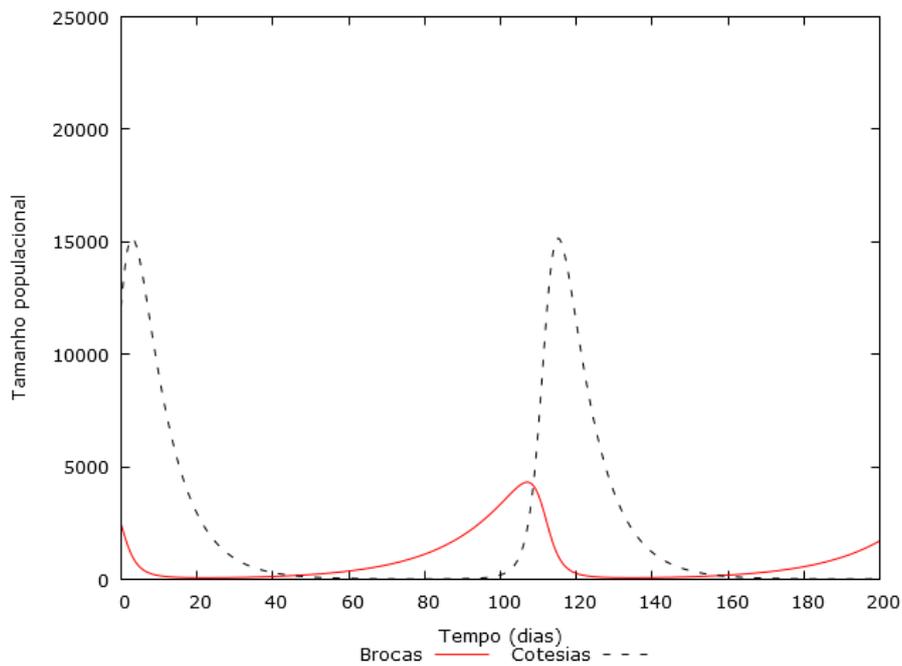


Figura 2.10: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* e de *C. flavipes* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 2.500 brocas e 12.000 vespas.

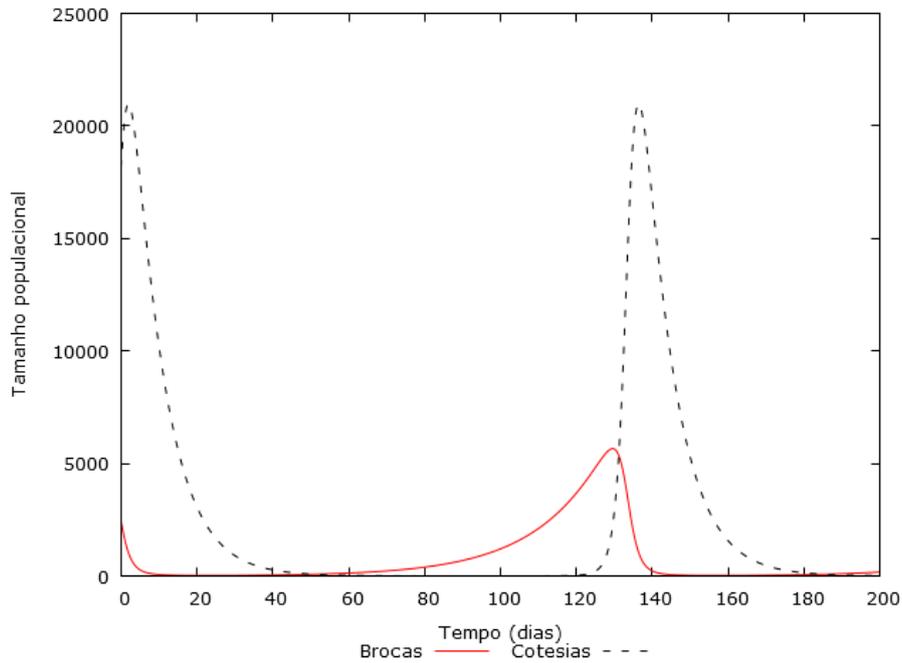


Figura 2.11: Evolução temporal do tamanho das populações de *D. saccharalis* e de *C. flavipes* de acordo com as equações (2.12) e (2.13) com condição inicial de 2.500 brocas e 18.000 vespas.

Observar um aumento no período de oscilação na dinâmica das populações envolvidas

é extremamente importante para formular protocolos de controle da praga. Isto porque, caso deva ser adotada uma política a poucos dias da colheita, por exemplo, um período de oscilação maior poderia ser estrategicamente interessante. No entanto, se a colheita for realizada após muito tempo, pode ser estrategicamente interessante se aproveitar dos picos menores da população da praga, mesmo que por um tempo maior.

No entanto, uma forma valiosa para se avaliar a dinâmica considerando apenas o que ocorre às populações, sem analisar o efeito do tempo, pode ser encontrada ao construir-se o plano de fases. O plano de fases é um retrato do que acontece ao descrever as equações 2.12 e 2.13 independente do tempo:

$$\frac{dN}{dP} = \frac{N(0,056 - 0,000025P)}{P(0,00012N - 0,1248)}. \quad (2.31)$$

A figura 2.12 apresenta um ciclo estável, obtido com as condições iniciais de 2.500 brocas e 6.000 parasitoides. Nesta figura foram traçadas as linhas isoclinais, que retratam a condição para taxa de crescimento populacional nulo.

É importante lembrar que o crescimento de uma população é limitado pelas características impostas pela outra, tais como taxa de crescimento e a constante retrata o impacto dos encontros aleatórios. Ocorre um crescimento nulo no ponto no qual as taxas de crescimento das duas populações se encontram. No entanto, como foi mostrado ao analisarmos a estabilidade do sistema, este ponto não pode ser atingido se o sistema inicia de qualquer outra condição inicial. Neste caso, o que surge são os ciclos limite, como pode ser observado na figura 2.12. Estas linhas dividem o ciclo limite em quatro quadrantes, que apresentam características comportamentais distintas para ambas populações.

Caso a análise se dê à direita da isoclinal, a curva de crescimento aponta crescimento e diminuição no eixo x, enquanto apresenta apenas crescimento no eixo y. Sendo assim, neste lado da isoclinal é observado o crescimento dos parasitoides, e o oposto ocorre no lado esquerdo do gráfico. Já se a análise ocorrer acima da isoclinal, existe crescimento e diminuição da população do eixo y, enquanto ocorre apenas diminuição no eixo x. Isto rege a população da praga, que perceberá acréscimos em sua população somente na região inferior da isoclinal. Sendo assim, a região superior direita favorece o crescimento das vespas, onde sua população aumenta. No entanto, por estar na porção superior a população da praga apresenta decréscimo.

Conforme a população de praga diminui, os recursos para os parasitoides vão se tornando escassos, até que esta passe para a porção esquerda de sua isoclinal da figura 2.12. No entanto, a população de vespas na região superior esquerda ainda é muito grande para permitir que a praga gere novos indivíduos. Isto gera uma situação onde ambas as populações estão diminuindo.

Quando a população de parasitoides diminui o suficiente para que seu tamanho atinja os valores da região inferior esquerda da figura 2.12, a população da praga pode então começar a crescer sem tantas vespas para suprimir seu crescimento. Conforme a população da broca cresce, o último quadrante do gráfico é atingido. Nesta porção existe abundância de praga, suficiente para que os parasitoides retomem seu crescimento, ao mesmo tempo que a baixa quantidade deste ainda não é suficiente para inibir o crescimento desta. Isto acontece até que existam brocas e vespas suficientes para que o primeiro quadrante seja novamente atingido, fechando assim o ciclo.

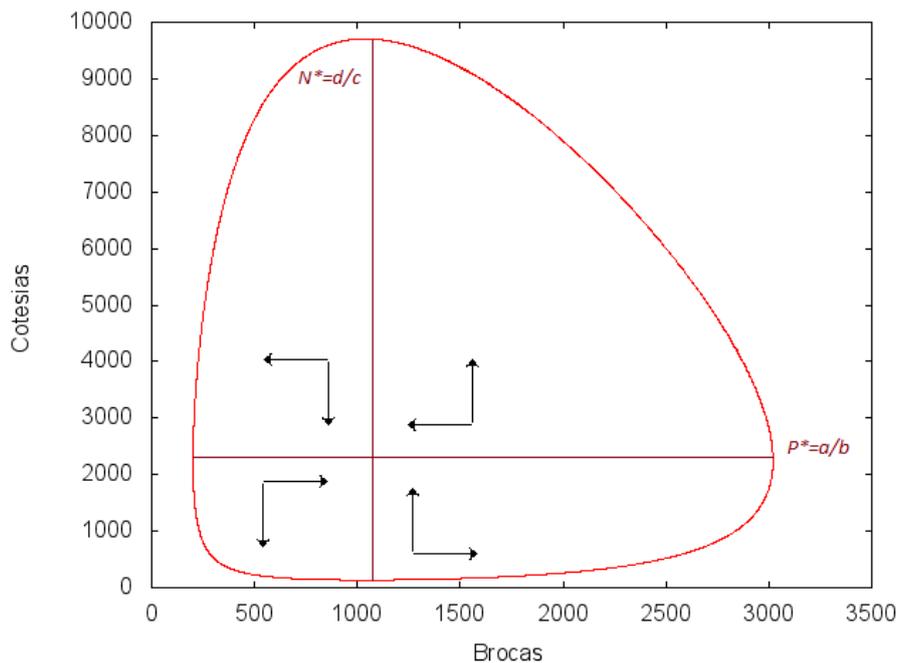


Figura 2.12: Plano de fases da interação entre populações de *D. saccharalis* e de *C. flavipes* com condição inicial de 2.500 brocas e 6.000 vespas.

Na figura 2.13 são apresentados cenários com 2.500 brocas e quantidades diferentes de parasitoides inicialmente. Vê-se aqui que cada conjunto de condições iniciais diferentes gera um novo ciclo estável. É ainda importante notar que qualquer quantidade de brocas e parasitoides inicialmente introduzidos em qualquer ponto sobre um destes ciclos fará com que o ciclo seja estabelecido. Sendo assim, o ciclo obtido com 2.500 brocas e 6.000 parasitoides poderia também ser obtido ao se introduzir esta quantidade de parasitoides quando cerca de 300 hospedeiros estavam presentes no sistema. Analogamente, o mesmo ciclo também seria estabelecido se cerca de 520 vespas fossem introduzidas ao serem observadas 2.500 brocas no sistema.

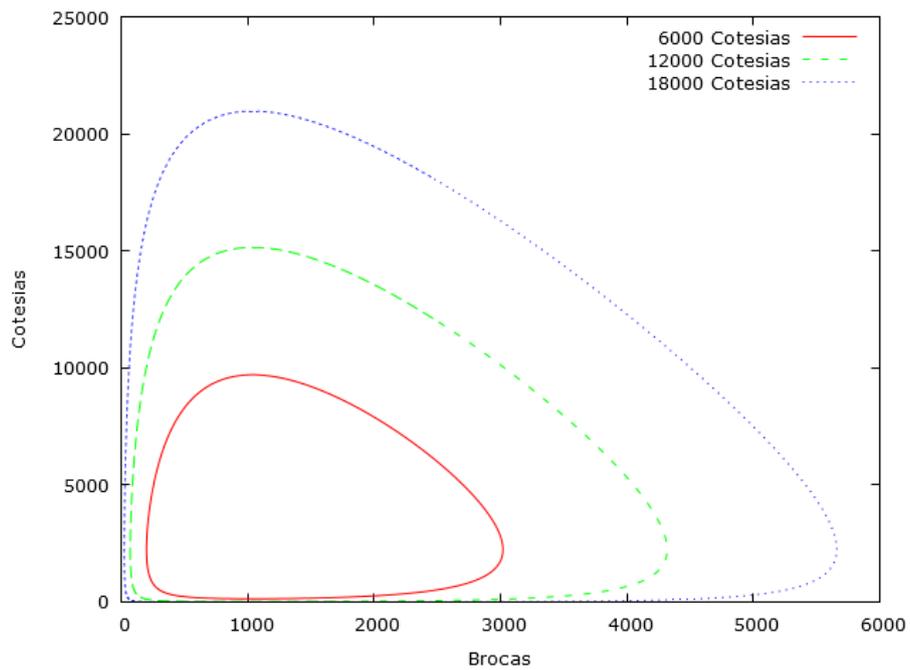


Figura 2.13: Plano de fases da interação entre populações de *D. saccharalis* e de *C. flavipes* com condição inicial de 2.500 brocas e variação na quantidade inicial de vespas.

No entanto, estabelecer um certo ciclo através de condições iniciais diferentes pode acarretar tanto em alguma estratégia prática útil no campo, quanto inclusive estratégias que sejam economicamente prejudiciais ao produtor. Esta avaliação das estratégias que poderiam ser formuladas com base nesse modelo serão apresentadas nas seções posteriores.

### **3 Simulação computacional da dinâmica de *D. saccharalis* e *C. flavipes***

A simulação computacional entra como grande aliada no entendimento do problema, já que experimentos em campo dispendem muito tempo (cerca de pelo menos 1 ano se for considerado todo o ciclo da cana-de-açúcar), podem ser custosos e, por meio dos métodos convencionais, ainda não é possível avaliar o crescimento populacional diário da praga e métodos de controle.

Como alternativa para solucionar estas questões, a utilização de simulações computacionais se apresenta como um intermediário entre experimentos em campo e modelos matemáticos, comprometendo um pouco dos aspectos realísticos do campo e obtendo em troca a evolução temporal diária das populações envolvidas. Neste capítulo, a influência das fases dos ciclos de vida da broca e de *C. flavipes* será estudada através da técnica de simulação de multi agentes.

#### **3.1 Configuração do início da simulação utilizada**

A simulação foi construída em linguagem C++ e em Python, utilizando o paradigma de orientação à objeto, possibilitando a criação de classes de objetos “brocas” e “cote-sias”, que possuíam como características o tempo de vida, número de prole e gênero. Na configuração inicial de cada simulação, a proporção entre machos e fêmeas para cada uma das populações era determinada sendo que cada indivíduo tinha o gênero escolhido de forma aleatória, com base nas proporções encontradas na literatura. Vários destes parâmetros apresentavam discordância entre autores e a escolha do conjunto utilizado como padrão precisou ser feita de maneira arbitrária neste trabalho. Porém, os caminhos para a adaptação do método para indivíduos com características diferentes são explicitados. O número de dias que o indivíduo pode viver, bem como a quantidade de prole que cada fêmea tem é determinado através de distribuições gaussianas, implementadas através da biblioteca “random.h”, incluída no Visual Studio 201 5, com valores médios e desvio padrão também determinados pela literatura. Para cada grupo de simulações, 200 repetições eram realizadas e o valor médio apresentado nos gráficos. Para diminuir a poluição visual, as barras do desvio padrão foram omitidas, excluindo os casos onde a análise delas se mostrava necessária.

## 3.2 Descrição da interação entre parasitoide e hospedeiro na simulação

Na figura 3.1 vemos como ocorre a interação entre brocas e *C. flavipes* na simulação. A interação checa todos os indivíduos sequencialmente e realiza testes. Inicialmente, é gerado um sorteio para descobrir se o indivíduo morreu por algum fator aleatório. A taxa para a morte aleatória é fixada sempre no início da simulação e é uma informação levada por cada indivíduo. Da mesma maneira, a expectativa de vida é um parâmetro fixado na criação do indivíduo e levada com este enquanto estiver vivo. Caso o indivíduo não morra por algum fator aleatório e consiga completar seu ciclo de vida, no último dia de vida ele poderá deixar descendentes, a depender se ele está apto para isso, sendo realizado de forma diferente entre parasitoides e hospedeiros. Para a população de brocas, se a fêmea é fértil ela pode gerar prole. Para os parasitoides, além de ser uma fêmea fértil, a probabilidade de deixar descendentes é dependente da quantidade de lagartas da broca e parasitoides presentes no sistema, multiplicada por um fator de predação. Quando o parasitoide deixa prole ele mata uma lagarta sorteada aleatoriamente. Caso o indivíduo seja macho, nada além da morte do indivíduo ocorre para ambas as populações no último dia de vida.

### 3.2.1 Parâmetros utilizados para *D. saccharalis*

Para a implementação computacional da dinâmica, foi necessário obter alguns parâmetros a partir da literatura para os indivíduos. Não existe um consenso entre todos os valores que caracterizam o ciclo de vida da broca, e um ponto importante a ser considerado é que estas podem se adaptar à região onde se encontram presentes e alterar seus ciclos de vida. Sendo assim, adotaremos o conjunto de parâmetros a seguir apresentados como sendo o padrão para a simulação. O ciclo de vida da broca foi obtido através do trabalho de Dinardo-Miranda (2008) [84] como sendo de  $70 \pm 2$  dias. Como o objetivo principal da simulação era observar o comportamento das lagartas, seus ciclos de vida foram resumidos em três fases: ovos, nos primeiros 10 dias; lagartas, nos próximos 53; e adultos, nos últimos sete dias. A proporção entre machos e fêmeas foi fixada em 1:1 e os prole gerados pelas fêmeas adultas são  $60 \pm 20$  indivíduos. A taxa de morte aleatória diária foi adotada arbitrariamente como sendo de 3%.

### 3.2.2 Parâmetros utilizados para *C. flavipes*

Analogamente à situação apresentada com *D. saccharalis*, não existe um consenso entre os parâmetros biológicos para *C. flavipes* na literatura. No entanto, como o objetivo

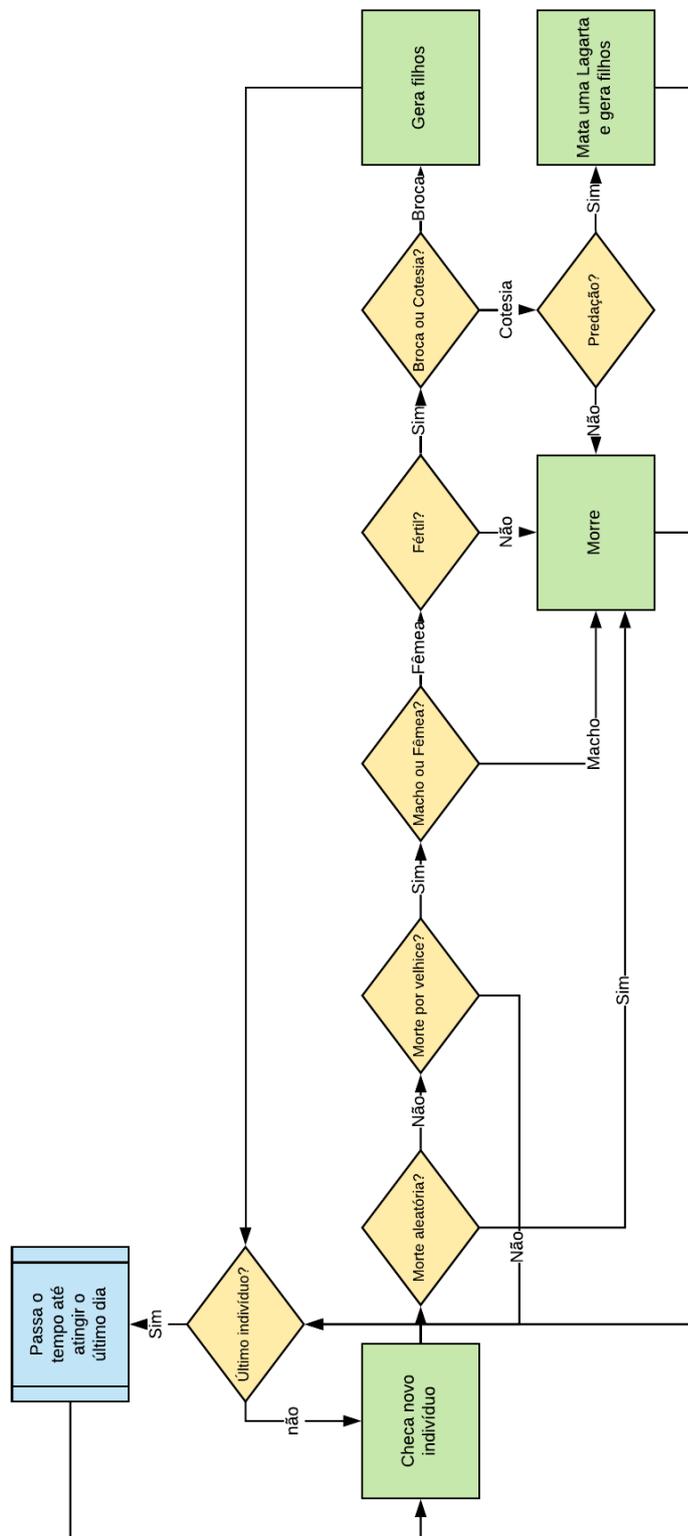


Figura 3.1: Descrição da simulação por meio da técnica de multi-agentes para a interação entre *D. saccharalis* e *C. flavipes*.

deste trabalho não é descrever cada situação presente no campo, e sim montar o ferramental necessário para a descrição e otimização dos problemas presentes no controle de pragas na cana, os parâmetros serão arbitrariamente escolhidos para a utilização na simulação. O ciclo de *C. flavipes* foi adotado como  $24 \pm 4$  dias [84], onde consideramos que só no último dia deste parasitoide pode gerar prole através do parasitismo de uma broca. A probabilidade do parasitismo ocorrer depende do tamanho da população de lagartas da broca e parasitoides presentes, multiplicado por um valor arbitrário, o que pode ser visto através da equação 3.1

$$P_{\text{parasitismo}} = E_C \frac{T_L}{T_C}, \quad (3.1)$$

onde  $P_{\text{parasitismo}}$  é a probabilidade do parasitismo ocorrer,  $T_L$  é o total de lagartas e  $T_C$  o total de *C. flavipes* presentes no sistema no momento da verificação, e  $E_C$  é uma constante que mede a eficiência do parasitoide. Como condição padrão foi adotado um parasitoide altamente eficiente, sendo o coeficiente  $E_C = 10$ . O tamanho da prole da vespa foi adotado como  $28 \pm 19$  e a proporção entre machos e fêmeas foi adotada como 1 : 2,13 [85]. Como o interesse do trabalho é a simulação da situação de liberação dos parasitoides artificialmente no campo, a idade inicial de todos eles foi estimada como sendo três dias antes de sua morte. Por último, a taxa de morte aleatória diária foi adotada como sendo de 5%.

### 3.3 Análise dos resultados

Antes de avaliar a interação entre a população de *D. saccharalis* e *C. flavipes*, será importante avaliar como cada uma dessas populações evolui isoladamente. Particularmente, a interação de nosso maior interesse é a de brocas, que pode ser observada na figura 3.2. Nela vemos a população total de brocas e a evolução de machos e fêmeas, que crescem de forma igualitária, já que a literatura apresenta taxa de 1:1 entre eles. Porém, o fato mais curioso nesta imagem é a presença de ciclos de cerca de 70 dias, correspondendo ao ciclo de vida de cada broca. A dinâmica apresenta uma população inicial pequena, sofrendo um crescimento na metade do ciclo e subsequente decréscimo, atingindo valores maiores que o ponto de partida.

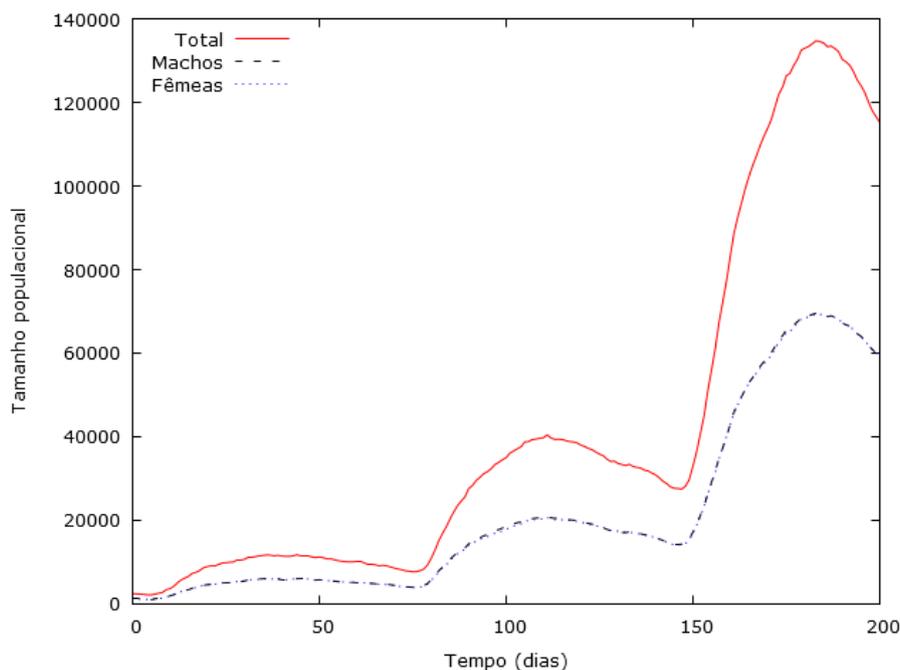


Figura 3.2: Evolução temporal da população de machos e fêmeas da broca com taxa de morte aleatória nula.

Visando contribuir para o entendimento da existência destes ciclos pode-se dividir a evolução da população total entre as fases de ovos, lagarta e o que chamaremos aqui de fase de adulto, agregando as fases de pupa e mariposa nesta última. A figura 3.3 retrata tal situação, porém considerando que os indivíduos só morrem de velhice, ao completarem seus ciclos de vida. É possível perceber que a população de indivíduos adultos é sempre muito pequena, quando comparada com as outras. Isto ocorre devido ao fato de ser a última fase do ciclo de vida, onde os indivíduos são nela inseridos cerca de sete dias antes de suas mortes. Na figura 3.4 pode-se observar que a quantidade de indivíduos mortos num determinado dia é constante. Entretanto, a quantidade de novos indivíduos oscila bastante no decorrer dos dias, isto devido ao desvio padrão, onde cada adulto gera em média  $60 \pm 20$  novos indivíduos. Contudo, esta oscilação se dá em torno do valor médio da distribuição gaussiana dos prole, cerca de 60 vezes o número de fêmeas adultas que morreram.

Ao observamos a figura 3.3 e considerando o ciclo de vida com 70 dias, tendo a população uma distribuição uniforme de idades, aproximadamente 10% dos indivíduos iniciais estariam na fase adulta. No entanto, a cada novo dia novas lagartas passam para a fase adulta, o que inicialmente significaria cerca de  $\frac{1}{70}$  da população total. Cada um destes indivíduos que passam a serem adultos, se forem fêmeas, ovopositam uma média de 60 ovos, efetivamente aumentando a população total da espécie. Vale lembrar que a população inicial teve a distribuição de idades feita de forma uniforme, onde a fase de ovo

se dava nos 10 primeiros dias, o que representaria  $\frac{1}{7}$  da população total inicial. Com o acréscimo de 60 ovos em média para cada adulto que deixa o sistema, a probabilidade de se encontrar um ovo aumenta significativamente após os primeiros dias. Assim, conforme os dias vão passando, os primeiros ovos passam para a fase de lagarta, e isto ocorre até que a quantidade de ovos que entra no sistema seja igual a quantidade de ovos que vira lagarta. Após o ciclo dos primeiros ovos gerados se completar, este se repete, o que pode ser visto na figura 3.5.

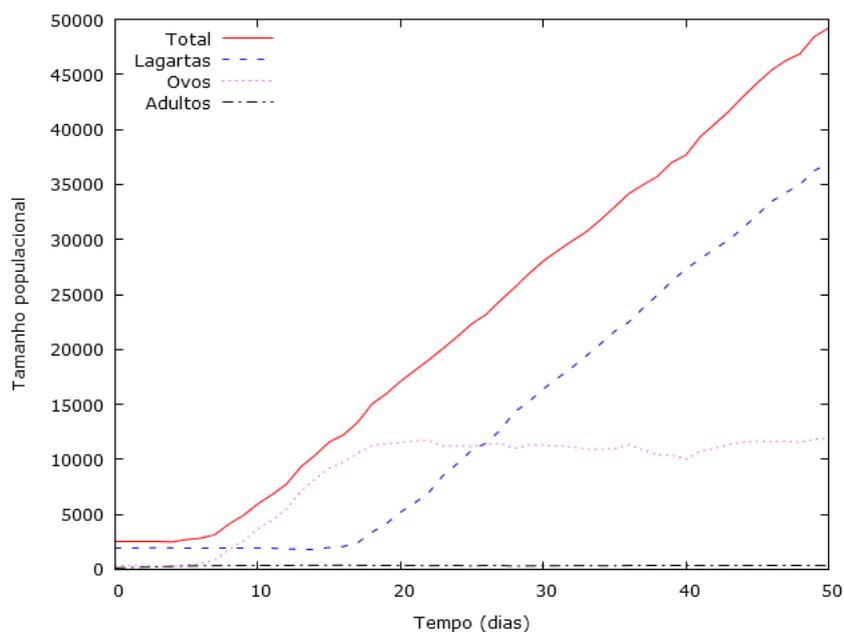


Figura 3.3: Evolução temporal da população de broca separada nas fases de seu ciclo de vida, com taxa de morte aleatória nula.

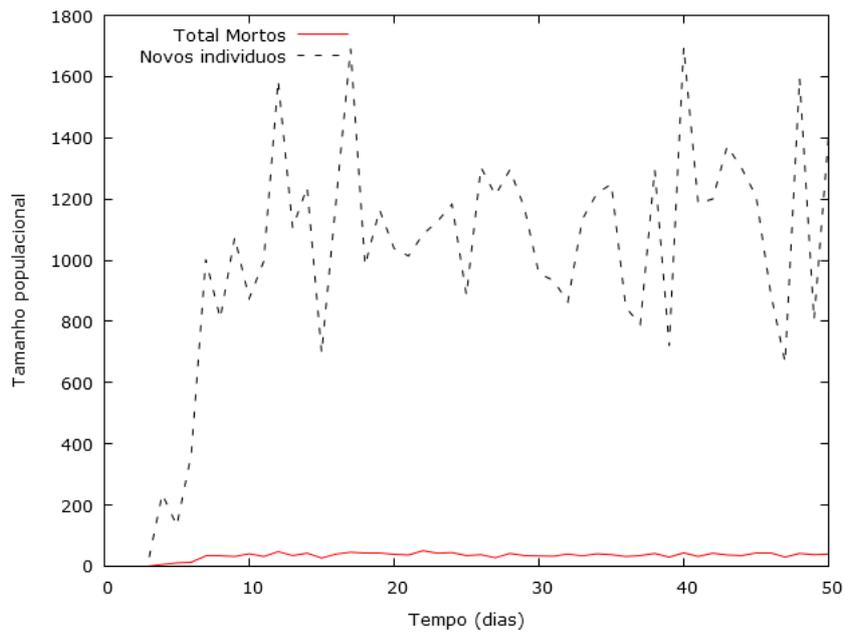


Figura 3.4: Total de diário de mortes e liberação de novos indivíduos da broca.

