

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE MATEMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATEMÁTICA APLICADA

**Modelos Matemáticos para o Controle da Praga
Grapholita molesta em Culturas de Pessegueiros**

por

Elisa Regina Cara

Tese submetida como requisito parcial
para a obtenção do grau de
Doutora em Matemática Aplicada

Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Varriale
Orientadora

Prof^a. Dr^a. Diomar Cristina Mistro
Coorientadora

Porto Alegre, 15 de fevereiro de 2016

CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Cara, Elisa Regina

Modelos Matemáticos para o Controle da Praga *Grapholita molesta* em Culturas de Pessegueiros / Elisa Regina Cara - Porto Alegre: PPGMAp da UFRGS, 2016.

156 p.: il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Porto Alegre, 2016

Orientadora: Varriale, Maria Cristina

Coorientadora: Mistro, Diomar Cristina

Tese: Matemática Aplicada,
Mariposa Oriental, Controle, MIP, Limiar Econômico

Modelos Matemáticos para o Controle da Praga *Grapholita molesta* em Culturas de Pessegueiros

por

Elisa Regina Cara

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada
do Instituto de Matemática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito parcial para a obtenção do grau de

Doutora em Matemática Aplicada

Linha de Pesquisa: Sistemas Não-Lineares e Aplicações

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Varriale

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Diomar Cristina Mistro

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Diego Eckhard
PPGMAp-UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Díaz Rodrigues
PPGMat-UFSM

Prof. Dr. Wesley Augusto Conde Godoy
ESALQ-USP

Tese apresentada e aprovada em
15 de fevereiro de 2016.

Prof. Dr. Carlos Hoppen
Coordenador

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho agradeço...

Aos meus pais Vilson e Orinete pelo apoio incondicional durante toda a minha trajetória acadêmica.

À minha tia Leodete que sempre esteve presente quando precisei de sua ajuda.

À Maria Cristina, pela amizade, orientação e apoio durante esta caminhada.

À Diomar, pelo apoio e colaboração.

À todos os amigos e familiares que colaboraram de uma forma ou de outra para a realização deste trabalho.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xvi
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUÇÃO	1
1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	7
1.1 Produção de Pêssegos no Brasil	7
1.2 <i>Grapholita molesta</i> (Mariposa Oriental): Aspectos Gerais	8
1.2.1 Origem e Distribuição Geográfica	8
1.2.2 Descrição e Bioecologia	8
1.2.3 Danos e Prejuízos	10
1.3 Controle Biológico: Uso de Parasitoides	11
1.3.1 <i>Trichogramma pretiosum</i> (Hymenoptera: Trichogrammatidae)	12
1.3.2 <i>Macrocentrus ancylivorus</i> (Hymenoptera: Braconidae)	14
1.4 Construção do Modelo Básico I	15
1.5 Considerações Finais	19
2 MODELO BÁSICO I: ANÁLISE E PRIMEIROS RESULTADOS	20
2.1 Adimensionalização do Modelo Básico I	20
2.2 Pontos de Equilíbrio	21
2.3 Viabilidade Biológica dos Pontos de Equilíbrio	23
2.4 Estabilidade Local dos Pontos de Equilíbrio	24
2.4.1 Estabilidade Local do Equilíbrio E_0	24
2.4.2 Estabilidade Local do Equilíbrio E_1	25
2.4.3 Estabilidade Local do Equilíbrio E_2	25
2.4.4 Estabilidade Local do Equilíbrio E_3	26
2.4.5 Estabilidade Local do Equilíbrio E_4	27

2.5	Escolha dos Parâmetros do Modelo I	27
2.6	Simulações sem Estrutura Espacial e sem Controle	29
2.7	Considerações Finais	31
3	MODELOS MATEMÁTICOS PARA O CONTROLE DA <i>GRAPHOLITA MOLESTA</i>	33
3.1	Manejo Integrado de Pragas	33
3.1.1	Conceito de Inseto-Praga	33
3.1.2	Conceito Geral de Manejo Integrado de Pragas (MIP)	35
3.1.3	Técnicas para o Controle da <i>Grapholita molesta</i>	36
3.2	Monitoramento da <i>Grapholita molesta</i> e o Nível de Controle	38
3.3	Modelos para o Controle da <i>Grapholita molesta</i>	40
3.3.1	Simulações com apenas uma Técnica de Controle: Casos I e II	42
3.3.2	Simulações com o Controle Integrado: Caso III	51
3.4	Controle Proporcional-Integral	57
3.4.1	Modelagem do Controle Proporcional-Integral	58
3.4.2	Simulações com o Controle Proporcional-Integral	59
3.5	Considerações Finais	62
4	MODELOS ESPACIALMENTE ESTRUTURADOS PARA O CONTROLE DA <i>GRAPHOLITA MOLESTA</i>	64
4.1	Formulação do Modelo Espacialmente Estruturado	65
4.1.1	Dispersão por Difusão Simples	67
4.1.2	Dispersão por Difusão e Taxia Quase Local	67
4.2	Estratégias para a Implementação do MIP em um Sistema com Dispersão	69
4.2.1	Estratégia I: Verificação da Densidade de Fêmeas Adultas em Todos os Sítios de Cada Bloco	69
4.2.2	Estratégia II: Verificação da Densidade de Fêmeas Adultas em Alguns Sítios de Cada Bloco	70
4.3	Simulações com Dispersão	70
4.3.1	Dispersão por Difusão Simples	71
4.3.2	Dispersão por Difusão e Taxia Quase Local	76
4.3.3	Dispersão por Difusão e MIP	79
4.3.4	Dispersão por Difusão, Taxia Quase Local e MIP	88
4.4	Considerações Finais	96
5	FEROMÔNIOS SEXUAIS SINTÉTICOS NO MANEJO DA <i>GRAPHOLITA MOLESTA</i>	98
5.1	Feromônios Sexuais e a sua Aplicação no Manejo de Pragas	98
5.2	Construção do Modelo Básico II	102

5.2.1	Adimensionalização do Modelo Básico II	103
5.2.2	Pontos de Equilíbrio	104
5.2.3	Viabilidade Biológica dos Pontos de Equilíbrio	106
5.2.4	Simulações sem Estrutura Espacial e sem Controle	107
5.3	Inclusão da Dispersão por Difusão e por Taxia Quase Local ao Modelo Básico II	109
5.3.1	Simulações com Dispersão Mista e sem Controle	110
5.4	Incorporação do Feromônio Sexual Sintético ao Modelo Básico II com Dispersão	115
5.4.1	Simulações com Dispersão Mista na Presença de Feromônio Sexual Sintético	117
5.5	Considerações Finais	123
6	APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE INTERRUÇÃO DO ACASALAMENTO NO CONTROLE DA <i>GRAPHOLITA MOLESTA</i>	124
6.1	Atrai-e-Mata	124
6.2	Confusão Sexual	130
6.3	Controle Integrado: Atrai-e-mata e Liberação Artificial de Parasitoides	134
6.4	Considerações Finais	139
	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROJETOS FUTUROS	140
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
	A CRITÉRIO DE ROUTH-HURWITZ	155

LISTA DE FIGURAS

1.1	<i>Grapholita molesta</i> adulta.	10
1.2	Danos causados pela <i>Grapholita molesta</i> em ponteiros e frutos.	11
1.3	(a) <i>Trichogramma pretiosum</i> e (b) <i>Trichogramma pretiosum</i> depositando seus ovos no ovo da <i>Grapholita molesta</i>	13
1.4	Evolução da cor de um ovo da grafolita parasitado pelo <i>Trichogramma pretiosum</i>	14
1.5	Ciclo de vida completo do <i>Trichogramma pretiosum</i>	14
1.6	<i>Macrocentrus ancylivorus</i> adulto.	15
2.1	Populações tendendo ao ponto de equilíbrio de coexistência do modelo dimensional (2.1).	29
2.2	Populações tendendo ao ponto de equilíbrio de coexistência E_4 (modelo adimensional (2.2)).	30
2.3	Trajetória do espaço de fase pentadimensional projetada no subespaço tridimensional vln	31
2.4	Trajetória do espaço de fase pentadimensional projetada no subespaço bidimensional: (a) vs (população de ovos em relação ao parasitoide de ovos) e (b) lp (lagartas em relação ao parasitoide de lagartas).	31
3.1	Armadilha Delta empregada para o monitoramento da <i>Grapholita molesta</i>	39
3.2	Evolução temporal da população de lagartas com aplicação de inseticida de amplo espectro quando: $LE = 0,2$, $m_3 = 0,95$, $m_4 = 0,8$, $m_5 = 0,9$; (a) $m_1 = m_2 = 0,6$, (b) $m_1 = m_2 = 0,7$, (c) $m_1 = m_2 = 0,8$ e (d) $m_1 = m_2 = 0,9$	43
3.3	Intervalo de tempo entre as aplicações de inseticida, (a) referente à Figura 3.2 (a) e (b) referente à Figura 3.2 (b).	43
3.4	Evolução temporal das populações de: (a) ovos, (b) mariposas adultas, (c) parasitoides de ovos e (d) parasitoides de lagartas, com aplicação de inseticida de amplo espectro, referentes à Figura 3.2 (b).	44

3.5	Evolução temporal da população de lagartas com liberação de parasitoides de ovos quando $LE = 0, 2$, $\tau = 0$ e (a) $\eta = 0, 25$; (b) $\eta = 0, 5$; (c) $\eta = 0, 75$; (d) $\eta = 1$	45
3.6	Intervalo de tempo entre as liberações de parasitoides de ovos, (a) referente à Figura 3.5 (a) e (b) referente à Figura 3.5 (b).	46
3.7	Evolução temporal da população de lagartas com liberação de parasitoides de lagartas quando: $LE = 0, 2$, $\eta = 0$ e (a) $\tau = 0, 01$; (b) $\tau = 0, 1$; (c) $\tau = 0, 2$; (d) $\tau = 0, 3$	47
3.8	Intervalo de tempo entre as liberações de parasitoides, (a) referente à Figura 3.7 (a); (b) referente à Figura 3.7 (b); (c) referente à Figura 3.7 (c); (d) referente à Figura 3.7 (d).	48
3.9	Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de parasitoides de lagartas e variando a liberação de parasitoides de ovos quando: $LE = 0, 2$, $\tau = 0, 1$ e (a) $\eta = 0, 25$; (b) $\eta = 0, 5$; (c) $\eta = 0, 75$; (d) $\eta = 1$	49
3.10	Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de parasitoides de ovos e variando a liberação de parasitoides de lagartas quando: $LE = 0, 2$, $\eta = 0, 5$ e (a) $\tau = 0, 01$; (b) $\tau = 0, 1$; (c) $\tau = 0, 2$; (d) $\tau = 0, 3$	50
3.11	Evolução temporal das populações com liberação de ambos os tipos de parasitoides: (a) ovos, (b) mariposas adultas, (c) parasitoides de ovos e (d) parasitoides de lagartas, referente à Figura 3.10 (d).	51
3.12	Evolução temporal da população de lagartas fixada a quantidade de inseticida aplicado, a liberação de parasitoides de ovos e variando a liberação de parasitoides de lagartas, quando: $LE = 0, 2$, $m_1 = 0$, $m_2 = 0, 85$, $m_3 = 0, 5$, $\eta = 1$ e (a) $\tau = 0, 5$; (b) $\tau = 1$; (c) $\tau = 1, 5$; (d) $\tau = 2$	52
3.13	Intervalo de tempo entre as aplicações do MIP, (a) referente à Figura 3.12 (a); (b) referente à Figura 3.12 (d).	53
3.14	Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de ambos os tipos de parasitoides e variando a mortalidade de mariposas adultas, quando: $LE = 0, 2$, $m_1 = 0$, $m_2 = 0, 85$, $\tau = 1$, $\eta = 1$ e (a) $m_3 = 0, 1$; (b) $m_3 = 0, 3$; (c) $m_3 = 0, 5$; (d) $m_3 = 0, 7$	54
3.15	Intervalo de tempo entre as aplicações do MIP: (a) referente à Figura 3.14 (a); (b) referente à Figura 3.14 (d).	54
3.16	Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de ambos os tipos de parasitoides e variando a mortalidade de ovos, quando $LE = 0, 2$, $m_3 = 0, 5$, $m_2 = 0, 85$, $\tau = 1$, $\eta = 1$ e (a) $m_1 = 0, 1$; (b) $m_1 = 0, 2$; (c) $m_1 = 0, 3$ e (d) $m_1 = 0, 4$	55
3.17	Intervalo de tempo entre as aplicações do MIP: (a) referente à Figura 3.16(a); (b) referente à Figura 3.16(d).	55

3.18	Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de ambos os tipos de parasitoides e variando a mortalidade de lagartas, quando: $LE = 0, 2$, $m_1 = 0, 2$, $m_3 = 0, 5$, $\tau = 1$, $\eta = 1$ e (a) $m_2 = 0, 6$; (b) $m_2 = 0, 7$; (c) $m_2 = 0, 8$; (d) $m_2 = 0, 9$	56
3.19	Intervalo de tempo entre as aplicações do MIP: (a) referente à Figura 3.18(a); (b) referente à Figura 3.18(d).	56
3.20	Evolução temporal das populações de: (a) ovos, (b) mariposas adultas, (c) parasitoides de ovos e (d) parasitoides de lagartas, quando: $LE = 0, 2$, $m_1 = 0$, $m_2 = 0, 85$, $m_3 = 0, 5$, $\eta = 0, 5$ e $\tau = 0, 3$	57
3.21	(a) Evolução temporal das densidades populacionais para o controle proporcional integral, com $\kappa = 20$; (b) Controlador proporcional integral $u(t)$ da equação (3.6).	60
3.22	(a) Evolução temporal das densidades populacionais para o controle proporcional-integral, com $\kappa = 45$; (b) Controlador proporcional integral $u(t)$ da equação (3.6).	61
3.23	(a) Evolução temporal das densidades populacionais para o controle proporcional-integral, com $\kappa = 80$; (b) Controlador proporcional integral $u(t)$ da equação (3.6).	61
4.1	Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo com difusão simples e fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.	72
4.2	Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com difusão simples e fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.	72
4.3	Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e mariposas adultas (terceira linha), movimentando-se por difusão, em $t = 50, 100, 150$ com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.	73
4.4	Distribuição espacial das mesmas populações da Figura 4.3, em $t = 200, 400, 800$	74
4.5	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), movimentando-se por difusão em $t = 50, 100, 150, 200, 400, 800$, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.	75
4.6	Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), movimentando-se por difusão com fatores de difusão descritos na Tabela 4.1, enquanto os parasitoides movimentam-se por <i>taxia</i> , em $t = 50, 100, 200$	76

4.7	Distribuição espacial das mesmas populações da Figura 4.6 em $t = 400, 800, 1000$	77
4.8	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), com dispersão orientada por taxia quase local, enquanto as lagartas e mariposas adultas movimentam-se por difusão, em $t = 50, 100, 200, 400, 800, 1000$, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.	78
4.9	Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo, movimentando-se por difusão e com aplicação do MIP, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.	79
4.10	Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com difusão simples e MIP e fatores de difusão da Figura 4.9.	80
4.11	Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), movimentando-se por difusão simples e com MIP aplicado de acordo com a estratégia I, com fatores de difusão dados na Tabela 4.1, em $t = 50, 100, 200$	81
4.12	Distribuição espacial das mesmas populações que na Figura 4.11, com dispersão por difusão e MIP, em $t = 400, 800, 1000$	82
4.13	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), movimentando-se por difusão e com o MIP aplicado de acordo com a estratégia I, em $t = 50, 100, 200, 400, 800, 1000$; os fatores de difusão são estabelecidos na Tabela 4.1.	83
4.14	Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo, dispersando-se por difusão e com o MIP aplicado de acordo com a estratégia II, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.	84
4.15	Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central, com dispersão por difusão e MIP como na Figura 4.14.	85
4.16	Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), movimentando-se por difusão e com o MIP aplicado de acordo com a estratégia II, com fatores de difusão dados na Tabela 4.1, em $t = 50, 100, 200$	85
4.17	Distribuição espacial das mesmas populações que na Figura 4.16, com os mesmos fatores de difusão, em $t = 400, 800, 1000$	86
4.18	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), dispersando-se por difusão e com o MIP aplicado de acordo com a estratégia II, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1, em $t = 50, 100, 200, 400, 800, 1000$	87

4.19	(a) Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo; (b) Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com dispersão por difusão para as populações da praga (fatores de difusão dados na Tabela 4.1); dispersão por taxia quase local para os parasitoides e MIP aplicado de acordo com a estratégia I.	88
4.20	Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), dispersando-se por difusão com fatores dados na Tabela 4.1; parasitoides dispersando-se por taxia quase local; e MIP aplicado de acordo com a estratégia I, em $t = 100, 200, 400$	89
4.21	Distribuição espacial das mesmas populações da Figura 4.20, em $t = 800, 1000, 1200$	90
4.22	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas) com dispersão orientada por taxia quase local; lagartas e mariposas adultas dispersando-se por difusão (fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1) e MIP aplicado de acordo com a estratégia I, em $t = 100, 200, 400, 800, 1000, 1200$	91
4.23	(a) Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo; (b) Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com dispersão por difusão para as populações da praga; dispersão por taxia quase local para os parasitoides e MIP aplicado de acordo com a estratégia II.	92
4.24	Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), dispersando-se por difusão (fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1); parasitoides dispersando-se por taxia quase local e MIP aplicado de acordo com a estratégia II, em $t = 100, 200, 400$	93
4.25	Distribuição espacial das mesmas populações da Figura 4.24, em $t = 800, 1000, 1500$	94
4.26	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas) com dispersão orientada por taxia quase local; lagartas e mariposas adultas dispersando-se por difusão (fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1) e MIP aplicado de acordo com a estratégia II, em $t = 100, 200, 400, 800, 1000, 1500$	95
5.1	Evolução temporal das populações tendendo ao equilíbrio de coexistência E_5 .	107
5.2	Trajectoria do espaço de fase hexadimensional projetada no subespaço tridimensional: (a) vln (ovo, lagarta e fêmea); (b) vlw (ovo, lagarta e macho).	108