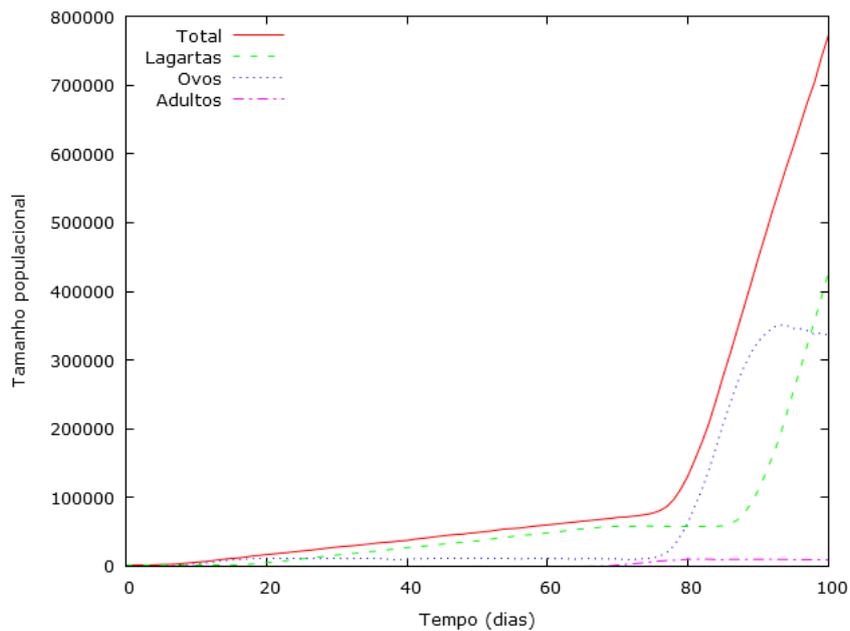


Figura 3.5: Evolução temporal da população de broca separada nas fases de seu ciclo de vida, com taxa de morte aleatória nula até os primeiros ovos inseridos inicialmente no sistema completarem seus ciclos de vida.

É importante lembrar que na natureza a situação descrita anteriormente, onde o indivíduo só morre ao completar o seu ciclo de vida, pode muitas vezes não ocorrer. Para simular esta condição, foi estabelecida uma probabilidade do indivíduo morrer a cada dia,  $P_d$ . Esta probabilidade foi inicialmente fixada em 3% ao dia, o que faria com que após

decorrida uma quantidade de dias,  $t_d$ , a probabilidade de o indivíduo estar vivo,  $P_v$ , é dada por

$$P_v = (1 - P_d)^{t_d} . \quad (3.2)$$

Sendo assim, a probabilidade de um indivíduo estar vivo após 70 dias é de aproximadamente 12%. Isto contribui para o entendimento da dinâmica apresentada na figura 3.2, onde a população total apresenta valores máximos e mínimos no ciclo esperado para cada geração. A figura 3.6 apresenta a contribuição dos dois tipos de morte implementadas na dinâmica. Nesta figura é possível ver que para a condição imposta de 3% de morte por fatores aleatórios diariamente,  $P_d = 0,03$ , esta é muito mais significativa quando comparada aos indivíduos que morrem ao completarem seus ciclos de vida. É interessante notar que a morte aleatória apresenta valores maiores nos períodos com mais indivíduos e nos períodos onde a morte por “velhice” ocorre ela é menor. Tendo em vista que quanto maior a quantidade de indivíduos, mais fácil será visualizar o efeito da probabilidade  $P_d$ , pode-se então comparar as figuras 3.5 e 3.7. Vemos nesta última que, ao contrário do que acontecia na situação onde  $P_d = 0$ , os indivíduos na fase de ovos não atingem mais uma população constante. Isto ocorre por dois motivos, o primeiro é a morte dos indivíduos nesta fase e o segundo é decorrência da morte de indivíduos das outras fases, principalmente adultos e lagartas mais velhas, que não mais poderão completar seus ciclos e deixar descendentes.

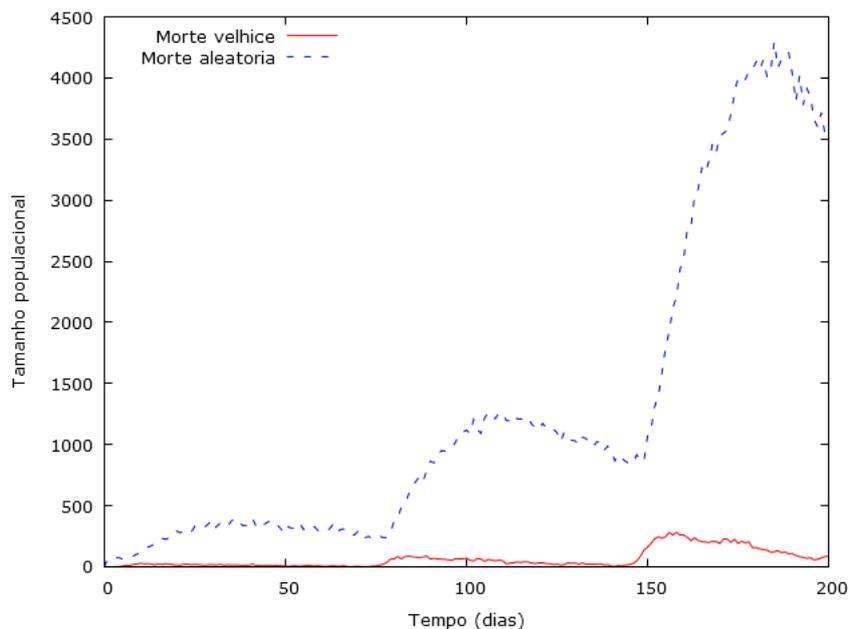


Figura 3.6: Evolução temporal da morte das brocas que morreram antes e ao completarem seus ciclos de vida com  $P_d = 0,03$  .

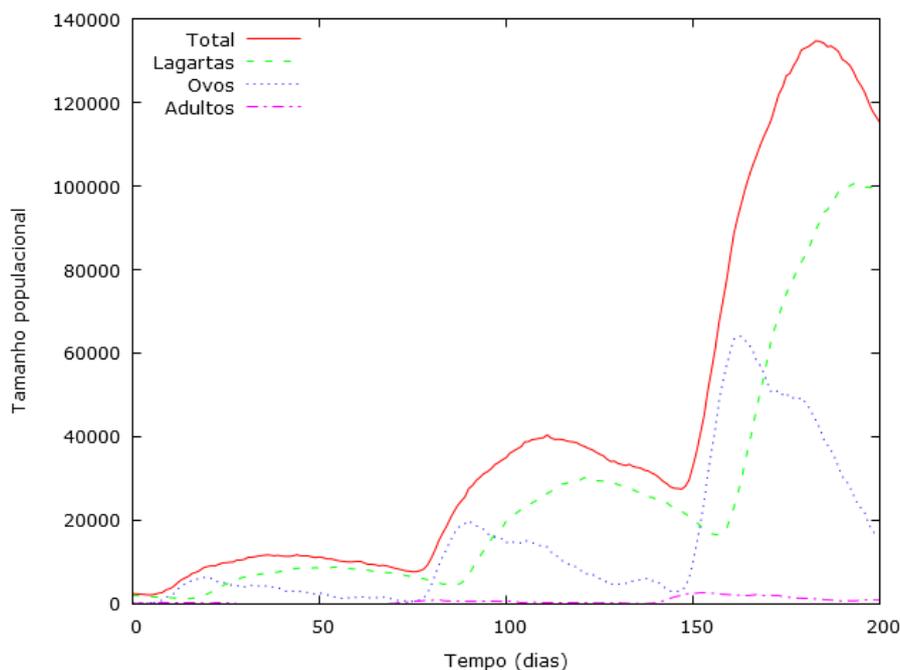


Figura 3.7: Evolução temporal da população de broca separadas nas fases de seu ciclo de vida, com  $P_d = 0,03$ .

Como estamos considerando a população de parasitoides como sendo especialistas que não vivem na ausência dos hospedeiros, a descrição desta população isoladamente é um pouco mais simples. A figura 3.8 apresenta a situação onde 6.000 vespas foram introduzidas com idades seguindo uma distribuição uniforme. Vemos que em menos de 30 dias a população foi inteiramente extinta. É possível também perceber que a população de machos e fêmeas não apresenta o mesmo tamanho, devido à condição inicial imposta, onde foi considerado que 70% dos indivíduos são fêmeas. Ao considerar este cenário onde os parasitoides estão isolados e no processo de população nula, a figura 3.9 pode mostrar a parcela da população que completa seu ciclo de vida (sem reprodução) e quais indivíduos morrem por fatores aleatórios antes disto. É possível ver que logo nos primeiros dias uma grande quantidade de indivíduos morre por velhice. A probabilidade de um indivíduo estar vivo após um tempo  $t_d$  é novamente dada pela equação 3.2, sendo que neste caso foi utilizado  $P_d = 0,05$ , o que faria a probabilidade  $P_v = 28\%$  após 25 dias. No entanto, com os parâmetros utilizados, a quantidade de indivíduos mortos por cada sistema é praticamente equivalente, sendo a morte por velhice, cerca de 3100 indivíduos, um pouco maior que a aleatória. É importante notar que após cerca de 1 cinco dias os indivíduos presentes no sistema são praticamente todos adultos, os quais eram muito jovens no tempo 0.

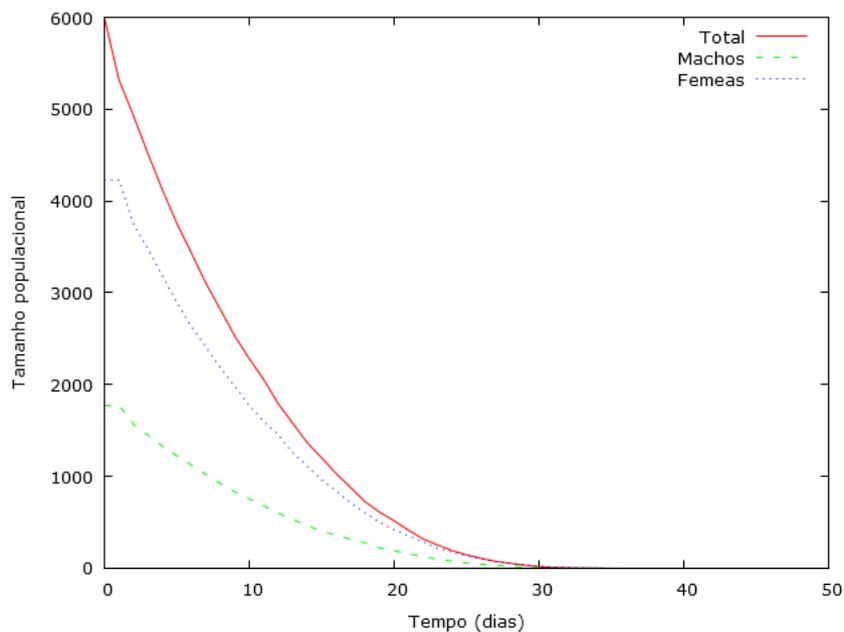


Figura 3.8: Evolução temporal da população de *C. flavipes* separadas em machos e fêmeas com taxa de morte aleatória de 5%.

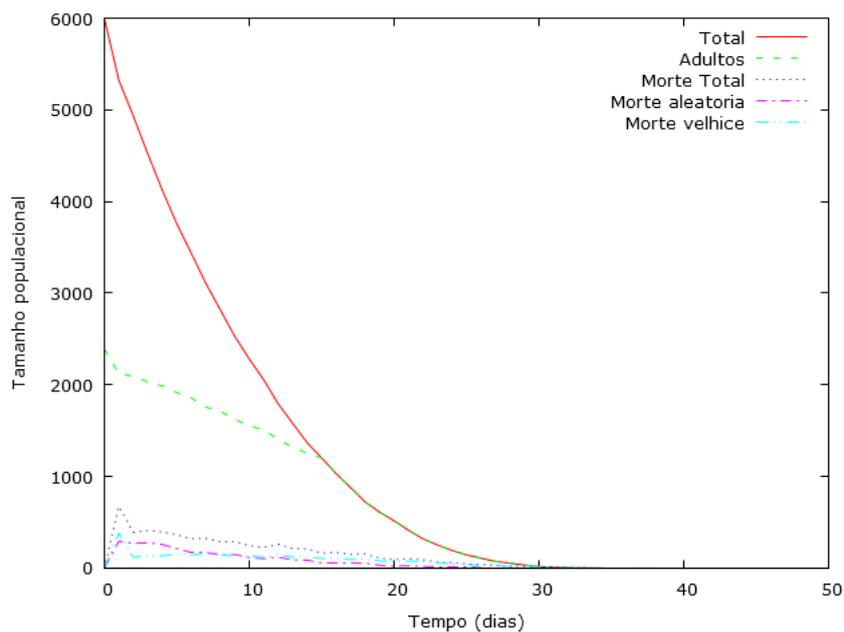


Figura 3.9: Evolução temporal da população de *C. flavipes* considerando os processos de morte, com  $P_d = 0,05$ .

**Eficiência do parasitoide:** A figura 3.10 apresenta a interação entre as populações de *D. saccharalis* e *C. flavipes* obtidas através da simulação multi agentes. Na situação apresentada, o parasitoide presente é pouco eficaz, apresentando eficiência  $E_C = 2$ . Neste

cenário, pode-se observar que existe coexistência das populações dentro do período estimado. Para as condições utilizadas a população de brocas apresenta diminuição logo após a liberação dos parasitoides. Porém, após poucos dias da liberação, a população de brocas cresce novamente, atingindo o dobro da população inicial em cerca de 20 dias. Ao atingir o valor máximo, a população dos hospedeiros começa a decrescer e cerca de 70 dias depois, o ciclo se fecha com esta atingindo os valores iniciais. O efeito do controle biológico nesta situação pode ser observado nos valores máximos atingidos, que a cada ciclo atingem valores menores. No entanto, a coexistência entre os indivíduos não ocorre para os casos onde o predador é mais eficiente, como pode ser visto na figura 3.11 para  $E_C > 4$ . Vemos nesta figura que conforme a eficiência do parasitoide aumenta, o tempo para a população nula da broca diminui. Porém o tamanho populacional máximo atingido não diminui consideravelmente. Vale ressaltar que a população de *C. flavipes*, que apresenta pouca diferença no primeiro pico máximo, na sua segunda geração percebe-se um aumento no número de indivíduos conforme  $E_C$  aumenta.

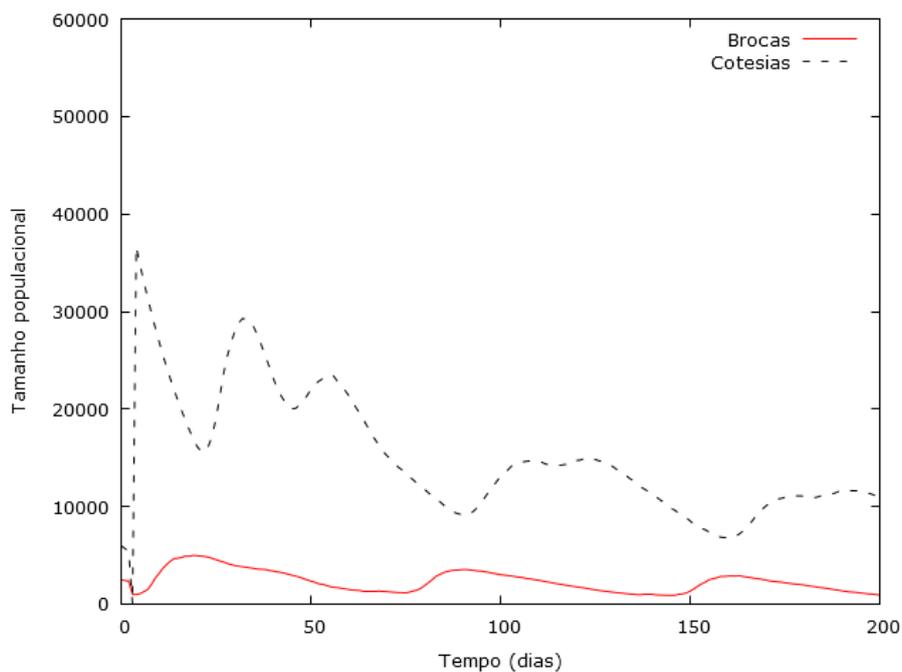


Figura 3.10: Evolução temporal da simulação com interação das populações de praga e parasitoides com eficiência de parasitismo  $E_C = 2$ .

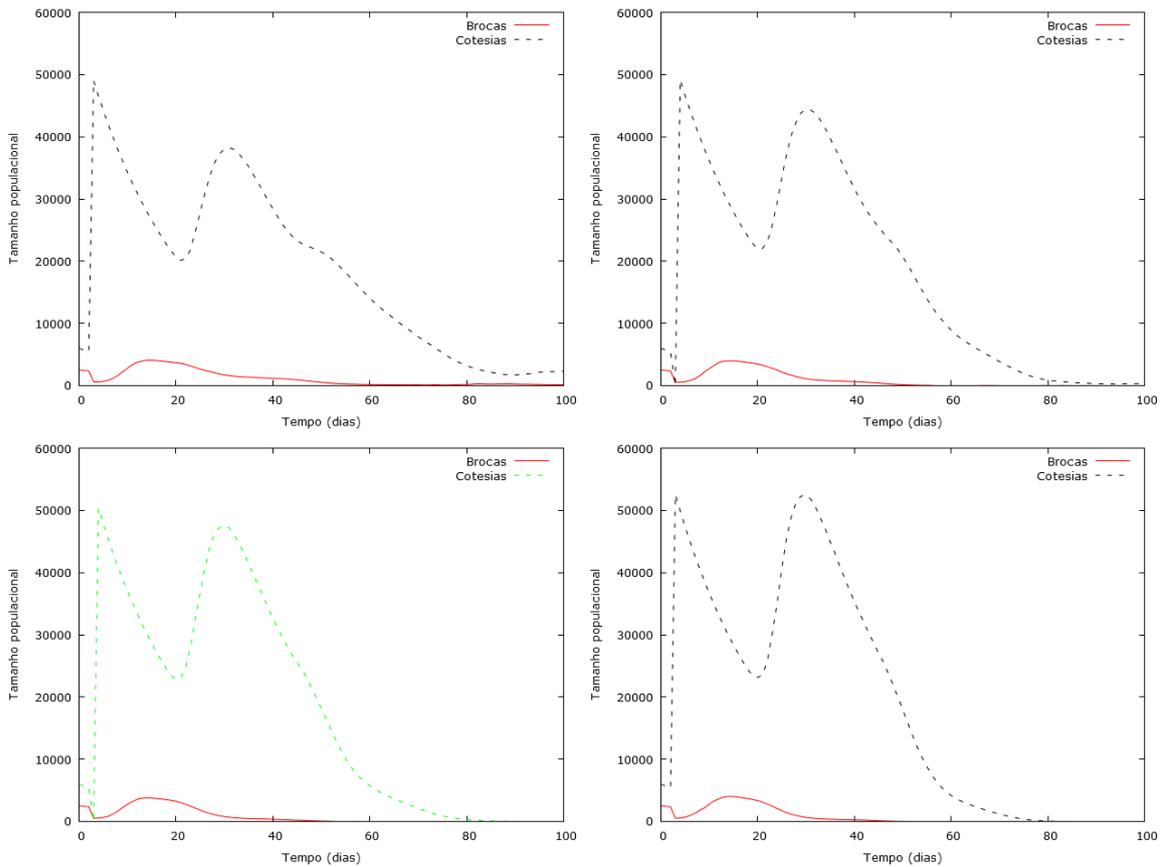


Figura 3.11: Evolução temporal da simulação com interação das populações de praga e parasitoides com eficiência de parasitismo: canto superior esquerdo  $E_C = 4$ ; superior direito  $E_C = 6$ ; inferior esquerdo  $E_C = 8$ ; inferior direito  $E_C = 10$ .

Afim de explicar um pouco mais a dinâmica, entender como se dão os processos de morte dos parasitoides se torna importante. Estes processos estão descritos na figura 3.12, onde vemos a situação para  $E_C = 2$ , ocorrendo coexistência entre as populações para o tempo avaliado. Vemos nos primeiros dias um grande pico de mortes por indivíduos que completaram seus ciclos de vida. Isto é a característica da dinâmica adotada, onde a vespa é colocada no sistema muito próximo do momento do parasitismo ocorrer. Porém, como os indivíduos inseridos morrem logo nos primeiros dias, pelos próximos 20 dias todas as mortes ocorridas serão devido aos fatores aleatórios, com a probabilidade diária  $P_d = 5\%$ , anteriormente fixada. Nas situações com mais indivíduos, mortes por fatores aleatórios são mais comuns. Contudo, após 20 dias do início da simulação, novamente ocorre a morte dos indivíduos que conseguiram atingir seus ciclos de vida completos. Vale ressaltar que após cerca de 100 dias as mortes dos indivíduos com ciclos completos começam a ser um pouco menos identificadas, o que pode ser explicado pela expectativa de vida diferente para cada indivíduo.

Na figura 3.13 é retratado o efeito de  $E_C$  sobre a morte dos parasitoides. É possível

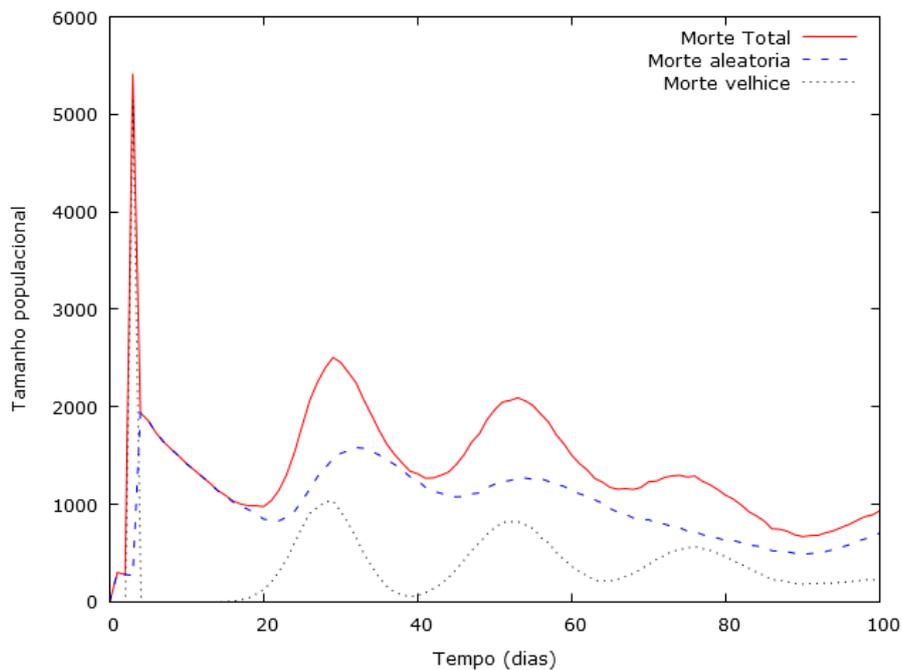


Figura 3.12: Evolução temporal da simulação com interação com divisão das mortes dos indivíduos de *C. flavipes*, com  $E_C = 2$ .

então observar que quanto maior  $E_C$ , mais rapidamente as mortes dos indivíduos ocorrem, o que foi explicado pela população nula dos hospedeiros no sistema. Vê-se também que quanto mais eficaz o parasitoide, maior os picos dos indivíduos que conseguem completar seus ciclos de vida. Porém, como as vespas são mais abundantes quando  $E_C$  é maior, mais mortes aleatórias vão ocorrer também. É interessante notar que para  $E_C$  maiores, ocorrem casos onde a morte aleatória é menos expressiva que a morte por velhice.

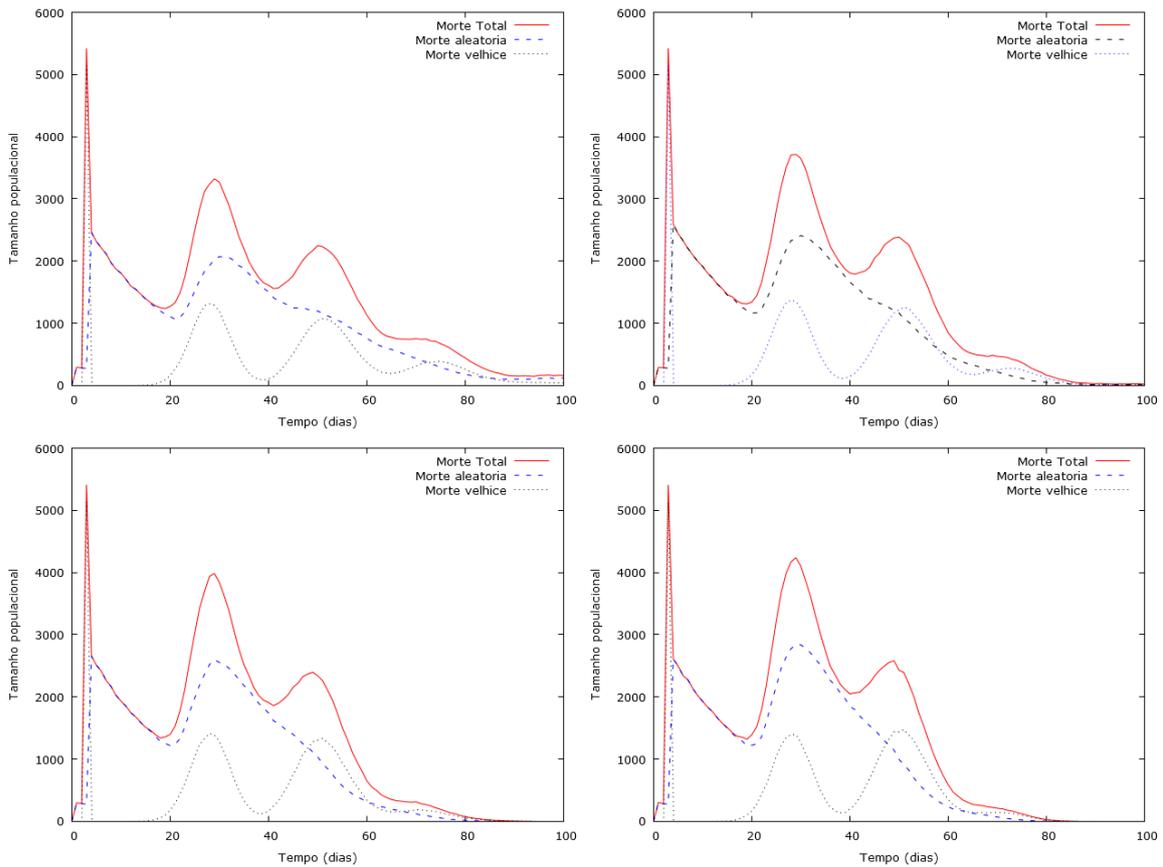


Figura 3.13: Evolução temporal da simulação com divisão das mortes dos indivíduos de *C. flavipes*: canto superior esquerdo  $E_C = 4$ ; superior direito  $E_C = 6$ ; inferior esquerdo  $E_C = 8$ ; inferior direito  $E_C = 10$ .

O parasitismo neste cenário só ocorre quando a broca está na fase de lagarta. A figura 3.14 apresenta a população de lagartas e o parasitismo. É possível observar que no início da dinâmica, onde a maior parte das brocas está na fase susceptível ao ataque dos parasitoides, a população de lagartas sofre uma grande baixa. No entanto, o efeito supressor neste caso não dura muito tempo, sendo que a população de lagartas logo recomeça a crescer. Ao comparar este cenário com a situação sem parasitoides, retratada na figura 3.7, vê-se que o do ciclo das brocas não é expressivamente alterado pela liberação dos parasitoides. Contudo, os picos desta população são grandemente reduzidos, o que mostra a eficácia do controle. Ao empregar-se parasitoides mais eficientes, é possível observar pela figura 3.15 que tanto os picos de valor máximo quanto o tempo para atingir valor mínimo de lagartas presentes é reduzido.

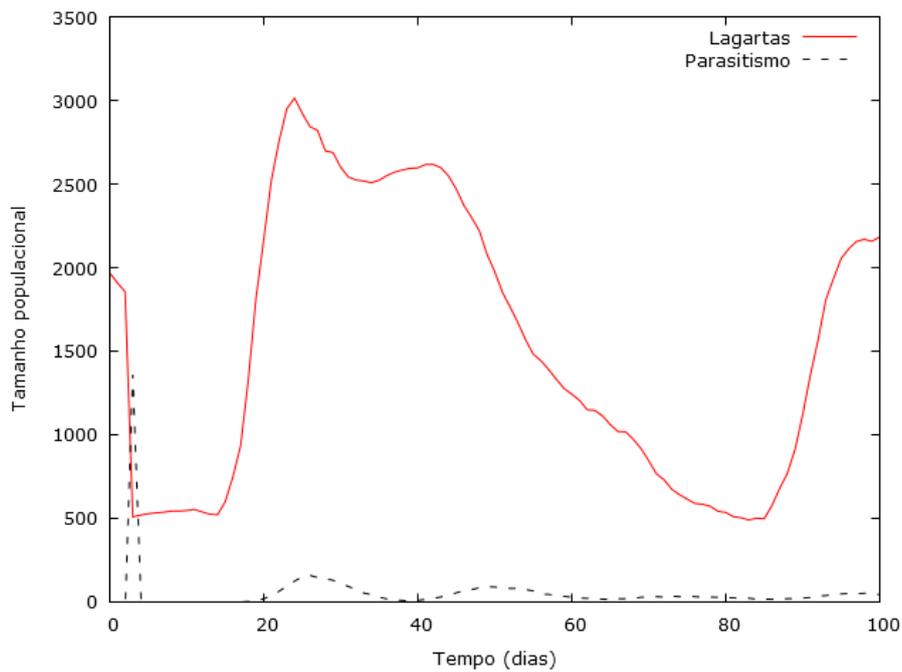


Figura 3.14: Evolução temporal da simulação com interação descrevendo a população de lagartas e parasitismo, com  $E_C = 2$ .

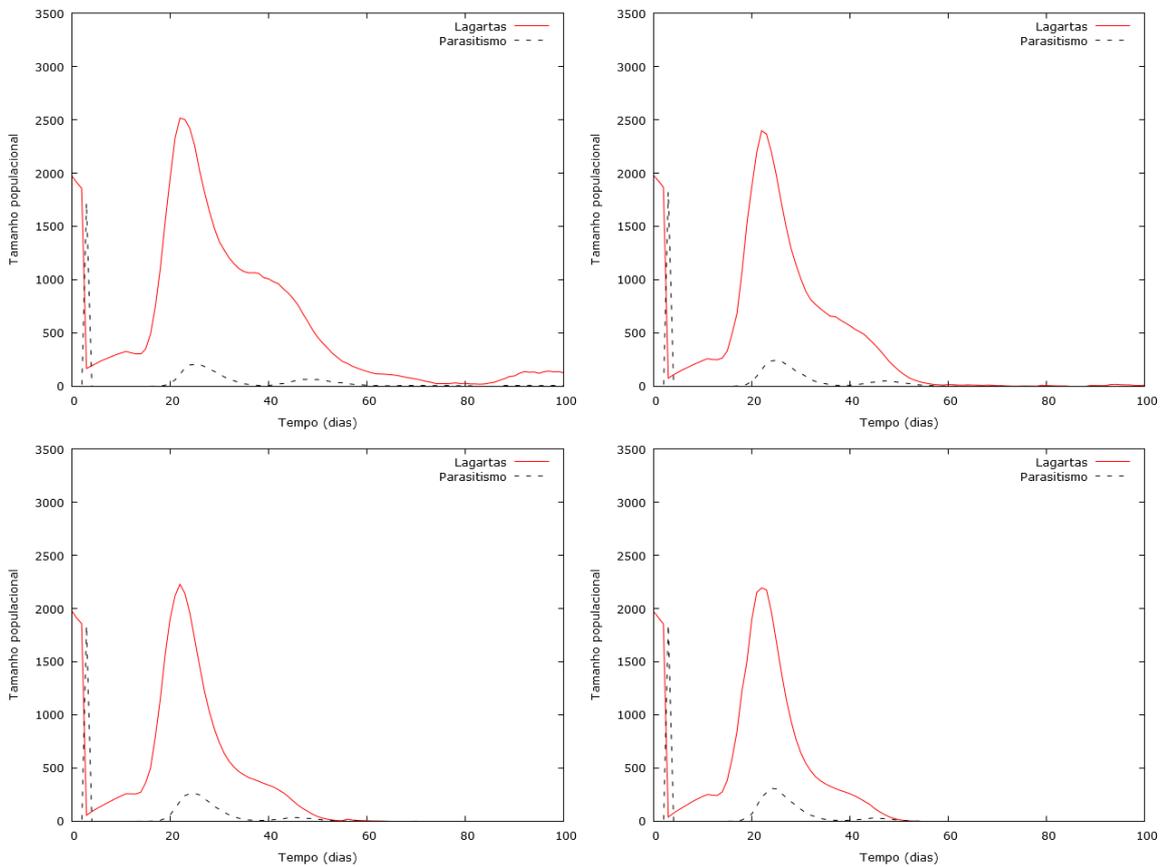


Figura 3.15: Evolução temporal da simulação com interação descrevendo a população de lagartas e parasitismo: canto superior esquerdo  $E_C = 4$ ; superior direito  $E_C = 6$ ; inferior esquerdo  $E_C = 8$ ; inferior direito  $E_C = 10$ .

Uma questão importante a se observar é a contribuição de cada tipo de morte das brocas na dinâmica. Inicialmente o que pode ser observado na figura 3.16 é a contribuição quase que total da morte por parasitismo. Porém, após este primeiro evento, morte por velhice ocorre em escala baixa e morte por fatores aleatórios se apresenta como mais expressiva, novamente acompanhando a disponibilidade de indivíduos no sistema. É possível ver inicialmente ciclos de cerca de 20 dias, onde o parasitismo dá uma contribuição expressiva para o total de mortes, o que começa a ficar mais uniforme a partir de 100 dias. Neste sistema, a população de broca só pode crescer quando uma morte por velhice ocorre, o que vemos ser um evento relativamente raro, sendo que o encurtamento do período em que ela ocorre diminui conforme o tempo passa, indicando que a população está direcionada ao extermínio completo se não houver influência externa. O que pode ser visto na figura 3.17 é a grande contribuição do parasitismo para o total de mortes, principalmente ao se adotar parasitoides mais eficazes. Este é então o maior contribuinte para a morte da praga após os primeiros 20 dias, o que não era observado no caso onde  $E_C = 2$ .

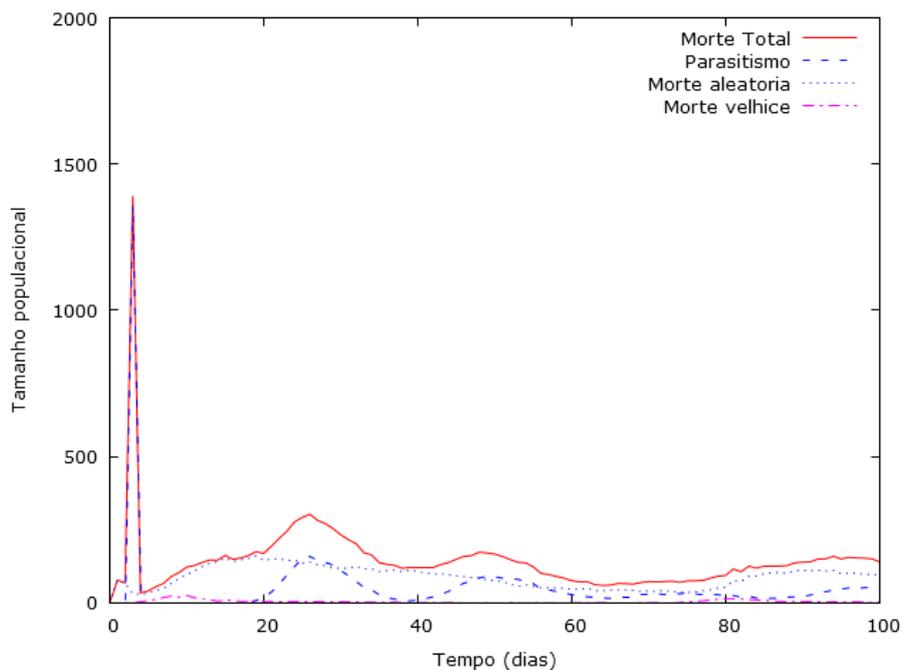


Figura 3.16: Evolução temporal da simulação com interação descrevendo as mortes da população de *D. saccharalis*, com  $E_C = 2$ .

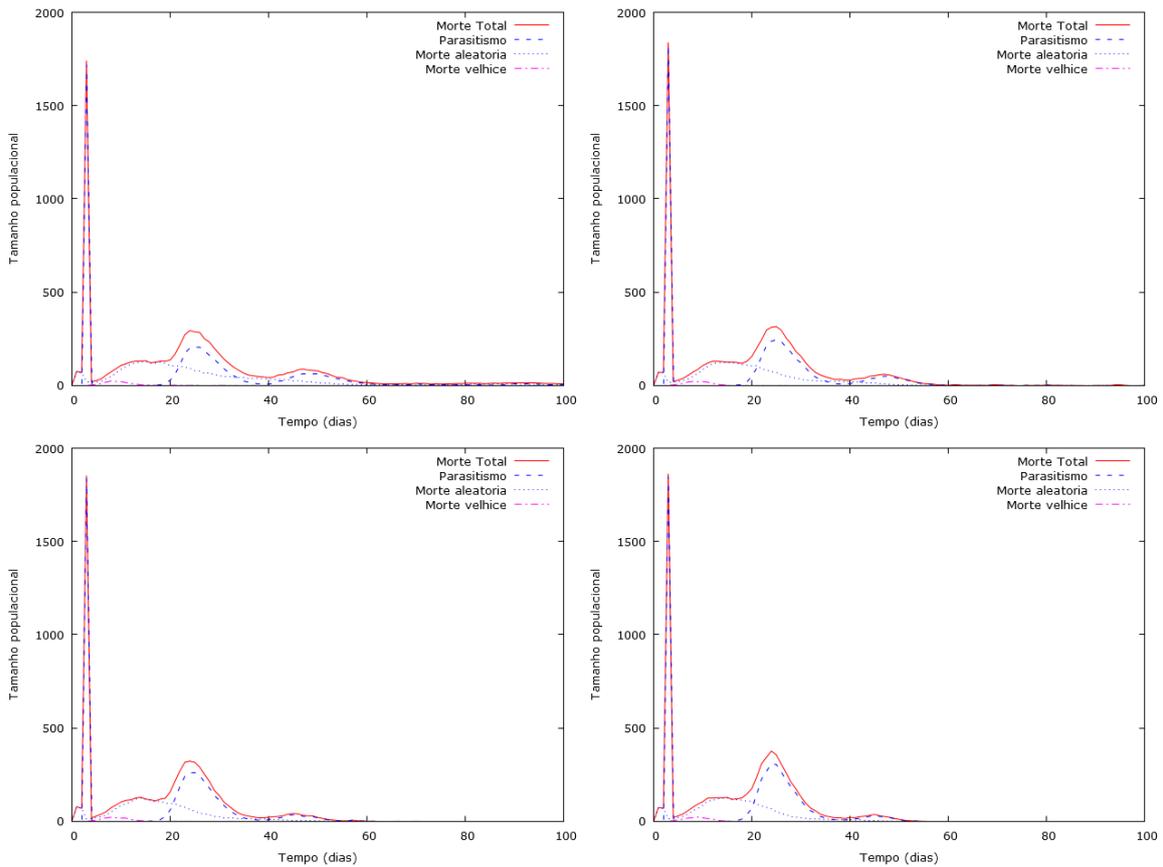


Figura 3.17: Evolução temporal da simulação com interação descrevendo as mortes da população de *D. saccharalis*: canto superior esquerdo  $E_C = 4$ ; superior direito  $E_C = 6$ ; inferior esquerdo  $E_C = 8$ ; inferior direito  $E_C = 10$ .

Por fim, a população de brocas pode ser observada em suas diferentes fases de vida na figura 3.18. Vê-se que inicialmente ocorre uma grande queda na população total, o que foi anteriormente explicado pela ação do parasitismo, sendo que no ponto mínimo, metade da população presente é de lagartas e a outra metade é constituída quase que igualmente por adultos e ovos. Estas duas últimas fases agem como uma barreira protetora da população, já que o parasitoide não atua sobre elas. É possível observar que a população total nos primeiros 20 dias tem sua maior expressão na fase de ovos. Porém, é importante notar que mesmo quantidades muito pequenas de adultos geram crescimentos muito rápidos.

Na figura 3.19 a população de lagartas apresenta menor expressão quando comparadas ao caso anterior, com  $E_C = 2$ . É curioso notar que quanto maior a eficiência do parasitismo, mais rapidamente o primeiro pico da população de ovos e adultos entra em população nula. Isto ocorre devido ao maior controle inicial das lagartas mais velhas, que desta forma não completam mais seus ciclos de vida. Outro ponto importante a se considerar é a presença do pico máximo de lagartas com cerca de 25 dias após a liberação dos parasitoides. Também vemos o baixo valor de brocas após 70 dias em qualquer um

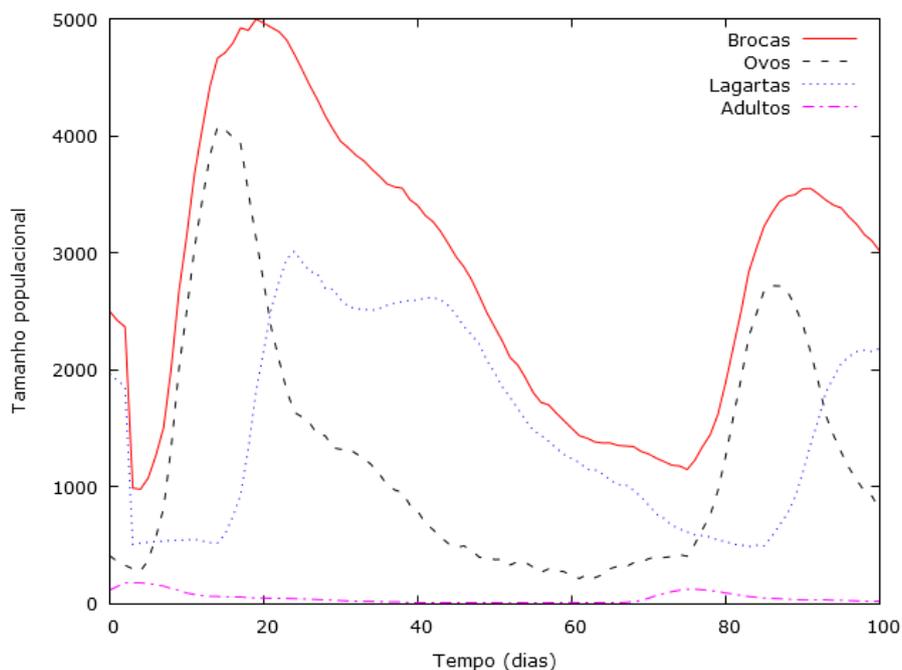


Figura 3.18: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de *D. saccharalis*, com  $E_C = 2$ .

dos casos considerados. Este resultado é importante ao realizar levantamentos, já que a execução destes com 25 dias da liberação do controle pode gerar uma estimativa errônea quanto à eficácia do parasitoide. Por outro lado, realizando o levantamento com cerca de 70 dias também gera uma estimativa ineficaz, já que nesta situação se encontra um ponto de mínimo, o que acarretaria numa representação falsa com relação à eficácia de *C. flavipes*. Idealmente, a partir das situações apresentadas aqui pode-se estimar que a época ideal para realizar um levantamento de estimativa da eficácia do parasitoide, por meio da quantidade de lagartas presentes no sistema, é obtida entre 40 e 50 dias. Caso o levantamento neste período apresente populações estimadas com valor próximo ao inicial, a eficácia do parasitoide pode então ser questionada.

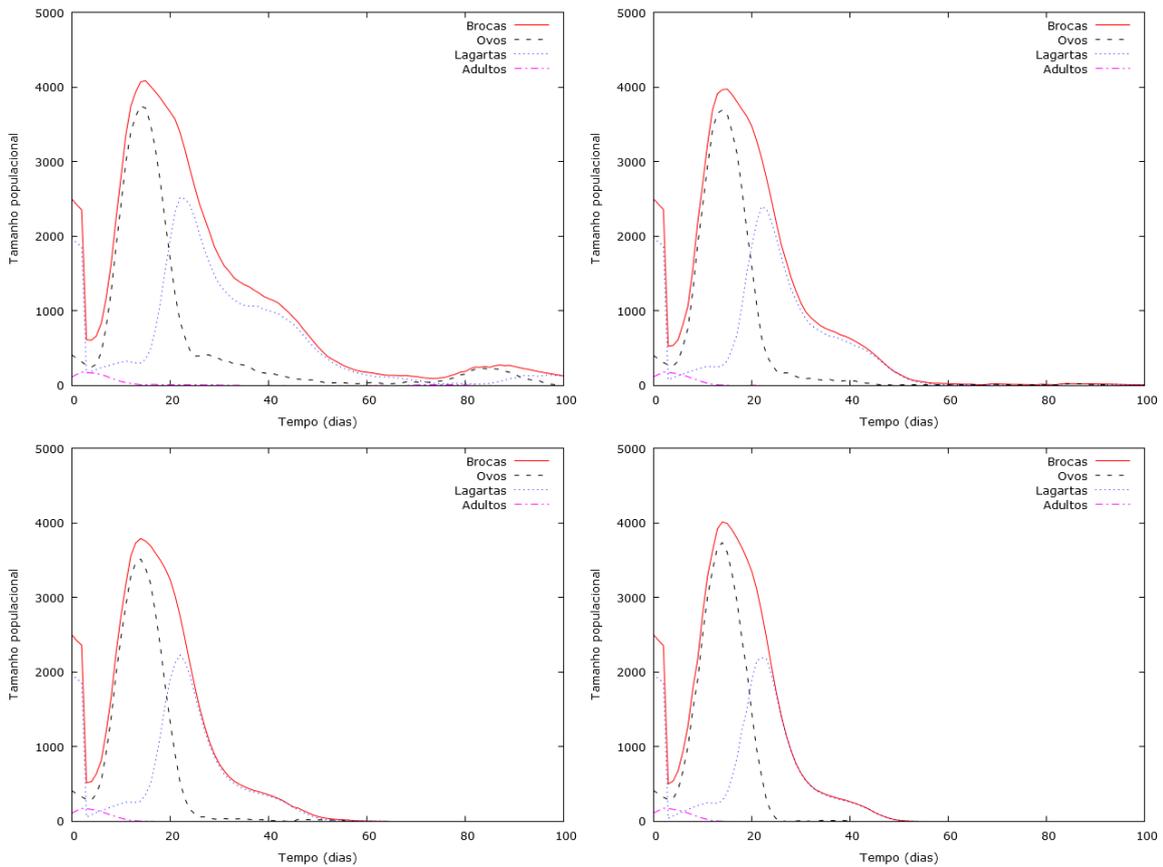


Figura 3.19: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de *D. saccharalis*: canto superior esquerdo  $E_C = 4$ ; superior direito  $E_C = 6$ ; inferior esquerdo  $E_C = 8$ ; inferior direito  $E_C = 10$ .

**Influência da quantidade de vespas inseridas:** A figura 3.20 apresenta a situação onde a eficiência da vespa é de  $E_C = 2$ , sendo que foram introduzidas 6.000 parasitoides quando foram identificadas 1.000 brocas. Esta situação, onde a vespa é pouco eficaz, gera uma dinâmica de coexistência durante o período avaliado. Neste cenário, a quantidade de ovos no primeiro pico, após o parasitismo entrar em ação, é de quase o dobro da quantidade de brocas inicialmente encontradas no sistema. Esses ovos, com o tempo, geram uma população de lagartas também maior que a quantidade inicial de brocas totais. É importante notar que as pequenas reduções da quantidade de lagartas, que podem ser observadas próximo ao pico destas, podem também ser explicadas pela quantidade de parasitoides adultos presentes no sistema. Ao comparar esta figura com a figura 3.21 pode-se observar o efeito de tamanhos populacionais diversos na dinâmica. Vemos que uma dada quantidade de vespas não reduz aos mesmos patamares populações de broca inicialmente com valores diferentes, caso a vespa utilizada não seja muito eficaz. Isto pode ser visto ao comparar os cenários onde o tratamento foi de 6.000 vespas e a quantidade de praga presente foi de 1.000, 2.500 e 5.000 brocas. No entanto, ao comparar as situações onde a

broca manteve-se com tamanho populacional de 2.500 indivíduos e os tratamentos foram alterados, tendo sido empregados 6.000, 12.000 e 18.000 parasitoides, vemos que estes não apresentaram reduções significativas da praga. Isto em geral pode ser explicado de duas maneiras, sendo a primeira que o parasitoide é muito eficaz e os tratamentos com mais vespas não geram uma melhora significativa. A segunda, que pode ser utilizada nessa situação, é de que o parasitoide é muito pouco eficaz e para haver alguma melhora significativa, o tratamento indicado deve ser de quantidades muito superiores.

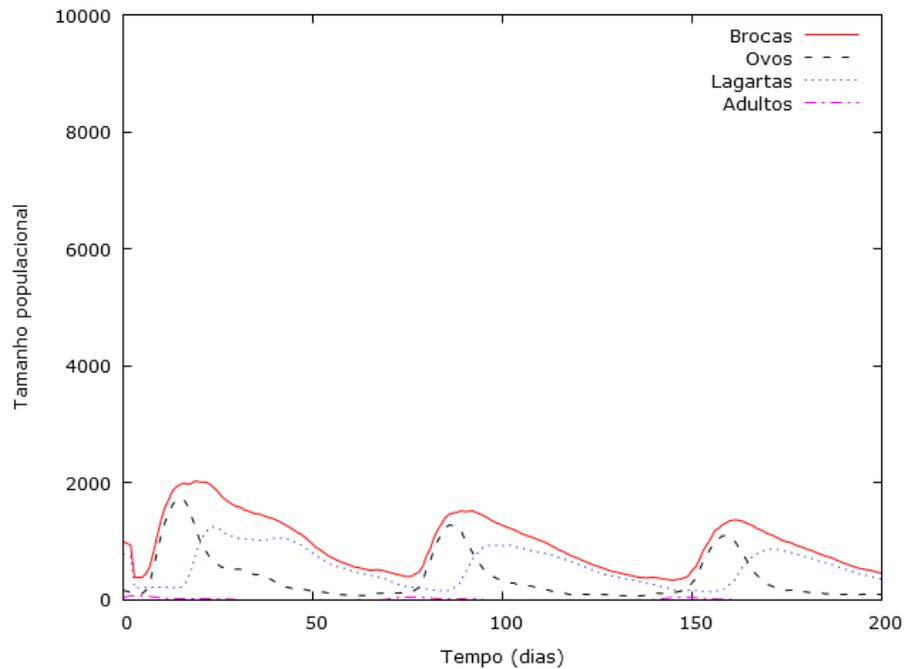


Figura 3.20: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de *D. saccharalis*, com  $E_C = 2$ , 1.000 brocas e 6.000 parasitoides.

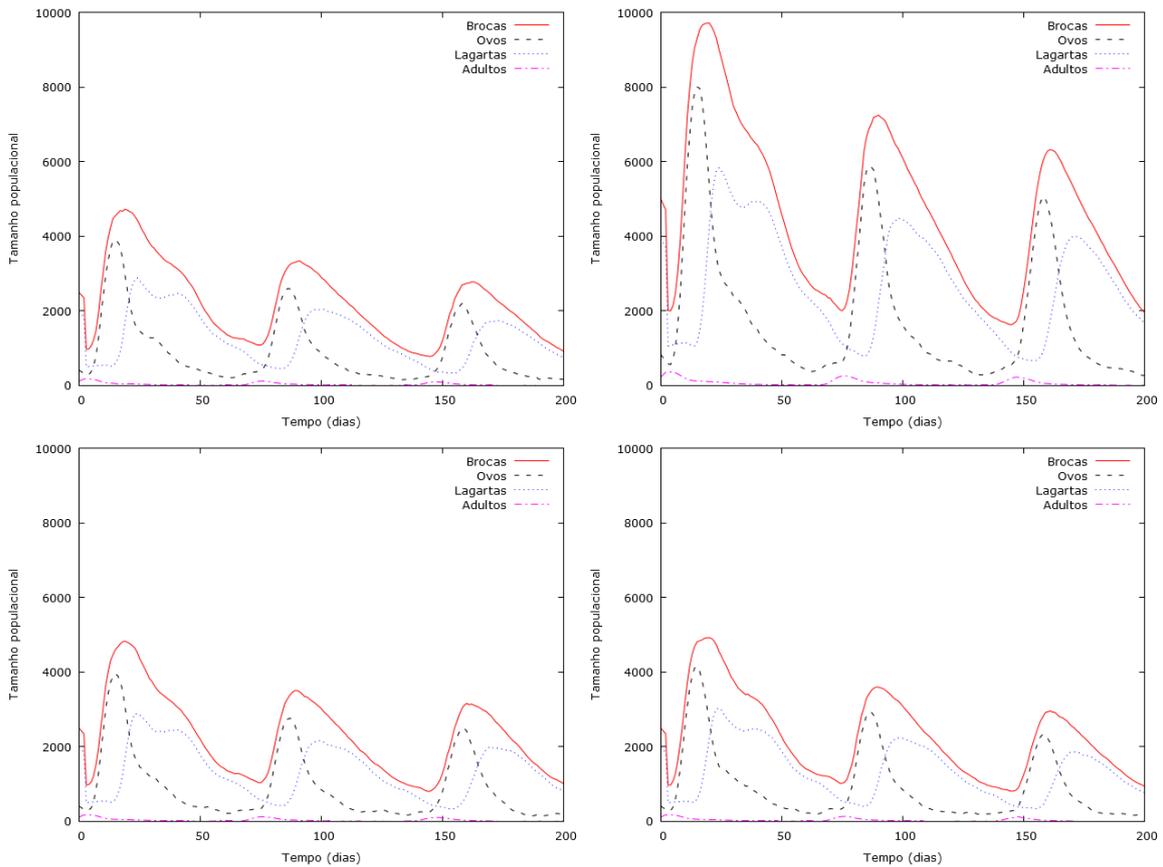


Figura 3.21: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de *D. saccharalis*,  $E_C = 2$ : canto superior esquerdo 2.500 brocas e 6.000 parasitoides; superior direito 5.000 brocas e 6.000 parasitoides; inferior esquerdo 2.500 brocas e 12.000 parasitoides; inferior direito 2.500 brocas e 18.000 parasitoides.

Contudo, os cenários apresentados nas figuras 3.20 e 3.21 consideram apenas vespas pouco eficazes. Para se obter um entendimento melhor da influência dos tamanhos populacionais sobre o sistema, cenários com  $E_C = 10$  são apresentados nas figuras 3.22 e 3.23. Em todos os cenários apresentados nestas figuras a população da praga foi extinta. É interessante notar a quantidade de parasitoides adultos presentes nas figuras 3.20 e 3.22. Nesta segunda situação, o primeiro pico de adultos é muito maior que no caso onde  $E_C = 2$ , e então para  $E_C = 10$ , a população da praga é extinta do sistema. Isto pode indicar uma possibilidade de tratamento com duas liberações de parasitoides, caso a eficiência da vespa seja baixa, onde  $E_C$  é pequeno, cerca de 20 dias após a primeira liberação.

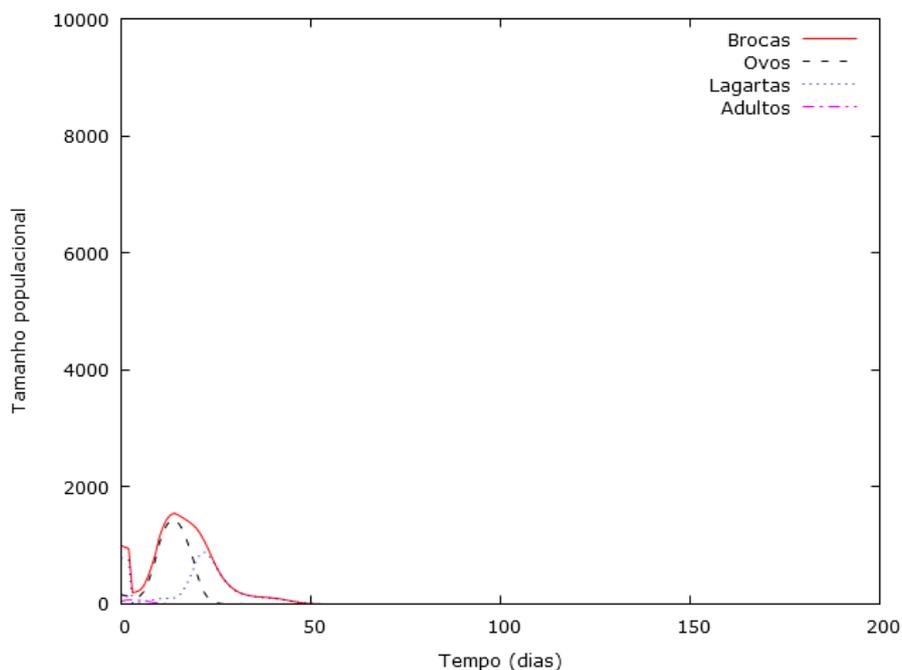


Figura 3.22: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de *D. saccharalis*, com  $E_C = 10$ , 1.000 brocas e 6.000 parasitoides.

Comparando os cenários com tratamento fixado em 6.000 parasitoides, vemos através das figuras 3.22 e 3.23 que a quantidade inicial de brocas é muito importante para o resultado do controle. Isto indica que levantamentos sistemáticos devem ser realizados para evitar que a praga atinja valores muito altos, onde mesmo o controle sendo efetivo na população nula desta, o dano causado ao sistema seja considerável. No entanto, os resultados obtidos com uma vespa altamente eficiente mostram que os tratamentos com 6.000, 12.000 e 18.000 parasitoides apresentam respostas muito semelhantes, o que indica que o parasitismo neste sistema está saturado.

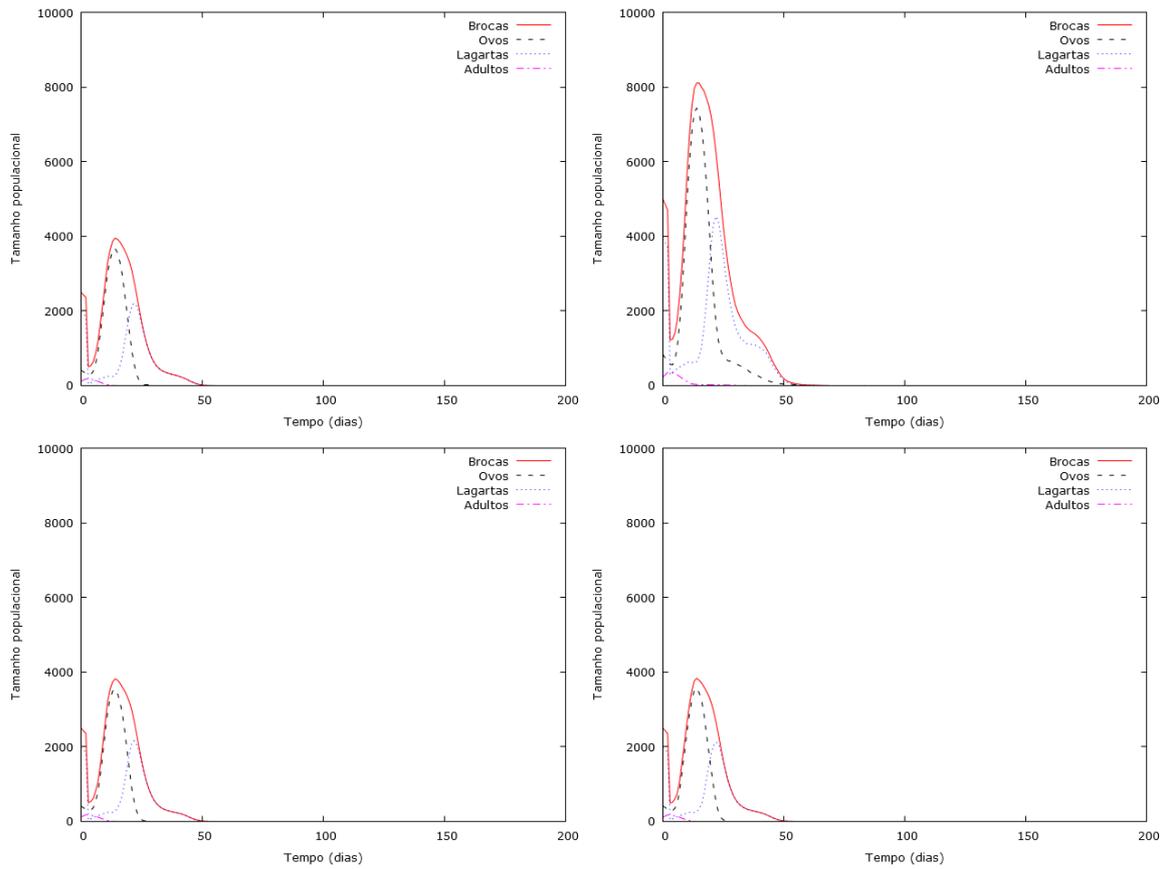


Figura 3.23: Evolução temporal da simulação descrevendo os tamanhos populacionais das fases de vida de *D. saccharalis*,  $E_C = 10$ : canto superior esquerdo 2.500 brocas e 6.000 parasitoides; superior direito 5.000 brocas e 6.000 parasitoides; inferior esquerdo 2.500 brocas e 12.000 parasitoides; inferior direito 2.500 brocas e 18.000 parasitoides.