5.3	Trajetória do espaço de fase hexadimensional projetada no subespaço bidimensional: (a) <i>vs</i> (ovos, parasitoide de ovos); (b) <i>lp</i> (lagartas, parasitoide de lagartas).	108
5.4	(a) Densidades populacionais totais ao longo do tempo; (b) Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com lagartas e mariposas fêmea dispersando-se por difusão (fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1), mariposas macho e parasitoides dispersando-se por taxia quase local.	111
5.5	Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), com lagartas e mariposas fêmea dispersando-se por difusão, enquanto que mariposas machos e parasitoides dispersam-se por taxia quase local, em $t = 1, 10, 70, 150, 300, 500$	112
5.6	Distribuição espacial das populações de fêmeas adultas (duas primeiras linhas) e de machos adultos (duas últimas linhas), com lagartas e mariposas fêmea dispersando-se por difusão, enquanto que mariposas macho e parasitoides dispersam-se por taxia quase local, em $t = 1, 10, 70, 150, 300, 500$	113
5.7	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), parasitoides e mariposas macho dispersando-se por taxia quase local, enquanto lagartas e mariposas fêmea dispersam-se por difusão, em $t = 1, 10, 70, 150, 300, 500$	114
5.8	Distribuição inicial de feromônio no reticulado, onde quadrados pretos significam ausência de feromônio e quadrados brancos significam presença de feromônio.	118
5.9	Variação da concentração de feromônio sexual sintético ao longo do tempo, com constante de degradação $c = 0,046$	118
5.10	Distribuição espacial do feromônio em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$, com $\xi = 0,1$ (coeficiente de difusão) e $\varphi = 0,1$ (coeficiente de convecção).	119
5.11	Evolução temporal das: (a) Densidades populacionais totais e (b) Densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$; com lagartas e fêmeas adultas dispersando-se por difusão; machos adultos e parasitoides dispersando-se por taxia quase local e o feromônio dispersando-se por difusão e convecção.	119
5.12	Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), com lagartas e fêmeas adultas dispersando-se por difusão; machos adultos e parasitoides dispersando-se por taxia quase local e o feromônio dispersando-se por difusão e convecção, para $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$	120

5.13	Distribuição espacial das populações de fêmeas adultas (duas primeiras linhas) e de machos (duas últimas linhas), com lagartas e fêmeas adultas dispersando-se por difusão; machos adultos e parasitoides dispersando-se por taxia quase local e o feromônio dispersando-se por difusão e convecção, para $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$	121
5.14	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), com lagartas e fêmeas adultas dispersando-se por difusão; machos adultos e parasitoides dispersando-se por taxia quase local e o feromônio dispersando-se por difusão e convecção, para $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$	122
6.1	Evolução temporal: (a) das densidades populacionais totais; (b) das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com a aplicação da técnica atrai-e-mata, com lagartas e fêmeas dispersando-se por difusão, machos e parasitoides dispersando-se por taxia quase local e feromônio dispersando-se por difusão e convecção.	126
6.2	Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), com a aplicação da técnica atrai-e-mata; lagartas e fêmeas adultas movimentando-se por difusão; machos adultos e parasitoides movimentando-se por taxia quase local; feromônio dispersando-se por difusão e convecção, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$	127
6.3	Distribuição espacial das populações de mariposas fêmea (duas primeiras linhas) e de mariposas macho (duas últimas linhas), com a aplicação da técnica atrai-e-mata; lagartas e fêmeas adultas movimentando-se por difusão; machos adultos e parasitoides movimentando-se por taxia quase local; feromônio dispersando-se por difusão e convecção, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$	128
6.4	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), movimentando-se por taxia quase local; lagartas e fêmeas adultas movimentando-se por difusão; machos adultos movimentando-se por taxia quase local; feromônio dispersando-se por difusão e convecção, com a aplicação da técnica atrai-e-mata, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$	129
6.5	Evolução temporal das: (a) densidades populacionais totais; (b) densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com a aplicação da técnica de confusão sexual, e movimentação das populações como na Figura 6.1.	131
6.6	Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$, com a aplicação da confusão sexual e movimentação como descrita nas figuras anteriores.	132

6.7	Distribuição espacial das populações de fêmeas adultas (duas primeiras linhas) e de machos adultos (duas últimas linhas), em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$, com as populações e o feromônio dispersando-se como descrito nas figuras anteriores.	133
6.8	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$, com as populações e o feromônio dispersando-se como descrito nas figuras anteriores.	134
6.9	Evolução temporal das densidades populacionais totais (a) e das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$ (b), com a aplicação do MIP utilizando a técnica atrai-e-mata e liberação artificial de ambos os parasitoides, $\eta = 1, \tau = 1$	135
6.10	Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), com a aplicação do manejo integrado incluindo a técnica atrai-e-mata juntamente com a liberação artificial de ambos os parasitoides, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$	136
6.11	Distribuição espacial das populações de fêmeas adultas (duas primeiras linhas) e de machos adultos (duas últimas linhas), com a aplicação do manejo integrado incluindo a técnica atrai-e-mata e a liberação artificial de parasitoides, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$	137
6.12	Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), com manejo integrado incluindo a técnica atrai-e-mata e a liberação artificial de ambos os parasitoides, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$	138

LISTA DE TABELAS

2.1	Parâmetros dimensionais do modelo básico I	29
2.2	Parâmetros adimensionais do modelo básico I	29
2.3	Condições iniciais	30
4.1	Fatores de difusão	71

RESUMO

A *Grapholita molesta* (mariposa oriental) é a principal praga associada à cultura do pessegueiro na Região Sul do Brasil, provocando perdas da ordem de 3% a 5%. Diante disso, desenvolvemos um modelo matemático para descrever a evolução temporal de três fases do ciclo de vida da mariposa (ovo, lagarta e fêmea adulta) e de dois inimigos naturais (parasitoides). Determinamos os pontos de equilíbrio do modelo, viabilidade biológica e suas respectivas estabilidades locais. Os parâmetros para o modelo foram estabelecidos de acordo com dados experimentais encontrados na literatura. Em seguida, desenvolvemos três modelos para o controle da mariposa oriental, sendo um deles adotando o Manejo Integrado de Pragas (MIP), incluindo controles biológico e químico, a fim de manter a praga abaixo do Limiar Econômico (LE). O controle biológico foi adotado através da liberação de parasitoides de ovos *Trichogramma pretiosum* e de parasitoides de lagartas *Macrocentrus ancyliivorus*; o controle químico foi adotado através da utilização de inseticida seletivo. Acrescentamos ao modelo uma estrutura espacial bidimensional discreta, adotando diferentes tipos de movimentação (difusão e taxia quase local). Foram adotadas duas estratégias distintas para a implementação do MIP com estrutura espacial. Complementarmente, acrescentamos ao controle uma técnica conhecida como interrupção do acasalamento caracterizada pela liberação de grandes quantidades de feromônio sexual sintético que imita o odor que as fêmeas liberam para atrair os machos para o acasalamento, para confundir os machos e assim diminuir a reprodução da espécie. Aplicamos a técnica de interrupção do acasalamento de duas maneiras distintas: atraí-e-mata e confusão sexual. Ambas foram eficazes para o controle da mariposa oriental. Finalmente, acoplamos a estratégia do MIP através da liberação de parasitoides e liberação de feromônio sexual sintético. Resultados comprovando a eficácia dos modelos desenvolvidos são visualizados através de gráficos das soluções numéricas.

ABSTRACT

The oriental fruit moth *Grapholita molesta* is one of the main pests associated with peach orchards in Southern Brazil, is responsible for loss of 3% to 5% in its production. For this reason, we developed a mathematical model for the time series of three life stages of the oriental fruit moth (egg, larva, adult females) and two natural enemies (parasitoids). We determine the equilibria points of the model, biological viability and their local stability. The model parameters were established in accordance with experimental data in the literature. Then we developed three models for control of oriental fruit moth, one of them adopting Integrated Pest Management (IPM), including biological and chemical controls in order to keep the pest below the Economic Threshold (ET). We adopt biological control through the release of egg parasitoid *Trichogramma pretiosum* and larva parasitoid *Macrocentrus ancylivorus*; the quimical control were adopt through the use of selective insecticide. We add to model a discrete two-dimensional spatial structure, adopting different types of movement (diffusion and non-local taxis). Two different strategies for the implementation of the IPM with spatial structure were taken. In addition, we added to control a technique known as mating disruption characterized by the release of large amounts of synthetic sex pheromone that mimics the odor that females release to attract males for mating, to confuse males and thus decrease the reproduction of the species. We apply the mating disruption technique in two distinct ways: attract and kill and sexual confusion. Both were effective to control oriental fruit moth. Finally, we engage the IPM strategy by releasing parasitoids and release synthetic sex pheromone. Results proving the efficacy of the developed models are visualized through graphs of numerical solutions.

INTRODUÇÃO

A modelagem matemática é uma importante ferramenta amplamente utilizada no estudo de problemas agrícolas, principalmente na ocorrência de insetos-praga, que são os maiores causadores de danos em agroecossistemas (Rafikov et al., 2008; Rodrigues et al., 2013). Em particular, o uso de ferramentas matemáticas na busca da estratégia que garanta a maior efetividade no controle de insetos-praga em agroecossistemas tem sido objeto de inúmeros estudos nas últimas décadas (Tang and Cheke, 2005; Bhattacharyya and Bhattacharya, 2006; Bhattacharyya and Bhattacharya, 2007; Tang and Cheke, 2008; Rodrigues et al., 2013).

É importante ressaltar que o conceito de inseto-praga é um conceito essencialmente econômico: está relacionado com o tamanho da população de insetos que causa algum tipo de prejuízo, cuja eliminação compense sob o ponto de vista econômico (Nakano et al., 1981). Outra definição é apresentada por Norris et al. (2003): Praga é toda população de organismos no ambiente da cultura, que causam prejuízo à cultura e são capazes de reduzir sua produção (em rendimento ou em qualidade).

O controle de insetos-praga vem sendo feito através de inseticidas químicos desde 4000 anos atrás (Tracker, 2002), quando frequentemente eram utilizados indiscriminadamente, sem levar em consideração a preservação do ecossistema. Além disso, tem sido observado, nas últimas décadas, um número muito grande de insetos resistentes a esse tipo de controle. Essa resistência tem sido registrada em mais de 500 espécies de insetos no mundo, de modo que o uso de inseticidas químicos tem resultado em problemas agudos e crônicos de saúde, resíduos em alimentos como frutas e verduras, poluição ambiental e altos custos de produção (Bhattacharyya and Bhattacharya, 2006). Este impacto negativo no meio ambiente, implica em um decréscimo nas populações de insetos benéficos e consequentemente na biodiversidade (Nerio et al., 2010). Estes problemas são mais severos em países em desenvolvimento, onde a regulamentação não é bem fiscalizada e os produtores não tem informações e nem treinamento apropriados para fazer um uso consciente destes inseticidas (Bhattacharyya and Bhattacharya, 2006).

Uma alternativa eficiente para diminuir o uso de inseticidas químicos contra insetos-praga de diversas culturas, é a adoção do controle biológico (Bhattacharyya and Bhattacharya, 2007). Este é relacionado com os inimigos naturais, que desempenham um papel importante na limitação de populações de pragas. Há três categorias de inimigos naturais

de insetos praga: predadores, parasitoides e patógenos (Rafikov et al., 2008).

O controle biológico pode ser descrito de duas maneiras: 1) controle biológico aplicado pelo homem através da manipulação e liberação de inimigos naturais; 2) o controle biológico natural (entre espécies já existentes no ambiente), que ocorre sem a intervenção humana (Van den Bosch et al., 1982). O Brasil tem o mais amplo programa de controle biológico do mundo, para o controle da broca da cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*), com a utilização das vespas *Cotesia flavipes* e *Trichogramma galloi*. Contudo, a utilização de inseticidas ainda é considerada indispensável no controle da maioria dos insetos-praga.

Diante de todos os problemas, causados pelo uso único e exclusivo de inseticidas químicos no controle de insetos praga, foi introduzido no final da década de 1950 (Stern, 1973) o conceito de Manejo Integrado de Pragas (MIP), o qual foi mais praticado nas décadas de 1970 e 1980 (Van Lenteren, 1995, 2000; Van Lenteren and Woets, 1988). O MIP é uma estratégia de controle a longo prazo que consiste na utilização simultânea de diferentes técnicas de supressão populacional, tais como: controle biológico, aplicação de inseticidas, rotação de culturas, uso de variedades resistentes a pragas, dentre outras, de modo a manter os insetos em uma condição de “não praga”, de forma econômica e harmônica com o ambiente (Crocomo 1990; Norris et al., 2003; Tang and Cheke, 2005; Tang et al., 2005; Tang and Cheke, 2008).

O que se deseja com a adoção do MIP não é erradicar completamente a população de pragas, mas sim reduzi-la a níveis toleráveis, abaixo de um Limiar Econômico (LE). O LE é definido como aquele número de insetos-praga em uma cultura, que quando atingido, determina que devam ser adotadas ações de controle para prevenir que o Nível de Dano (ND) seja atingido ou excedido, onde ND é a menor densidade populacional que causa danos econômicos. Desta forma, as ações de controle devem ser aplicadas toda vez que a densidade de pragas atingir ou ultrapassar o LE (Norris et al., 2003; Tang and Cheke, 2005; Tang et al., 2005; Tang and Cheke, 2008). O LE é um valor difícil de ser deduzido e requer a estimativa e a previsão de diferentes parâmetros; assim, a maioria dos valores estimados para o LE, são pouco precisos, devido por exemplo, às incertezas nas taxas de crescimento das populações (Metcalf and Luckman, 1975; Tang et al., 2008).

O MIP tem se mostrado mais efetivo que os métodos clássicos, como o controle biológico ou o controle químico aplicados isoladamente, tanto experimentalmente (Van Lenteren, 1987, 1995), quanto teoricamente (Xiao and Van Den Bosch, 2003), e é responsável pela redução na utilização de inseticidas químicos nas culturas.

No Brasil, a cultura do pessegueiro ocupa uma área superior a 20 mil ha, com uma produção anual de aproximadamente 220.700 toneladas. O Rio Grande do Sul é o maior produtor, sendo responsável por 60% da produção nacional (Castilhos et al., 2011). Segundo dados do IBGE (2011), analisados por Castilhos et al. (2011), o Estado apresenta uma baixa produtividade média quando comparado a outros estados produtores. Um dos principais fatores que comprometem a produtividade da cultura é a ocorrência de

insetos-praga, onde destacamos as pragas primárias, como a mariposa oriental e a mosca-das-frutas sul-americana, e as pragas secundárias (ocorrem em baixas densidades e com menos frequência que as pragas primárias, geralmente sem a necessidade de controle), como pulgões, cochonilhas e ácaros (Botton et al., 2005a; Botton et al., 2011).

A *Grapholita molesta* (Busck, 1916) (Lepidoptera: Tortricidae), também denominada mariposa oriental, broca dos ponteiros ou grafolita, é uma das principais pragas associadas à cultura do pessegueiro na região Sul do Brasil, provocando perdas na produção, da ordem de 3% a 5%, principalmente nas cultivares de ciclo tardio (Botton et al., 2011). Nativa do continente asiático, a mariposa oriental foi introduzida no Brasil em 1929, sendo detectada primeiramente no Estado do Rio Grande do Sul, de onde se dispersou para outras regiões do país (Hickel e Ducroquet, 1998; Kovaleski e Ribeiro, 2003). Atualmente, encontra-se amplamente dispersa pelo país, causando danos a cultivos comerciais de pessegueiros e macieiras nas diversas regiões produtoras.

Motivados pela sua importância como praga ligada à cultura do pessegueiro no Brasil, nosso objetivo neste trabalho é estudar e desenvolver modelos matemáticos aplicados ao controle da *Grapholita molesta*, adotando técnicas do MIP. Para isso, serão definidos os diversos parâmetros envolvidos no modelo, os quais serão validados através de dados experimentais obtidos na literatura.

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos ao longo da última década (Tang, 2004; Tang and Cheke, 2005; Bhattacharyya and Bhattacharya, 2006; Bhattacharyya and Bhattacharya, 2007; Tang and Cheke, 2008; Rafikov et al., 2008; Tang et al., 2008), explorando a aplicação de técnicas do MIP ou de apenas uma técnica de controle em modelos clássicos de interações entre populações, como predador-presa e parasitóide-hospedeiro, dentre outros. Para construirmos a modelagem matemática do controle de pragas, e considerando que o inseto-praga faz parte de uma cadeia trófica, devemos partir da modelagem matemática desse ecossistema ainda sem qualquer intervenção humana.

No nosso modelo, descrevemos a interação entre três estágios de desenvolvimento da mariposa oriental (ovo, lagarta e adulto), juntamente com seus inimigos naturais: o parasitóide de ovos *Trichogramma pretiosum* e o parasitóide de lagartas *Macrocentrus ancylivorus*. Ambas as espécies de parasitoides têm sido encontradas naturalmente nos pomares de pêssegos (Botton et al., 2011; Rodrigues et al., 2011), justificando a incorporação das mesmas no modelo matemático desenvolvido.

O controle da mariposa oriental vem sendo realizado principalmente por meio da aplicação de inseticidas químicos de amplo espectro (fosfarados e peritroides), que atingirão não apenas os insetos-praga mas também seus inimigos naturais, muitas vezes independente das densidades populacionais da mariposa (Arioli et al., 2004; Botton et al., 2011). Este tipo de manejo está se tornando inviável, em razão da crescente exigência dos consumidores por frutas de melhor qualidade, obtidas de forma que o meio ambiente e a saúde dos produtores seja preservada (Fachinello et al., 2009; Härter et al., 2010; Botton

et al., 2011). Por essas razões, incorporamos ao modelo o MIP, incluindo o controle químico através da aplicação de inseticida seletivo e o controle biológico, através da liberação de parasitoides de ovos e de parasitoides de lagartas, como será detalhado no trabalho. Também desenvolvemos modelos explorando a aplicação de apenas uma técnica de controle (inseticidas de amplo espectro ou controle biológico), visando a comparação com as técnicas integradas.

Quando tratamos de modelagem matemática em sistemas ecológicos, é importante considerarmos juntamente com a evolução temporal das populações envolvidas, a heterogeneidade espacial, incluindo a movimentação das populações no ambiente considerado. É bem sabido, por exemplo, que no modelo discreto parasitoide-hospedeiro de Nicholson-Bailey, o equilíbrio de coexistência das espécies só é estável se considerarmos heterogeneidade espacial (modelo de Hassell), apresentando neste caso diferentes padrões espaço-temporais dependendo das taxas de dispersão de cada uma das populações (Hassell et al., 1991).

Adicionalmente, a inclusão de uma estrutura espacial ao modelo matemático tem se mostrado de fundamental importância, para o sucesso das estratégias do MIP, pois a migração entre populações locais pode influenciar o valor do LE (Hughes, 1996; Ferguson et al., 2003). Dependendo das taxas de dispersão dos parasitoides e dos hospedeiros, a dispersão pode ser favorável ou prejudicial ao controle de pragas. Além disso, a heterogeneidade espacial pode estar presente na distribuição espacial da população de pragas, sugerindo assim que o seu controle seja gerenciado de forma heterogênea, dependendo da localização dentro do hábitat.