## 4 Otimização do custo

Para que o produtor agrícola adote novas estratégias de controle, estas devem ser pautadas no que ele considera importante. Em geral, isso significa redução de custos, porém uma maior preocupação com o meio ambiente vem também se tornando mais relevante na mente do agricultor. Neste capítulo estas questões serão consideradas ao construir e avaliar uma ferramenta teórico-prática para o controle biológico da broca, visando a redução de custos desta. Serão utilizadas duas abordagens, sendo aqui realizada a adaptação de uma ferramenta estatística para melhorar o levantamento da praga. Então, de posse da abordagem apresentada nos capítulos anteriores, nos quais foi realizada estimativa futura dos tamanhos populacionais, será calculado o custo da praga e, como consequência da junção dessas duas abordagens, o controle otimizado.

### 4.1 Avaliação do custo

Utilizando-se como ponto de partida o modelo Lotka-Volterra para descrever a interação entre hospedeiros e parasitoides, isto é, entre a broca-da-cana e a *C. flavipes*, inicialmente será avaliado o custo causado pela população de brocas<sup>2</sup>. Isto pode ser feito avaliando o dano financeiro causado por uma quantidade definida de brocas durante um período específico conhecido. É importante notar que nesta parte do estudo foram adotados parâmetros que descrevem a interação entre as brocas e vespas obtidos da literatura [84], mas que podem ser reavaliados para outros casos, já que ambas as populações aparentam apresentar uma alta sensibilidade ao clima. Desta forma, alterações climáticas, especialmente na temperatura, podem alterar a dinâmica entre as populações significativamente.

Usando como aproximação que cada broca presente no sistema causa sempre o mesmo dano à plantação, pôde-se considerar que o dano total causado pela população de brocas era descrito pela integral da curva gerada no modelo Lotka-Volterra, multiplicado por uma constante  $C_{broca}$ . Esta constante é influenciada tanto por características fisiológicas da broca, tais como quantidade de cana consumida, como também pelo seu preço. Isto ocorre por ser a constante  $C_{broca}$  um parâmetro que avalia essencialmente o dano financeiro causado pela presença de uma única broca no sistema. Com base no artigo de Sandoval e Senô (2010) [86], que consideram que a cada 1% de brocas por hectare<sup>3</sup>, uma perda de cerca de R\$ 100,00, foi possível propor que  $C_{broca} = 0,002$ . Este parâmetro pode e deve ser reavaliado conforme o valor da cana seja alterado ou a cada introdução

<sup>2</sup>Neste contexto, estamos considerando o custo causado pela população de brocas como sendo as perdas que esta gera somado ao valor do seu controle.

<sup>3</sup>Isto equivale a 1.000 brocas presentes no momento da colheita.

de espécies novas, já que o dano da broca pode variar nesses casos.

Outro parâmetro importante a ser considerado é o custo do uso das vespas,  $C_{vespa}$ . Esse parâmetro considera o custo de cada vespa no momento da liberação, o que em valores atuais, apresenta um custo de R\$ 4,00 por 1.500 indivíduos de *C. flavipes*, o que faria  $C_{vespa} = 0,0027$ . Este valor também está sujeito às variações do mercado e deve ser ajustado quando alguma alteração for identificada.

Com base nos valores de  $C_{broca}$  e  $C_{vespa}$ , a função que contabiliza o custo gerado pelo dano das brocas somado ao custo do controle utilizando a *C. flavipes* é

$$C(w) = P_0 C_{vespa}(w) + C_{broca} \int_0^{t_f} V(t) dt, \quad (4.1)$$

onde  $w$  são as vespas,  $P_0$  é a quantidade inicial de parasitoides,  $V(t)$  é dada pela evolução temporal da população de brocas e  $t_f$  é o tempo final do período desejado.

Sabendo que  $C_{broca}$  pode variar, alguns cenários foram simulados para se entender um pouco melhor como este parâmetro poderia influenciar no custo do controle.

#### 4.1.1 Custo estimado por meio do modelo Lotka-Volterra

Na figura 4.1 é possível ver a influência de  $C_{broca}$  no custo total do controle,  $C$ , onde inicialmente o dano causado pelas brocas é nulo e qualquer liberação de vespas gerará custos. Conforme o valor de  $C_{broca}$  aumenta, o custo de não adotar nenhuma estratégia vai se tornando alto, o que justificaria o uso da vespa. Iremos levar em consideração que uma boa estratégia é aquela que tenha um apelo forte o suficiente para convencer os produtores à sua adoção. Sendo assim, parece interessante adotar como definição da estratégia ótima aquela que gere o menor custo total possível. É interessante notar que para o período escolhido é possível sempre descobrir o ponto ótimo, onde a quantidade empregada de vespas geraria o menor custo final. Curiosamente, ao contrário do que se poderia acreditar, utilizar quantidades grandes de vespas não significa economia, mesmo que essas quantidades levem a praga próximo à população nula. Outro ponto que pode ser contrário à intuição do produtor é que nem sempre a estratégia que mais gera economia é àquela que acabe totalmente com a praga no campo. Além desses pontos destacados vale a pena notar que conforme  $C_{broca}$  aumenta de valor, o ponto ótimo com  $C$  mínimo é obtido para quantidades iniciais maiores de parasitoides.

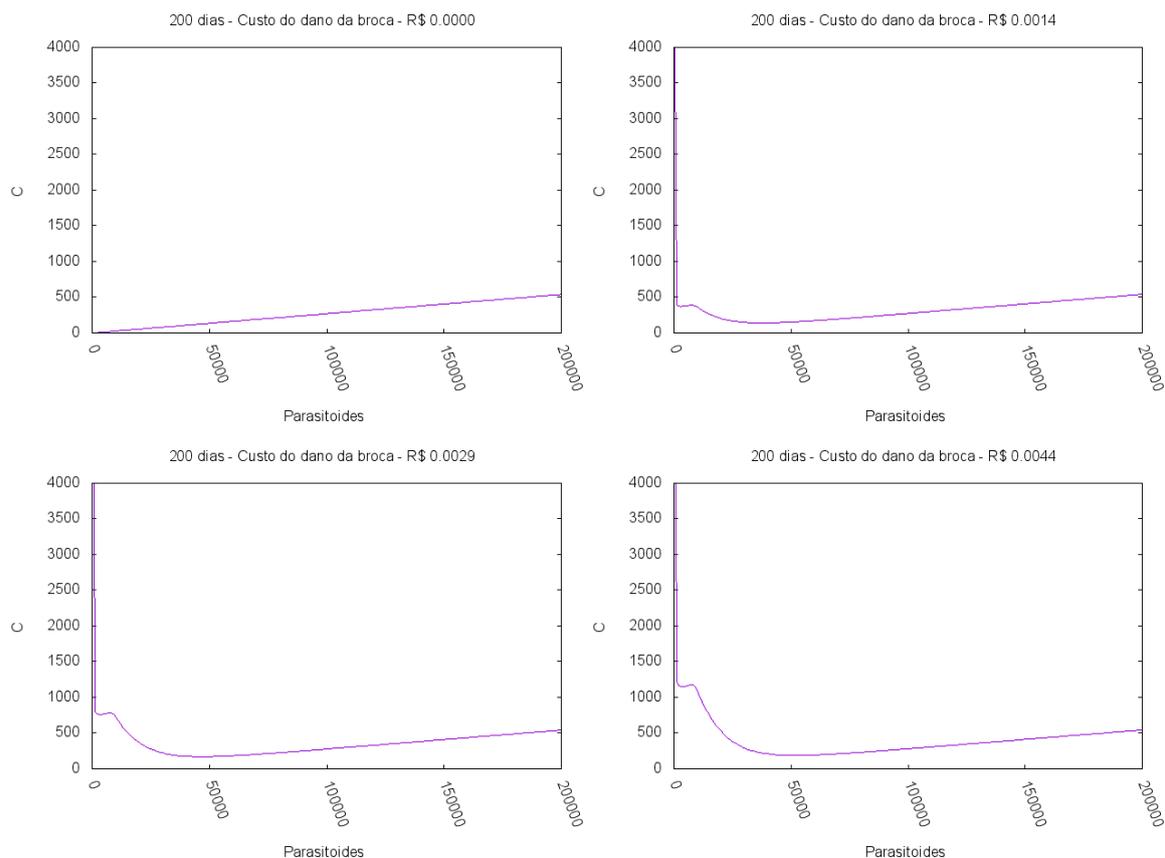


Figura 4.1: Variação do custo do controle alterando o dano econômico produzido pela broca,  $C_{broca}$ , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos,  $P_0$ , para um período de 200 dias com custo da vespa fixo,  $C_{vespa} = 0,0027$  e  $N_0 = 2.500$ .

Na figura 4.2 observamos algo parecido com a figura 4.1, considerando agora o período avaliado de 550 dias<sup>4</sup>. É importante notar que nesse caso o eixo y, que representa o custo total da estratégia adotada, foi truncado em 4.000 reais para facilitar a análise das estratégias com liberação, já que o custo de não se empregar nenhum controle é da ordem de centenas de milhares de reais já no primeiro caso retratado. Novamente é possível observar que com  $C_{broca}$  nulo, o valor mais significativo ainda é o valor de  $C_{vespa}$ , o que faz com que a melhor estratégia nesse caso seja não fazer nada. Conforme o custo do dano da broca deixa de ser nulo, começam a surgir valores mínimos para o custo  $C$  do controle. Como no caso anterior, esses valores ótimos são obtidos com quantidades maiores de vespas a cada incremento em  $C_{broca}$ . É interessante notar também algumas diferenças entre os dois casos, entre elas as quantidades de vespas nos pontos ótimos. Ao se avaliar um período menor, a quantidade ótima de vespas é muito menor do que a segunda situação apresentada. Essa quantidade menor, ótima no primeiro caso, caso seja utilizada

<sup>4</sup>O que seria equivalente a cana conhecida como “cana de ano e meio”, variedade utilizada para que a produção de álcool se dê o ano todo.

no segundo período avaliado, geraria grandes prejuízos, muito maiores do que os valores próximos à quantidade ótima nesta situação. Isto leva à primeira consideração qualitativa que deve ser feita. Tão importante quanto a quantidade de vespas a ser utilizada é ter em mente o período em que a cana será colhida, o que não é observado nas recomendações em vigor para o controle da praga. Uma segunda consideração qualitativa que pode ser feita é que se o intervalo entre avaliações é grande, liberação de grandes quantidades de predadores se torna uma boa estratégia, ao contrário do que se poderia dizer para os intervalos mais curtos.

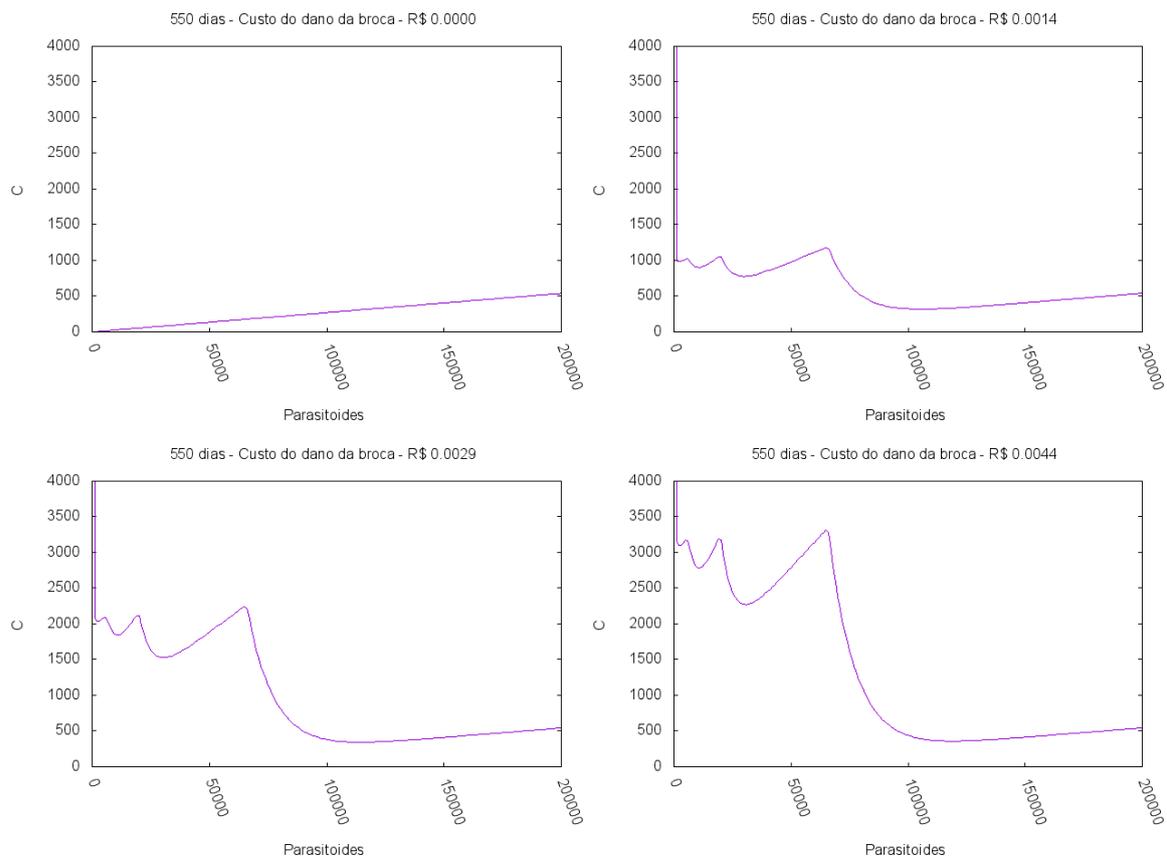


Figura 4.2: Variação do custo do controle alterando o dano econômico produzido pela broca,  $C_{broca}$ , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos,  $P_0$ , para um período de 550 dias com custo da vespa fixo,  $C_{vespa} = 0,0027$  e  $N_0 = 2.500$ .

O outro parâmetro avaliado foi  $C_{vespa}$ , que pode variar com as flutuações financeiras que alteram o valor de produção e venda de *C. flavipes*. Na figura 4.3 é possível observar o custo do controle variando com o aumento em  $C_{vespa}$  para um período de 200 dias. No primeiro caso, onde o custo para utilização de *C. flavipes* é nulo, não utilizar alguma quantidade da mesma representa perdas econômicas geradas pelo dano causado pela broca. O custo efetivo do controle, nesse primeiro caso atinge um valor muito próximo à zero e se mantém nesse valor, já que o período escolhido para avaliação da dinâmica não pos-

sibilita a presença de oscilações do sistema. Ao avaliar o valor  $C_{vespa} = 0,003$ , muito próximo ao custo corrente para utilização das vespas, é possível ver que um valor ótimo aparece e, ao contrário do caso anterior, conforme o custo aumenta, o custo da estratégia adotada também aumenta. O mesmo pode ser visto ao se aumentar em cinco vezes o custo, sendo que o ponto ótimo é deslocado para quantidades menores de vespas. O último caso apresentado nos gráficos, com custo das vespas muito maior do que o comercialmente encontrado, aponta uma situação em que o ponto ótimo é obtido muito próximo ao zero. mas é importante notar que mesmo nesse caso, liberar quantidades inferiores a aproximadamente 100 mil vespas ainda é melhor do que não adotar nenhum controle.

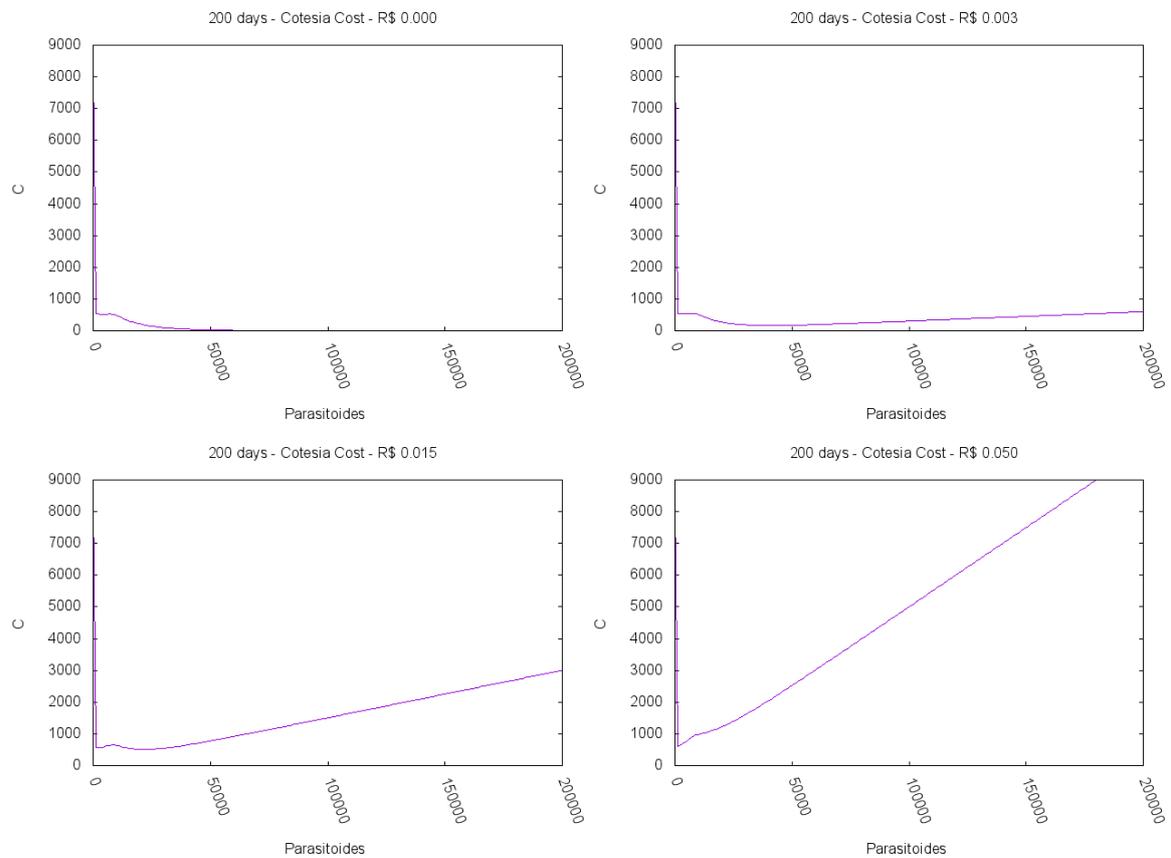


Figura 4.3: Variação do custo do controle alterando o valor da vespa,  $C_{vespa}$ , em função dos parasitoides inicialmente inseridos,  $P_0$ , para um período de 200 dias com dano econômico causado pela broca fixo,  $C_{broca} = 0,002$  e  $N_0 = 2.500$ .

Tendo em vista o período de 550 dias, pode-se observar na figura 4.4 alguns pontos interessantes. Novamente, como foi feito na figura 4.2, o custo máximo foi truncado em 10 mil reais afim de avaliarmos as estratégias de liberação de vespas, já que não adotar nenhuma estratégia geraria gasto da ordem de milhares de reais. Na primeira situação é interessante notar que a quantidade de vespas para gerar um custo próximo a zero é quase duas vezes maior que o mesmo caso na figura 4.3. O mesmo acontece com o ponto

ótimo, considerados os valores correntes de custo das vespas  $C_{vespa} = 0,003$  passando de uma quantidade próxima a 40 mil vespas para algo em torno de 110 mil vespas. Isto gera custo superior de controle, o que também era esperado. O que pode-se ver nos dois últimos gráficos da figura 4.4 é que novamente os valores ótimos são obtidos ao se liberar poucas vespas. Esta estratégia pode ser arriscada, já que com pouquíssimas vespas no sistema, fatores aleatórios podem gerar a morte das mesmas, anulando o efeito do controle. Por outro lado, qualquer quantidade de vespas liberada, mesmo apresentando benefícios menores do que nas situações anteriores, ainda apresenta grandes benefícios quando comparada com não adotar nenhum controle. É interessante notar também os valores para grandes quantidades de vespas: ao comparar os gráficos para os mesmos valores do custo da *C. flavipes*, em ambas as figuras, notam-se valores similares, o que indicaria um domínio do valor de  $C_{vespa}$  em relação à  $C_{broca}$ .

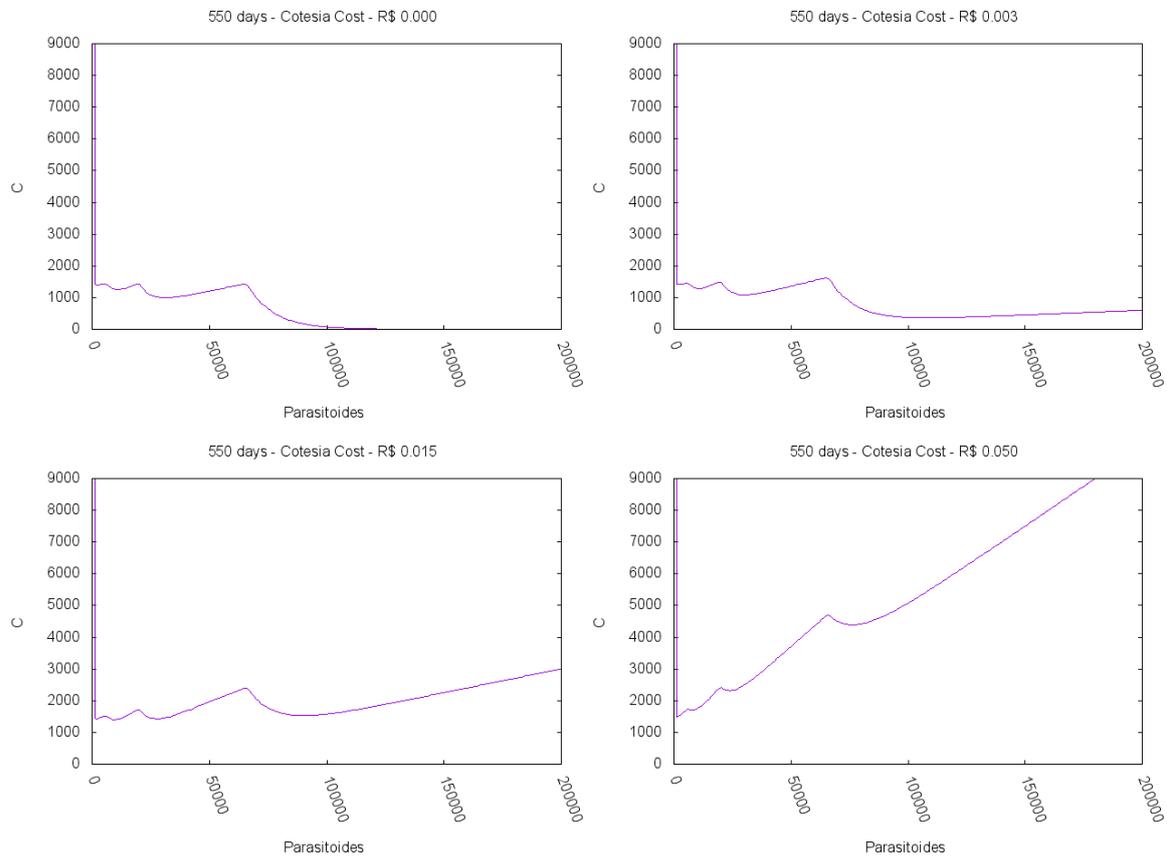


Figura 4.4: Variação do custo do controle alterando o valor da vespa,  $C_{vespa}$ , em função dos parasitoides inicialmente inseridos,  $P_0$ , para um período de 550 dias com dano econômico causado pela broca fixo,  $C_{broca} = 0,002$  e  $N_0 = 2.500$ .

#### 4.1.2 Custo estimado por meio da simulação multi-agentes

Sendo a simulação multi-agentes um pouco mais realista, é interessante avaliar o impacto dos custos dos parasitoides e da praga na solução ótima quando se tem posse do valor real das populações envolvidas. Para tanto, foram usadas as condições biológicas padrão apresentadas no capítulo anterior, com uma população de praga que possui resistência baixa às condições do ambiente e uma população de parasitoides muito eficiente.

Inicialmente vemos na figura 4.5 o impacto do aumento do dano econômico das brocas sobre o sistema para uma situação de 200 dias, com população inicial de brocas  $N_0 = 2.000$ . No primeiro caso apresentado nesta figura o dano financeiro causado pela praga é nulo, o que ocorreria na situação onde o valor da cana é nulo ou na situação onde a broca não estivesse se alimentando da cana. Nesta situação vemos que o aumento do custo total do controle cresce apenas em função do incremento de parasitoides inseridos no sistema. No segundo caso, onde o dano causado por 1 broca/dia é de R\$ 0,001 5, não tratar a broca se torna custoso e surge uma solução ótima de *C. flavipes* a ser inserida no sistema para gerar o menor custo. Esta quantidade é de cerca de 3.000 parasitoides, porém qualquer uma das condições testadas oferece maior economia do que a não utilização do controle. É interessante notar que o aumento do custo do controle com número de vespas acima de 4.500 é relativo ao preço destas, o que sugere não haver vantagens econômicas diretas na adição de mais indivíduos. O próximo cenário, onde o dano financeiro da broca é estimado em R\$ 0,01/dia, apresenta como solução ótima a liberação de 4.500 parasitoides, sendo que a partir de 6.000 brocas o aumento do custo do controle pode novamente ser atribuído ao aumento do custo do tratamento. Uma condição interessante é alcançada quando o dano da broca atinge R\$ 0,06/dia, onde a solução ótima é obtida através da liberação de 9.000 vespas. Porém, neste cenário, não é possível explicar a variação do custo do controle apenas pelo aumento do valor do tratamento, o que sugere que a solução otimizada deva ser utilizada, apesar de o custo total para as outras soluções não apresentar valores muito diferentes.

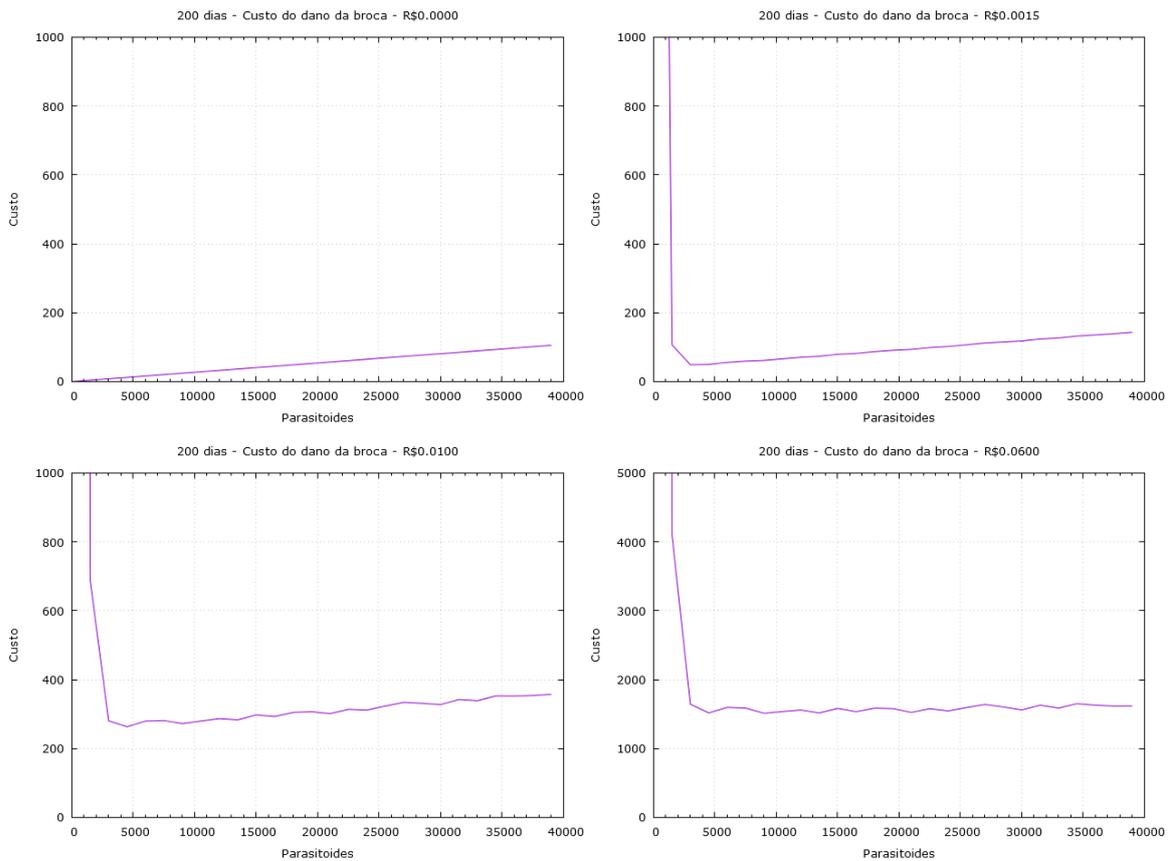


Figura 4.5: Resultado da simulação multi-agentes com variação do custo do controle alterando o valor do dano econômico produzido pela broca,  $C_{broca}$ , como função da quantidade de parasitoides inicialmente inseridos,  $P_0$ , para um período de 200 dias com custo da vespa fixo,  $C_{vespa} = 0,0027$  e  $N_0 = 2.000$ .

Na figura 4.6 pode-se observar a influência do valor de  $C. flavipes$  sobre o custo total do controle da praga. No primeiro cenário vemos a situação onde o parasitoide é obtido sem custo. Neste caso, acima de 4.500 indivíduos, o custo do controle é na prática o mesmo, o que indicaria que o total da praga tem sido eliminado logo nos primeiros instantes para todas as quantidades acima deste valor. Nas próximas três situações o tratamento otimizado da praga ocorre através da utilização de 3.000 vespas. No segundo cenário, onde o custo de uma  $C. flavipes$  é de R\$ 0,003, o tratamento otimizado é cerca de 70% mais econômico que os tratamentos testados com a maior quantidade de indivíduos. Porém o tratamento com 1.500 indivíduos é apenas cerca de 15% mais econômico que o com a maior quantidade de indivíduos testados, o que indicaria que o prejuízo da broca a longo prazo é compatível ao custo imediato de uma grande dose de  $C. flavipes$ . A partir de 3.000 vespas, o incremento pode também ser justificado pelo aumento de preço do parasitoide, indicando que a praga foi eliminada no tempo mínimo da interação entre as populações. No terceiro cenário é possível identificar um aumento muito maior do custo

do tratamento após a solução ótima, novamente correlacionado com custo maior dos tratamentos aplicados. Isto ocorre também na quarta situação, porém a condição otimizada sendo cerca de 90% mais econômica que o tratamento mais dispendioso.

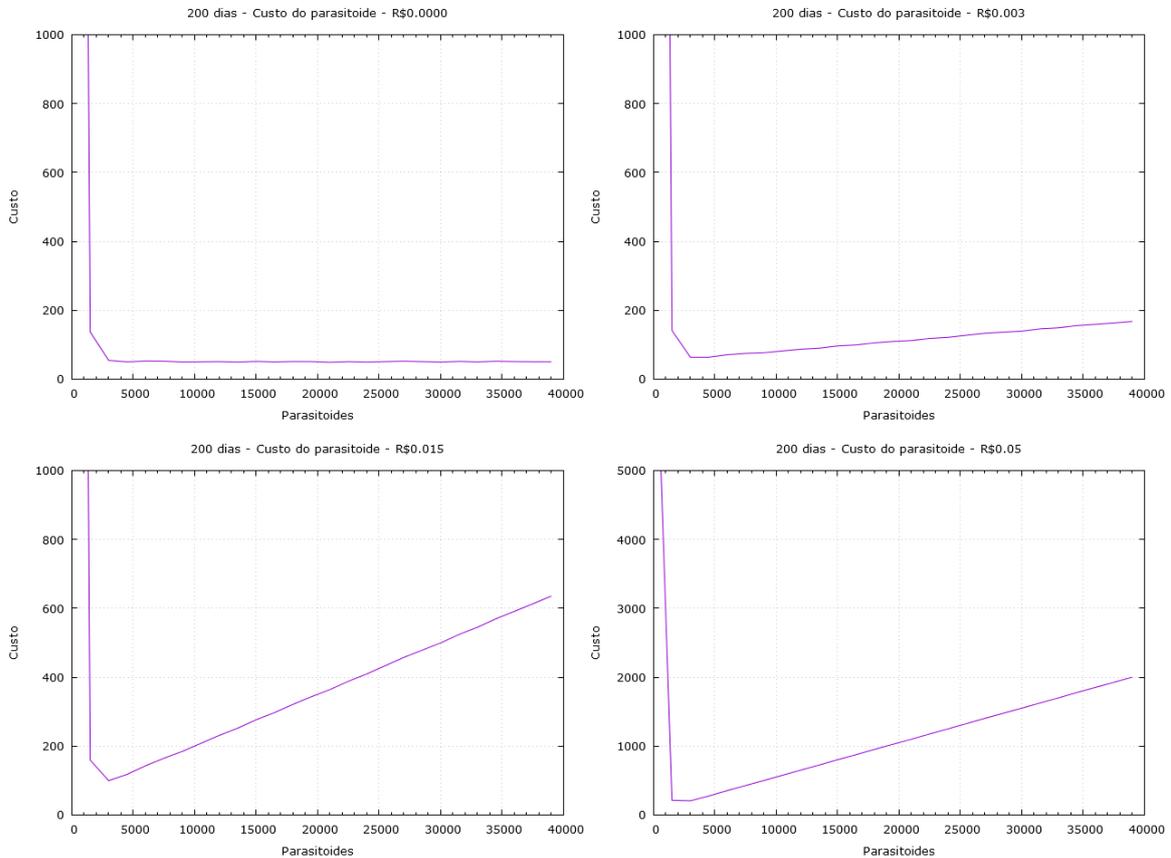


Figura 4.6: Resultado da simulação multi-agentes com variação do custo do controle variando o valor da vespa,  $C_{vespa}$ , em função dos parasitoides inicialmente inseridos,  $P_0$ , para um período de 200 dias com dano econômico causado pela broca fixo,  $C_{broca} = 0,002$  e  $N_0 = 2.000$ .

## 4.2 Inferência Bayesiana

Um dos grandes problemas para se estimar o tamanho da população de brocas na cana-de-açúcar é o método de avaliação utilizado tanto comercialmente quanto em muitas pesquisas. Como um efeito conjunto, validar modelos matemáticos se torna muito difícil e o processo pouco confiável dada a pouca precisão do método utilizado. O processo de avaliação mais comum consiste em escolher uma parcela do talhão<sup>5</sup> a ser avaliado, cortando uma pequena porção de canas e abrindo-as, de forma a tornar possível a contagem

<sup>5</sup>Um talhão pode ser descrito como a unidade mínima da área total destinada ao cultivo da cana, sendo circunscrito por ruelas por onde o maquinário pode trafegar. O talhão possui tamanho variável a depender da geografia local e do tipo de maquinário que deverá percorrer seu interior, geralmente possuindo entre 10 e 20 hectares na cultura da cana.

das lagartas. A contagem então é realizada e o valor obtido é extrapolado para o talhão completo e, muitas vezes, para outros talhões.

Para tentar diminuir o efeito da imprecisão do método de avaliação, foi proposto utilizar a inferência Bayesiana. Esta permite estimar probabilidades para densidades possíveis de lagartas com base em conhecimentos prévios. Neste estudo, ela foi descrita como

$$P(\rho | n, A) = \frac{P(n | A, \rho) P(\rho)}{P(n)}, \quad (4.2)$$

onde :

$P(\rho | n, A)$ , também chamado de *posterior*, é a probabilidade de se encontrar uma certa densidade,  $\rho$ , caso sejam encontradas  $n$  lagartas numa área  $A$ .

$P(\rho)$ , também chamado de *prior*, é a probabilidade de se encontrar uma certa densidade. Ele foi construído utilizando parte dos dados doados por uma empresa de levantamento de pragas dentro da região sudeste do Brasil, composto de 700 amostragens realizadas no ano de 2011.

$P(n)$ , é o fator de normalização.

Por último,  $P(n | A, \rho)$ , conhecido como a função de verossimilhança, é a probabilidade de se encontrar um certo número de brocas, dada uma área e uma certa densidade. Neste projeto foi assumido que o número de lagartas encontradas nas amostras para cada área  $A$  era independente da quantidade de brocas encontradas na amostra anterior. Isto permitiu o uso da distribuição de Poisson para descrever este processo. Os requisitos para a utilização da distribuição de Poisson neste caso são eventos independentes e aleatórios, o que é uma boa aproximação dada a falta na literatura de uma descrição espacial da broca no campo. Entretanto Schexnayder (2001) [87] desenvolveu um experimento de três anos de duração onde a distribuição das canas infestadas é retratada, o que permitiu uma dupla interpretação dos dados obtidos, descrevendo a distribuição como aleatória ou Poisson.

Esta distribuição pôde então ser escrita como

$$P(n | A, \rho) = \frac{(\rho A)^n e^{-\rho A}}{n!}.$$

Como exemplo usaremos uma das medições, onde foi encontrada 1 broca em  $120 \text{ m}^2$ . A densidade de brocas nessa área é de  $0,0083 \frac{\text{brocas}}{\text{m}^2}$ , sendo assim, a probabilidade de se observar 1 broca, considerando  $120 \text{ m}^2$  e uma densidade  $\rho = 0,0083$ , é de

$$P(1 | 120, 0,0083) = \frac{(0,0083 \cdot 120)^1 e^{-(0,0083 \cdot 120)}}{1!} \simeq 0,368.$$

Afim de termos um melhor entendimento deste caso, pode-se observar a distribuição

de probabilidades, dada na figura 4.7. Neste primeiro caso vemos que

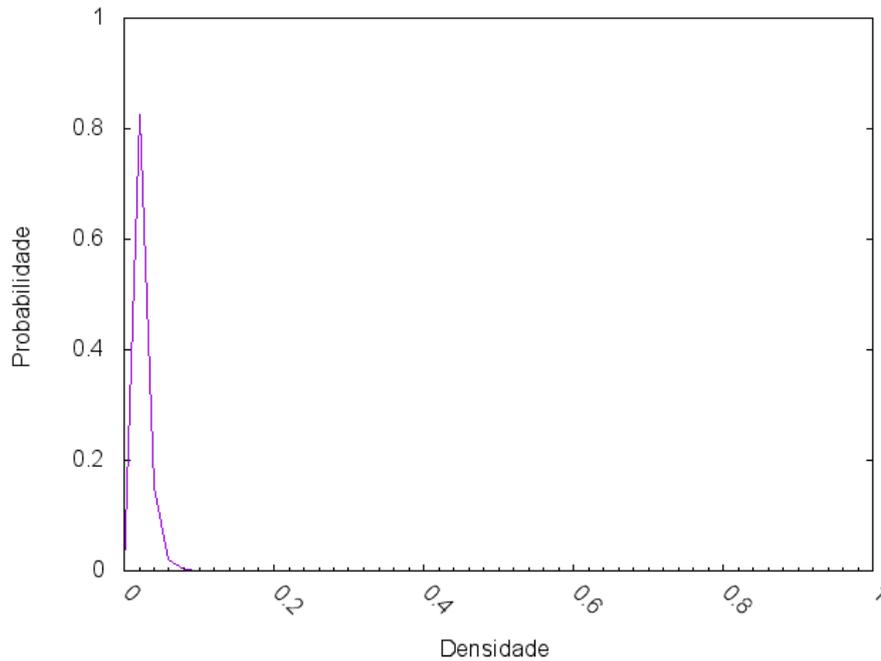


Figura 4.7: Distribuição de Poisson para  $n = 1$  observados numa área  $A = 120\text{m}^2$ .

pode-se observar algumas das distribuições para amostras obtidas do campo na figura 4.8. Para a construção desses gráficos foram usadas densidades múltiplas de  $0,02 \frac{\text{brocas}}{\text{m}^2}$ . Esta abordagem é interessante já que assume probabilidades para as densidades possíveis, ao invés de só admitir uma única densidade. Sendo assim, ao extrapolar a densidade para áreas muito maiores, no caso o talhão de onde foi realizado o levantamento, poderemos avaliar qual o grau de confiança temos em determinada densidade. Isto é particularmente importante no desenvolvimento de estratégias de controle, como será visto mais a frente.

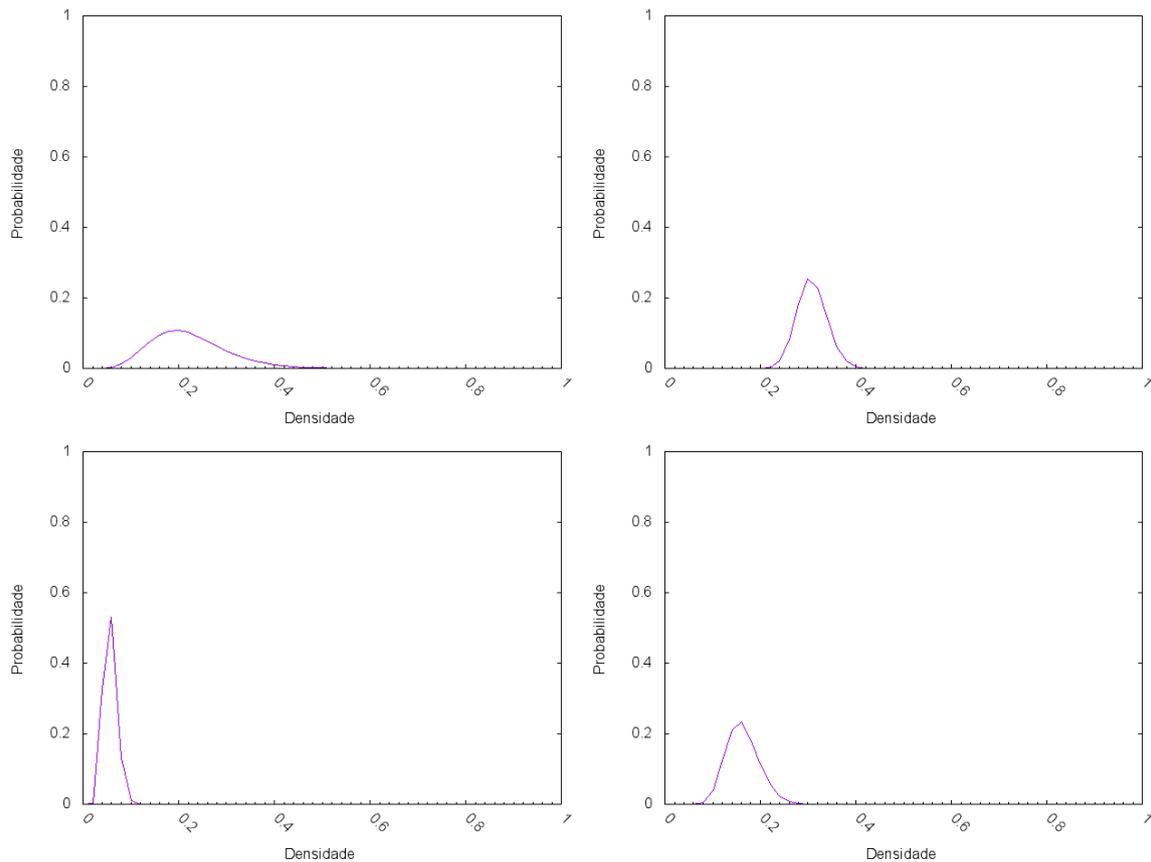


Figura 4.8: Distribuição de Poisson para alguns levantamentos obtidos do campo, canto superior esquerdo -  $n = 7$ ,  $A = 356m$ , superior direito -  $n = 96$ ,  $A = 315m^2$ , inferior esquerdo -  $n = 16$ ,  $A = 300m^2$ , inferior direito -  $n = 21$ ,  $A = 135m^2$ .

Ao usar o processo de Bayes, apresentado na equação 4.2, a distribuição de probabilidade é combinada com o conhecimento prévio. No presente caso, este último foi obtido através dos dados de campo doados, apontando a frequência das densidades encontradas no campo, o que pode ser visto na figura 4.9. As densidades foram construídas em um gráfico log, visando observar um possível comportamento de lei de potência, o que não pôde ser constatado e observa-se na figura 4.10. Essa nova distribuição de probabilidades é então construída a partir do pressuposto de uma distribuição de Poisson para as amostras encontradas, levando em consideração o histórico apresentado pelos dados do campo.

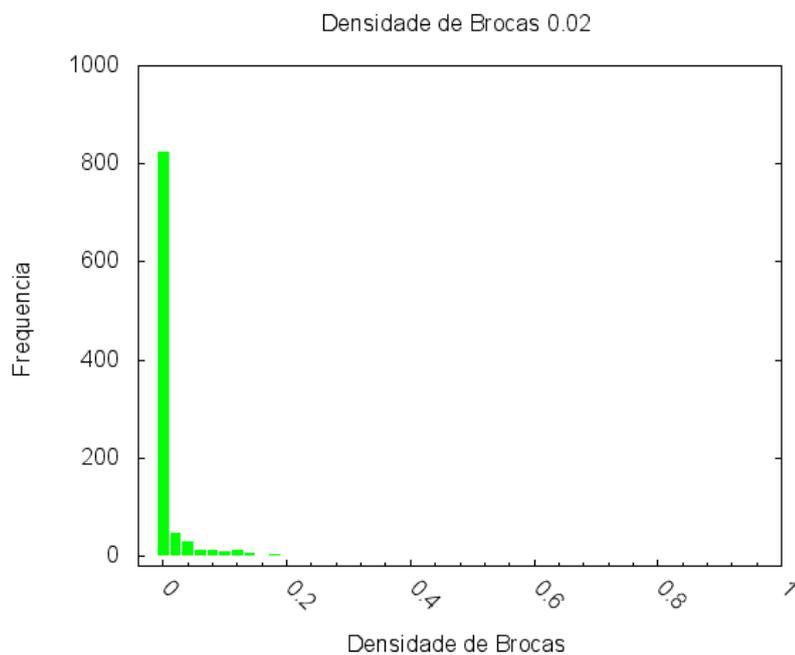


Figura 4.9: Histograma dos dados mostrando as densidades de brocas encontradas no campo no ano de 2011 em cada levantamento que não apresentava presença de parasitoides, doados pela empresa SmartBio.

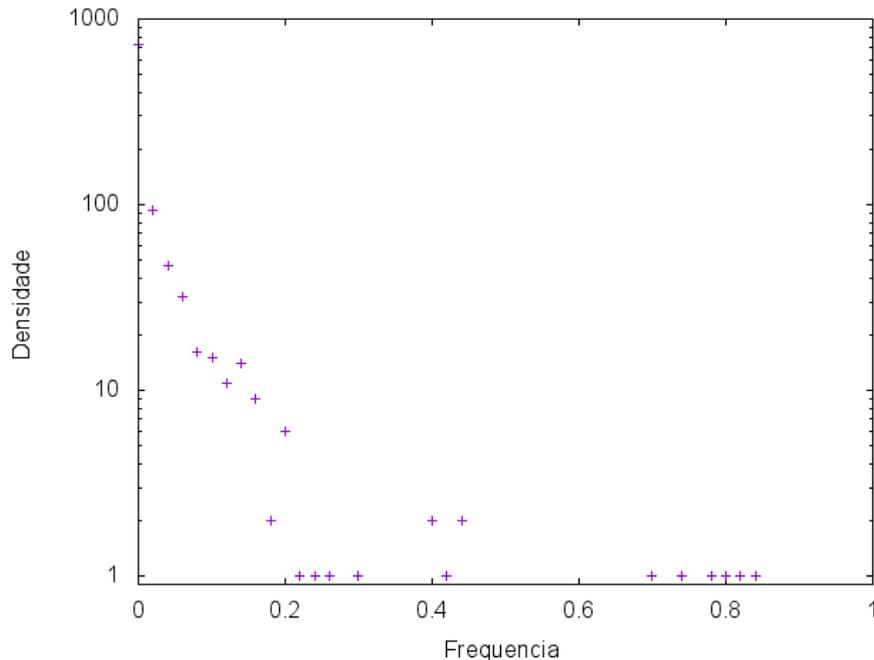


Figura 4.10: Representação logarítmica dos dados mostrando a quantidade de brocas encontradas no campo no ano de 2011 em cada levantamento sem a presença de parasitoides, doados pela empresa SmartBio.

pode-se então, através do teorema de Bayes, construir as figuras 4.11 e 4.12. Na fi-

gura 4.11, onde o método tradicional apresentaria uma densidade de 0,008, observa-se uma probabilidade 88% ser este valor, porém com 10% de chance de valores de até 0,04 serem encontrados. Isto representa a presença de poucas lagartas no sistema, algo entre 80 e 400 indivíduos, se forem utilizados os valores mais prováveis de brocas. No primeiro caso da figura 4.12, onde sete brocas foram encontradas na área de  $36\text{ m}^2$ , a densidade estimada tradicionalmente é de 0,19 lagartas por hectare. No entanto, através do teorema de Bayes, a densidade com maior probabilidade é de 0,16, com cerca de 20%, e a densidade de 0,19 apresentando cerca de 13% de chance de ser o retrato real. Vemos então que esta situação, que na figura 4.8 era a densidade de maior probabilidade, tradicionalmente obtida, ao empregar-se o histórico do campo, tem-se uma modificação significativa. A próxima situação é um bom retrato do que acontece quando a área avaliada é considerada na estimativa. Neste cenário, 96 brocas foram encontradas na área de 31 cinco  $\text{m}^2$ , o que representaria uma densidade de 0,3 lagartas/hectare. A distribuição de Poisson atribuída nesta situação uma probabilidade grande para as densidades vizinhas, porém o teorema de Bayes para estes outros casos apresenta baixa probabilidade, e 90% de chance de ser a densidade 0,3. Nos últimos dois cenários as densidades obtidas através do método tradicional são também as mais prováveis. Vale ressaltar que nestes casos isto acontece devido à grande área utilizada no levantamento, o que, nesta abordagem é levado em consideração. Caso a densidade tradicionalmente estimada fosse a mesma destes casos, porém obtida em áreas muito menores, a confiança nesta densidade seria muito menor através do método de Bayes.

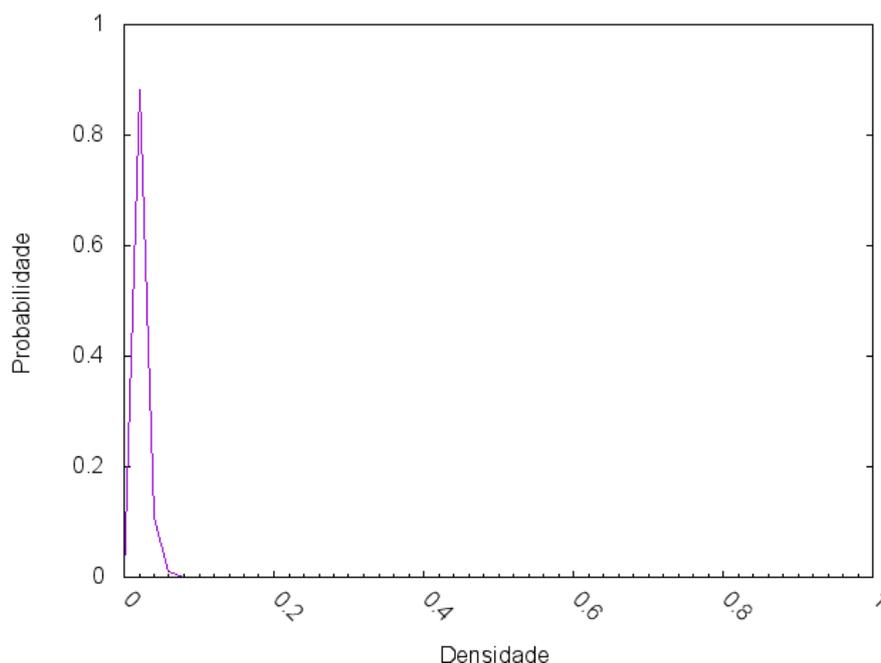


Figura 4.11: Teorema de Bayes para  $n = 1$  brocas observadas para uma área  $A = 120\text{m}^2$ .

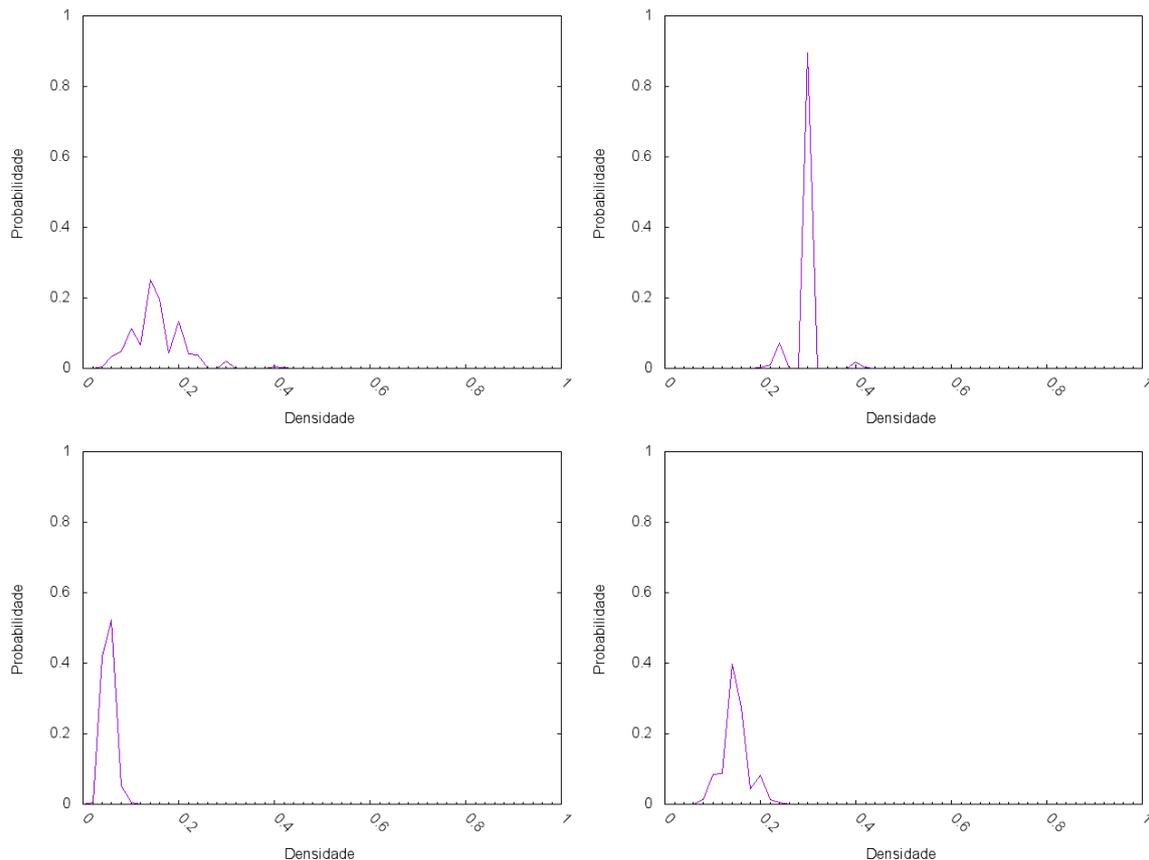


Figura 4.12: Teorema de Bayes para os levantamentos realizados no campo, canto superior esquerdo -  $n = 7$ ,  $A = 36m^2$ , superior direito -  $n = 96$ ,  $A = 315m^2$ , inferior esquerdo -  $n = 16$ ,  $A = 300m^2$ , inferior direito -  $n = 21$ ,  $A = 135m^2$ .

### 4.3 Avaliação do métodos de levantamento de praga no campo

Um dos principais métodos de levantamento de *D. saccharalis* no campo consiste na escolha aleatória de pontos para realizar o corte longitudinal da cana. Após o corte, é realizada contagem de entrenós totais e brocados, e realiza-se a extrapolação da densidade obtida para o talhão avaliado. Isto tem sido feito tanto para experimentos quanto comercialmente dentro de um período longo de tempo [75, 76, 77]. A quantidade de amostras por levantamento é de cerca de 20 canas/hectare da mesma variedade, corte, idade e tipo de solo. O Índice de Infestação (II) pode ser classificado como baixo (0- 5%), moderado ( cinco a 10%), regular (10-1 5%), elevado (1 5-25%) e muito elevado (> 25%). No entanto o controle é adotado a partir de 3% de II [88].

Deve-se considerar que poucos trabalhos são desenvolvidos para otimizar os métodos de amostragem de *D. saccharalis* na cana-de-açúcar [87]. Em particular, um dos métodos que podem ser utilizados para avaliar o tamanho populacional da broca é baseado no teste

da taxa probabilística sequencial <sup>6</sup>. Os critérios necessários para desenvolver um plano de amostragem utilizando este teste são: um limite econômico ou densidades da praga que correspondam à alguma decisão de tratamento; o nível de risco que pode ser tolerado; e por último, o modelo de distribuição da variável a ser empregada, por exemplo o número de plantas infestadas [87]. Um exemplo deste método considera apenas aspectos visuais da cana pelo seu exterior, onde o amostrador verifica os sinais da presença da praga sem necessidade de avaliar precisamente o tamanho real da população desta, estimando apenas a população mínima presente. Caso a quantidade mínima da praga para se realizar o tratamento fosse encontrado, o levantamento era encerrado naquela região e pesticidas eram então empregados [87]. Este método é particularmente eficaz ao se utilizar tratamentos onde não é necessário saber precisamente o tamanho da população da praga, sendo suficiente saber que a praga atingiu o valor mínimo requerido para aplicação do tratamento. Um outro método de levantamento consiste em fazer o amostrador escolher aleatoriamente canas para realizar a coleta das formas biológicas, que consistem em lagartas e pupas da praga e pupas dos parasitoides, anotando o tempo de trabalho [27]. No entanto, em propriedades com áreas muito grandes, onde os recursos para levantamento são limitados, regiões mais susceptíveis são priorizadas [27]. Após o levantamento, Parra et al (2002) apresenta a recomendação de tratamento com 6.000 *C. flavipes* quando mais que 2.500 lagartas/ha ou 10 lagartas/hora/homem sejam identificadas. No entanto, recomenda ainda que não menos de 2.500 e não mais que 10.000 parasitoides sejam usados para o tratamento [27].

Levando em consideração as limitações impostas pelos métodos tradicionais de amostragem, que podem ser destrutivos, retirando canas da plantação, foi proposto neste trabalho uma avaliação da eficácia do método adotado convencionalmente. Para tanto, utilizamos como ponto de partida o modelo Lotka-Volterra para gerar os dados simulados que representariam a população de brocas presentes no campo por hectare, considerando que em média 100 mil canas,  $C_{hec}$  estariam presentes nessa área. De posse destas informações, construímos um processo para simular a amostragem aleatória das brocas, que consistia em realizar sorteios onde a probabilidade de encontrar uma broca era dada pela razão entre brocas presentes divida pela quantidade de canas do hectare

$$\rho(t) = \frac{N(t)}{C_{hec}}. \quad (4.3)$$

---

<sup>6</sup>O teste da taxa probabilística sequencial é um método estatístico que considera alguns critérios para a finalização do processo de amostragem. Este teste não apresenta necessariamente o tamanho da amostra inicial que deve ser obtida, sendo o tamanho desta determinado pela satisfação dos critérios estabelecidos previamente. Os critérios dependem da situação avaliada, que podem ser cenários onde o processo avaliado já deu resultados positivo ou negativo esperados para a tomada de alguma decisão.

Como em geral a quantidade de canas amostradas é muito menor do que a quantidade presente em um hectare,  $C_{hec}$  foi considerada constante, porém a quantidade de brocas presente variou de acordo com o modelo Lotka-Volterra, fazendo a probabilidade  $\rho(t)$  também depender do tempo.

Durante a simulação, foram considerados dois processos de amostragem, o primeiro feito com 200 amostragens, usado em trabalhos acadêmicos [67, 77]. O segundo processo foi construído baseado no trabalho de Dinardo-Miranda et al. (2011) e o que dizem especialistas na área. Estes consideram que comercialmente uma quantidade menor de amostragens é realizada. No nosso caso 50 canas foram usadas para simular o levantamento de brocas. É importante notar que a população de brocas obtida através da extrapolação da amostragem será discreta e seguirá a seguinte equação

$$\Delta N = \frac{C}{s}, \quad (4.4)$$

onde  $s$  é o tamanho da amostra,  $C$  a quantidade de canas presentes e  $\Delta N$  o tamanho mínimo da população estimada. Sendo assim, no caso de 200 amostras em um levantamento, considerando 100 mil canas, a população estimada será discretizada com  $\Delta N_{200} = 500$  e no caso comercial  $\Delta N_{50} = 2.000$ .

#### 4.3.1 Eficácia do método tradicional em situação simulada

Na figura 4.13 vemos a evolução temporal das brocas interagindo com seus parasitoides, o que idealmente deveria ser reobtido ao se realizar o processo de amostragem. Aplicando a equação 4.3 para 200 amostras diárias, pelo período de 200 dias, com cinco repetições da interação a partir do primeiro dia, totalizando mil levantamentos, obtemos o histograma retratado na figura 4.14. É possível notar neste histograma que quase metade das amostras realizadas apresentaram nenhuma ou apenas uma broca, o que representaria uma estimativa de cerca de 0 ou 500 brocas por hectare. É importante notar que a dinâmica representada na figura 4.13 tem uma população média de 1.300 brocas, onde 43% da população era maior do que a média, e com picos máximo e mínimo em 2.800 e 460 brocas respectivamente. Dentro deste intervalo, apenas 25% dos dados apresentam valores menores que 660 brocas, 6% apresentam valores menores que 500 brocas. Por outro lado, 37% apresentavam população maior que 1.500 indivíduos e apenas 23% acima de 2.000 brocas. Já os dados observados no histograma, apresentam 37% de amostras estimando população de 500 brocas ou menos. Os valores estimados acima de 1.500 brocas foram encontrados em quatro 5% dos casos, sendo que valores acima de 3.000 brocas ocorreram em 6% dos casos. Ainda assim, o valor médio de brocas, calculado pelo método aleatório, foi de 1.300 brocas.