Incorporamos uma estrutura espacial bidimensional discreta ao modelo matemático desenvolvido para o controle da *Grapholita molesta*, e exceto para os ovos, consideramos dois tipos de movimentação para as demais populações: 1) dispersão aleatória por difusão simples para lagartas, fêmeas adultas e parasitoides e, 2) dispersão por difusão simples para as lagartas e fêmeas adultas, mas dispersão orientada para ambos os parasitoides.

Ao incluirmos a estrutura espacial, podemos simular o uso de uma técnica considerada promissora para o controle da mariposa oriental, chamada de interrupção sexual ou interrupção do acasalamento (Botton et al., 2005a; Grasseli, 2010; Altafini et al., 2010; Härter et al., 2010; Arioli et al., 2013). Ela é feita através da utilização de feromônios sexuais sintéticos responsáveis por confundir os machos da mariposa oriental, diminuindo os acasalamentos ou até mesmo reduzindo a população de machos e conseqüentemente a reprodução da espécie. Esta técnica já é utilizada em aproximadamente 30% dos pomares de macieiras no Brasil; para a cultura do pessegueiro, ela ainda está sendo realizada em caráter experimental, mas abriu novas perspectivas em substituição ao controle químico (Botton et al., 2011; Pastori et al., 2012; Arioli et al., 2013; Arioli et al., 2014).

Para a aplicação da técnica de interrupção do acasalamento, incorporamos ao modelo inicial uma equação para a taxa de variação da população de machos adultos da

mariposa oriental, bem como uma equação para a taxa de variação na concentração do feromônio sexual sintético. Isto se fez necessário pois os machos é que são atraídos pelo feromônio sexual sintético que imita o odor liberado pelas fêmeas para atraí-los para o acasalamento. A necessidade da estrutura espacial deve-se ao modo de aplicação desta técnica nos pomares, sendo que o produto é afixado diretamente nos galhos do pessegueiro. Maiores detalhes serão especificados no decorrer do trabalho.

O diferencial do nosso trabalho, além da consideração do controle biológico natural da *Grapholita molesta* com parâmetros experimentais, usando duas espécies de parasitoides e da incorporação de uma estrutura espacial discreta ao modelo (sem e com o MIP), está no uso de feromônios sexuais sintéticos para diminuir a reprodução e conseqüentemente a densidade populacional do inseto. A seguir descrevemos a estruturação do trabalho, por capítulos.

No Capítulo 1, abordamos os conceitos básicos que fundamentam a escolha do problema abordado, dentre eles: produção de pêssegos no Brasil; a mariposa oriental e sua bioecologia; controle biológico através de parasitoides. Para finalizar o capítulo, formulamos um modelo básico de equações diferenciais ordinárias que descreve a evolução temporal da mariposa oriental (considerando três estágios de desenvolvimento) e de seus inimigos naturais (parasitoides).

No Capítulo 2, adimensionalizamos o modelo básico e a partir do modelo adimensional calculamos os seus pontos de equilíbrio e a viabilidade biológica de cada um. A estabilidade local de todos os pontos de equilíbrio é obtida utilizando o Critério de Routh-Hurwitz. Estabelecemos os valores para os parâmetros do modelo através de dados experimentais presentes na literatura e realizamos simulações numéricas para a verificação do comportamento das populações ainda sem a adição de medidas de controle.

No Capítulo 3, desenvolvemos modelos adotando apenas uma técnica de controle (liberação de parasitoides ou aplicação de inseticida de amplo espectro). A seguir, ainda neste capítulo, incluímos o MIP, combinando controle biológico (liberação de parasitoides) e controle químico (aplicação de inseticida seletivo). Analisamos a eficiência das diversas técnicas na redução da população da mariposa oriental. Aplicamos ao modelo original (sem adimensionalização) um controlador proporcional-integral, de modo a manter a população de mariposas adultas num número desejado. Avaliamos os resultados obtidos com todos os modelos apresentados e comparamos os resultados.

No Capítulo 4, consideramos a estrutura espacial através de uma rede discreta bidimensional para o modelo proposto, abordando dois tipos de movimentação para as populações que se dispersam. Além disso, analisamos a eficiência da estratégia do MIP para o modelo com estrutura espacial, aplicando tomadas de decisão (aplicar ou não o controle) alternativas.

No Capítulo 5, apresentamos a técnica de controle conhecida como interrupção do acasalamento, feita com a utilização de feromônios sexuais sintéticos, seja apenas con-

fundindo, seja reduzindo a população de machos. Desenvolvemos e simulamos um novo modelo básico considerando separadamente populações de mariposas macho e de mariposas fêmea, e também uma equação para a variação na concentração de feromônio sintético, para posterior aplicação de técnicas para a interrupção do acasalamento.

No Capítulo 6, aplicamos as técnicas de confusão sexual e atrai-e-mata visando o controle da mariposa oriental, através da interrupção do acasalamento. Nestas simulações, adotamos uma configuração espacial não uniforme para a distribuição dos liberadores de feromônio no pomar. Por fim, construímos e simulamos um MIP, composto pela técnica atrai-e-mata, juntamente com a liberação de parasitoides, sem a aplicação de inseticida.

O Capítulo Considerações Finais e Projetos Futuros é dedicado à explanação dos resultados obtidos, bem como às considerações sobre trabalhos futuros.

Capítulo 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, abordaremos as principais características que tornam a *Grapholita molesta* ou mariposa oriental, a principal praga da cultura do pessegueiro no Brasil. Além disso, descreveremos dois parasitoides que podem ser utilizados para o seu controle e construiremos um modelo matemático básico para a dinâmica vital da mariposa oriental e dos parasitoides em questão.

1.1 Produção de Pêssegos no Brasil

A cultura do pêssego está presente no Brasil há mais de 470 anos, sendo que sua produção se concentra nos Estados das Regiões Sul e Sudeste, devido principalmente a fatores climáticos que favorecem a cultura (Raseira e Madail, 2008). A produção mundial de pêssegos está crescendo mais de 20% a cada década. A China é a maior produtora mundial, com cerca de 27% da oferta, seguida pela Itália e Estados Unidos. O Brasil ocupa a 13ª posição na produção mundial. O Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional com cerca de 54% da produção, seguido por São Paulo 17% e Minas Gerais 11%.

No Rio Grande do Sul, segundo dados da ASCAR/EMATER-RS (2010), foram produzidas 129.515 toneladas de pêssego, cultivadas por 4.838 produtores rurais, na safra 2008/2009. A Região Sul do RS é a maior produtora de pêssegos para a indústria, sendo o município de Pelotas o maior produtor; a Região da Serra Gaúcha é a maior produtora de pêssegos “in natura”, sendo Caxias do Sul o maior produtor. Toda a produção nacional se destina ao mercado interno, e mesmo assim não supre o consumo. O Brasil é um grande importador, principalmente do Chile, que é um tradicional exportador da América Latina.

A Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA, 2003) indica que a cultura do pêssego é de alta rentabilidade, sendo uma boa opção para a agricultura familiar e também para os produtores empresariais, e que existe um grande potencial de consumo interno, verificando-se um aumento na demanda nos últimos anos. Consideramos de grande relevância buscar a melhoria no controle das pragas que atingem o pessegueiro, aumentando com isso a produção e rentabilidade dessa cultura no país, que tem se mos-

trado de grande importância econômica.

1.2 *Grapholita molesta* (Mariposa Oriental): Aspectos Gerais

A *Grapholita molesta* (Busck, 1916) (Lepidoptera: Tortricidae), mariposa oriental, broca dos ponteiros ou grafolita é uma das principais pragas associadas à cultura do pessegueiro na região Sul do Brasil, provocando perdas na produção da ordem de 3% a 5%, principalmente nas cultivares de ciclo tardio. Além dos danos diretos, a perfuração da casca dos frutos pelas lagartas ocasiona o desenvolvimento da podridão parda, causada por um fungo. Assim, ocorrem perdas adicionais durante o armazenamento dos frutos destinados ao consumo “in natura” (Botton et al., 2011).

1.2.1 Origem e Distribuição Geográfica

Acredita-se que a mariposa oriental seja oriunda da Ásia, sendo originária do Japão ou norte da China (González, 1986). No início do século XX, ela já era considerada como praga de importância econômica no Japão e na Austrália (Reichart and Bodor, 1972). Na América do Sul, ela foi registrada pela primeira vez no Brasil em 1929 (Silva et al., 1962), no Estado do Rio Grande do Sul, de onde avançou para o Uruguai em 1932, Argentina em 1936 e Chile em 1971 (González, 1986).

A ocorrência da grafolita está associada ao cultivo de frutíferas da família Rosaceae (rosáceas), ou seja, dos frutos com caroço como ameixeira, amendoeira, cerejeira, damasqueiro, macieira, marmeleiro, nespereira, nectarineira, pereira e pessegueiro (Barbosa e Raseira, 1999; Monteiro et al., 2004). Como essas frutíferas são amplamente cultivadas na Região Centro-Sul do Brasil, os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul são os mais afetados pela grafolita (Barbosa e Raseira, 1999).

1.2.2 Descrição e Bioecologia

A mariposa oriental possui metamorfose completa, passando pelas fases de ovo, lagarta, pupa e adulta. A duração de cada fase depende da temperatura e do alimento consumido na fase de lagarta (Netto Silva et al., 2010). A seguir uma breve descrição de cada fase de vida da mariposa.

- **Ovos:** Os ovos são muito pequenos, medindo aproximadamente 0,7mm de diâmetro, possuindo formato redondo-ovalado e coloração branca ou branco-acinzentada, passando à coloração escura com o desenvolvimento embrionário. Eles são depositados na face inferior das folhas novas, de brotações próximas às axilas, nos ramos

novos e também nos frutos. A fase de ovo tem duração de 2,9 a 5,1 dias (Botton et al., 2011).

- **Lagartas:** As lagartas possuem coloração branco-acinzentada e cabeça preta, são muito ativas, caminham pela planta à procura de brotações (ponteiros) ou frutos, onde, ao penetrar, iniciam a construção de galerias. As lagartas podem medir até $14mm$ e adquirem a coloração rosada quando bem desenvolvidas. Na região Sul do Brasil, durante o inverno, as lagartas entram em diapausa induzida pelo encurtamento dos dias e os primeiros adultos surgem em meados de agosto, coincidindo com a brotação das cultivares precoces de pessegueiros (Arioli et al., 2005). O período larval dura de 11 a 21,5 dias (Botton et al., 2011).
- **Pupas:** Ao fim da fase larval, a lagarta faz um orifício para a sua saída dos ponteiros ou frutos e com um fio de seda atinge o local onde passará à fase de pupa. As crisálidas são frágeis e ficam abrigadas em casulos de seda, tecidos pelas lagartas em fendas da casca ou ramos, nas axilas dos ramos ou em detritos no solo. Apresentam coloração amarelo-acastanhado e medem aproximadamente $6mm$ de comprimento. O período de pré-pupa dura de 3 a 7,9 dias e o período de pupa dura de 6,8 a 12,3 dias (Botton et al., 2011).
- **Adultos:** Em sua forma adulta a grafolita é um microlepidóptero de cor cinza-escura com manchas claras nas asas, de 10 a $15mm$ de envergadura e de 6 a $7mm$ de comprimento, como ilustrada na Figura 1.1 (a) ¹ e (b) ². Possui atividades de migração, alimentação, acasalamento e postura entre os horários das 17 às 22 horas (Salles, 1991). Cada fêmea adulta pode colocar de 30 a 333 ovos, dependendo da temperatura e alimentação da fase de lagarta, com pico de oviposição de 4 a 9 dias após a emergência (González, 1986). Por exemplo, para insetos criados em ponteiros de pessegueiros a uma temperatura de $25^{\circ}C$, as fêmeas colocam 144 ovos (Botton et al., 2011). A fase adulta tem duração de 13,9 a 23,7 dias.

As primeiras mariposas surgem na primavera oriundas de lagartas que passaram o inverno em diapausa. Na região da Serra Gaúcha são observados quatro períodos distintos de voo, de agosto a janeiro (Botton et al., 2011), a saber: o primeiro pico ocorre em agosto, oriundo das lagartas que estavam em diapausa; o segundo ocorre na segunda quinzena de outubro; o terceiro na primeira semana de dezembro e o quarto na primeira semana de janeiro. A distribuição destes picos pode depender da variação de temperatura anual (Botton et al., 2001; Arioli et al., 2005). Na Depressão Central do RS, por exemplo, a

¹<http://www.padil.gov.au/pests-and-diseases/pest/main/141542/35578> acessado em 21/04/2015 às 13:20.

²<http://www.discoverlife.org/mp/20q?search=Grapholita+molesta&mobile=close&flags=glean>: acessado em 21/04/2015 às 14:21.

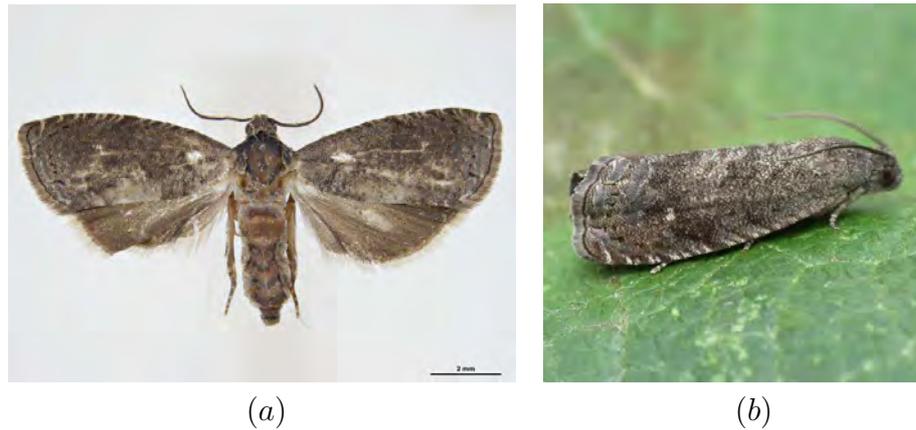


Figura 1.1: *Grapholita molesta* adulta.

grafolita pode chegar a dez ciclos e à medida que aumenta a altitude e as temperaturas tornam-se mais amenas, não passa de seis ciclos por ano (Afonso et al., 2008).

Segundo Grasseli (2009), a escolha por áreas com temperaturas anuais mais baixas para o cultivo do pessegueiro pode diminuir o número de intervenções necessárias para o controle da praga. Se as temperaturas forem altas, o custo do controle do inseto pode tornar-se elevado, podendo acarretar em maiores danos, tanto em ramos, quanto em frutos.

1.2.3 Danos e Prejuízos

Os danos causados pela grafolita no pessegueiro são observados tanto nas brotações (ponteiros) quanto nos frutos, e são resultantes da alimentação das lagartas (Crocomo, 1990), como ilustrado na Figura 1.2, obtida no site da Embrapa ³. A intensidade do ataque depende da geração da praga e do período de desenvolvimento da cultura. O dano nos ramos é significativo em pomares jovens e viveiros onde as plantas se encontram em formação. Nos primeiros dias de infestação, não se observam sintomas de ataque aos ponteiros, os quais são vistos a partir de seu murchamento e posterior secamento. Pode-se observar exsudato de goma no local de penetração. Durante a noite as lagartas deixam as galerias podendo se alimentar de três a sete ponteiros, normalmente próximos entre si (Botton et al., 2005a; Salles, 1991).

O ataque aos frutos é considerado o mais prejudicial, e pode ser causado por lagartas desenvolvidas, oriundas das brotações e que migram para os frutos, ou por lagartas recém-eclodidas. A penetração ocorre principalmente na área da base do fruto, próximo à cavidade peduncular, formando uma galeria em direção ao centro, em torno do caroço, de 2cm a 10cm de comprimento. As lagartas liberam excrementos juntamente com uma goma exsudada, resultado de sua alimentação, tornando o fruto imprestável para o comércio (Botton et al., 2005a; Botton et al., 2011). Normalmente observa-se uma só lagarta

³<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pessego/PessegoMesaRegiaoSerraGaucha/pragas.htm> acessado em 21/04/2015 às 13:20.



Figura 1.2: Danos causados pela *Grapholita molesta* em ponteiros e frutos.

por fruto e estando no interior do fruto, a lagarta só o abandonará quando completar o seu desenvolvimento (Netto Silva et al., 2010).

Os excrementos deixados pelas lagartas são uma característica indicativa do ataque da lagarta da grafolita em pêssegos, o que não ocorre com relação ao dano causado pela larva da mosca-da-fruta. As plantas jovens sofrem os maiores danos devido ao ataque da mariposa oriental nos ponteiros, prejudicando o seu desenvolvimento (Botton et al., 2011). Já no caso dos frutos, o maior dano ocorre a partir de 2cm de diâmetro, após o endurecimento do caroço (Hickel et al., 2007).

Em pomares adultos, as cultivares tardias são as que tem os frutos mais prejudicados pois são mais atacadas em relação às cultivares dos ciclos precoce e médio. Sobre estas incide um maior número de gerações e, conseqüentemente, populações mais elevadas da grafolita. No Rio Grande do Sul a grafolita tem provocado perdas de 3% a 5% dos frutos nas cultivares tardias e de cerca de 1% nas cultivares precoces (Botton et al., 2011).

Os danos indiretos provocados pela *Grapholita molesta* ocorrem devido à penetração do fungo *Monilinia fruticola*, que utiliza como porta de entrada os orifícios deixados nos frutos, devido ao ataque da grafolita. Esse fungo causa perdas no período pós-colheita (Botton et al., 2001).

1.3 Controle Biológico: Uso de Parasitoides

Existem várias técnicas de controle as quais serão apresentadas no Capítulo 3. Nesta seção, apresentaremos apenas o controle biológico feito através do uso de parasitoides.

O controle biológico consiste no uso de um organismo para controlar a população de outro organismo. O mais comum é introduzir um inimigo natural exótico nos agrossistemas afetados por uma praga (Junior, 2011). Existem diversos agentes de controle biológico, como os vírus entomopatogênicos, as bactérias entomopatogênicas, os fungos entomopatogênicos, os protozoários entomopatogênicos, predadores, parasitoides, entre outros. Estamos interessados especificamente na utilização de parasitoides como agentes de controle biológico da *Grapholita molesta*.