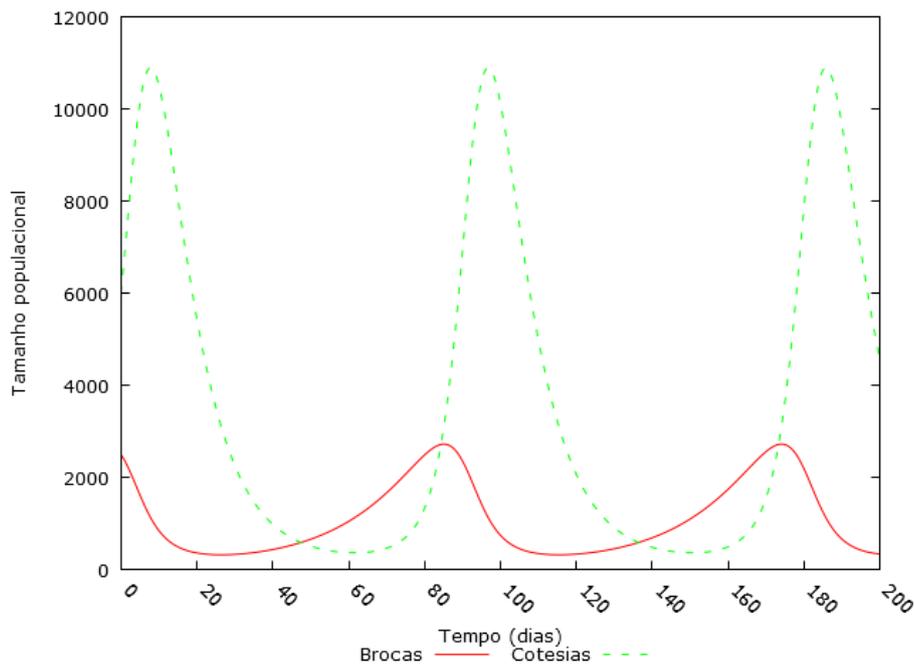


Figura 4.13: Evolução temporal da simulação utilizada para avaliação das amostragens comercial e acadêmica.

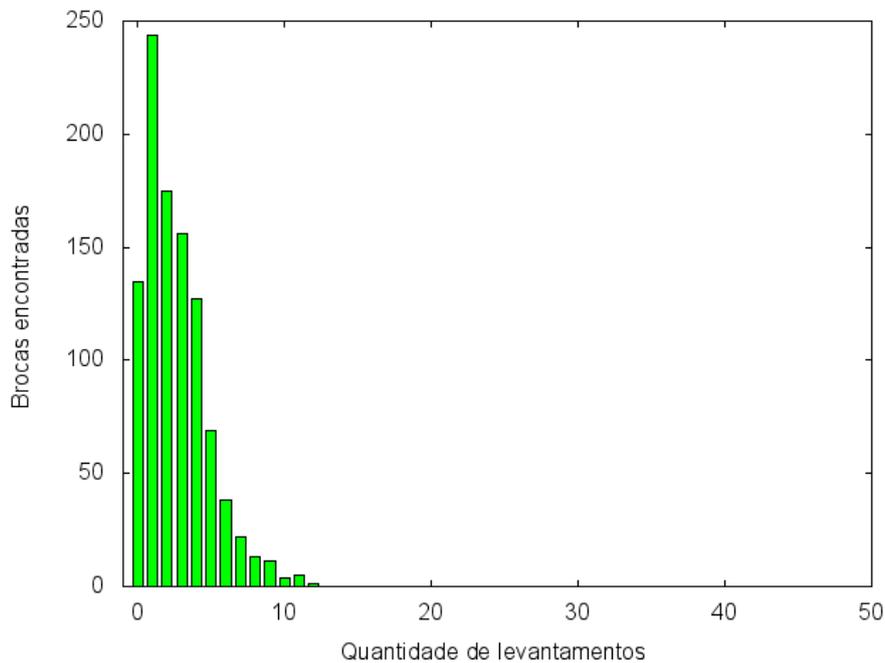


Figura 4.14: Histograma de 200 amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 4.3 com cinco repetições a partir do início da dinâmica.

Apesar de o método de amostragem aleatória com 200 canas ter apresentado pouca confiabilidade para avaliar de forma precisa a população de brocas que representava o que

seria encontrado no campo durante 200 dias, comercialmente é comum encontrar situações onde o levantamento é realizado com menos canas amostradas. Fatores como custo da mão de obra, tempo para realização do levantamento, logística, dentre outros, são responsáveis por uma diminuição das canas avaliadas durante o levantamento. Similarmente ao caso anterior, simulamos o levantamento aleatório com 50 canas amostradas por dia, num período de 200 dias com cinco repetições. O histograma retratado na figura 4.15 apresenta a quantidade de brocas encontradas por levantamento utilizando a mesma situação retratada na dinâmica da figura 4.13. Neste caso, ao utilizar a equação 4.4 vemos que as populações possíveis de serem estimadas apresentam incremento de  $\Delta N_{50} = 2.000$  brocas. É possível observar que em mais da metade dos casos, o método de levantamento aleatório permite estimar a população de brocas como inexistente. As amostras onde uma única broca foi encontrada, o que aconteceu em cerca de 30% dos casos, fizeram com que a estimativa da quantidade de brocas, para a maior parte dos casos não nulos, fosse avaliada em 2.000 brocas. É interessante notar ainda que o valor máximo estimado foi de 12.000 brocas e que valores acima de 4.000 brocas estavam presentes em mais de 1 5%.

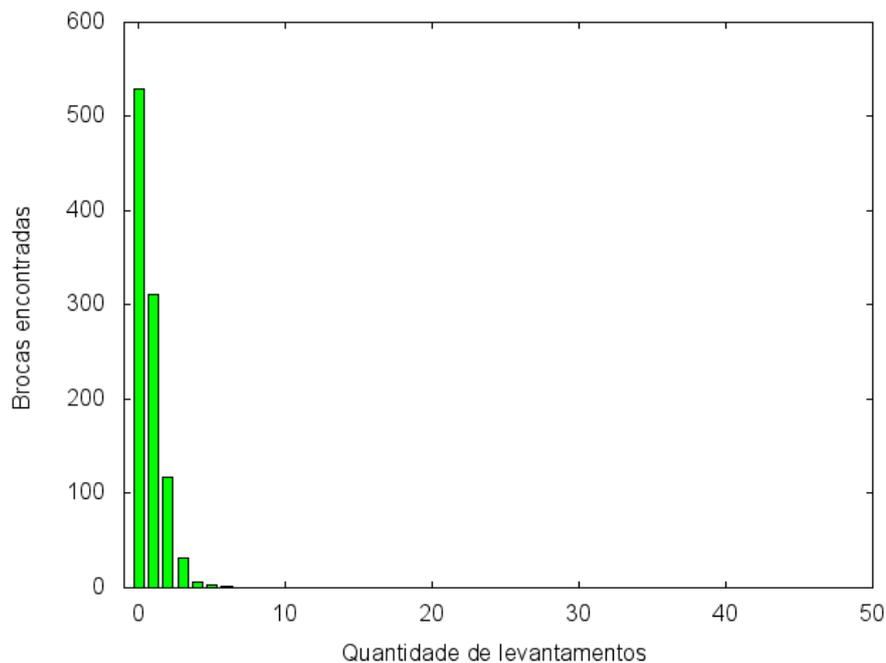


Figura 4.15: Histograma de 50 amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 4.3 com cinco repetições a partir do início da dinâmica.

Com o objetivo apenas de ilustrar o que acontece em casos reais no campo, foi construído o histograma presente na figura 4.16. Os dados chamados de “reais” foram doados pela empresa SmartBio. Nesta figura, vemos que em uma grande quantidade de amostras nenhuma broca é encontrada na situação real, o que se parece mais com a situação comer-

cial simulada. No entanto, quantidades maiores de broca são mais raras na situação real, o que pode indicar que a praga está controlada na área avaliada. Desta forma, pode-se supor que o agricultor tende a controlar a praga sempre que a encontra, já que os dados aqui apresentados não distinguem entre talhões cujo levantamento foi realizado antes ou após seu tratamento.

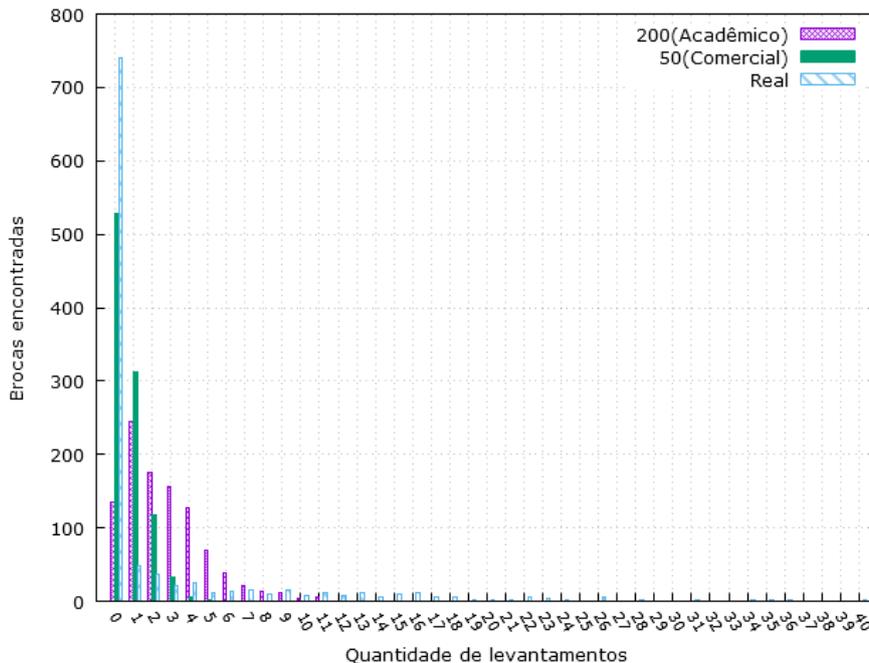


Figura 4.16: Histograma comparativo entre 200, 50 canas amostragens diárias realizadas no período de 200 dias através da equação 4.3 com cinco repetições a partir do início da dinâmica e dados reais obtidos do campo.

### 4.3.2 Comparação Bayes x método tradicional

pode-se usar a estatística Bayesiana para estimar a população de brocas presentes em um dado momento. Para tanto, é necessário saber a quantidade de brocas encontradas no levantamento,  $L$ , e ter posse do histórico de brocas encontradas para a área anteriormente. Como abordagem para comparação, as quantidades de brocas presentes em um hectare foram impostas com base na média de infestação do estado de São Paulo, de cerca de 1-2%. Neste processo o interesse era retratar situações que acontecem no campo. Para tanto, valores de brocas foram fixadas e o processo de levantamento se dava da seguinte maneira - atribuía-se uma probabilidade,  $P_{amostra}$ , de se encontrar uma broca por amostra, sendo esta probabilidade igual à quantidade de brocas fixadas,  $N_{fixado}$ , dividida pela quantidade de canas presentes em um hectare,  $C$ :

$$P_{amostra} = \frac{N_{fixado}}{C}. \quad (4.5)$$

Este processo de amostragem era então repetido pela quantidade de canas simuladas, presente no levantamento, sendo que foram usadas duas condições - 50 e 200 amostras por levantamento, o que representaria os levantamentos usados comercial e academicamente. A quantidade de brocas encontradas no levantamento  $L$  era então extrapolada para a área do talhão, no caso do método tradicional, para estimar a população de broca total. Para se obter a estimativa através do teorema de Bayes, os mesmos dados obtidos no levantamento  $L$  eram usados para alimentar o novo método. Este procedimento requer que se insira a quantidade de brocas encontradas em  $L$ , a área total amostrada, as densidades possíveis e suas probabilidades de ocorrência. As densidades possíveis utilizadas no processo são todas as densidades obtidas através da equação 4.4 divididas pela área amostrada. Considerando que em cada metro linear existem cerca de 1 cinco canas e que em geral o espaçamento entre as fileiras de canas pode ser considerado como 1,5 m, a área amostrada foi tomada como sendo

$$A_{amostrada} = \frac{L}{15} * 1,5. \quad (4.6)$$

Já o histórico das probabilidades para cada densidade possível, foi obtido realizando 100 levantamentos  $L$  com o método tradicional e registrando a frequência delas. É importante notar que a equação 4.2 não apresenta um valor de brocas, mas sim uma probabilidade para uma dada densidade. Sendo assim, foi escolhido nesta comparação utilizar a densidade média, obtida através da multiplicação da densidade,  $\rho$ , por sua probabilidade de acontecer,  $P_{bayes}$ , e somando sobre todas as densidades possíveis.

$$\bar{\rho} = \sum_{\rho} \rho P_{bayes}. \quad (4.7)$$

Esta densidade média foi então multiplicada pela área total, no caso 1 hectare - 10.000 m<sup>2</sup>.

Variou-se a quantidade de brocas fixadas  $N_{fixado}$  para tentar descobrir se algum dos métodos se apresentava mais eficaz na determinação desta, em faixa de valores diferentes. Para se obter mais informações, cada levantamento com um dado  $N_{fixado}$  foi realizado 1.000 vezes, o que permitiu o tratamento estatístico desses dados.

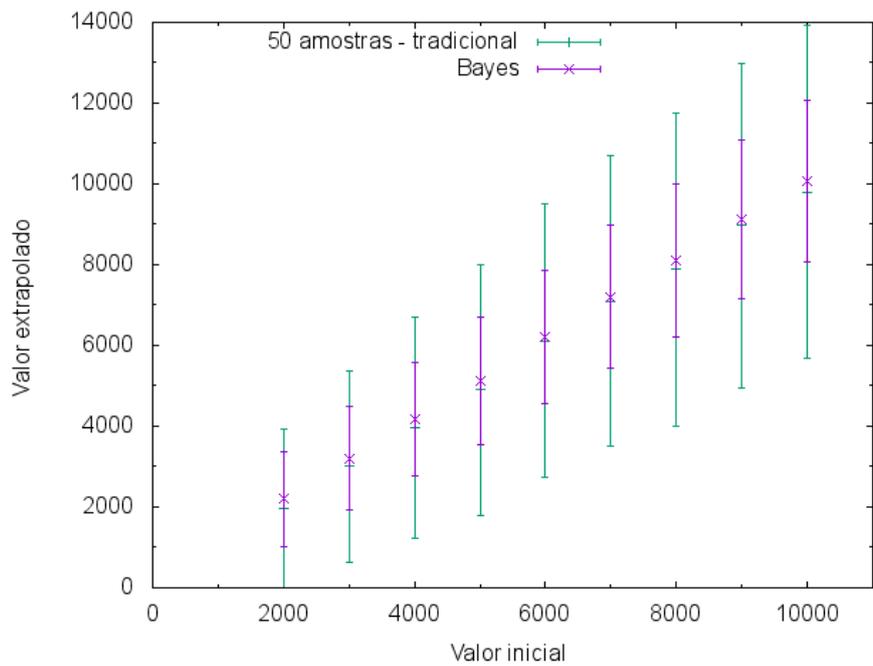


Figura 4.17: Comparação dos métodos de levantamento com 50 amostras por levantamento, com barra de desvio padrão - 1.000 levantamentos realizados.

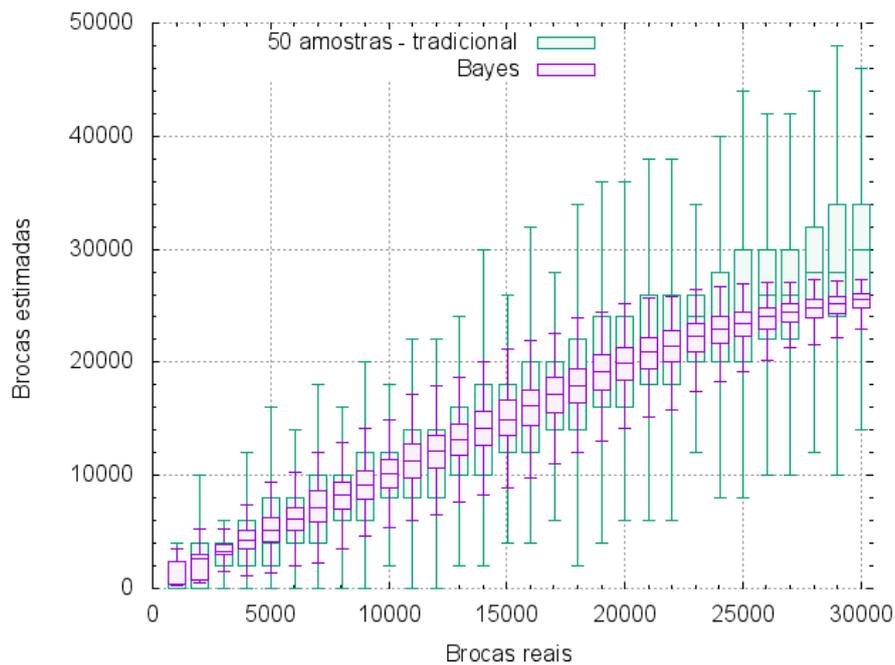


Figura 4.18: Dados com 50 amostras por levantamento - 1.000 levantamentos realizados separados em quartis.

A figura 4.17 retrata a comparação dos métodos tradicional, com 50 amostras realizadas, e o método usando estatística Bayesiana. Neste caso, ao utilizar-se o método

tradicional com 50 canas amostradas por hectare, uma grande quantidade de dados fica longe do valor esperado. No processo com o teorema de Bayes vemos principalmente uma menor dispersão desses dados. Ambos os métodos, ao se repetir os processos de estimativas 1.000 vezes para cada  $N_{fixado}$  apresentam valor médio próximo do esperado. Contudo, uma informação mais útil no campo pode ser quão eficaz será cada método ao se realizar um único levantamento numa certa área. Com este intuito, é interessante notar que a mediana do método tradicional só poderá gerar valores múltiplos de  $\Delta N$  da equação 4.4, enquanto o segundo método permite encontrar-se qualquer valor.

Na figura 4.18 temos os dados de 1.000 levantamentos para cada  $N_{fixado}$  obtidos através da extrapolação de 50 amostras por levantamento divididos em quatro quartis. Esta abordagem pode trazer informações muito úteis para o agricultor, já que ao realizar um levantamento, a quantidade de brocas presente vai estar dispersa entre os valores apresentados. Vemos que mesmo para quantidades pequenas de brocas, o método tradicional pode gerar extrapolações para a população presente muito acima da realidade. O mesmo ocorre ao se observar os valores mínimos estimados. Esta última situação é bastante preocupante, já que 25% de todos os dados obtidos com o método tradicional apresentaram população de broca nula, mesmo quando as populações reais eram muito grandes. Menos grave, mas tão preocupante quanto é a situação apresentada no segundo quartil, onde mais de 25% dos dados apresentam valores entre 0 e algum valor mais próximo da mediana. É importante neste momento lembrar que a mediana nem sempre vai poder estimar o valor real de brocas presentes, já que nem todos os valores para o tamanho populacional podem ser extrapolados com o método tradicional. Isto faz com que este segundo quartil apresente na maior parte dos casos valores longe do real com distância proporcional à diferença entre o valor médio e a mediana. O terceiro quartil apresenta as melhores estimativas com o método tradicional, contudo, vale lembrar que este quartil é responsável por apenas 25% dos dados. Por último, vemos que o último quartil pode gerar tamanhos populacionais com mais do que o dobro do real, o que pode gerar uma reação exagerada no momento do controle da praga por parte do produtor.

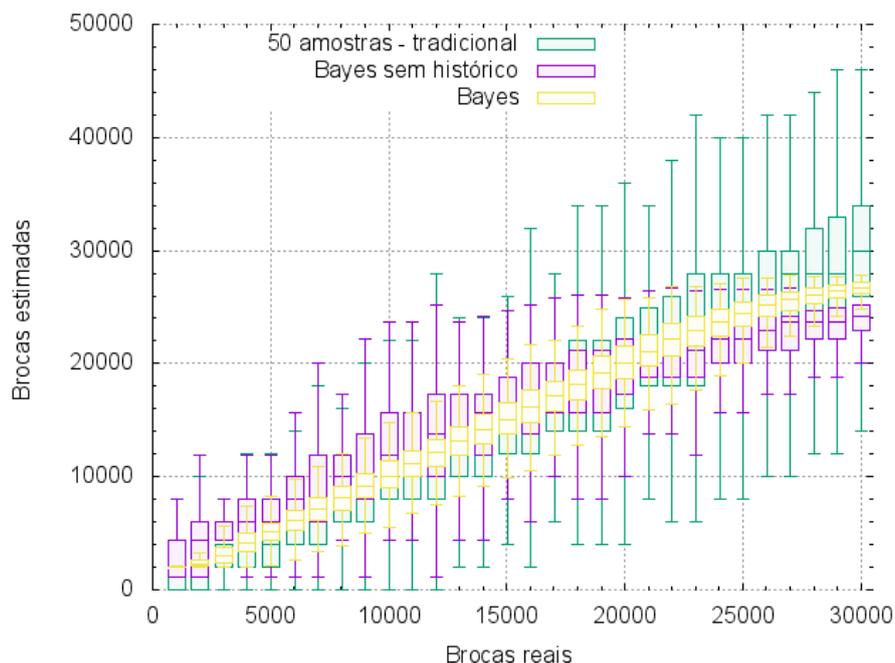


Figura 4.19: Dados com 50 amostras por levantamento, comparando os métodos aleatório, Bayes e Bayes sem histórico - 1.000 levantamentos realizados separados em quartis.

A figura 4.19 apresenta uma comparação entre usar a estatística Bayesiana, com e sem histórico, tendo o método tradicional com 50 amostras como referência. Sem o histórico, as avaliações foram um pouco melhores que o método tradicional nos primeiros quartis, no entanto a mediana, mesmo nesse primeiro quartil, não estava próxima ao valor real comparada com os outros métodos. Em geral, os valores obtidos através da estatística Bayesiana com histórico são muito melhores que sem este, ou ainda que o método tradicional, mostrando assim a importância de dados confiáveis de infestações anteriores.

Como solução aos problemas apresentados pelo método tradicional, o método de Bayes foi utilizado para estimar o tamanho populacional empregando os mesmos dados obtidos para a extrapolação no método tradicional. É possível notar pela figura 4.18 que este método apresenta menor dispersão nas estimativas populacionais. A primeira situação a ser analisada, e bem útil, está presente nos dados do primeiro quartil. Vemos que nenhum dos casos apresenta população de broca nula estimada, mesmo nos casos com valores muito baixos comparados com o valor real. Isto se deve à natureza do método, que utiliza os dados do procedimento tradicional onde, no caso do levantamento  $L$ , não havia sido encontrada nenhuma broca. Entretanto, ao contrário do método tradicional, não encontrar nenhuma broca no levantamento não significa automaticamente que não existam brocas presentes, já que o método utilizando o teorema de Bayes considera o histórico de ocorrências e a probabilidade da amostra apresentar uma melhor representação da realidade. É interessante notar que mesmo neste primeiro quadrante já existem valores

bem próximos do valor real. mais interessante ainda é notar que o segundo quartil agora apresenta quase a totalidade das estimativas próximas dos valores reais, o que também acontece no terceiro quartil. Por último é possível observar que o último quartil agora apresenta resultados mais próximos do valor real quando comparado com o último quartil no método tradicional. Os dados estimados neste último quartil ainda não estão muito próximos, podendo chegar a valores de aproximadamente o dobro do real. Porém, vale notar que os dados de entrada foram gerados pelo método tradicional, onde as estimativas estavam muito mais distantes do obtido com este novo método.

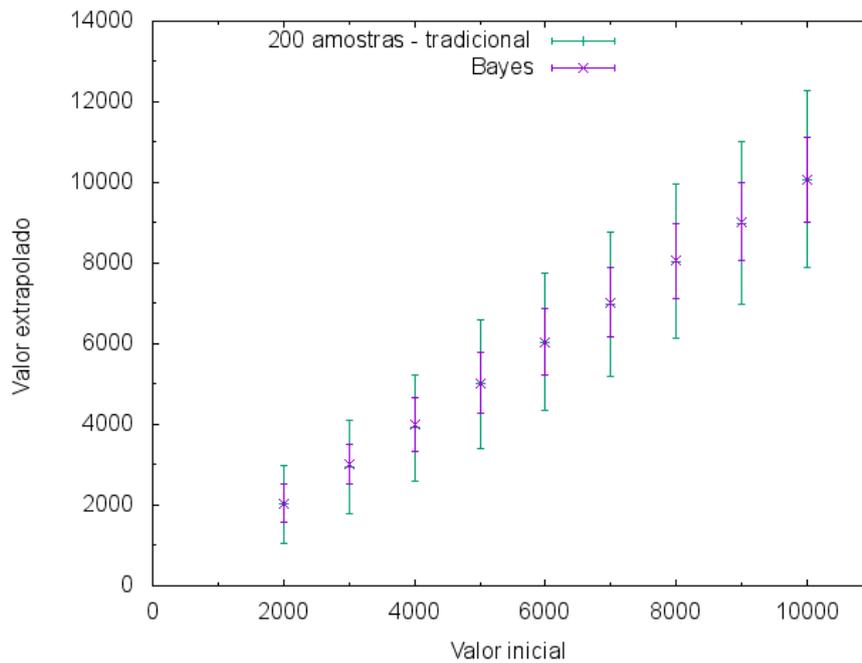


Figura 4.20: Comparação dos métodos de levantamento com 200 amostras por levantamento, com barra de desvio padrão - 1.000 levantamentos realizados.

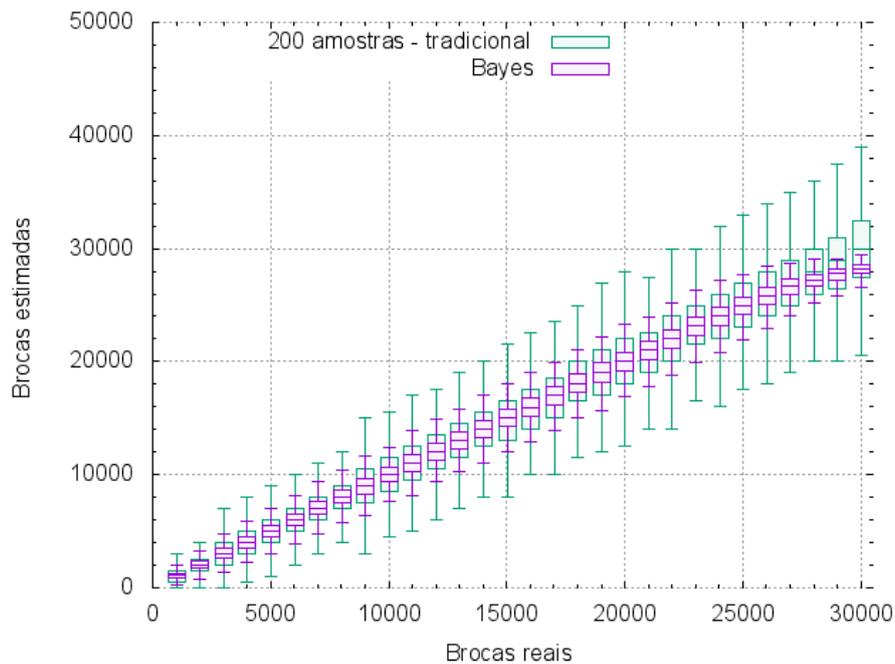


Figura 4.21: Dados com 200 amostras por levantamento - 1.000 levantamentos realizados separados em quartis.

Na figura 4.20 vemos uma comparação entre o método padrão e o método usando estatística Bayesiana com 200 amostras por levantamento. Em geral esta condição é próxima da indicada em estudos para poder estimar o tamanho populacional. A recomendação é que 0,28% da plantação seja levantada, mas poucos são os casos onde ela é efetivamente realizada no campo [89]. Vemos aqui que a precisão mesmo no método tradicional é bem maior que no caso anterior com 50 amostras por levantamento, o que era de se esperar. O valor médio e o valor real são muito próximos novamente, porém o desvio padrão reduziu-se à menos da metade do caso anterior, sendo um pouco menor ainda que o método usando o teorema de Bayes naquela situação. No entanto, ao usarmos os dados obtidos com as 200 amostras no método de Bayes para levantamento da praga, vemos que novamente este apresenta cerca do dobro de precisão. Uma análise parecida pode ser feita ao observarmos a figura 4.21, onde são apresentados os dados distribuídos em quartis. Vemos agora que o método tradicional consegue apresentar estimativas nos 2º e 3º quartis muito próximas à sua mediana. Contudo, vale lembrar que o método tradicional não tem como aproximar a mediana suficientemente do valor real, já que os dados possíveis seguem ainda a equação 4.4. É interessante notar ainda que para populações reais pequenas, algumas estimativas ainda considerarão a população de brocas como inexistente.

A figura 4.21 apresenta os dados obtidos através da aplicação do teorema de Bayes ao método tradicional, com 200 amostras por levantamento. Vemos novamente uma melhora entre as estimativas dos 2º e 3º quartis quando comparadas ao método tradicional.

Entretanto, são nos 1° e 4° quartis onde vemos as melhoras mais significativas. Primeiramente, o método não apresenta nenhum valor nulo para a estimativa da população total presente, o que é especialmente importante para populações reais pequenas. Ainda no primeiro quartil vemos que os valores mínimos estimados estão consideravelmente mais próximos dos valores reais. Por fim, é possível observar que o último quartil apresenta extrapolações para a população muito menores do que no caso do método tradicional.

## 4.4 Otimização de Custo

De posse do custo do controle biológico para várias densidades de brocas e vespas, pode-se combinar estes resultados com a probabilidade de uma certa densidade ser encontrada no campo, dada uma quantidade de brocas  $n$  na amostra de área  $A$ . Sendo assim, esperamos encontrar o custo do controle mais provável para uma certa quantidade de brocas  $n$  em uma área  $A$  para cada uma das possíveis estratégias de liberação de quantidades de vespas  $w$ :

$$C(w) = \sum_{\rho} P(\rho | n, A) C(\rho, w), \quad (4.8)$$

onde  $C(\rho, w)$  é obtido através da equação 4.1 e  $P(\rho | n, A)$  é o teorema de Bayes, descrito na equação 4.2.

### 4.4.1 Teste de robustez dos dados do campo usados na construção do *prior*

Para avaliar quão robustos são os dados obtidos no campo para a construção do *prior* (presente na equação 4.2) e quão sensível a variações é o modelo, foram testadas algumas situações. Primeiramente, de um total de 1.000 amostragens no campo, quatro condições foram testadas utilizando os 500 primeiros dados, os 300 e os 500 últimos dados, e por último os dados disponíveis foram selecionados alternadamente e então o *prior* construído. Isto resultaria em histogramas com grandes diferenças em caso de os dados apresentarem qualquer enviesamento. Como pode ser visto na figura 4.22, em todos os casos a influência dessas alterações no *prior* não foram muito significativas. Isto pode ainda ser notado observando como exemplo a taxa de aparição da densidade mais frequente dos dados,  $\rho = 0$ , que foram 0,7671, 0,7034, 0,7068 e 0,7035, respectivamente.

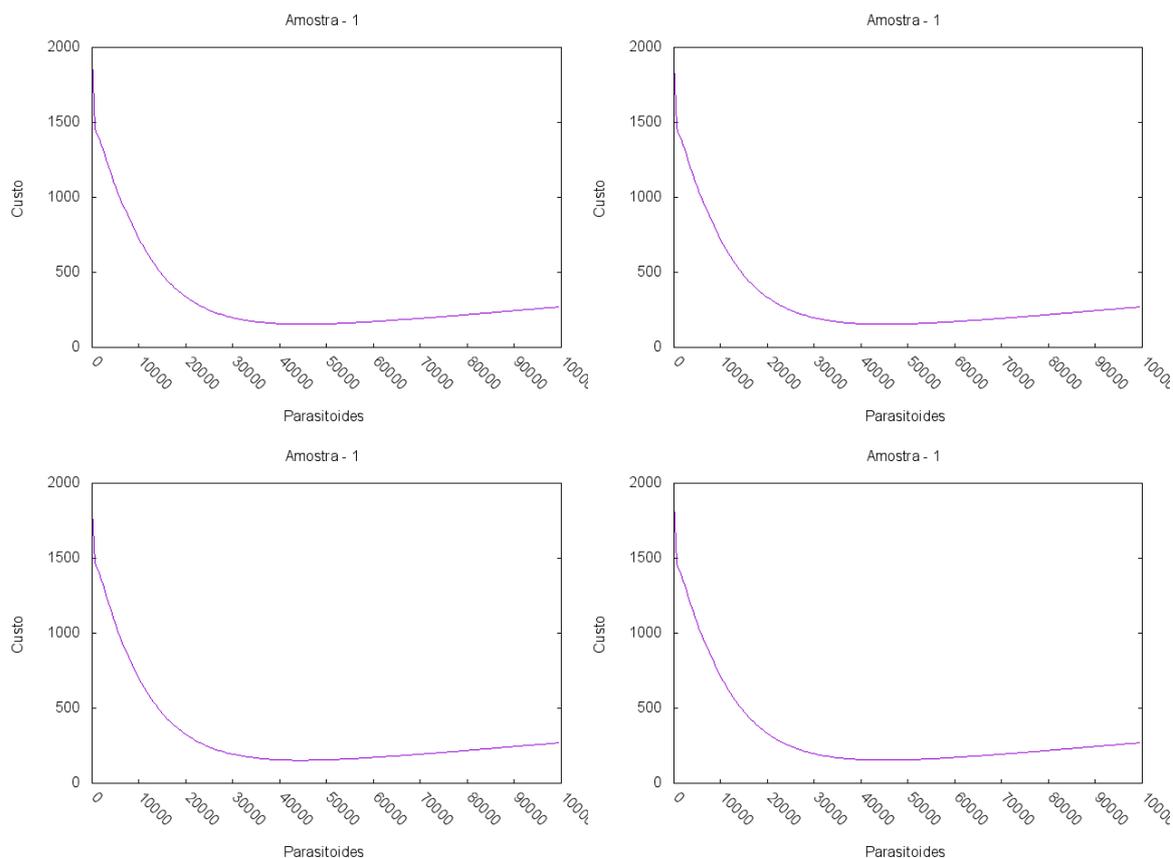


Figura 4.22: Custo para alguns dos levantamentos realizados no campo para 200 dias com *priors* diferentes. Canto superior esquerdo - 500 primeiros levantamentos eliminados, superior direito - 300 últimos levantamentos eliminados, inferior esquerdo - 500 últimos levantamentos eliminados, inferior direito - levantamentos alternados eliminados.

#### 4.4.2 Avaliação da recomendação padrão comparada com o modelo Lotka-Volterra para algumas situações específicas

Para exemplificar o processo, alguns dos dados de densidades de broca foram separados. Eles foram escolhidos com base em não terem sido tratadas com *C. flavipes*, o que permitiria uma comparação entre a situação otimizada apresentada aqui e a estratégia adotada pelos produtores. A estratégia corrente apresenta as seguintes condições para as densidades de brocas/m<sup>2</sup>

- Abaixo de uma densidade de 0,08 nenhum controle é feito;
- Entre as densidades de 0,08 e 0,3, 6.000 parasitoides/hectare são empregadas;
- Entre as densidades de 0,3 e 1,0, dois parasitoides por lagarta devem ser inseridas (algo entre 6.000 e 20.000 parasitoides/hectare);

- Entre as densidades de 1,0 e 1,5, três parasitoides por lagarta devem ser inseridas (algo entre 30.000 e 45.000 parasitoides/hectare);
- Acima da densidade de 1,5, quatro parasitoides por lagarta devem ser inseridas.

Pela figura 4.23, onde as densidades 0,0083, 0,0 e 0,97 foram encontradas, para o período de 200 dias, vemos que a estratégia ótima a ser adotada é diferente da recomendada. Na primeira situação a recomendação atual diria para não adotar nenhum controle, o que geraria, pelo nosso modelo, um prejuízo em torno de 2.000 reais. Se por outro lado fosse usado o ponto ótimo, que é em torno de quatro cinco mil vespas, o custo cairia para cerca de 250 reais, sendo necessário um investimento de cerca de 120 reais em parasitoides. Os dois próximos casos, onde a densidade estimada pelos métodos tradicionais seria  $\rho = 0$  apresentam pontos onde o custo poderia ser reduzido em relação à recomendação de não empregar nenhum controle. O primeiro caso, onde não empregar vespas geraria uma perda de cerca de 500 reais, ao se empregar cerca de 25 mil parasitoides, a perda poderia ser reduzida a cerca de 150 reais. Já o próximo caso não apresenta uma grande economia ao se empregar parasitoides no controle. É interessante notar que em ambos os casos nenhuma broca foi encontrada na amostra, mas a área avaliada foi muito menor no primeiro caso, o que gera mais incerteza da medida, que nessa abordagem é levado em conta. No último caso, onde a densidade é avaliada em  $\rho = 0,19$ , aplicar cerca de 25 mil vespas gera no modelo o custo ótimo, que é de cerca de R\$ 250,00. Por sua vez, considerando o valor da recomendação tradicional, cerca de seis mil vespas, geraria um custo muito próximo do otimizado. Esta última situação é interessante para apresentar um ponto muito importante - é extremamente necessário saber a escala de tempo que está sendo avaliada, que nesse primeiro caso foi de cerca de 200 dias com uma única liberação de parasitoides.

Sabendo que a escala a ser avaliada é um dos pontos importantes no trabalho, realizamos o estudo das amostras anteriores com um período de 550 dias, o que corresponderia à situação menos comum no campo, onde as brocas são encontradas no dia que a cana começa a crescer e esta será colhida na estratégia de 1 ano e meio. Na figura 4.24, as mesmas densidades da figura 4.23 são apresentadas, mas sendo o período muito maior, as estratégias de liberação são agora diferentes. No primeiro caso, onde a densidade é de  $\rho = 0,0083$ , adotar a recomendação padrão, de não inserir nenhuma *C. flavipes*, geraria um custo de cerca de 600 mil reais por hectare ao final dos 550 dias. Estes valores muito altos ocorrem devido ao modelo utilizado, que não prevê efeitos de superpovoamento ou recursos limitados para o crescimento da broca. Isto é uma boa aproximação para populações pequenas, mas se tornam irrealistas quando estas crescem consideravelmente. Entretanto, utilizar quatro cinco mil vespas, como a estratégia para os 200 dias, já não

seria a melhor solução. Para este caso a utilização de 100 mil vespas geraria a estratégia ótima, apresentando um custo total de cerca de 500 reais por hectare. Nos dois próximos casos, onde  $\rho = 0$ , pode-se ver novamente que as estratégias ótimas são diferentes, já que as áreas avaliadas também foram. Contudo, é interessante notar que o custo total, utilizando a estratégia ótima, ainda é muito próximo do apresentado na figura 4.23 para os mesmos casos. Por último, no caso da densidade  $\rho = 0,19$ , onde a recomendação padrão seria utilizar cerca de seis mil vespas por hectare, vemos que essa estratégia já apresenta um custo total muito maior do que o ponto ótimo. Sendo que inserindo cerca de oito cinco mil vespas, o custo total do controle cairia 90% aproximadamente comparado com a recomendação padrão.

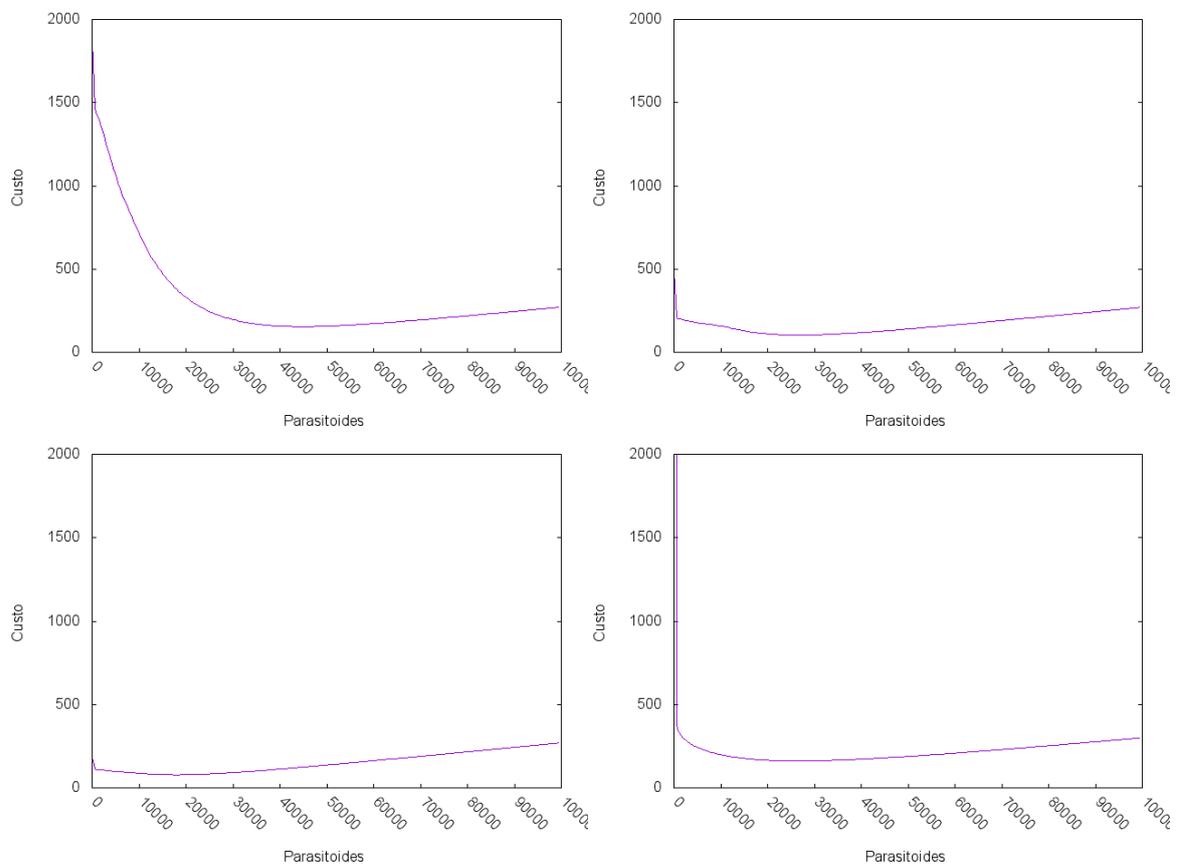


Figura 4.23: Custo estimado através do modelo com Lotka-Volterra para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 200 dias. Canto superior esquerdo -  $n = 1, A = 120m^2, \rho = 0,0083$ , superior direito -  $n = 0, A = 14m^2, \rho = 0$ , inferior esquerdo -  $n = 0, A = 36m^2, \rho = 0$ , inferior direito -  $n = 7, A = 36m^2, \rho = 0,19$ .

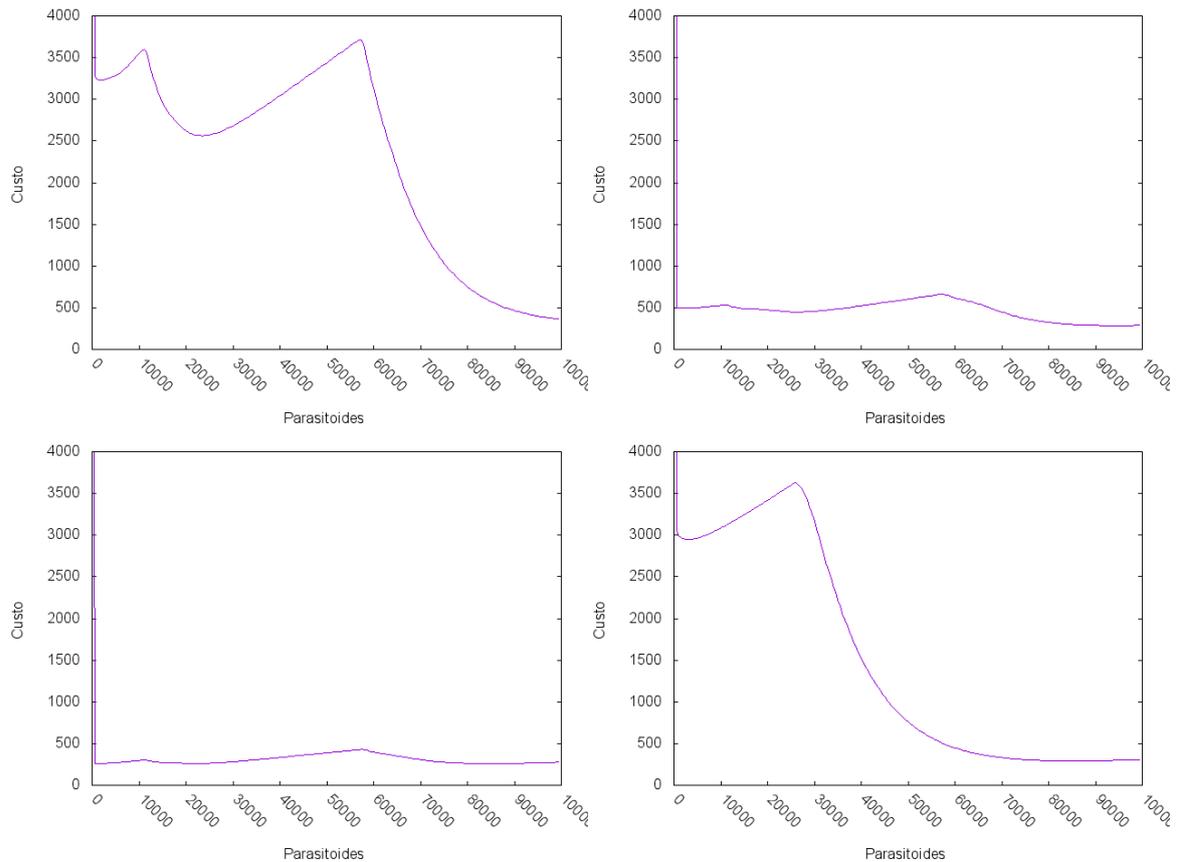


Figura 4.24: Custo estimado através do modelo com Lotka-Volterra para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 550 dias. Canto superior esquerdo -  $n = 1$ ,  $A = 120m^2$ ,  $\rho = 0,0083$ , superior direito -  $n = 0$ ,  $A = 14m^2$ ,  $\rho = 0$ , inferior esquerdo -  $n = 0$ ,  $A = 36m^2$ ,  $\rho = 0$ , inferior direito -  $n = 7$ ,  $A = 36m^2$ ,  $\rho = 0,19$ .

**Comparação de custos Lotka-Volterra - simulação de campo:** Para poder comparar de forma mais eficaz, foi realizada uma simulação no qual a quantidade de brocas era similar a encontrada em 1 hectare, com índice de infestação de 1-2%. Um processo de amostragem, considerando 200 canas por amostra/hectare foi realizado, com a probabilidade de uma lagarta ser encontrada dada pela equação 4.5

$$P_{amostra} = \frac{N_{fixado}}{C},$$

onde:

- $P_{amostra}$  é a probabilidade de uma lagarta ser encontrada ao se avaliar uma cana;
- $N_{fixado}$  é o total de lagartas presentes no hectare;
- $C$  é o total de canas no hectare.

Este processo foi realizado para o total de canas amostradas e o controle estimado através das recomendações padrão. Posteriormente, o resultado obtido foi comparado com o processo otimizado descrito neste trabalho. Por fim, foi realizada a simulação da situação sem a adoção de algum tipo de controle. De posse das quantidades de parasitoides,  $T_p$ , a serem utilizados para cada método, o sistema era iniciado com a quantidade de brocas  $N_{fixado}$  e de vespas  $T_p$  e o custo para cada situação era então computado através da equação 4.1. Exemplos dos resultados obtidos podem ser vistos na tabela 4.1 para uma avaliação considerando um período de 50 dias. Este processo foi repetido 200 vezes para os índices de infestação descritos. O tratamento seguindo a recomendação padrão gerou uma economia de cerca de três 5% em relação à situação não tratada. Foram usadas em média 1.867 vespas por situação com máximo de 7.333. Porém, uma grande quantidade de situações não tiveram nenhuma vespa usada. Entretanto, o processo otimizado gerou uma média de 72% de economia comparado com a situação sem tratamento, com uma média de 15.720 e máximo de 25.000 vespas usadas. O tratamento padrão foi então 57% menos eficaz na redução de prejuízos que a recomendação otimizada.

Br. Encontradas	Quant. de br.	Custo Otimizado	Vesp. usadas	Custo da recom. pad.	Vesp. usadas	Custo S/vesp.
2	2.488	132	19.500	982	0	982
6	2.211	126	25.000	214	6.000	872
3	2.064	126	22.000	215	6.000	814
0	1.915	756	0	756	0	756
3	1.774	123	22.000	215	6.000	700
1	1.244	123	17.000	491	0	491
1	1.040	117	17.000	410	0	410
3	812	103	22.000	167	6.000	320
2	517	91	19.500	204	0	204

Tabela 4.1: Análise de custos para quantidades de brocas diferentes comparando o processo otimizado com a recomendação padrão e sem tratamento para 50 dias.

O processo descrito anteriormente foi repetido considerando uma única liberação de vespas para o período de 200 dias. Nesta nova situação, a recomendação padrão conseguiu gerar uma economia de 43% comparada com a situação sem tratamento. No entanto as quantidades de vespas recomendadas para o tratamento são dependentes apenas da quantidade de brocas presentes no sistema, e não do tempo até a próxima avaliação, o que fez com que as mesmas quantidades de vespas fossem novamente recomendadas. Como o processo aqui descrito para a otimização considera de certa forma a incerteza com relação à quantidade de praga presente no sistema e o tempo até o próximo levantamento, as quantidades de vespas a serem inseridas através desse método são completamente diferentes da situação avaliada para 50 dias. Nesta nova situação, a média de vespas recomendadas

é de cerca de 41 mil vespas, com amplitude variando de um mínimo de 500 e máximo de 54.500 vespas. Este processo conseguiu gerar uma economia de 96% comparado com a situação sem tratamento, sendo o valor gasto com a praga três vezes maior do que o obtido ao se realizar a avaliação para 50 dias. Ele foi também muito superior ao tratamento padrão, que gerou economia 93% menor que a recomendação otimizada.

#### **4.4.3 Avaliação da recomendação padrão comparada com a simulação para alguns casos específicos**

O modelo usando a simulação multi-agentes apresenta uma dinâmica um pouco mais complexa que a obtida através do sistema de equações diferenciais. Por este motivo, avaliar os resultados da otimização usando a estatística bayesiana e este modelo é importante. Vemos na figura 4.25 a estimativa de custos para algumas quantidades de *C. flavipes* no tratamento da broca para um período de 50 dias. Na primeira situação, onde uma broca foi encontrada em  $A = 120m^2$  amostrados, a recomendação otimizada é que se utilize 1.500 parasitoides. No entanto qualquer quantidade de vespas abaixo de 36.000, geraria uma economia maior do que não fazer nada. Contudo é importante notar que esta situação apresenta um custo muito baixo para não tomar nenhuma ação, o que deve ser levado em consideração. A mesma recomendação pode ser utilizada para as duas próximas situações, onde nenhuma broca foi encontrada. O custo estimado do dano da broca nestas situações é muito baixo pela alta eficiência do parasitoide, onde o custo estimado na primeira situação é de cerca de R\$ 8,00 e no segundo é de cerca de R\$ 5,00, pouco mais do que o custo do tratamento recomendado. A variação do custo estimado nestas duas situações se deve à área maior no segundo caso, o que gera maior confiança de que não ter encontrado nenhuma broca no levantamento retrata a situação onde realmente não exista praga presente. Porém ao considerar o histórico, a presença da broca não pode ser desconsiderada, o que faz com que a aplicação dos parasitoides entre como uma medida preventiva. No entanto, a situação onde nenhuma broca foi encontrada numa área de  $36m^2$  faz com que tratamentos com mais de três mil vespas gere mais custo do que a não aplicação destas. Isto só ocorre na situação onde  $14m^2$  foram avaliados, para tratamentos com mais de nove mil parasitoides. A última situação apresentada nesta figura, tendo sido encontradas sete brocas numa área de  $36m^2$ , a recomendação otimizada é que se utilizem 4.500 parasitoides, enquanto a recomendação padrão indica que se utilize seis mil indivíduos para o tratamento. O aumento no custo ao utilizar a recomendação padrão neste caso é praticamente nulo, já que o dano estimado é de R\$ 132,00 no caso otimizado e R\$ 137,00 neste outro. É importante lembrar que o custo de 1.500 *C. flavipes* é de cerca de R\$ 4,00, sendo assim o aumento de custo para os tratamentos com vespas com quantidades maiores que o caso otimizado, nesta situação, é devido ao valor dos indivíduos

inseridos.

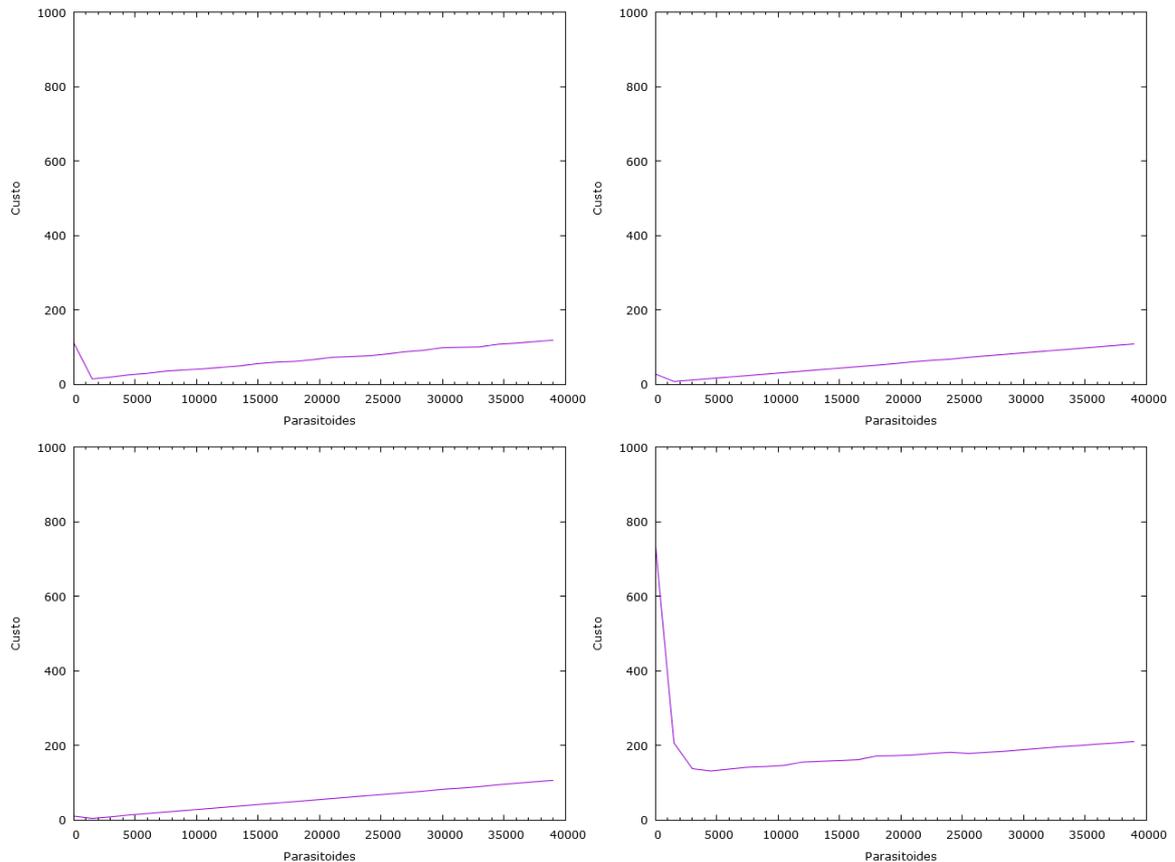


Figura 4.25: Custo estimado através da simulação para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 50 dias. Canto superior esquerdo -  $n = 1$ ,  $A = 120m^2$ ,  $\rho = 0,0083$ , superior direito -  $n = 0$ ,  $A = 14m^2$ ,  $\rho = 0$ , inferior esquerdo -  $n = 0$ ,  $A = 36m^2$ ,  $\rho = 0$ , inferior direito -  $n = 7$ ,  $A = 36m^2$ ,  $\rho = 0,19$ .

Na figura 4.26 vemos as mesmas situações abordadas na figura 4.25, porém considerando um tempo de 200 dias. Na primeira situação apresentada, onde 1 broca foi encontrada no levantamento de  $120m^2$ , o tratamento otimizado ainda é o uso de 1.500 indivíduos. No entanto, neste período considerado, qualquer quantidade de parasitoides utilizada vai gerar mais economia do que não adotar alguma ação. Nesta situação, onde o custo estimado sem tratamento é muito alto, seria recomendável alguma aplicação de parasitoides. As próximas duas situações, onde nenhuma broca foi encontrada, a recomendação otimizada ainda é a utilização de 1.500 indivíduos, porém o tratamento com qualquer uma das quantidades apresentadas gera mais economia do que nenhuma ação de controle, o que é diferente da estimativa para 50 dias. Novamente é apresentado um custo menor para o levantamento com maior área, já que existe maior certeza que esta área apresenta maior probabilidade de não haver brocas, também considerando o histórico dos levantamentos anteriores. É importante notar que a recomendação padrão para

estas três primeiras situações seria não adotar nenhuma ação de controle, o que gera custo bem alto nestes cenários. A última situação apresenta o controle otimizado novamente com 4.500 *C. flavipes*, porém com o custo de não tomar ação alguma de tratamento sendo muito maior que o estimado para 50 dias.

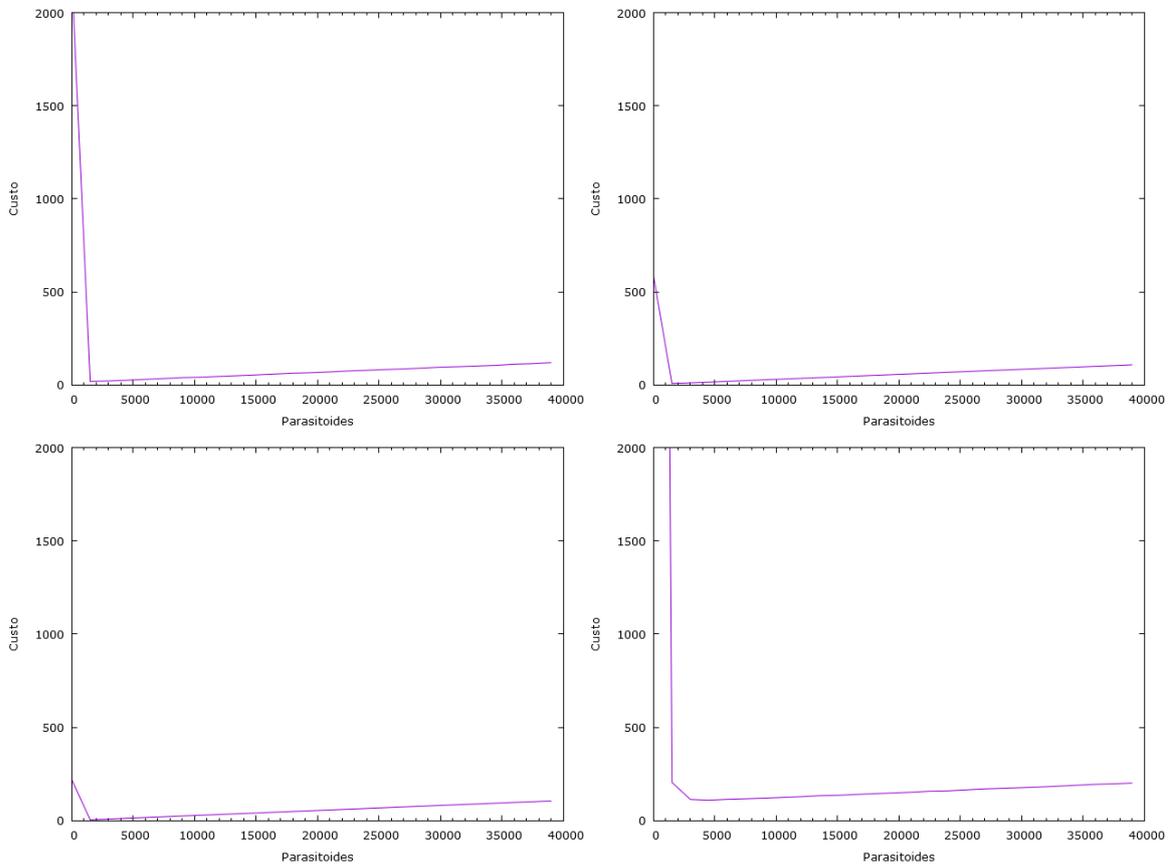


Figura 4.26: Custo estimado através da simulação para alguns levantamentos realizados no campo para o período de 200 dias. Canto superior esquerdo -  $n = 1$ ,  $A = 120m^2$ ,  $\rho = 0,0083$ , superior direito -  $n = 0$ ,  $A = 14m^2$ ,  $\rho = 0$ , inferior esquerdo -  $n = 0$ ,  $A = 36m^2$ ,  $\rho = 0$ , inferior direito -  $n = 7$ ,  $A = 36m^2$ ,  $\rho = 0,19$ .