Os parasitoides são insetos que durante uma fase de sua vida parasitam outros

insetos, conhecidos como seus hospedeiros. O parasitoide se instala no hospedeiro em busca de abrigo e alimento, sem estabelecer uma relação permanente com o mesmo. Eles ficam aderidos externamente ou no interior de seu hospedeiro, levando-o à morte. Esta razão é o que difere o parasitoidismo do parasitismo, já que o último não provoca a morte do hospedeiro (Junior, 2011).

Por ocuparem um nível trófico superior, apresentarem uma grande diversidade de adaptações fisiológicas e comportamentais, os parasitoides atuam de forma determinante nas densidades populacionais de seus hospedeiros (Mathews, 1974). Por serem inimigos naturais de pragas agrícolas, os parasitoides são utilizados em programas de controle biológico (Parra et al., 2002). Estima-se que cerca de 10% das espécies de insetos sejam parasitoides. Dentre eles, destacam-se muitas vespas, alguns coleópteros e dípteros (Borror et al., 1992).

Os parasitoides são divididos em duas categorias, dependendo de como levam seu hospedeiro à morte: idiobiontes e coinobiontes. Os idiobiontes impedem qualquer tipo de desenvolvimento de seus hospedeiros. Normalmente são parasitoides das fases imóveis dos hospedeiros, como ovos e pupas. Os coinobiontes permitem que seus hospedeiros sobrevivam até uma determinada fase de sua vida, coincidindo, muitas vezes, com a pupação ou emergência dos adultos (Andrade, 2007).

Muitos programas de controle biológico no mundo usam parasitoides como sua principal ferramenta para a redução das populações de insetos-praga. O Brasil tem o mais amplo programa de controle biológico do mundo para o controle da broca da cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*) com a utilização das vespas *Cotesia flavipes* e *Trichogramma galloi* (Botton et al., 2011). Existem mais de 130 espécies de parasitoides que podem ser usadas para o controle da mariposa oriental. Entretanto, o parasitismo desempenha um papel muito pequeno no controle da mariposa, principalmente em pomares comerciais, devido à sensibilidade dos parasitoides aos inseticidas comumente utilizados (Seaman and Riedl, 1988).

Como visto, existem diversas espécies de parasitoides, mas estamos interessados em duas em especial, que são os principais inimigos naturais da *Grapholita molesta* (Botton et al., 2011; Rodrigues et al., 2011): o *Trichogramma pretiosum*, que é um parasitoide de ovos e o *Macrocentrus ancyliivorus*, que é um parasitoide de lagartas.

1.3.1 *Trichogramma pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae)

O *Trichogramma pretiosum* (Riley, 1879) (Hymenoptera: Trichogrammatidae) é um parasitoide de ovos idiobionte que interrompe o ciclo de vida do hospedeiro (grafolita) antes da emergência das lagartas, sendo assim altamente recomendável para o uso no controle da grafolita na cultura do pessegueiro. Além disso, estudos realizados por Rodrigues et al.,

(2011), comprovaram que os ovos da *Grapholita molesta* são hospedeiros adequados para o parasitoide. As espécies do gênero *Trichogramma* são dentre os inimigos naturais os mais estudados e utilizados em programas de controle biológico, devido à sua eficiência, ampla distribuição geográfica e facilidade de criação em laboratório (Magalhães et al., 2012).

O *Trichogramma pretiosum* é uma microvespa, com dimensões inferiores a um milímetro, que controla diversas pragas de importância econômica, dentre elas a mariposa oriental conforme ilustrado na Figura 1.3 (a) ⁴. Ao localizar a praga na cultura, as vespas fêmeas depositam seus ovos dentro do ovo da praga como podemos observar na Figura 1.3 (b) ⁵. Dentro de algumas horas nasce uma larva do parasitoide que se alimenta do conteúdo do ovo do hospedeiro, que começa a escurecer até tornar-se preto como ilustrado na Figura 1.4 ⁶. Após o parasitoidismo, a praga tem seu desenvolvimento interrompido gradualmente e em poucos dias ocorre o nascimento de um novo parasitoide (vespa adulta), cujo ciclo de vida completo está ilustrado na Figura 1.5 ⁷. Essa vespa se multiplicará na cultura utilizando os ovos da praga para a sua reprodução. Todo o ciclo de vida do parasitoide ocorre no interior do ovo da praga e dura cerca de dez dias.



Figura 1.3: (a) *Trichogramma pretiosum* e (b) *Trichogramma pretiosum* depositando seus ovos no ovo da *Grapholita molesta*.

Além das frutíferas como o pessegueiro, o *Trichogramma pretiosum* também pode ser utilizado no controle de pragas de outras culturas como: tomate, pimentão, berinjela, morango, rosas, milho, algodão, entre outros. Os parasitoides são facilmente criados em larga escala em laboratórios e armazenados em cartelas para a liberação nas culturas. Cada cartela contém cerca de cem mil vespinhas prontas para nascer quando levadas ao campo (Magalhães et al., 2012). A qualidade e o desempenho do *Trichogramma pretiosum* podem ser influenciados por fatores como o hospedeiro utilizado para a criação em laboratório, a temperatura, o hospedeiro em campo e sua área de exploração, o vento e inseticidas aplicados na cultura (Gonçalves et al., 2003).

⁴<http://www.planetnatural.com/product/trichogramma-wasps/> acessado em 21/04/2015 às 13:30.

⁵<http://perkinsltda.com.co/trichogramma/> acessado em 21/04/2015 às 13:35.

⁶<http://www.bugsforbugs.com.au/trichogramma-parasites-information/> acessado em 21/04/2015 às 13:45.

⁷<http://soundhorticulture.com/offerings/beneficial-insects/trichogramma-spp/> acessado em 21/04/2015 às 13:53.



Figura 1.4: Evolução da cor de um ovo da grafolita parasitado pelo *Trichogramma pretiosum*.

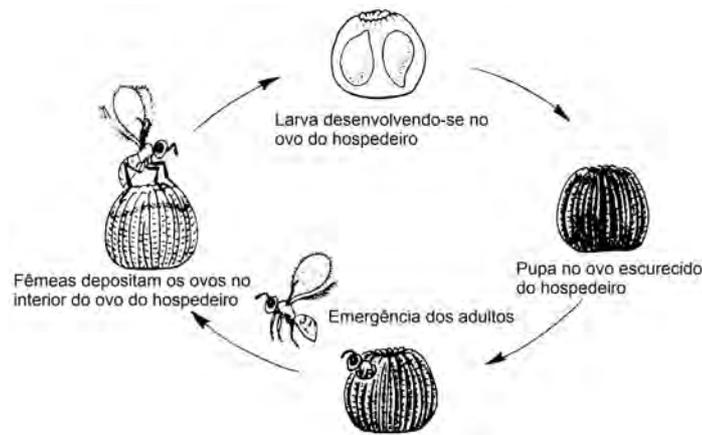


Figura 1.5: Ciclo de vida completo do *Trichogramma pretiosum*.

1.3.2 *Macrocentrus ancyliivorus* (Hymenoptera: Braconidae)

O gênero *Macrocentrus* engloba várias espécies conhecidas por atacar pragas de árvores frutíferas. O *Macrocentrus ancyliivorus* é nativo da América do Norte e tem sido historicamente reconhecido como um dos mais importantes do gênero, pois proporciona um controle biológico efetivo da mariposa oriental. Na Califórnia, por exemplo, o parasitoide é utilizado juntamente com uma baixa quantidade de inseticida para o controle da mariposa oriental, em substituição às grandes quantidades de inseticidas antes aplicadas (Brunner, 1993). Em liberações inundativas (grandes quantidades) o parasitoide forneceu uma redução de 50% no número de frutos danificados (Seaman and Riedl, 1988).

O *Macrocentrus ancyliivorus*, pertencente a categoria dos coinobiontes, ataca principalmente a lagarta enroladeira do morango e a mariposa oriental. Este parasitoide foi utilizado pela primeira vez no controle da mariposa oriental nos Estados Unidos e no Canadá no ano de 1930. Trata-se de uma pequena vespa, que adulta tem de 3 a 5mm de comprimento, de cores que variam de amarelo-âmbar ao marrom-avermelhado. Tanto as antenas quanto o oviduto das fêmeas são tão longos quanto o seu corpo (Mahr, 1998), como ilustrado na Figura 1.6 ⁸.

Este parasitoide deposita seus ovos no interior das lagartas da praga. Durante

⁸<http://www.bugsforbugs.com.au> acessado em 21/04/2015 às 13:59.



Figura 1.6: *Macrocentrus ancylivorus* adulto.

suas quase duas semanas de vida uma única vespa pode parasitar (depositar seus ovos) mais de cinquenta hospedeiros. As fêmeas do parasitoide localizam as lagartas da praga através das fezes e teias deixadas nas plantas. Nos seus três primeiros ínstares, as larvas do parasitoide alimentam-se dentro do corpo do hospedeiro e, no quarto ínstar, elas saem para se alimentar no exterior do hospedeiro. A pupa do parasitoide é construída dentro da pupa do hospedeiro.

O ciclo sazonal do *Macrocentrus ancylivorus* está correlacionado com o do seu hospedeiro. No caso do parasitoidismo às lagartas da mariposa oriental, o parasitoide apresenta de três a quatro gerações por ano, levando cerca de sete dias a mais para se desenvolver do que o seu hospedeiro. Assim, a emergência do parasitoide adulto coincidirá com a eclosão dos ovos do hospedeiro, para que o adulto tenha lagartas hospedeiras disponíveis para o ataque. O parasitoide, assim como a mariposa oriental, apresenta quatro estágios de vida: ovo, larva, pupa e adulto (Mahr, 1998).

O *Macrocentrus ancylivorus* proporciona um bom controle da mariposa oriental em pessegueiros e macieiras, sendo mais efetivo contra lagartas que atacam os ponteiros. Ele é mais eficaz se for liberado logo que aparecerem os primeiros ponteiros murchos, que são os indícios de um ataque da mariposa oriental. Nos Estados Unidos são liberados de três a cinco parasitoides por pessegueiro. Essa liberação, isoladamente, ou em conjunto com a aplicação de algum inseticida reduziu significativamente os danos provocados pela mariposa na cultura do pessegueiro (Brunner, 1993).

1.4 Construção do Modelo Básico I

Levando em consideração a importância da *Grapholita molesta* como a principal praga que atinge a cultura do pessegueiro no Brasil, nosso objetivo nesta seção é desenvolver um modelo matemático contínuo no tempo para a dinâmica populacional da grafolita e de seus principais inimigos naturais. Neste modelo básico não levaremos em conta a estrutura espacial, ou seja, a movimentação de indivíduos, o que será feito no Capítulo 4.

Como visto anteriormente, a grafolita apresenta quatro estágios em seu ciclo de vida: ovo, lagarta, pupa e adulto. No modelo abordaremos as fases de ovo, lagarta e adulto, pois

estas são as que têm maior importância quando pensamos em infestações do inseto-praga em pomares de pêssegos. Estudos de campo feitos pela EMBRAPA e outros pesquisadores detectaram a presença de inimigos naturais da grafolita nos pomares. Este fato nos leva a considerar a presença de dois tipos de parasitoide no sistema, o *Trichogramma pretiosum*, que é o parasitoide de ovos descrito na Subseção 1.3.1, e o *Macrocentrus ancyliivorus*, que é o parasitoide de lagartas descrito na Subseção 1.3.2.

Assim, o sistema será composto por cinco EDO's de primeira ordem não lineares, para as taxas de variação das seguintes densidades populacionais:

- **V**: população de ovos da *Grapholita molesta* no instante T;
- **L**: população de lagartas da *Grapholita molesta* no instante T;
- **N**: população de fêmeas adultas da *Grapholita molesta* no instante T;
- **S**: população do parasitoide *Trichogramma pretiosum* (parasitoide de ovos) no instante T;
- **P**: população do parasitoide *Macrocentrus ancyliivorus* (parasitoide de lagartas) no instante T.

A resposta funcional de um consumidor para uma variação na densidade de um recurso é geralmente entendida como a taxa em que um indivíduo consumidor extrai recursos como uma função da densidade de recursos (Tang and Cheke, 2008). Existem três tipos de resposta funcional, as quais são conhecidas como Holling tipo I, Holling tipo II e Holling tipo III. Segundo Tang and Cheke (2008), o modelo mais amplamente utilizado para a descrição de respostas funcionais de parasitoides é a resposta funcional de Holling tipo II. Ela é típica de consumidores invertebrados (insetos predadores e parasitoides) e prevê um nível de saturação, envolvendo um parâmetro de meia saturação (Smith, 1974).

Definidas as variáveis de nosso sistema, construiremos agora cada equação do modelo. A taxa de variação da população de ovos **V** no instante T, terá uma contribuição positiva proporcional à quantidade de ovos postos por unidade de tempo, e as seguintes contribuições negativas: a quantidade de ovos que eclodem e dão origem às lagartas, a quantidade de ovos que não eclodem (morrem), e a quantidade de ovos parasitados pelo *Trichogramma pretiosum*, por unidade de tempo. Consideramos que a quantidade de ovos postos cresce de acordo com o Modelo Logístico: $rN \left(1 - \frac{N}{K}\right)$. O termo de decréscimo da taxa de variação da população de ovos devido ao parasitoidismo se dá por uma resposta funcional de Holling tipo II, onde o parâmetro σ é o nível populacional de ovos, para o qual $\frac{\eta_V V}{\sigma + V}$ é igual à metade do seu máximo, por isso é chamado de parâmetro de meia saturação. Segundo Faria et al. (2000), a resposta funcional do parasitoide *Trichogramma pretiosum* parasitando ovos de *Tuta absoluta* também é de Holling tipo II. Considerando

estas hipóteses, obtemos a equação:

$$\frac{dV}{dT} = rN \left(1 - \frac{N}{K}\right) - (\alpha_V + \mu_V)V - \frac{\eta_V VS}{\sigma + V}, \quad (1.1)$$

onde:

- r : é a taxa de ovoposição das fêmeas adultas;
- K : é a capacidade suporte do meio ambiente em relação às fêmeas adultas;
- α_V : é a taxa de ovos que eclodem e originam lagartas;
- μ_V : é a taxa de mortalidade natural dos ovos;
- η_V : é a taxa de parasitoidismo do *Trichogramma pretiosum* nos ovos;
- σ : é o parâmetro de meia saturação do parasitoide de ovos.

A taxa de variação da população de lagartas no instante T , terá uma contribuição positiva proporcional à quantidade de ovos que se tornam lagartas, por unidade de tempo, e as seguintes contribuições negativas: a quantidade de lagartas que originam pupas e posteriormente adultos, a quantidade de lagartas que morrem, e a quantidade de lagartas que são parasitadas pelo *Macrocentrus ancyliivorus*, por unidade de tempo. Desta forma, teremos a equação:

$$\frac{dL}{dT} = \alpha_V V - (\alpha_L + \mu_L)L - \frac{\eta_L LP}{\Gamma + L}, \quad (1.2)$$

onde:

- α_L : é a taxa de variação da população de lagartas que originam adultos;
- μ_L : é a taxa de mortalidade natural das lagartas;
- η_L : é a taxa de parasitoidismo do parasitoide *Macrocentrus ancyliivorus*;
- Γ : é o parâmetro de meia saturação do parasitoide *Macrocentrus ancyliivorus*.

A taxa de variação da população de mariposas adultas fêmeas no instante T , terá uma contribuição positiva proporcional à quantidade de lagartas que originam pupas e posteriormente adultos e que são fêmeas, por unidade de tempo, e uma contribuição negativa proporcional à quantidade de mariposas que morrem naturalmente, por unidade de tempo. Assim, obtemos a equação:

$$\frac{dN}{dT} = \alpha_N \alpha_L L - \mu_N N, \quad (1.3)$$

onde:

- α_N : é o parâmetro que representa a proporção de adultos que são fêmeas;
- μ_N : é a taxa de mortalidade natural das fêmeas adultas da mariposa.

Para construir as equações para as taxas de variação das densidades de parasitoides, faremos as seguintes suposições, que são válidas para ambos os parasitoides:

1. Hospedeiros parasitados darão origem a parasitoides na próxima geração;
2. Hospedeiros não parasitados darão origem a hospedeiros na próxima geração;
3. A fração de hospedeiros parasitados é proporcional à taxa de encontros entre hospedeiros e parasitoides;
4. O parasitoide *Trichogramma pretiosum* parasita os ovos da mariposa oriental;
5. O parasitoide *Macrocentrus ancylivorus* parasita as lagartas da mariposa oriental.

Considerando as hipóteses acima, a taxa de variação da população de parasitoides de ovos *Trichogramma pretiosum* no instante T , terá uma contribuição positiva proporcional à taxa de natalidade do parasitoide, por unidade de tempo, e uma contribuição negativa proporcional à quantidade de parasitoides que morrem naturalmente, por unidade de tempo. A taxa de natalidade se dá pela resposta funcional dependente da quantidade de ovos parasitados, que é a de Holling tipo II. Logo, a equação para o parasitoide de ovos é da forma:

$$\frac{dS}{dT} = \frac{\eta_S \eta_V V S}{\sigma + V} - \mu_S S, \quad (1.4)$$

onde:

- η_S : é a taxa de conversão de ovo para parasitoide de ovos;
- μ_S : é a taxa de mortalidade natural do parasitoide de ovos.

Da mesma forma que o parasitoide de ovos, a taxa de variação da população de parasitoides de lagartas *Macrocentrus ancylivorus* no instante T , terá uma contribuição positiva proporcional à taxa de natalidade (lagartas parasitadas que dão origem a parasitoides na próxima geração), por unidade de tempo, e uma contribuição negativa proporcional à quantidade de parasitoides que morrem naturalmente, por unidade de tempo. Logo, a equação é da forma:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\eta_P \eta_L L P}{\Gamma + L} - \mu_P P, \quad (1.5)$$

onde:

- η_P : é a taxa de conversão de lagarta para parasitoide de lagartas;
- μ_P : é a taxa de mortalidade natural do parasitoide de lagartas.

Portanto, considerando as equações (1.1)-(1.5) temos o modelo básico I para o estudo da dinâmica vital da *Grapholita molesta* e de seus parasitoides *Trichogramma pretiosum* e *Macrocentrus ancyliivorus*, dado pelas equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV}{dT} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right) - (\alpha_V + \mu_V)V - \frac{\eta_V VS}{\sigma + V}, \\ \frac{dL}{dT} = \alpha_V V - (\alpha_L + \mu_L)L - \frac{\eta_L LP}{\Gamma + L}, \\ \frac{dN}{dT} = \alpha_N \alpha_L L - \mu_N N, \\ \frac{dS}{dT} = \frac{\eta_S \eta_V VS}{\sigma + V} - \mu_S S, \\ \frac{dP}{dT} = \frac{\eta_P \eta_L LP}{\Gamma + L} - \mu_P P. \end{array} \right. \quad (1.6)$$

1.5 Considerações Finais

Neste capítulo tratamos sobre a importância da produção de pêssegos no Brasil, em particular no Rio Grande do Sul e de suas principais características. Caracterizamos a *Grapholita molesta* (mariposa oriental ou grafolita), principal praga da cultura do pessegueiro no Brasil. Cada fase de seu ciclo vital foi descrita, bem como danos e prejuízos causados por ela. Apresentamos o controle biológico para insetos-praga, feito através de parasitoides, e em particular, descrevemos os parasitoides *Trichogramma pretiosum* e *Macrocentrus ancyliivorus*, que são os principais inimigos naturais da mariposa oriental.

Para finalizar, levando em conta as características biológicas da mariposa e de seus inimigos naturais, desenvolvemos um modelo matemático básico para descrever a interação entre a praga e seus parasitoides. O modelo é composto por cinco equações diferenciais ordinárias de 1ª ordem não lineares, para as taxas de variação das populações nas fases de ovo, lagarta e adulta da mariposa e duas para os parasitoides específicos. No próximo capítulo analisaremos este modelo, fazendo a sua adimensionalização, cálculo de pontos de equilíbrio, viabilidade biológica e estabilidade local dos pontos de equilíbrio obtidos.

Capítulo 2

MODELO BÁSICO I: ANÁLISE E PRIMEIROS RESULTADOS

Neste capítulo, faremos a análise local do modelo (1.6). Primeiramente faremos a adimensionalização do modelo, e em seguida a obtenção dos pontos de equilíbrio, viabilidade biológica, estabilidade local e primeiras simulações, ainda sem a introdução do controle de pragas.

2.1 Adimensionalização do Modelo Básico I

A adimensionalização do modelo básico I para a dinâmica vital da *Grapholita molesta* e dos parasitoides *Trichogramma pretiosum* e *Macrocentrus ancylivorus*

$$\begin{cases} \frac{dV}{dT} = rN \left(1 - \frac{N}{K}\right) - (\alpha_V + \mu_V)V - \frac{\eta_V VS}{\sigma + V}, \\ \frac{dL}{dT} = \alpha_V V - (\alpha_L + \mu_L)L - \frac{\eta_L LP}{\Gamma + L}, \\ \frac{dN}{dT} = \alpha_N \alpha_L L - \mu_N N, \\ \frac{dS}{dT} = \frac{\eta_S \eta_V VS}{\sigma + V} - \mu_S S, \\ \frac{dP}{dT} = \frac{\eta_P \eta_L LP}{\Gamma + L} - \mu_P P. \end{cases} \quad (2.1)$$

é efetuada observando que a dimensão das variáveis e parâmetros envolvidos no modelo é:

$$[V] = [L] = [N] = [S] = [P] = [K] = [\sigma] = [\Gamma];$$

$$[r] = [\alpha_V] = [\mu_V] = [\eta_V] = [\alpha_L] = [\mu_L] = [\eta_L] = [\mu_S] = [\mu_P] = [T]^{-1};$$

$$[\alpha_N] = [\eta_S] = [\eta_P] = \text{adimensionais.}$$

Definimos as populações adimensionais $v = \frac{V}{\sigma}$; $l = \frac{L}{\Gamma}$; $n = \frac{N}{K}$; $s = \frac{S}{\sigma}$; $p = \frac{P}{\Gamma}$ de ovos, lagartas, fêmeas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, respectivamente, e o tempo adimensional t a partir de $t = rT$, e dessa forma obtemos o modelo

básico I em sua forma adimensional:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \gamma n(1-n) - \delta_v v - \frac{\beta_v v s}{1+v}, \\ \frac{dl}{dt} = \rho_l v - \delta_l l - \frac{\beta_l l p}{1+l}, \\ \frac{dn}{dt} = \alpha_{nl} l - \mu_n n, \\ \frac{ds}{dt} = \frac{\beta_{sv} v s}{1+v} - \mu_s s, \\ \frac{dp}{dt} = \frac{\beta_{pl} l p}{1+l} - \mu_p p, \end{cases} \quad (2.2)$$

envolvendo os seguintes parâmetros adimensionais:

$$\begin{aligned} \gamma &\equiv \frac{K}{\sigma}, \quad \delta_v \equiv \frac{\alpha_V + \mu_V}{r}, \quad \beta_v \equiv \frac{\eta_V}{r}, \quad \rho_l \equiv \frac{\alpha_V \sigma}{\Gamma r}, \quad \delta_l \equiv \frac{\alpha_L + \mu_L}{r}, \quad \beta_l \equiv \frac{\eta_L}{r}, \quad \alpha_{nl} \equiv \frac{\alpha_N \alpha_L \Gamma}{K r}, \\ \mu_n &\equiv \frac{\mu_N}{r}, \quad \beta_{sv} \equiv \eta_S \beta_v, \quad \mu_s \equiv \frac{\mu_S}{r}, \quad \beta_{pl} \equiv \eta_P \beta_l, \quad \mu_p \equiv \frac{\mu_P}{r}. \end{aligned}$$

2.2 Pontos de Equilíbrio

Os pontos de equilíbrio do modelo (2.2) são as soluções $(v^*, l^*, n^*, s^*, p^*)$ do seguinte sistema:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = 0 \iff \gamma n(1-n) - \delta_v v - \frac{\beta_v v s}{1+v} = 0, \\ \frac{dl}{dt} = 0 \iff \rho_l v - \delta_l l - \frac{\beta_l l p}{1+l} = 0, \\ \frac{dn}{dt} = 0 \iff \alpha_{nl} l - \mu_n n = 0, \\ \frac{ds}{dt} = 0 \iff \frac{\beta_{sv} v s}{1+v} - \mu_s s = 0, \\ \frac{dp}{dt} = 0 \iff \frac{\beta_{pl} l p}{1+l} - \mu_p p = 0. \end{cases} \quad (2.3)$$

Obtemos assim, cinco pontos de equilíbrio, a saber:

- Extinção de todas as populações:

$$E_0 = (0, 0, 0, 0, 0);$$

- Extinção de ambos os parasitoides:

$$E_1 = (v_1; l_1; n_1; 0; 0), \text{ onde:}$$

$$v_1 = \frac{\delta_l \mu_n}{\rho_l \alpha_{nl}} \left[1 - \frac{\delta_v \delta_l \mu_n}{\gamma \rho_l \alpha_{nl}} \right];$$

$$l_1 = \frac{\mu_n}{\alpha_{nl}} \left[1 - \frac{\delta_v \delta_l \mu_n}{\gamma \rho_l \alpha_{nl}} \right];$$

$$n_1 = 1 - \frac{\delta_v \delta_l \mu_n}{\gamma \rho_l \alpha_{nl}}.$$

- Extinção do parasitoide de ovos:

$E_2 = (v_2; l_2; n_2; 0; p_2)$, onde:

$$v_2 = \frac{\gamma\alpha_{nl}\mu_p}{\delta_v(\beta_{pl} - \mu_p)\mu_n} \left[1 - \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{\mu_n(\beta_{pl} - \mu_p)} \right];$$

$$l_2 = \frac{\mu_p}{\beta_{pl} - \mu_p};$$

$$n_2 = \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{\mu_n(\beta_{pl} - \mu_p)};$$

$$p_2 = \frac{\gamma\beta_{pl}\rho_l\alpha_{nl}}{\delta_v(\beta_{pl} - \mu_p)\mu_n\beta_l} \left[1 - \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{\mu_n(\beta_{pl} - \mu_p)} \right] - \frac{\beta_{pl}\delta_l}{\beta_l(\beta_{pl} - \mu_p)}.$$

- Extinção do parasitoide de lagartas:

$E_3 = (v_3; l_3; n_3; s_3; 0)$, onde:

$$v_3 = \frac{\mu_s}{\beta_{sv} - \mu_s};$$

$$l_3 = \frac{\rho_l\mu_s}{\delta_l(\beta_{sv} - \mu_s)};$$

$$n_3 = \frac{\rho_l\alpha_{nl}\mu_s}{\mu_n\delta_l(\beta_{sv} - \mu_s)};$$

$$s_3 = \frac{\gamma\beta_{sv}\rho_l\alpha_{nl}}{\beta_v\mu_n\delta_l(\beta_{sv} - \mu_s)} \left[1 - \frac{\rho_l\alpha_{nl}\mu_s}{\mu_n\delta_l(\beta_{sv} - \mu_s)} \right] - \frac{\beta_{sv}\delta_v}{\beta_v(\beta_{sv} - \mu_s)}.$$

- Coexistência de todas as populações:

$E_4 = (v_4; l_4; n_4; s_4; p_4)$, onde:

$$v_4 = \frac{\mu_s}{\beta_{sv} - \mu_s};$$

$$l_4 = \frac{\mu_p}{\beta_{pl} - \mu_p};$$

$$n_4 = \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{\mu_n(\beta_{pl} - \mu_p)};$$

$$s_4 = \frac{\gamma\beta_{sv}\alpha_{nl}\mu_p}{\beta_v\mu_n\mu_s(\beta_{pl} - \mu_p)} \left[1 - \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{\mu_n(\beta_{pl} - \mu_p)} \right] - \frac{\delta_v\beta_{sv}}{\beta_v(\beta_{sv} - \mu_s)};$$

$$p_4 = \frac{\beta_{pl}}{\beta_l} \left[\frac{\rho_l\mu_s}{\mu_p(\beta_{sv} - \mu_s)} - \frac{\delta_l}{\beta_{pl} - \mu_p} \right].$$

Observamos que, excetuando o equilíbrio trivial E_0 , onde todas as populações se extinguem, em nenhum dos outros quatro as populações da mariposa oriental (ovos, lagartas e adultos) se extinguem, sobrevivendo apenas os parasitoides. Na próxima seção trataremos das condições para que os pontos de equilíbrio sejam biologicamente viáveis.

2.3 Viabilidade Biológica dos Pontos de Equilíbrio

Um ponto de equilíbrio é biologicamente viável quando todas as populações envolvidas forem não negativas. Analisando a viabilidade biológica de cada um dos equilíbrios, calculados na Seção 2.2, obtemos as seguintes condições necessárias e suficientes de viabilidade biológica:

- Para o ponto de equilíbrio E_1 :

1. $R_0 = \frac{\delta_v \delta_l \mu_n}{\gamma \rho_l \alpha_{nl}} < 1$;

- Para o ponto de equilíbrio E_2 :

1. $\mu_p < \beta_{pl}$;

2. $R_1 = \frac{\alpha_{nl} \mu_p}{\mu_n (\beta_{pl} - \mu_p)} < 1$;

3. $R_2 = R_0 \frac{(\beta_{pl} - \mu_p)^2 \mu_n}{\mu_n (\beta_{pl} - \mu_p) - \alpha_{nl} \mu_p} < 1$.

- Para o ponto de equilíbrio E_3 :

1. $\mu_s < \beta_{sv}$;

2. $R_3 = R_0 \frac{\mu_n \delta_l (\beta_{sv} - \mu_s)}{\mu_n \delta_l (\beta_{sv} - \mu_s) - \rho_l \alpha_{nl} \mu_s} < 1$.

- Para o equilíbrio E_4 :

1. $\mu_s < \beta_{sv}$;

2. $\mu_p < \beta_{pl}$;

3. $R_4 = \frac{(\beta_{sv} - \mu_s) \delta_l}{(\beta_{pl} - \mu_p) \rho_l} < 1$;

4. $R_5 = \frac{\delta_v (\beta_{pl} - \mu_p)^2 \mu_s \mu_n^2}{\gamma \alpha_{nl} \mu_p (\beta_{sv} - \mu_s) (\mu_n (\beta_{pl} - \mu_p) - \alpha_{nl} \mu_p)} < 1$.

Quando, mais tarde, atribuirmos valores experimentais aos parâmetros do modelo, só farão sentido, evidentemente aqueles equilíbrios que forem biologicamente viáveis. A seguir, determinaremos as condições de estabilidade local para cada um dos pontos de equilíbrio. Importante salientar que a viabilidade biológica é uma necessidade, o que não ocorre necessariamente com a estabilidade de um ponto de equilíbrio.

2.4 Estabilidade Local dos Pontos de Equilíbrio

Para obtermos as condições para a estabilidade local dos pontos de equilíbrio do modelo (2.2), vamos linearizá-lo em torno de cada ponto de equilíbrio. Assim, obteremos a Matriz Jacobiana associada ao sistema. Esta matriz é composta pelas derivadas parciais de primeira ordem em relação a cada variável do sistema, e a mesma será aplicada em cada ponto de equilíbrio.

Supondo que E_* seja um ponto de equilíbrio do modelo, se cada autovalor da Matriz Jacobiana J no ponto E_* for negativo ou tiver parte real negativa, então E_* é um ponto de equilíbrio localmente estável do sistema (Edelstein-Keshet, 1988). Como estamos trabalhando com um sistema com cinco EDO's, não será possível obter de forma explícita cada autovalor associado à Matriz Jacobiana aplicada em cada ponto de equilíbrio. Por isso, vamos utilizar o Critério de Routh-Hurwitz, que está explicitado em detalhes no Apêndice A. Utilizando este critério, estabeleceremos condições necessárias para a estabilidade local de cada ponto de equilíbrio.

Os autovalores da matriz J são as raízes do polinômio característico, que é obtido através da solução da equação $\det(J - \lambda I) = 0$. Em cada subseção a seguir estabeleceremos as condições para a estabilidade local de cada um dos pontos de equilíbrio do modelo (2.2).

2.4.1 Estabilidade Local do Equilíbrio E_0

As raízes λ do polinômio característico associado à matriz J (autovalores da matriz) no ponto E_0 são as soluções da equação:

$$(-\lambda - \mu_p)(-\lambda - \mu_s)((\gamma\rho_l\alpha_{nl} + (-\lambda - \delta_v)(-\lambda - \delta_l)(-\lambda - \mu_n)) = 0.$$

Logo, encontramos facilmente que duas raízes (autovalores) são $\lambda_1 = -\mu_p$ e $\lambda_2 = -\mu_s$, ambas negativas. As outras três raízes deverão satisfazer a equação:

$$\gamma\rho_l\alpha_{nl} + (-\lambda - \delta_v)(-\lambda - \delta_l)(-\lambda - \mu_n) = 0,$$

isto é:

$$\lambda^3 + \lambda^2 a_1 + \lambda a_2 + a_3 = 0,$$

onde:

$$a_1 = \mu_n + \delta_l + \delta_v;$$

$$a_2 = (\delta_l + \delta_v)\mu_n + \delta_v\delta_l;$$

$$a_3 = \delta_v\delta_l\mu_n - \gamma\rho_l\alpha_{nl}.$$

Pelo Critério de Routh-Hurwitz, as raízes da equação acima terão $Re\lambda < 0$ se $a_1 > 0$, $a_3 > 0$ e $a_1 a_2 - a_3 > 0$. Estas são as condições para que o equilíbrio E_0 seja localmente estável.

2.4.2 Estabilidade Local do Equilíbrio E_1

As raízes λ do polinômio característico associado à matriz J (autovalores da matriz) no ponto E_1 são as soluções da equação:

$$[(-\lambda - \delta_v)(-\lambda - \delta_l)(-\lambda - \mu_n) + A](\lambda + \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) = 0,$$

onde:

$$A = \rho_l \alpha_{nl} \left(-\gamma + \frac{2\delta_v \delta_l \mu_n}{\rho_l \alpha_{nl}} \right),$$

e λ_1 e λ_2 são dois autovalores associados ao ponto de equilíbrio E_1 , como dados abaixo:

$$\lambda_1 = -\frac{\beta_{sv} \delta_l \mu_n (-\gamma \rho_l \alpha_{nl} + \delta_v \delta_l \mu_n)}{\gamma \rho_l^2 \alpha_{nl}^2 + \gamma \rho_l \alpha_{nl} \delta_l \mu_n - \delta_v \delta_l^2 \mu_n^2} - \mu_s;$$

$$\lambda_2 = \frac{\beta_{pl} \mu_n (-\gamma \rho_l \alpha_{nl} + \delta_v \delta_l \mu_n)}{\delta_v \delta_l \mu_n^2 - \gamma \rho_l \alpha_{nl} (\alpha_{nl} + \mu_n)} - \mu_p.$$

Os outros três autovalores são as raízes da equação:

$$(-\lambda - \delta_v)(-\lambda - \delta_l)(-\lambda - \mu_n) + A = 0,$$

isto é:

$$\lambda^3 + \lambda^2 a_1 + \lambda a_2 + a_3 = 0,$$

onde:

$$a_1 = \mu_n + \delta_l + \delta_v;$$

$$a_2 = \delta_v \delta_l + (\delta_l + \delta_v) \mu_n;$$

$$a_3 = \delta_v \delta_l \mu_n - \rho_l \alpha_{nl} \left(\gamma + \frac{2\delta_v \delta_l \mu_n}{\rho_l \alpha_{nl}} \right).$$

Logo, pelo Critério de Routh-Hurwitz, as raízes da equação acima tem $Re\lambda < 0$ se $a_1 > 0$, $a_3 > 0$ e $a_1 a_2 - a_3 > 0$. Para que o equilíbrio E_1 seja localmente estável é necessário que os autovalores λ_1 e λ_2 sejam ambos negativos e que as condições do Critério de Routh-Hurwitz sejam satisfeitas.