É importante notar que estas situações foram simuladas considerando parasitoides muito eficientes, onde o coeficiente de eficiência do parasitismo foi considerado como  $E_C = 10$ . No caso de *C. flavipes* inserida ser menos eficiente, as recomendações aqui apresentadas sofrerão grandes alterações.

**Comparação de custos da técnica de multi agentes e simulação de campo:** Utilizando os mesmos dados simulados da seção anterior, foi realizada uma avaliação da eficácia da simulação multi agentes como método de previsão atrelada à estatística bayesiana. Foram utilizados as mesmas 200 condições iniciais, com processo de amostra guiado pela equação 4.5. No entanto, foram comparados apenas as soluções padrão e solução oti-

mizada para 50 e 200 dias. Para 50 dias a recomendação padrão teve uma variação de parasitoides inseridos com mínimo de 0 e máximo de 16.500 vespas, sendo o valor médio de vespas empregadas de 3.500 e mediana em 6.000. Por outro lado, o processo otimizado apresentou a liberação de no mínimo de 1.500 e máximo de 16.500 vespas, com valor médio de 4.700 e mediana em 4.500 parasitoides. O custo médio do tratamento pela recomendação padrão foi de cerca de R\$ 9,00, com total de R\$ 1.755,00 para todas as situações simuladas, enquanto a solução otimizada teve o custo médio um pouco maior, sendo cerca de R\$ 12,00 com total de R\$ 2.320,00 para todas as situações. O tratamento nestes casos é cerca de 30% mais caro, porém apresentando uma economia global de 53%, devida à redução de prejuízos que a praga causou. Se forem comparadas com a situação sem tratamento, a recomendação padrão foi cerca de 70% mais econômica, enquanto a otimizada ofereceu redução de 86%.

A partir da quantidade real de brocas presentes, dentro do processo anteriormente descrito, pode-se observar maior economia ao se considerar o período maior, com 200 dias. A recomendação padrão sugere que se insiram as mesmas quantidades de parasitoides, independentemente da escala de tempo a ser considerada. Sendo assim, as quantidades apresentadas no cenário para 50 dias são as mesmas para 200 dias. No entanto, o processo otimizado gerou recomendações com pequenas diferenças. Os valores máximos, mínimos e a mediana de parasitoides empregadas foram os mesmos obtidos para a situação de 50 dias, sendo que em algumas poucas situações a quantidade de parasitoides recomendada apresentou pequenas variações, o que gerou um custo de tratamento pouco superior, sendo de R\$ 2.324,00. No entanto, a utilização da sugestão otimizada gerou uma economia de cerca de 90%, quando comparada com o custo gerado pelo tratamento padrão. Se for considerado o cenário sem controle biológico, a recomendação padrão gera uma economia de cerca de 92% enquanto a otimizada gera 99% de economia, devido ao grande prejuízo apresentado pelo não tratamento da praga. Estes valores estão equivalentes aos obtidos ao utilizar o modelo Lotka-Volterra como método de previsão, porém apresentando quantidades de vespas muito inferiores à este. Isto se deve em grande parte ao fato da simulação multi agentes retratar com mais detalhes a dinâmica descrita, considerando o tempo de reprodução muito maior para ambas as populações do que o modelo por equações diferenciais, que pela sua própria característica intrínseca considera todos os indivíduos aptos a reproduzir, porém com taxas constantes distribuindo o crescimento durante o ciclo de vida dos indivíduos. É importante notar que as recomendações otimizadas levam em consideração as características das populações envolvidas. Caso o parasitoide utilizado apresente variação na sua eficiência, a quantidade recomendada será diferente. O mesmo vale para as características de reprodução, resistência e ciclos de vida das populações interagentes.

## 5 Conclusão e Considerações finais

A cana-de-açúcar é uma cultura muito importante para o contexto brasileiro atual. Dada sua relevância, todos os aspectos que possam contribuir para a maior competitividade desta devem ser estudados, com especial atenção às soluções com menor impacto ambiental. Neste contexto, o controle de pragas por meio de predadores, parasitas e parasitoides se apresenta como solução muito pertinente. No entanto, para obter maior compreensão da dinâmica, apenas os dados de observações coletados no campo podem não serem suficientes, de tal forma que o entendimento e interpretação destes grandemente ampliados por meio de modelos teóricos.

Este trabalho teve como objetivos aprimorar o conhecimento de como se dá a dinâmica entre a praga da cana, *D. saccharalis*, e seu parasitoide, *C. flavipes*, o que foi realizado por meio de dois modelos. De posse de um melhor entendimento da dinâmica, a devolução deste conhecimento em forma de uma ferramenta útil para o agricultor era almejada. Para alcançar este objetivo foram utilizadas duas técnicas para descrever a interação entre as populações, sendo elas o modelo Lotka-Volterra e simulação computacional por meio da técnica de multi agentes. A transformação do conhecimento da interação entre praga e parasitoide de forma útil ao agricultor foi obtida através da combinação das técnicas de previsão anteriores com o ferramental da estatística bayesiana, o que possibilitou retornar de forma genérica uma solução otimizada para a utilização do controle biológico da praga.

Foi possível realizar a adaptação do modelo Lotka-Volterra para a interação entre a broca-da-cana e seu parasitoide. Neste processo, os caminhos para a obtenção dos parâmetros específicos para a situação desejada foram explicitados, dado que os fatores biológicos das populações envolvidas podem mudar com o tempo [51]. De posse do modelo, seus pontos de equilíbrio foram analisados, de onde conclui-se que as soluções de coexistência apresentadas oscilam indefinidamente na presença de pequenas perturbações, caracterizando soluções estáveis do tipo centro [90]. Foi possível também calcular o período de oscilação para populações próximas à condição de equilíbrio como sendo de 21,7 dias. Por fim, foram observadas as condições para as quais um certo ciclo limite poderia ser atingido através de populações inicialmente diferentes. Isto indica que tratamentos diversos podem ser aplicados em momentos diferentes de forma a manter as populações controladas em certos valores em um dado instante.

O modelo Lotka-Volterra, apesar de contribuir para o entendimento da dinâmica e apresentar grande velocidade na obtenção de resultados, apresenta muitas limitações no potencial preditivo devido a forma como é idealizado. Entre as condições que causam estas limitações vale ressaltar que este modelo considera indivíduos idênticos entre si, sendo sexo, idade e taxas de parasitismo e morte os mesmos dentro da população. Como

forma de diminuir estas limitações foi usada a técnica de simulação de multi agentes, que apesar de utilizar muito poder computacional, consegue retratar de maneira mais realista a dinâmica entre os indivíduos.

A descrição da dinâmica entre as populações por meio da técnica de multi agentes foi implementada, sendo as características biológicas quase todas obtidas através dos dados disponíveis na literatura. Porém, como um dos objetivos deste trabalho foi criar as ferramentas necessárias para a obtenção da otimização do uso de *C. flavipes*, estes parâmetros foram utilizados para exemplificar o comportamento qualitativo dos indivíduos. Como as populações envolvidas podem apresentar características biológicas diferentes em regiões diversas, todos os parâmetros avaliados devem ser obtidos para a situação local. Os valores de taxa de morte diária por fatores aleatórios e a eficiência do parasitoide, no entanto, tiveram de ser arbitrariamente definidos, sendo que a variação no valor destes foi também estudada. Foi possível constatar que a taxa de morte por fatores aleatórios desempenha um papel importante na dinâmica, observando-se que a população da praga apresenta ciclos equivalentes ao valor da expectativa média de vida da broca. Este comportamento foi atribuído ao fato dos indivíduos poderem ser retirados diariamente do sistema e poderem se reproduzir apenas ao completarem o ciclo de vida completo, aqui adotado como o último dia de vida do indivíduo. As oscilações no tamanho populacional da broca no período relatado, estando esta população isolada, não puderam ser observadas pelo modelo Lotka-Volterra, já que este considera que a população pode se reproduzir a todo instante. No entanto, este tipo de oscilação em populações isoladas já havia sido documentado na literatura no trabalho de Hassell et al. (1976) [91], onde o comportamento surge mais facilmente em populações discretizadas em modelos que utilizam equações não lineares.

Dentro da análise dos resultados da simulação multi agentes, foi ainda possível avaliar a eficácia do parasitismo da vespa. Nos cenários avaliados o parasitismo foi identificado como decisivo para o controle da praga, porém uma grande quantidade das mortes dos indivíduos desta pôde ser atribuído ao sistema, sendo consideradas através da taxa de morte aleatória. O parasitismo, no entanto, atuou ativamente nos primeiros dias da liberação das vespas, sendo que neste período para coeficientes de eficiência do parasitoide  $E_C \geq 6$  a quantidade de lagartas presentes no sistema foi muito similar, apresentando total menor do que a quantidade de adultos e ovos da população de brocas. No entanto, como *C. flavipes* atua apenas na fase de lagarta da broca, os adultos e ovos do sistema foram responsáveis por um segundo pico identificado cerca de 20 dias após a liberação dos parasitoides. Este segundo ponto de máximo, no entanto, pode ser um indicativo inadequado caso um levantamento para atestar a eficiência da broca ocorra próximo a este período. Isto porque nos cenários onde o controle total ocorre, a população de brocas está quase extinta a cerca de 40 dias da liberação enquanto nos outros a população de brocas

ainda apresenta quantidades significativas de indivíduos neste instante. A presença deste segundo pico, cerca de 20 dias da liberação inicial, em todos os cenários avaliados, indica que uma estratégia com duas liberações de parasitoides espaçadas pode apresentar um controle mais eficaz.

De posse dos resultados da dinâmica obtidos por meio do modelo Lotka-Volterra e da simulação multi agentes, uma análise do custo da praga foi realizada. Considerou-se o dano econômico que a broca pode gerar, bem como o custo do tratamento. Estes resultados apresentaram pontos ótimos na redução do custo da praga, para tanto, um alto grau de certeza do tamanho da população da praga e dos parâmetros empregados deve existir. Para contornar o problema da incerteza da quantidade de brocas presentes no campo, foi utilizada o teorema de Bayes, onde probabilidades foram atribuídas à densidades de broca arbitrariamente fixadas. De posse destas probabilidades, observou-se que este último método é muito eficaz na estimativa populacional, porém sua eficácia depende de um bom histórico de pragas registradas. Por fim, a combinação do custo da praga com o método de levantamento empregado resultou em uma ferramenta bastante efetiva para o controle da broca. Dentre os cenários avaliados, a média total de economia ao adotar as estratégias propostas por essa ferramenta foi sempre superior à 40% comparada com o método tradicionalmente adotado, tanto ao utilizar o modelo Lotka-Volterra quanto a simulação multi agentes para previsão dos custos. A abordagem aqui adotada se mostra como muito promissora para aprimorar as estratégias para o controle de *D. saccharalis*, sendo um passo anterior ao desenvolvido de experimentos no campo, o que pode significar redução de custos ao direcionar quais estratégias devem ser priorizadas nos testes.

## Referências

- [1] D'HONT, A. et al. Determination of basic chromosome numbers in the genus *Saccharum* by physical mapping of ribosomal RNA genes. **Genome**, v. 41, n. 2, p. 221–225, abr. 1998.
- [2] KOLE, Chittaranjan (Ed.); HALL, Timothy C. (Ed.). Compendium of transgenic crop plants. **Hoboken, N.J: Wiley-Blackwell**, 2008. v.7. 248 p.
- [3] DE SOUZA, A. P.; GRANDIS, A.; LEITE, D. C. C.; BUCKERIDGE, m. S. Sugarcane as a Bioenergy Source: History, Performance, and Perspectives for Second-Generation Bioethanol. **BioEnergy Research**, v. 7, n. 1, p. 24–35, 2014.
- [4] UNICA - União da Indústria de cana-de-açúcar, 2017. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/>>, Acesso em 19/10/2017.
- [5] MACLOTKA-VOLTERRA, I. C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bioethanol production and utilization in Brazil (1996). **Biomass and Bioenergy**, v. 14, n. 1, p. 77–81, 1998.
- [6] DE OLIVEIRA BORDONAL, R.; DE FIGUEIRALotka-Volterra, E. B.; LA SCALA, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 846–858, 2012. Elsevier B.V.
- [7] GARCÍA, C. A.; FUENTES, A.; HENNECKE, A.; et al. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. **Applied Energy**, v. 88, n. 6, p. 2088–2097, 2011.
- [8] AMBROSANO, G. m. B.; STIMAC, J. L.; SILVEIRA NETO, S.; IGUE, T.; NAGAI, V. modelo matemático para simulação do controle biológico da broca-da-cana com o parasitoide *Trichogramma galloi*: I. modelos conceituais. **Bragantia**, v. 55, n. 2, 1996.
- [9] POTGIETER, L. modelling the effects of the sterile insect technique applied to *Eldana saccharina* Walker in sugarcane. v. 28, n. 2, p. 59–84, 2012.
- [10] RAFIKOV, m.; LORDELO, A. D. S.; RAFIKOVA, E. Impulsive Biological Pest Control Strategies of the Sugarcane Borer. **mathematical Problems in Engineering**, v. 2012, p. 1–14, 2012.

- [11] RAFIKOV, m.; DE HOLANDA LIMEIRA, E. mathematical modelling of the biological pest control of the sugarcane borer. **International Journal of Computer mathematics**, v. 89, n. 3, p. 390–401, 2012.
- [12] TANG, S.; CHEKE, R. A. models for integrated pest control and their biological implications. **mathematical biosciences**, v. 215, n. 1, p. 115–25, 2008.
- [13] RAFIKOV, m.; SILVEIRA, J. C. On dynamical behavior of the sugarcane borer – Parasitoid agroecosystem. **Ecological Complexity**, v. 18, n. 2013, p. 67–73, 2014.
- [14] SONG, Z.-G.; ZHEN, B.; XU, J. Species coexistence and chaotic behavior induced by multiple delays in a food chain system. **Ecological Complexity**, v. 19, p. 9–17, 2014.
- [15] RAFIKOV, m.; BALTHAZAR, J. m.; VON BREMEN, H. F. mathematical modeling and control of population systems: Applications in biological pest control. **Applied mathematics and Computation**, v. 200, n. 2, p. 557– 573, 2008.
- [16] BOTELHO, P.; PARRA, J.; NETO, J.; OLIVEIRA, C. Associação do parasitoide de ovos *Trichogramma galloi* Zucchi (Hymenoptera: Trichogrammatidae) e do parasitoide larval *Cotesia flavipes* (Cam.) (Hymenoptera: Braconidae) no controle de *D. saccharalis*, (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar. **An. Soc. Entomol. Bras**, v. 28, n. 3, p. 491–496, 1999.
- [17] ACEV Lotka-Volterra, J. P. m.; SAMUELS, R. I.; MACHADO, I. R.; DOLINSKI, C. Interactions between isolates of the entomopathogenic fungus *metarhizium anisopliae* and the entomopathogenic nematode *Heterorhabditis bacteriophora* JPM4 during infection of the sugar cane borer *D. saccharalis* (Lepidoptera: Pyralidae). **Journal of invertebrate pathology**, v. 96, n. 2, p. 187–92, 2007.
- [18] CAMPOS-FARINHA, A. Biologia reprodutiva de *Cotesia flavipes* (CAMERON) (HYMENOPTERA: BRACONIDAE). IV. Discriminação entre lagartas parasitadas e não parasitadas de *D. saccharalis fabricius* (LEPIDOPTERA: PYRALIDAE), tempo de desenvolvimento e razão sexual dos parasitoides. **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, p. 229–234, 2000.
- [19] MAHMOUD, A. Parasitism by the Endoparasitoid , *Cotesia flavipes* Induces Cellular Immunosuppression and Enhances Susceptibility of the Sugar Cane Borer , *D. saccharalis* to *Bacillus thuringiensis* Parasitism by the endoparasitoid , *Cotesia flavipes* induces cellula. **Journal of Insect Science**, v. 11, n. 119, p. 1–15, 2011.

- [20] NEVES m.F.; TROMBIN, V. G. A Dimensão do setor sucroenergético - mapeamento e quantificação da safra 2013/14. , p. 45 p., 2014.
- [21] MITCHELL, R.; SCHMER, m. Compendium of Bioenergy Plants: sugarcane.p. 2016.
- [22] COLE, Juan. Iraq and the Israeli-Palestinian Conflict in the Twentieth Century. **macalester International**. Vol. 23, Article 8. 2009. Available at: <http://digitalcommons.macalester.edu/macintl/vol23/iss1/8/>
- [23] GALEMBECK, F.; DE ABREU FILHO, P. Perspectives for Biomass Production and Use in Brazil. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 274–293, 2017.
- [24] Decreto n 76.593, de 14 de novembro de 1975 - disponível em <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76593-14-novembro-1975-425253-norma-pe.html>>
- [25] SHOEMAKER, C. Optimization of agricultural pest management I: Biological and mathematical background. **mathematical Biosciences**, v. 17 5, n. 139, p. 143–175, 1973.
- [26] GALLO, Domingos et al. manual de entomologia agricola. Sao Paulo, **Agronomica CERES**, 1978. 531 p.
- [27] PARRA, J. R. P. et al. Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores. São Paulo: **manole**, 2002. 635 p. ISBN oito 5-204-1 554-7.
- [28] RODERO, D. P. modelagem matemática da interação populacional entre *D. saccharalis* ( Fabricius , 1794 ) e o parasitoide *Cotesia flavipes* ( Cameron , 1891 ), 2016. UFSCar.
- [29] PLANT, R. E.; mANGEL, m. modeling and Simulation in Agricultural Pest management. **SIAM Review**, 29 (2): 235–261, 1987.
- [30] Agrofit. Sistema de agrotóxicos fitossanitários. Disponível em <<http://agrofit.agricultura.gov.br>>. Acesso em 16 Nov. 2017.
- [31] Sindiveg. Balanço 201 cinco - Setor de agroquímicos confirma queda de vendas. Disponível em <<http://sindiveg.org.br/balanco-2015-setor-de-agroquimicos-confirma-queda-de-vendas/>>. Acesso em 16 Nov. 2017.
- [32] FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. cana-de-açúcar e seus impactos : uma visão acadêmica. 2017.

- [33] MOTA, L. D. m. Agrotóxicos e transgênicos: solução ou problema à saúde humana e ambiental? **Saúde & Ambiente em Revista**, v. 4, n. 1, p. 36–46, 2009.
- [34] CARNEIRO, F. F.; et al. Dossiê ABRASCO, um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde. Rio de Janeiro/São Paulo: **Editores Expressão Popular**, 2015.
- [35] ROSSI, m.; FOWLER, H. manipulation of fire ant density, *Solenopsis* spp., for short-term reduction of *D. saccharalis* larval densities in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 2, p. 389–392, 2002.
- [36] POTGIETER, L.; VAN VUUREN, J. H.; CONLONG, D. E. A reaction–diffusion model for the control of *Eldana saccharina* Walker in sugarcane using the sterile insect technique. **Ecological modelling**, v. 250, p. 319–328, fev. 2013.
- [37] NOLAN, T. et al.; Developing transgenic *Anopheles* mosquitoes for the sterile insect technique. **Genetica**, v. 139, n. 1, p. 33–9, jan. 2011.
- [38] HICKERSON, m. J. All models are wrong. **molecular ecology**, v. 23, n. 12, p. 2887–9, 2014.
- [39] ALPHEY, L. et al.; Sterile-insect methods for control of mosquito-borne diseases: an analysis. Larchmont, N.Y.: **Vector borne and zoonotic diseases**, v. 10, n. 3, p. 295–311, abr. 2010.
- [40] ANTIGO, m. DE R.; et al.; Repelência de produtos fitossanitários usados na cana-de-açúcar e seus efeitos na emergência de *Trichogramma galloi*. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 4, p. 910–916, 2013.
- [41] COSTA, D. P.; COSTA, D. P. Distribuição Espacial de *D. saccharalis* ( Fabricius , 1794 ) ( Lepidoptera : Crambidae ) em cana-de-açúcar, 2009.
- [42] AMBROSANO, E. J.; et al. Infestation of *D. saccharalis* (Fabr.) during Five Consecutive Cycles of Sugarcane Crop Succeeding Leguminous Crops. **Agricultural Sciences**, v. 6, n. 1, p. 14–21, 2015.
- [43] MOORE, P.; BOTHA, F. Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology. New Delhi: **Wiley Blackwell**, 2014.
- [44] LONG, W. H.; HENSLEY, S. D. Insect Pests of Sugar Cane. **Annual Review of Entomology**, v. 17, n. 1, p. 149–176, 1972.

- [45] Brasil. Lei n 11.241 de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2002/lei-11241-19.09.2002.html>> Acesso em 16 Nov. 2017.
- [46] Portal do Governo. Etanol Verde. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/>> Acesso em 16 Nov. 2017.
- [47] VEIGA, A. C. P.; et al.; Quality control of *Cotesia flavipes* (Cameron) (Hymenoptera: Braconidae) from different Brazilian bio-factories. **Biocontrol Science and Technology**, v. 23, n. 6, p. 665–673, 2013.
- [48] WIEDENMANN, R. N.; SMITH, J. W.; DARNELL, P. O. Laboratory rearing and biology of the parasite *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) using *D. saccharalis* (Lepidoptera: Pyralidae) as a host. **Environ. Entomol.**, v. 21, p. 1160–1167, 1992.
- [49] LEERDAM, m. B. VAN; SMITH, J. W.; FUCHS, T. W. Frass-mediated host-finding behavior of *Cotesia flavipes*, a braconid parasite of *D. saccharalis* (Lepidoptera: Pyralidae). **Ann. Entomol. Soc. Am.**, v. 78, p. 647–650, 1985.
- [50] POTTING, R. P. J.; VET, L. E. m.; DICKE, m. Host microhabitat location by stem-borer parasitoid *Cotesia flavipes*: the role of herbivore volatiles and locally and systemically induced plant volatiles. **Journal of Chemical Ecology**, v. 21, n. 5, p. 525–539, 1995.
- [51] HAROLDO, X. L. V.; et al.; Determination of method to evaluate parasitism and cover area for studies on *Cotesia flavipes* in sugarcane. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 436–447, 2014.
- [52] VEIGA, A. C. P.; et al.; Quality control of *Cotesia flavipes* (Cameron) (Hymenoptera: Braconidae) from different Brazilian bio-factories. **Biocontrol Science and Technology**, v. 23, n. 6, p. 665–673, 2013.
- [53] VACARI, A. m.; et al.; Fonte proteica na criação de *D. saccharalis* e seu reflexo na produção e no controle de qualidade de *Cotesia flavipes*. **Bragantia**, v. 71, n. 3, p. três cinco 5–361, 2012.
- [54] SIMÕES, R. A.; et al.; I. Biological and behavioral parameters of the parasitoid *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) are altered by the pathogen *Nosema* sp. (Microsporidia: Nosematidae). **Biological Control**, v. 63, n. 2, p. 164–171, 2012.

- [55] ROSSI, m. N. Evidences of non-additive effects of multiple parasitoids on *D. saccharalis* Fabr. (Lep., Crambidae) populations in sugarcane fields in Brazil. **Journal of Applied Entomology**, v. 128, n. 2, p. 88–94, 2004.
- [56] MACLOTKA-VOLTERRA, N.; ARAÚJO, J. R. Efeitos da queima do canavial sobre parasitoides de larvas e de ovos de *D. saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 29, n. 1, p. 79–84, 2000.
- [57] SANTOS, L. A. O.; MIHSELDT, L. H. Capacidade de Busca e de Parasitismo de *Cotesia flavipes* Cameron (Hymenoptera: Braconidae) em Lagartas de *D. saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae). **EntomoBrasilis**, v. 7, n. 2, p. 106–109, 2014.
- [58] ARROYO, B. m.; et al.; Predação de “massas” de *Cotesia flavipes* na técnica de liberação Por Espalhamento De Pupas No canavial. **VI workshop Agroenergia. Anais..** . p.2–7, 2012. Ribeirão Preto, SP.
- [59] BENNETT, F. D. 1965. Tests with parasites of Asian graminaceous mothborers on *Diatraea* and allied genera in Trinidad. Commonwealth Inst. Biol. Control. Contrib., **Tech. Bull.** 5: 101-16.
- [60] ALAM, m. m.; BENNETT, F. D.; CARL, K. P. Biological control of *D. saccharalis* (F.) in Barbados by *Apanteles flavipes* Cam. and *Lixophaga Diatraeae* T. T. **Entomophaga**, v. 16, n. 2, p. 151–158, 1971.
- [61] GIFFORD, J. R.; MANN, G. A. Biology, Rearing, and A Trial Release of *Apanteles flavipes* in the Florida Everglades to Control the Sugarcane Borer<sup>12</sup>. **Journal of Economic Entomology**, v. 60, n. 1, p. 44–47, 1967.
- [62] ARAÚJO, J. R.; et al.; Influência do número de apanteles flavipes liberados, na eficiência de controle da broca da cana-de-açúcar, *D. saccharalis*. **Cad. Planalsucar**, v. 3, p. 3–24, 1984.
- [63] Agrolinkfito. Bula Cotésia Biocana. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/agrolinkfito/produto/cotesia-biocana\\_8562.html](https://www.agrolink.com.br/agrolinkfito/produto/cotesia-biocana_8562.html)> Acesso em: 10 Nov. 2017.
- [64] Biocontrol. Cotésia Biocontrol. Disponível em:<<http://www.biocontrol.com.br/produtos-cotesia.php>> Acesso em: 10 Nov. 2017.
- [65] SANTOS, Rafael Ferreira dos. Desenvolvimento de nova embalagem para comercialização, transporte e liberação do parasitoide *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891)

- (Hymenoptera: Braconidae). 201 5. viii, 57 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 201 5. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/123709>>.
- [66] MFRURAL. Preços de *Cotesia flavipes*. 2015. Disponível em: <<http://www.mfrural.com.br/busca.aspx?palavras=cotesia+flavipes>>. Acesso em: 10 Nov. 2017.
- [67] DINARDO-MIRANDA, L.; et al. Reação de cultivares de cana-de-açúcar à broca do colmo. **Bragantia**, 2013.
- [68] LOTKA, A. J. Undamped oscillations derived from the law of mass action. **Journal of the American Chemical Society**, v. 42, n. 8, p. 1 59 5–1 599, 1920.
- [69] VOLTERRA, V. Variations and Fluctuations of the Number of Individuals in Animal Species living together. **ICES Journal of marine Science**, v. 3, n. 1, p. 3– 51, 1928.
- [70] LIANG, J.; TANG, S. Optimal dosage and economic threshold of multiple pesticide applications for pest control. **mathematical and Computer modelling**, v. 51, n. 5-6, p. 487– 503, 2010. Elsevier Ltd.
- [71] MOLTER, A.; RAFIKOV, m. Nonlinear optimal control of population systems: applications in ecosystems. **Nonlinear Dynamics**, v. 76, n. 2, p. 1141–11 50, 2014.
- [72] GAO, W.; TANG, S. The effects of impulsive releasing methods of natural enemies on pest control and dynamical complexity. **Nonlinear Analysis: Hybrid Systems**, v. 5, n. 3, p. 540– cinco 53, 2011. Elsevier Ltd.
- [73] CAMPOS, J. R.; et al.; Biological control of caterpillar sugarcane (*D. saccharalis*) considering interval mathematical models. **BIOMATH**, v. 5, n. 1, p. 1604232, 2016.
- [74] CAPINERA, J. L. . Sugarcane Borer, *D. saccharalis* (Fabricius) (Insecta: Lepidoptera: Pyralidae). University of Florida. IFAS Extension. 2001. Disponível em: <http://edis.ifas.ufl.edu>. Acesso em: jan .2018.
- [75] HENSLEY, S. D. et al.; Effects of Insecticides on the Predaceous Arthropod Fauna of Louisiana Sugarcane Fields. **Journal of Economic Entomology**: 146–149, 1961.
- [76] BEUZELIN, J. m. et al.; Field assessment of novaluron for sugarcane borer, *D. saccharalis* (F.) (Lepidoptera: Crambidae), management in Louisiana sugarcane. **Crop Protection**: 1168–1176, 2010.

- [77] WHITE, W. H. et al.; Re-evaluation of sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae) bioeconomics in Louisiana. **Crop Protection**: 1256–1261, 2008.
- [78] MURRAY, J. D. mathematical Biology. **Springer-Verlag**. Berlin, três ed. 2002.
- [79] MAY, Robert m. (ed). mcLean, Angela R. (ed). Theoretical ecology principles and applications. Oxford, **Oxford University Press**, 2007 New York. ix, 257 p.
- [80] GOTELLI, Nicholas J. A primer of ecology. University of Vermont. Third edition, 2001 (pgs. 26-30)
- [81] OTTO, Sarah P. DAY, Troy. A biologist's guide to mathematical modeling in ecology and evolution. Princeton, **Princeton University Press**, c2007. x, 732 p.
- [82] RAFIKOV, m.; AGELELLI, T. Optimization of Biological Pest Control of Sugarcane Borer. Saint Petersburg: **18th IEEE International Conference on Control Applications**, 2009.
- [83] RAFIKOV, m.; SILVEIRA, J. C. On dynamical behavior of the sugarcane borer – Parasitoid agroecosystem. **Ecological Complexity**, v. 18, n. 2013, p. 67–73, Elsevier B.V., 2014.
- [84] DINARDO-MIRANDA, L. L.; Vasconcelos, A. C. m.; Landell, m. G. A. cana-de-açúcar. Campinas: **Instituto Biológico**: 349-404, 2008.
- [85] LV, J.; et al.; Impact of *Cotesia flavipes* (Hymenoptera: Braconidae) as an augmentative biocontrol agent for the sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae) on rice. , v. 56, n. 2, p. 159-169, 2011
- [86] SANDOVAL, S. S.; SENÔ, K. C. A. Comportamento e controle de *D. saccharalis* na cultura da cana-de-açúcar. **Nucleus**, v. 7, n. 1, p. 243–257, 2010. (in Portuguese)
- [87] SCHEXNAYDER, H. P.; REAGAN, T. E.; RING, D. R. Sampling for the Sugarcane Borer (Lepidoptera: Crambidae) on Sugarcane in Louisiana. **Journal of Economic Entomology**, v. 94, n. 3, p. 766–771, 2001.
- [88] DE BELÉM, C. de S. Q. P. Simulação da intensidade de infestação de *D. saccharalis* e impactos na qualidade tecnológica e econômica da cana-de-açúcar. UFG, 2017.
- [89] DINARDO-MIRANDA, L. L.; FRACASSO, J. V.; PERECIN, D. Variabilidade espacial de populações de *D. saccharalis* em canaviais e sugestão de método de amostragem. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 577– 585, 2011.

- [90] FIEDLER-FERRARA, Nelson; PRADO, Carmen P. Cintra Do. Caos: uma introdução. São Paulo: **Edgard Blucher**, 1995. 402 p.
- [91] HASSELL, m.; LAWTON, J.; mAY, R. Patterns of dynamical behaviour in single-species populations. **The Journal of Animal Ecology**, v. quatro 5, n. 2, p. 471–486, 1976.