2.4.3 Estabilidade Local do Equilíbrio E_2

As raízes λ do polinômio característico associado à matriz J (autovalores da matriz) no ponto E_2 são as soluções da equação:

$$(\lambda + \lambda_1)[(\lambda + \delta_v)(-\lambda - \mu_n)A - \lambda[B - (\lambda + \delta_v)(\lambda - \mu_n)(-\lambda + C)]] = 0,$$

onde:

$$A = \frac{\mu_p (\delta_v \delta_l \mu_n^2 (\beta_{pl} - \mu_p) + \gamma \rho_l \alpha_{nl} (-\beta_{pl} \mu_n + (\alpha_{nl} + \mu_n) \mu_p))}{\beta_{pl} \delta_v \mu_n^2};$$

$$B = \frac{\gamma \rho_l \alpha_{nl} (\beta_{pl} \mu_n - (2\alpha_{nl} + \mu_n) \mu_p)}{\mu_n (\beta_{pl} - \mu_p)};$$

$$C = \frac{-\delta_v \delta_l \mu_n^2 \mu_p + \gamma \rho_l \alpha_{nl} (-\beta_{pl} \mu_n + (\alpha_{nl} + \mu_n) \mu_p)}{\beta_{pl} \delta_v \mu_n^2}.$$

Um autovalor associado ao equilíbrio E_2 é:

$$\lambda_1 = -\mu_s + \frac{\gamma \alpha_{nl} \beta_{sv} \mu_p (-\beta_{pl} \mu_n + (\alpha_{nl} + \mu_n) \mu_p)}{-\beta_{pl}^2 \delta_v \mu_n^2 + \beta_{pl} \mu_n (-\gamma \alpha_{nl} + 2\delta_v \mu_n) \mu_p + (\gamma \alpha_{nl} (\alpha_{nl} + \mu_n) - \delta_v \mu_n^2) \mu_p^2}.$$

Os outros quatro autovalores são as raízes da equação:

$$[(\lambda + \delta_v)(-\lambda - \mu_n)A - \lambda[B - (\lambda + \delta_v)(\lambda - \mu_n)(-\lambda + C)]] = 0,$$

isto é:

$$\lambda^4 + \lambda^3 a_1 + \lambda^2 a_2 + \lambda a_3 + a_4 = 0,$$

onde:

$$a_1 = (\mu_n - C) + \delta_v;$$

$$a_2 = \mu_n C + \delta_v(\mu_n - C) - A;$$

$$a_3 = \delta_v \mu_n C - (\delta_v + \mu_n)A - B;$$

$$a_4 = -\delta_v \mu_n A,$$

com A , B e C como definidos anteriormente.

Pelo Critério de Routh-Hurwitz, as raízes da equação acima terão $Re\lambda < 0$ se $a_1 > 0$, $a_3 > 0$, $a_4 > 0$ e $a_1 a_2 a_3 > a_3^2 + a_1^2 a_4$. Portanto, para que o ponto de equilíbrio E_2 seja localmente estável devemos ter $\lambda_1 < 0$ e que as condições de Routh-Hurwitz sejam satisfeitas.

2.4.4 Estabilidade Local do Equilíbrio E_3

A equação característica associada a matriz J no equilíbrio E_3 é:

$$[(\lambda^2 + \lambda(\delta_l + \mu_n) + \delta_l \mu_n)A - \lambda C + (-\lambda - \delta_l(-\lambda - \mu_n))(-\lambda + B)] \left(-\lambda + \frac{\rho_l \beta_{pl} \mu_s}{\delta_l(\beta_{sv} - \mu_s) + \rho_l \mu_s} - \mu_p \right) = 0,$$

onde:

$$A = \frac{\gamma \rho_l \alpha_{nl} \mu_s \delta_l (\beta_{sv} - \mu_s) \mu_n - \gamma \rho_l^2 \alpha_{nl}^2 \mu_s^2 + \delta_v \delta_l^2 (\mu_s - \beta_l) \mu_n^2 \mu_s}{\beta_l \delta_l^2 \mu_n^2};$$

$$B = \frac{\gamma \rho_l^2 \alpha_{nl}^2 \mu_s - \delta_v \delta_l^2 \mu_n^2 \mu_s - \gamma \rho_l \alpha_{nl} \delta_l (\beta_{sv} - \mu_s) \mu_n}{\beta_{sv} \delta_l^2 \mu_n^2};$$

$$C = \frac{\rho_l \alpha_{nl} [\gamma \beta_{sv} \delta_l \mu_n - \gamma (2\rho_l \alpha_{nl} + \delta_l \mu_n) \mu_s]}{\delta_l (\beta_{sv} - \mu_s) \mu_n}.$$

Um autovalor associado ao ponto de equilíbrio E_3 é:

$$\lambda_1 = \frac{\rho_l \beta_{pl} \mu_s}{\delta_l (\beta_{sv} - \mu_s) + \rho_l \mu_s} - \mu_p.$$

Os outros quatro autovalores são as raízes da equação:

$$(\lambda^2 + \lambda(\delta_l + \mu_n) + \delta_l \mu_n)A - \lambda C + (-\lambda - \delta_l(-\lambda - \mu_n))(-\lambda + B) = 0,$$

isto é:

$$\lambda^4 + \lambda^3 a_1 + \lambda^2 a_2 + \lambda a_3 + a_4 = 0,$$

onde:

$$a_1 = (\delta_l + \mu_n) - B;$$

$$a_2 = A + \delta_l \mu_n - (\delta_l + \mu_n)B;$$

$$a_3 = (\delta_l + \mu_n)A - \delta_l \mu_n B - C;$$

$$a_4 = A \delta_l \mu_n.$$

Pelo Critério de Routh-Hurwitz as raízes da equação acima terão $Re\lambda < 0$ se $a_1 > 0$,

$a_3 > 0$, $a_4 > 0$ e $a_1 a_2 a_3 > a_3^2 + a_1^2 a_4$. Portanto, o ponto de equilíbrio E_3 é localmente estável se $\lambda_1 < 0$ e se as condições de Routh-Hurwitz estiverem satisfeitas.

2.4.5 Estabilidade Local do Equilíbrio E_4

A equação característica associada a matriz J no equilíbrio E_4 é:

$$(-\lambda - \mu_n)A(-B - \lambda(-\lambda + C)) - \lambda\{(-\lambda - \mu_n)(-\lambda - D)B - \lambda[E + (-\lambda - \mu_n)(-\lambda - D)(-\lambda + F)]\} = 0,$$

onde:

$$\begin{aligned} A &= \frac{(\beta_{pl} - \mu_p)(\rho_l \mu_s (\beta_{pl} - \mu_p) - \delta_l (\beta_{sv} - \mu_s) \mu_p)}{\beta_{pl} (\beta_{sv} - \mu_s)}; \\ B &= \frac{(\beta_{sv} - \mu_s)[\beta_{pl}^2 \delta_v \mu_n^2 \mu_s - \beta_{pl} \mu_n (\gamma \alpha_{nl} (\beta_{sv} - \mu_s) + 2\delta_v \mu_n \mu_s) \mu_p + (\gamma \alpha_{nl} (\beta_{sv} - \mu_s) (\alpha_{nl} - \mu_n) + \delta_v \mu_n^2 \mu_s) \mu_p^2]}{\beta_{sv} \mu_n^2 (\beta_{pl} - \mu_p)^2}; \\ C &= \frac{\beta_{pl} \mu_n (2\delta_v \mu_n \mu_s^2 - \gamma \alpha_{nl} (\beta_{sv} - \mu_s)^2) \mu_p - \beta_{pl}^2 \delta_v \mu_n^2 \mu_s^2 + (\gamma \alpha_{nl} (\beta_{sv} - \mu_s)^2 (\alpha_{nl} + \mu_n) - \delta_v \mu_n^2 \mu_s^2) \mu_p^2}{\beta_{sv} \mu_n^2 \mu_s (\beta_{pl} - \mu_p)^2}; \\ D &= \frac{\rho_l \mu_s (\beta_{pl} - \mu_p)^2 + \delta_l (\beta_{sv} - \mu_s) \mu_p^2}{\beta_{pl} (\beta_{sv} - \mu_s) \mu_p}; \\ E &= \frac{\gamma \rho_l \alpha_{nl} (\beta_{pl} \mu_n - (2\alpha_{nl} + \mu_n) \mu_p)}{\mu_n (\beta_{pl} - \mu_p)}; \\ F &= C + \frac{\gamma \alpha_{nl} (\beta_{sv} - \mu_s)^2 \mu_p}{\beta_{sv} \mu_n^2 \mu_s (\beta_{pl} - \mu_p)^2}. \end{aligned}$$

Reescrevendo a equação em potências de λ , obtemos:

$$\lambda^5 + \lambda^4 a_1 + \lambda^3 a_2 + \lambda^2 a_3 + \lambda a_4 + a_5 = 0,$$

onde:

$$\begin{aligned} a_1 &= D - F + \mu_n; \\ a_2 &= A + B - DF + (D - F)\mu_n; \\ a_3 &= (\mu_n - C)A + (D + \mu_n)B - (1 + \mu_n D)F; \\ a_4 &= (\mu_n D - A)B - \mu_n AC; \\ a_5 &= -\mu_n AB, \end{aligned}$$

com A , B , C , D , E e F como dados anteriormente.

Pelo Critério de Routh-Hurwitz, as raízes da equação acima terão $Re\lambda < 0$ se $a_1 > 0$, $a_2 > 0$, $a_3 > 0$, $a_4 > 0$, $a_5 > 0$, $a_1 a_2 a_3 > a_3^2 + a_1^2 a_4$ e $(a_1 a_4 - a_5)(a_1 a_2 a_3 - a_3^2 - a_1^2 a_4) > a_5(a_1 a_2 - a_3)^2 + a_1 a_5^2$. Portanto, estas são as condições para que o equilíbrio E_4 seja localmente estável.

2.5 Escolha dos Parâmetros do Modelo I

Na seção anterior analisamos a estabilidade local de cada ponto de equilíbrio do modelo básico, obtendo condições envolvendo os parâmetros do modelo para as quais o ponto de equilíbrio de coexistência é estável. Para tornarmos o modelo próximo à realidade, os parâmetros serão escolhidos de acordo com os dados da biologia da *G. molesta* e dos parasitoides *T. pretiosum* e *M. ancylivorus*, obtidos experimentalmente por entomologistas e agrônomos. De acordo com Botton et al. (2011), o tempo de duração de cada fase de vida (longevidade) da mariposa oriental é:

- **Fase de ovo:** 2,9 a 5,1 dias;
- **Pupa:** 6,8 a 12,3 dias;
- **Fase de lagarta:** 11 a 21,5 dias;
- **Fase adulta:** 15,9 a 23,7 dias.

Considerando estes dados e sabendo que os fatores ¹ de mortalidade natural em cada fase de vida da mariposa são iguais ao inverso da longevidade média, e que estamos considerando apenas as fases de ovo, lagarta e adulto, obtemos: $\mu_V = 0,25/\text{dia}$, $\mu_L = 0,062/\text{dia}$ e $\mu_N = 0,051/\text{dia}$.

No caso dos parasitoides, temos que as fêmeas do parasitoide de ovos (*Trichogramma pretiosum*) têm uma longevidade entre 11,2 e 13,3 dias, dependendo da temperatura. Desta forma, obtemos $\mu_S = 0,08/\text{dia}$, que representa o fator de mortalidade natural do parasitoide. Além disso, em resultados obtidos em campo observou-se que o parasitoidismo chega a 40% de ovos parasitados por dia (Botton et al., 2011). Já resultados obtidos em laboratório dizem que o parasitoidismo pode chegar a 54% de ovos parasitados por dia (Rodrigues et al., 2011). Assim, consideramos $\eta_V = 0,4/\text{dia}$, que no modelo representa o fator de parasitoidismo em ovos da mariposa oriental. Segundo Rodrigues et al. (2011), a emergência de parasitoides adultos é sempre maior que 84% podendo chegar a 95%, ou seja, entre 84% e 95% dos ovos parasitados darão origem a parasitoides. Desta forma, o fator de conversão de ovo para parasitoide de ovos será tomado como $\eta_S = 0,95$.

No caso do parasitoide de lagartas (*Macrocentrus ancylivorus*), a longevidade das fêmeas adultas parasitando lagartas da mariposa oriental é de 13 a 29 dias (Mahr, 1998). Desta forma, o fator de morte natural é $\mu_P = 0,048/\text{dia}$. O parasitoidismo fica entre 60% e 80% de lagartas por dia (Mahr, 1998; Botton et al., 2011), que corresponde a $\eta_L = 0,7/\text{dia}$.

Além disso, a viabilidade dos ovos da mariposa varia de 76% a 87% por dia, aproximadamente, e a viabilidade da fase de lagarta para adulto chega a 87% por dia, aproximadamente (Arioli et al., 2010; Silva et al., 2010). Então escolhemos $\alpha_V = 0,8/\text{dia}$, $\alpha_L = 0,87/\text{dia}$. A proporção do total de mariposas adultas que são fêmeas chega a 54% dependendo da dieta, logo tomamos $\alpha_N = 0,54$ (Arioli et al., 2010). A taxa de ovoposição ou taxa de crescimento intrínseco, segundo Arioli et al. (2010) é em média $r = 1,22/\text{dia}$.

Os outros parâmetros do modelo (2.1) foram escolhidos como: $\Gamma = 400$ lagartas, $\sigma = 300$ ovos, $K = 750$ mariposas adultas, $\eta_P = 0,8$. Portanto, os parâmetros dimensionais do modelo são:

¹Denominamos fator de mortalidade natural ao parâmetro μ , envolvido em uma taxa de mortalidade $\left[\frac{dx}{dt}\right]_{mortes}$ da forma $-\mu x$.

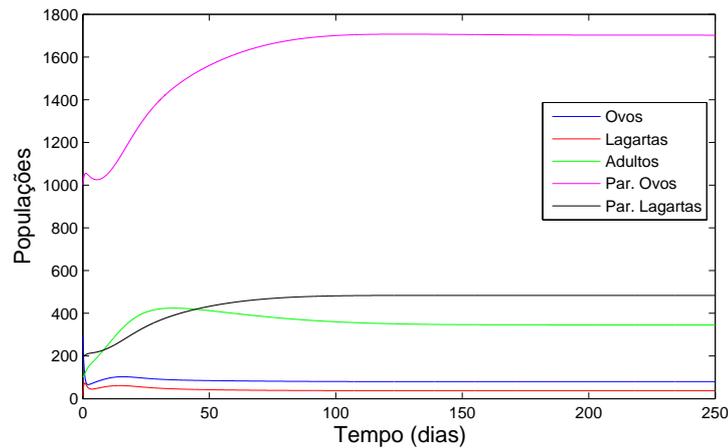
Tabela 2.1: Parâmetros dimensionais do modelo básico I

r	K	α_V	μ_V	η_V	σ	α_L	μ_L	η_L	Γ	α_N	μ_N	η_S	μ_S	η_P	μ_P
1,22	750	0,8	0,25	0,4	300	0,87	0,062	0,7	400	0,54	0,051	0,95	0,08	0,8	0,048

2.6 Simulações sem Estrutura Espacial e sem Controle

Nesta seção serão feitas algumas simulações numéricas para observarmos o comportamento da mariposa oriental e dos parasitoides sem a aplicação de nenhum tipo de controle. Como visto na seção anterior, os valores para cada parâmetro do modelo (2.1) foram escolhidos obedecendo a biologia de cada espécie.

Inicialmente faremos algumas simulações utilizando o modelo (2.1), considerando os valores dos parâmetros do modelo como estabelecidos na seção anterior e condições iniciais do número de insetos da seguinte forma: $V(0) = 30$, $L(0) = 10$, $N(0) = 100$, $S(0) = 1000$ e $P(0) = 200$. Na Figura 2.1, observamos que sem a aplicação de medidas de controle, as populações tendem ao ponto de equilíbrio (80; 37; 345; 1702; 484). Comparando a Figura 2.1 com a Figura 2.2, desconsiderando as escalas, observamos que elas são equivalentes.

**Figura 2.1:** Populações tendendo ao ponto de equilíbrio de coexistência do modelo dimensional (2.1).

Para a maioria das simulações, utilizaremos o modelo adimensional I (2.2), logo, de acordo com os valores dos parâmetros do modelo dimensional dados na seção anterior, obteremos os valores dos parâmetros adimensionais do modelo. Assim, em todas as simulações de agora em diante, os valores dos parâmetros para o modelo básico I adimensional são dados na Tabela 2.2:

Tabela 2.2: Parâmetros adimensionais do modelo básico I

γ	δ_v	δ_l	μ_n	μ_s	μ_p	ρ_l	α_{nl}	β_v	β_l	β_{sv}	β_{pl}
2,5	0,861	0,764	0,042	0,066	0,039	0,492	0,205	0,33	0,574	0,312	0,45

Com estes valores para os parâmetros, o equilíbrio de coexistência é: $E_4 =$

$(v^*, l^*, n^*, s^*, p^*) = (0,2683; 0,0929; 0,4532; 5,5657; 1,2520)$. Isto pode ser observado na Figura 2.2. Na simulação as populações tendem a exatamente o mesmo ponto de equilíbrio obtido analiticamente na Seção 2.2.

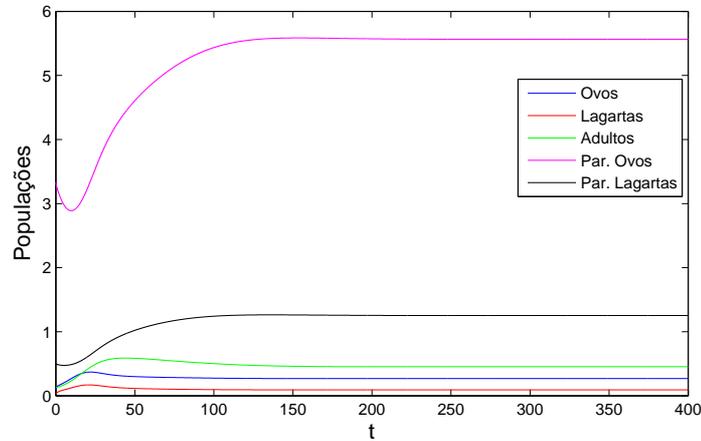


Figura 2.2: Populações tendendo ao ponto de equilíbrio de coexistência E_4 (modelo adimensional (2.2)).

As condições iniciais utilizadas são dadas na Tabela 2.3:

Tabela 2.3: Condições iniciais

$v(0)$	$l(0)$	$n(0)$	$s(0)$	$p(0)$
0,1	0,025	0,13	3,3	0,5

Todos os valores das condições iniciais estão abaixo do ponto de equilíbrio E_4 . Importante observar que o equilíbrio (que independe das condições iniciais) de coexistência caracteriza um estado de praga severa ($n^* \approx 0,45$) pois como mostraremos no Capítulo 3, o Limiar Econômico desta população é 0,2. É, portanto, essencial a implementação de medidas de controle para garantir a produção com qualidade na cultura no pessegueiro.

Na Figura 2.3, apresentamos a trajetória do espaço de fase pentadimensional projetada no subespaço tridimensional vln (ovo, lagarta e adulto). Na Figura 2.4, apresentamos as trajetórias do espaço de fase pentadimensional projetadas no subespaço bidimensional (a) vs (população de ovos em relação ao parasitoide de ovos) e (b) lp (lagartas em relação ao parasitoide de lagartas).

As simulações foram feitas no software MATLAB através da implementação do Runge-Kutta de 4ª ordem para a resolução numérica do sistema e os testes para a viabilidade biológica e estabilidade local do ponto de equilíbrio de coexistência foram feitos com o auxílio do software Mathematica. O último software foi utilizado para verificar se os valores escolhidos para os parâmetros do modelo satisfaziam as condições de estabilidade local estabelecidas na seção anterior.

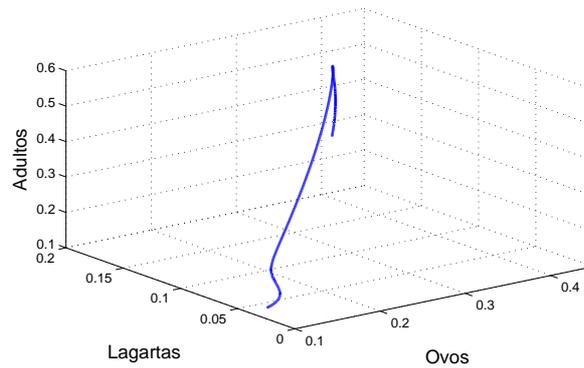


Figura 2.3: Trajetória do espaço de fase pentadimensional projetada no subespaço tridimensional vln .

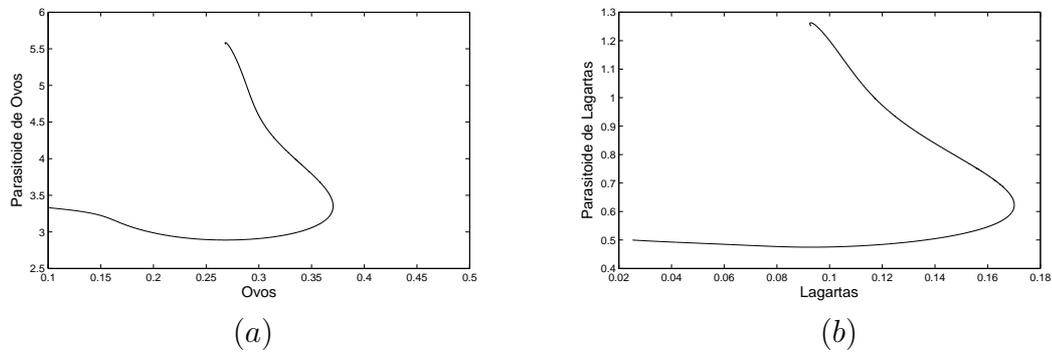


Figura 2.4: Trajetória do espaço de fase pentadimensional projetada no subespaço bidimensional: (a) vs (população de ovos em relação ao parasitoide de ovos) e (b) lp (lagartas em relação ao parasitoide de lagartas).

2.7 Considerações Finais

Neste capítulo, adimensionalizamos o modelo básico I desenvolvido no Capítulo 1 e, em seguida, calculamos todos os seus pontos de equilíbrio. O modelo apresenta cinco pontos de equilíbrio: (i) extinção de todas as populações; (ii) extinção de ambos os parasitoides; (iii) extinção do parasitoide de ovos; (iv) extinção do parasitoide de lagartas e (v) coexistência de todas as espécies. Obtivemos as condições para que os pontos de equilíbrio sejam biologicamente viáveis e também para a estabilidade local. As condições de estabilidade local de cada ponto de equilíbrio foram estabelecidas através do Critério de Routh-Hurwitz.

Os parâmetros do modelo dimensional (2.1) foram atribuídos através de dados experimentais obtidos na literatura. Estes dados se referem ao tempo de duração de cada fase de vida da mariposa oriental e dos parasitoides, taxas de parasitismo, viabilidade biológica de cada população, capacidade suporte do meio ambiente, taxa de ovoposição. Os parâmetros adimensionais foram calculados através das expressões obtidas na Seção 2.1 e posteriormente utilizados para simularmos o comportamento das populações sem a

adoção de medidas de controle. As populações tendem a exatamente o mesmo ponto de equilíbrio de coexistência obtido analiticamente na Seção 2.2.

Capítulo 3

MODELOS MATEMÁTICOS PARA O CONTROLE DA *GRAPHOLITA* *MOLESTA*

Neste capítulo, trataremos inicialmente dos conceitos gerais do Manejo Integrado de Pragas (MIP), das principais técnicas de controle e de como é feito o monitoramento da *Grapholita molesta* em campo. Em seguida, desenvolveremos três modelos para o controle da mariposa oriental e faremos simulações numéricas utilizando esses modelos. Finalmente, abordaremos o controle da mariposa oriental através de um controlador proporcional-integral.

3.1 Manejo Integrado de Pragas

O Manejo Integrado de Pragas (MIP) surgiu na segunda metade do século XX como o paradigma de escolha para o controle de pragas, e para enfatizar a necessidade da incorporação de conceitos básicos de ecologia no desenvolvimento e implementação de sistemas de controle de pragas. O MIP requer um entendimento detalhado da biologia e ecologia da praga, incluindo interações na comunidade e níveis de ecossistema (Norris et al., 2003). A seguir trataremos do conceito geral de MIP e das técnicas de controle para a *Grapholita molesta*.

3.1.1 Conceito de Inseto-Praga

Inicialmente, introduziremos o conceito de inseto-praga, o qual é essencialmente econômico: está relacionado com a população de insetos que esteja causando algum tipo de prejuízo, cuja eliminação compense sob o ponto de vista econômico (Nakano et al., 1981). Norris et al. (2003) apresenta outra definição: “Praga é toda população de organismos no ambiente da cultura, que causam prejuízo à cultura e são capazes de reduzir a produção

ou a qualidade.”

Em relação ao aspecto ecológico, um inseto não pode ser considerado praga, já que ele participa na manutenção do equilíbrio dinâmico dos ecossistemas. Nos ecossistemas naturais, particularmente os tropicais, participam ativamente no processo de ciclagem de nutrientes, além de servirem de alimentos às várias espécies de animais insetívoros como morcegos, aves, mamíferos, peixes, répteis e anfíbios, contribuindo para a estabilidade desses ambientes.

De acordo com Silveira Neto et al. (1976), o crescimento e o tamanho de uma população de insetos variam ao longo do tempo, flutuando em função da presença ou ausência dos fatores ecológicos que podem ser independentes da densidade populacional, como os fatores climáticos e físicos, ou dependentes da densidade populacional, como os fatores alimentares e os bióticos.

Tendo em vista as flutuações populacionais de insetos em função da presença ou ausência dos fatores bióticos e abióticos, é possível definir três níveis básicos de densidade populacional:

- **Nível de Equilíbrio (NE):** corresponde à densidade populacional média de insetos, em torno da qual ocorrem pequenas flutuações, durante um longo período de tempo na ausência de mudanças permanentes no ambiente;
- **Nível de Dano (ND):** corresponde à menor densidade populacional do inseto que implica em prejuízo ao agricultor. É o nível onde a praga começa a causar prejuízos, que para serem evitados, exige a aplicação de um método de controle;
- **Nível de Controle (NC):** corresponde à densidade populacional que quando atingida, determina que medidas de controle devam ser adotadas para evitar prejuízos econômicos. É o nível a partir do qual deve ser iniciado o controle para evitar que seja atingido o ND. Este nível também é denominado Limiar Econômico (LE).

Conforme a posição da população de um determinado inseto em relação aos níveis definidos anteriormente, considerando todos os aspectos intrínsecos à lavoura em questão, as condições para que um determinado inseto venha a adquirir, ou não, o status de praga, são as seguintes:

- **Inseto não praga:** quando o NE estiver situado abaixo do NC e do ND e os picos populacionais nunca atingirem o NC nem o ND. Neste caso, não é necessário adotar nenhuma medida de controle;
- **Praga esporádica:** quando o NE estiver situado abaixo do NC e do ND, e os picos populacionais atingirem ocasionalmente o NC ou o ND, podendo restabelecer a situação de inseto não praga após a adoção de medidas de controle;

- **Inseto-praga:** quando o NE estiver situado pouco abaixo do NC e do ND, tal que, todos os picos populacionais atingem estes dois níveis, e isto requer a adoção de medidas de controle de modo que se possa estabelecer um novo NE situado mais abaixo em relação ao NC e ao ND;
- **Praga severa:** quando o NE estiver situado acima do NC e do ND, justificando o controle preventivo para não comprometer a produtividade da lavoura. Ao aplicar as medidas de controle, será estabelecido um novo NE, que estará situado abaixo do NC e do ND.

Visando a redução das perdas causadas por pragas, vários métodos de controle têm sido utilizados (Metcalf and Luckmann, 1975), dentre eles destacamos: Métodos de Controle Legislativo ou Regulatório, Métodos de Controle Químico, Métodos de Controle Cultural ou Uso de Práticas Agronômicas, Métodos de Controle Físico, Métodos de Controle Mecânico, Métodos de Controle Biológico, Métodos de Controle Autocida e Métodos de Controle Comportamental.

3.1.2 Conceito Geral de Manejo Integrado de Pragas (MIP)

O Manejo Integrado de Pragas (MIP) consiste na utilização simultânea de diferentes técnicas de supressão populacional como estratégia de combate à praga, de modo a manter a população de insetos em uma condição de não praga (que não causa danos) de forma econômica e harmônica com o ambiente (Crocomo, 1990; Norris et al., 2003). Desta forma, o que se deseja não é erradicar completamente a população de pragas, mas sim reduzi-la a níveis toleráveis, abaixo de um Limiar Econômico (LE) ou Nível de Controle (NC).

Adotar a estratégia de manejo integrado implica em aplicar ações de controle quando a população de pragas atingir o LE, de modo a evitar que uma população crescente atinja o nível de prejuízo econômico ou Nível de Dano (ND). Atualmente, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos (Tang and Cheke, 2008; Tang et al., 2008; Bhattacharyya and Bhattacharya, 2007), explorando a modelagem matemática da aplicação de técnicas de controle integrado de pragas.

A aplicação do MIP depende inteiramente da tomada de decisão, ou seja, quando aplicar o controle integrado. Para isto, segundo Norris et al. (2003), devem ser levados em conta alguns fatores:

1. A espécie de praga deve ser corretamente identificada, principalmente a sua biologia e ecologia, para que a estratégia de controle adotada seja efetiva;
2. Determinar os parâmetros biológicos da praga e da cultura, incluindo o tamanho da população da praga, sua distribuição, estágio de desenvolvimento, distribuição e número de inimigos naturais, status da cultura e economia da cultura;

3. Avaliar a densidade de pragas que corresponde ao limiar econômico para a cultura em questão;
4. Avaliar todos os tipos de estratégias de controle existentes para aquela praga específica, bem como o custo de adoção de cada uma;
5. Considerar as interações entre a praga alvo e os outros insetos benéficos existentes no agrossistema;
6. Avaliar o ambiente local e regional e restrições sociais, que podem afetar a aplicação de um determinado inseticida, por exemplo;
7. Tomar uma decisão:
 - Não fazer nada: quando os danos causados forem menores que os gastos para o controle da praga;
 - Reduzir a susceptibilidade das culturas aos danos;
 - Reduzir o tamanho da população de pragas;
 - Combinar as últimas duas estratégias.

Os métodos de controle combinados mais comumente utilizados no MIP são o controle biológico (liberação artificial de inimigos naturais) e o controle químico (aplicação de inseticidas químicos). O objetivo principal deste trabalho é a utilização do MIP para o controle da *G. molesta* na cultura do pessegueiro. Para isto, na próxima subseção veremos os métodos de controle para a *G. molesta* que podem ser adotados e quais serão implementados posteriormente neste trabalho.

3.1.3 Técnicas para o Controle da *Grapholita molesta*

Para o controle da mariposa oriental, normalmente são utilizadas aplicações preventivas de inseticidas, sem que seja levada em conta a população da praga nos pomares (Botton et al., 2011). Esta técnica precisa ser revista devido aos seguintes motivos:

- As pulverizações preventivas podem resultar na aplicação de inseticidas quando a população de insetos não caracteriza uma praga, ou seja, quando está abaixo do Limiar Econômico, ocorrendo desperdício de produtos e contaminação ambiental;
- Os inseticidas mais utilizados são os de amplo espectro e eliminam também os inimigos naturais das pragas, causando a ocorrência de pragas secundárias;
- Os consumidores estão exigindo cada vez mais frutas produzidas com qualidade e baixo uso de agrotóxicos, visando preservar a saúde humana e o ambiente.

Desta forma, informações sobre o manejo da mariposa oriental nos pomares de pessegueiro são de fundamental importância para os produtores. O MIP tem como princípio a preservação e o aumento do controle biológico natural nos pomares, o monitoramento das pragas e dos inimigos naturais, o uso de métodos alternativos ao controle químico e, quando necessário, a utilização racional de inseticidas (Botton et al., 2011). Levando em consideração estes aspectos, vamos considerar as seguintes técnicas de controle para a *G. molesta*:

- **Controle Biológico:** é feito através da liberação artificial de parasitoides de ovos (*Trichogramma pretiosum*) e de parasitoides de lagartas (*Macrocentrus ancyliivorus*), visando à redução da população da grafolita. Esta técnica já foi abordada no Capítulo 1.
- **Controle Químico:** é o tipo de controle mais utilizado nos pomares de pêssegos. É feito através da pulverização de inseticidas de alta toxicidade, como os fosfarados e peritroides, que são de amplo espectro, ou seja, afetam todas as espécies de insetos e mamíferos presentes no ambiente, sendo deste tipo a grande maioria dos inseticidas comercializados. Por causa dos danos ambientais causados pela ampla utilização desse tipo de inseticidas, estudos foram feitos para desenvolver inseticidas seletivos, ou seja, que atacam apenas a praga em questão (Arioli et al., 2004; Arioli et al., 2007). Para isso foram pesquisados lagarticidas específicos (Arioli et al., 2004) e inseticidas neonicotinoides, que apresentam baixa toxicidade a mamíferos, seletividade a importantes espécies de inimigos naturais, estratégia anti-resistência e reduzida carência (Capella et al., 2004; Arioli et al., 2007). Nessas pesquisas foi comprovada a eficiência desses inseticidas seletivos no controle da *Grapholita molesta*; muitas vezes com baixas doses o efeito foi equivalente ao obtido com inseticidas como os fosfarados (Arioli et al., 2007). Contudo, esses novos inseticidas ainda não estão sendo comercializados para o controle da mariposa oriental, pois não estão registrados no AGROFIT-MAPA (2014/2015).
- **Controle com Feromônio Sexual Sintético:** o emprego da técnica de interrupção do acasalamento (disrupção sexual) feita através da liberação de feromônio sexual sintético é considerada promissora (Botton et al., 2005b; Pastori et al., 2012; Santana, 2012; Arioli et al., 2013). Nos Estados Unidos, desde a década de 80, pesquisas têm mostrado que a liberação de feromônio sexual sintético em altas concentrações na cultura, tem se mostrado efetivo em testes de campo (Seaman and Riedl, 1988). Atualmente, dois produtos compostos por feromônios da grafolita estão sendo comercializados para a cultura do pessegueiro: Biolita[®] e Splat Grafo[®] (Arioli et al., 2013; AGROFIT-MAPA, 2014/2015). O Splat Grafo é constituído por uma substância pastosa, que pode ser aplicada de diferentes formas nos galhos do pessegueiro, e que vai liberando feromônio sexual semelhante ao liberado pelas

fêmeas da grafolita. A concentração de feromônios liberada é alta, confundindo os machos, impedindo assim que o inseto cumpra seu ciclo reprodutivo, diminuindo a população e conseqüentemente os danos ao pomar. Esses produtos também são indicados para o controle da grafolita em pomares de maçãs, peras, nectarinas, ameixas, dentre outras rosáceas. Em pomares de maçãs, foram feitos experimentos com os produtos da marca Cetro[®] e SPLAT Grafo+Bona[®], para o controle da grafolita (Santana et al., 2012; Pastori et al., 2012; Arioli et al., 2013).

Para o Manejo Integrado de Pragas, deseja-se utilizar produtos respeitando a integridade da natureza, focando os melhores resultados na detecção, prevenção e controle da praga. Estratégias para aumentar o uso de métodos alternativos ao controle químico no manejo de pragas são uma necessidade. Com esse intuito, o emprego de feromônios sexuais sintéticos para o manejo de lepidópteros-praga, na fruticultura no Brasil, está sendo amplamente pesquisado (Santana, 2012; Pastori et al., 2012; Arioli et al., 2013; Arioli et al., 2014). Técnicas de atração por feromônios sexuais sintéticos e armadilhamento, utilizadas largamente na Europa e nos EUA, onde a agricultura atinge níveis de alto desenvolvimento tecnológico, vem sendo introduzidas na agricultura brasileira para variadas culturas.

Neste capítulo, iniciaremos por abordar a aplicação de apenas uma técnica de controle, e posteriormente construiremos um modelo para o MIP utilizando a combinação das técnicas de liberação artificial de parasitoides e de controle químico através de inseticidas seletivos. Após introduzir uma estrutura espacial no Capítulo 4, abordaremos nos Capítulos 5 e 6 a técnica de interrupção do acasalamento, utilizando feromônios sexuais sintéticos.

3.2 Monitoramento da *Grapholita molesta* e o Nível de Controle

O monitoramento de pragas permite definir o momento em que a espécie deve ser controlada. Além disso, pode delimitar as áreas críticas do pomar, isto é, onde está ocorrendo a maior infestação da praga. Este conhecimento pode ajudar na administração de medidas de controle, priorizando os locais onde as populações da praga são mais elevadas. No caso do cultivo do pessegueiro, o monitoramento da *G. molesta* poderá resultar em menor número de aplicações de inseticidas, reduzindo assim o custo de produção, o impacto ambiental e o risco à saúde do consumidor. Além disso, contribuirá para a obtenção de um produto final de maior qualidade com ausência, ou baixos níveis de resíduos de inseticidas (Botton et al., 2011).

O monitoramento da *G. molesta* nos pomares é feito com a utilização de armadilhas Delta (que pode ser observada na Figura 3.1¹) contendo feromônio sexual sintético (Arioli

¹<http://www.agrolink.com.br>, acessado em 13/09/2014.

et al., 2006; Botton et al., 2001) ou por meio de atrativos alimentares (Campos e Garcia, 2000). O feromônio sexual é equivalente ao odor natural que as fêmeas liberam no ambiente para atrair os machos para o acasalamento, é uma mistura de isômeros Z-8-dodecenil acetato, E-8-Dodecenil acetato e Z-8-dodecenol (Botton et al., 2001; Arioli et al., 2005).

Campos e Garcia (2001) buscaram identificar atrativos alimentares para o monitoramento da mariposa oriental. Eles utilizaram sucos de pêssego, uva e maracujá e melado de cana, concluindo que o melado de cana era mais eficiente na captura de adultos da mariposa. Contudo, o uso de atrativos alimentares no monitoramento apresenta desvantagens, pois não é seletivo para a espécie e degrada facilmente, enquanto que o uso de armadilhas com feromônio sexual é específico, logo mais eficiente na detecção da mariposa oriental (Botton, 1999).



Figura 3.1: Armadilha Delta empregada para o monitoramento da *Grapholita molesta*.

A armadilha Delta é fixada em plantas no interior do pomar, numa altura de 1,6m a 1,8m em um local livre de ramos para que não ocorra a interferência na liberação do odor. Em pomares pequenos utiliza-se no mínimo duas armadilhas por pomar. A instalação das armadilhas no pomar deve ser feita antes do voo dos primeiros adultos oriundos das lagartas que passaram o inverno em diapausa, no início do período de brotação (agosto) (Botton et al., 2011). É indicado que se faça a avaliação das armadilhas semanalmente, contando-se o número de insetos da mariposa oriental capturados, os quais devem ser retirados da armadilha (Botton et al., 2011).

A determinação de um nível de controle é fundamental para estabelecer uma máxima rentabilidade ao produtor com um mínimo de intervenções para o controle da praga (Grasseli, 2009). O nível de controle indicado para iniciar as intervenções sobre a *G. molesta* pode variar. Segundo Fachinello e Herter (2000), seria quando forem capturados 40 adultos/armadilha/semana. Já Nunes et al. (2003), definiram como 30 insetos/armadilha/semana o nível de controle para a intervenção química.

A recomendação atual é que o controle químico seja feito somente quando a captura de indivíduos ultrapassar 20 machos/armadilha/semana, podendo assim reduzir o número de aplicações (Salles, 1991; Farias et al., 2003). Contudo, há pesquisas que comprovam

que mesmo sendo baixa a captura de insetos pelas armadilhas com feromônio, os danos em frutos podem ser altos (Poltronieri et al., 2008; Guerra et al., 2007).

Salles (1991) acredita que os frutos maduros, ou em fase de maturação oferecem uma maior atratividade aos insetos em relação ao feromônio sintético. Para Afonso et al. (2002), a preferência da grafolita por determinadas variedades de pessegueiros pode contribuir para a ausência de relação entre os níveis de capturas nas armadilhas e os reais danos encontrados nos ponteiros e frutos.

3.3 Modelos para o Controle da *Grapholita molesta*

Nesta seção, desenvolveremos três modelos matemáticos para o manejo da *G. molesta*, considerando a liberação artificial de parasitoides e aplicação de inseticidas, a saber:

1. Controle químico com inseticidas de amplo espectro, pois ainda é o controle mais utilizado pelos produtores;
2. Controle biológico através da liberação, tanto de parasitoides de lagartas *M. ancyli-vorus*, quanto de parasitoides de ovos *T. pretiosum*;
3. Controle integrado através da utilização de inseticidas seletivos (que não estão no mercado ainda) e da liberação de parasitoides de lagartas *M. ancyli-vorus*.

As técnicas de controle serão aplicadas quando a população de pragas atingir ou ultrapassar o Limiar Econômico (LE); caso contrário continuará valendo a dinâmica sem a intervenção humana, dada pelo modelo básico I (2.2), com os parâmetros estabelecidos na Tabela 2.2, e adotando as condições iniciais estabelecidas na Tabela 2.3.

Caso I: Aplicação de Inseticida de Amplo Espectro

Neste caso, quando a população de adultos atingir ou ultrapassar o LE, teremos o seguinte modelo para o controle:

$$\begin{cases} v(t^+) = (1 - m_1)v(t), \\ l(t^+) = (1 - m_2)l(t), \\ n(t^+) = (1 - m_3)n(t), \\ s(t^+) = (1 - m_4)s(t), \\ p(t^+) = (1 - m_5)p(t), \end{cases} \quad (3.1)$$

onde $v(t^+)$, $l(t^+)$, $n(t^+)$, $s(t^+)$ e $p(t^+)$ denotam o número de ovos, lagartas, fêmeas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, respectivamente, após cada aplicação do controle químico, no tempo t . No modelo (3.1) $0 \leq m_i < 1$, $i = 1, \dots, 5$, é a proporção pela qual a densidade das populações é reduzida por morte devido à aplicação de inseticidas de amplo espectro, uma vez que a população de adultos atingiu o LE.

Caso II: Liberação de Parasitoides de Ovos e de Parasitoides de Lagartas

Neste caso, quando a população de adultos atingir ou ultrapassar o LE, será feita a liberação artificial de ambos os parasitoides. Logo, o modelo para o controle será da forma:

$$\begin{cases} v(t^+) = v(t), \\ l(t^+) = l(t), \\ n(t^+) = n(t), \\ s(t^+) = s(t) + \eta, \\ p(t^+) = p(t) + \tau, \end{cases} \quad (3.2)$$

onde $v(t^+)$, $l(t^+)$, $n(t^+)$, $s(t^+)$ e $p(t^+)$ denotam o número de ovos, lagartas, fêmeas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, respectivamente, após cada aplicação do controle biológico, no tempo t . No modelo (3.2), $\eta \geq 0$ e $\tau \geq 0$ são os números constantes de parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, respectivamente, liberados no tempo t , cada vez que a população de adultos atingir o LE.

Caso III: MIP com Liberação de Ambos os Parasitoides e Aplicação de Inseticidas Seletivos

Neste caso, quando a população de adultos atingir ou ultrapassar o LE, teremos o controle integrado:

$$\begin{cases} v(t^+) = (1 - m_1)v(t), \\ l(t^+) = (1 - m_2)l(t), \\ n(t^+) = (1 - m_3)n(t), \\ s(t^+) = s(t) + \eta, \\ p(t^+) = p(t) + \tau, \end{cases} \quad (3.3)$$

onde $v(t^+)$, $l(t^+)$, $n(t^+)$, $s(t^+)$ e $p(t^+)$ denotam o número de ovos, lagartas, fêmeas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, respectivamente, após cada aplicação do controle integrado, no tempo t . No modelo (3.3) $0 \leq m_i < 1$, $i = 1, \dots, 3$, é a proporção pela qual a densidade de ovos, lagartas e adultos, respectivamente, é reduzida por morte devido à aplicação de inseticidas seletivos, uma vez que a população de adultos atingiu o LE. Além disso, $\eta \geq 0$ e $\tau \geq 0$ representa o número constante de parasitoides de ovos e de parasitoides de lagartas, respectivamente, liberados no tempo t .

Nas próximas subseções faremos simulações numéricas com cada caso separadamente e após compararemos os resultados obtidos.

3.3.1 Simulações com apenas uma Técnica de Controle: Casos I e II

Nesta subseção, faremos simulações numéricas aplicando apenas uma técnica de controle para a *Grapholita molesta*: aplicação de inseticida (Caso I) ou liberação de parasitoides (Caso II).

O LE foi escolhido de acordo com os dados da literatura, a saber: quando forem capturados 20 insetos/armadilha/semana é indicado que se faça uma intervenção a fim de controlar o inseto. Em nosso modelo básico I, consideramos somente a população de fêmeas adultas, mas supondo que o número de machos e de fêmeas seja aproximadamente o mesmo, podemos utilizar o LE em relação à população de fêmeas adultas, ou seja, quando a população de fêmeas adultas atingir o número de 20 indivíduos, aplicaremos uma medida de controle. Logo, $LE = 0,2$ (em centenas de insetos).

Aplicação de Inseticida de Amplo Espectro

Consideramos o modelo (3.1) (Caso I) quando a população de adultos atingir o $LE = 0,2$. Na Figura 3.2, consideramos a aplicação de um inseticida que mata 95% dos adultos da mariposa ($m_3 = 0,95$), que é o normal entre os inseticidas peritroides e fosfarados, amplamente utilizados no controle da mariposa oriental (Botton et al., 2011). Além disso, tem-se da literatura que esses inseticidas estão na Classe 3 (prejudicial significa com mortalidade maior que 75%) de toxicidade para os inimigos naturais benéficos, como é o caso dos parasitoides que consideramos no modelo. Desta forma, escolhemos $m_4 = 0,8$ e $m_5 = 0,9$, contemplando assim a morte dos parasitoides pela ação do inseticida.

Iniciamos supondo que o inseticida elimine 60% dos ovos e 60% das lagartas em cada aplicação (Figura 3.2 (a)), em seguida, aumentamos essa quantidade de ovos e lagartas eliminados até atingirmos a quantidade de 90% de mortalidade cada. A escala temporal utilizada equivale a um período de 180 dias (220 etapas de tempo adimensionais), que é aproximadamente a duração da época em que as mariposas são registradas nas plantações (agosto a janeiro).

Quando supomos que a mortalidade de ovos e de lagartas é baixa em relação à mortalidade de adultos (Figura 3.2 (a)), foram necessárias 21 aplicações de inseticida, enquanto que, quando a mortalidade é alta (Figura 3.2 (d)), 15 aplicações foram necessárias para manter a praga abaixo do LE . Além disso, na Figura 3.2 (a) notamos que a população de lagartas não decai até o nível mais baixo imediatamente após a aplicação do inseticida; entretanto, na Figura 3.2 (d), o decaimento foi praticamente imediato. Interpretamos este fato como decorrente da eficácia do inseticida sobre as populações de ovos e lagartas que é maior em (d) do que em (a).

Na Figura 3.3, observamos que o tempo entre cada aplicação varia, aumentando com o acréscimo da quantidade de ovos e lagartas mortas pelo inseticida (eficácia do

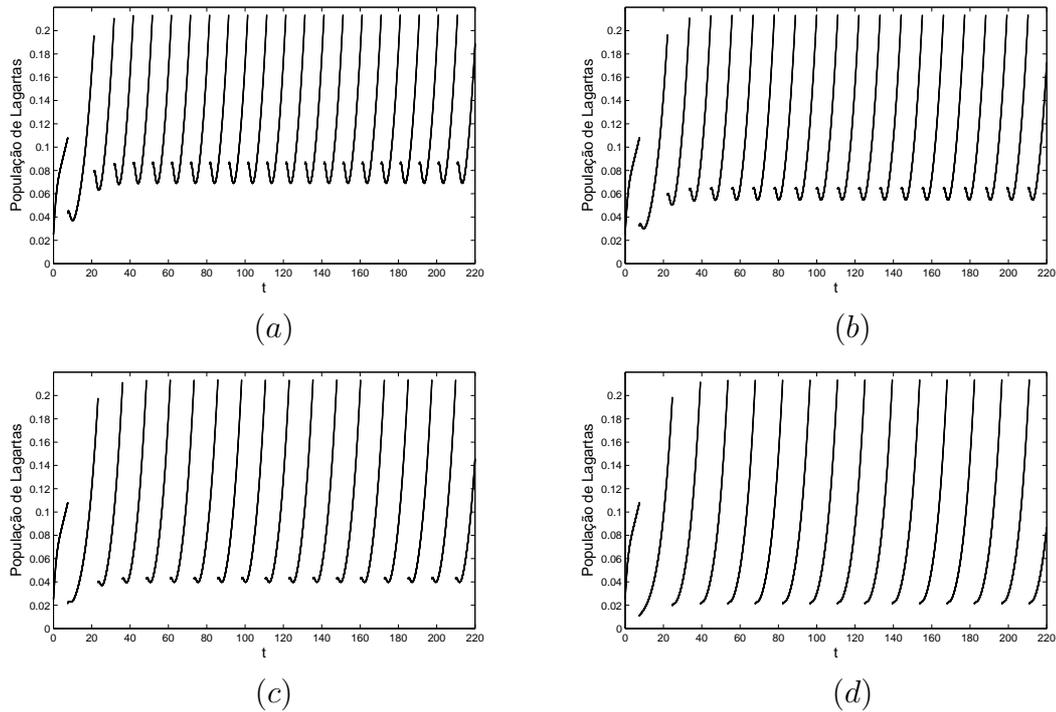


Figura 3.2: Evolução temporal da população de lagartas com aplicação de inseticida de amplo espectro quando: $LE = 0,2$, $m_3 = 0,95$, $m_4 = 0,8$, $m_5 = 0,9$; (a) $m_1 = m_2 = 0,6$, (b) $m_1 = m_2 = 0,7$, (c) $m_1 = m_2 = 0,8$ e (d) $m_1 = m_2 = 0,9$.

inseticida sobre ovos e lagartas). Isso fica evidenciado nos gráficos para o período de tempo entre as aplicações, na Figura 3.3. Após os transientes iniciais, as aplicações tornaram-se aparentemente periódicas, como também foi comprovado por Tang e Cheke (2008), Tang e Chen (2004) e Tang et al. (2005) em modelos predador-presa e parasitoide-hospedeiro.

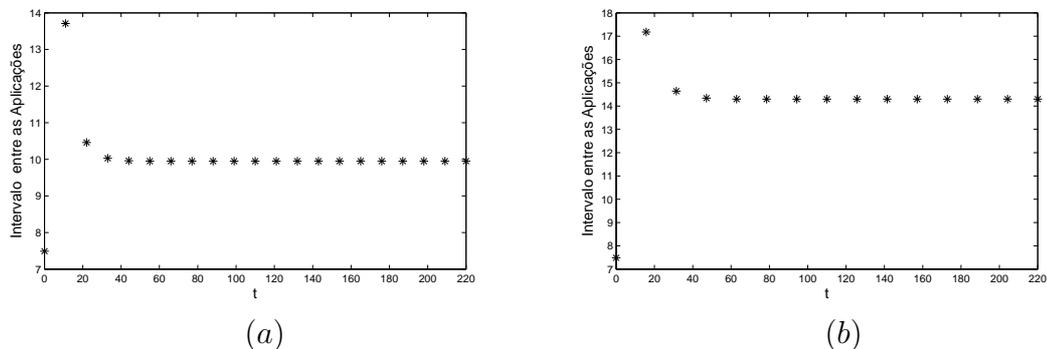


Figura 3.3: Intervalo de tempo entre as aplicações de inseticida, (a) referente à Figura 3.2 (a) e (b) referente à Figura 3.2 (b).

Na Figura 3.3 (a), observamos que a primeira aplicação de inseticida foi feita no tempo $t = 7,5$, que é equivalente a 6 dias. Após os transientes iniciais, as aplicações foram

feitas a cada 10 instantes de tempo, o que é equivalente a 8,2 dias. Na Figura 3.3 (b), após os transientes iniciais, as aplicações foram feitas a cada 14,5 instantes de tempo, o que equivale a 12 dias. Com isso, concluímos que quanto maior a eficácia do inseticida nas três fases de vida da mariposa oriental, menor será a quantidade de aplicações necessárias para mantê-la abaixo do LE. Os resultados obtidos estão em conformidade com o que ocorre na prática, pois nos pomares as aplicações de inseticidas são feitas em intervalos de 10 a 15 dias (Arioli et al, 2004).

Na Figura 3.4, apresentamos a evolução temporal das demais populações, sob o efeito de um inseticida de amplo espectro. Os ovos apresentam comportamento semelhante ao das lagartas, as mariposas adultas são reduzidas toda vez que atingem o LE a níveis baixos. Contudo, como já era esperado, os parasitoides se extinguem, pois o inseticida é muito nocivo para os inimigos naturais da praga.

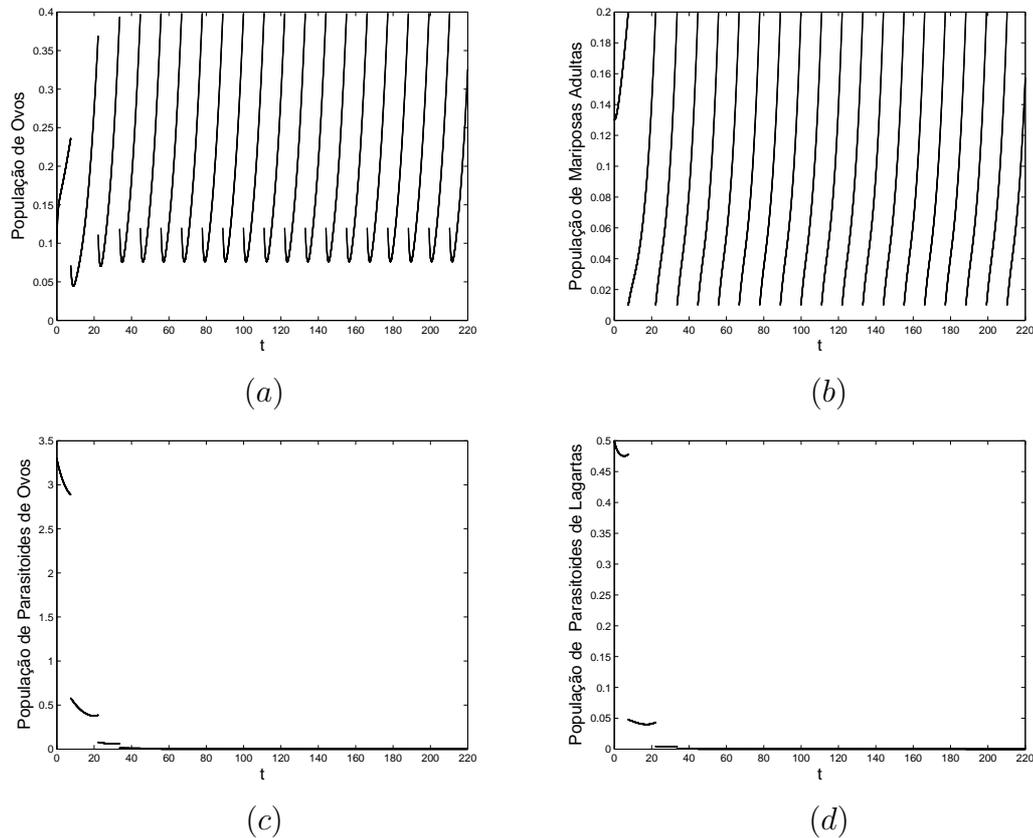


Figura 3.4: Evolução temporal das populações de: (a) ovos, (b) mariposas adultas, (c) parasitoides de ovos e (d) parasitoides de lagartas, com aplicação de inseticida de amplo espectro, referentes à Figura 3.2 (b).

Atualmente, há 14 produtos com registro no AGROFIT-MAPA (2014/2015) que podem ser utilizados para o controle da mariposa oriental na cultura do pessegueiro. Destes 14 produtos, a maioria são inseticidas químicos de amplo espectro e altamente tóxicos para outros insetos que vivem nos pomares e outros tipos de animais. Assim,

a busca por produtos menos tóxicos ou pela maior utilização de controle biológico é de grande relevância para a preservação ambiental e para a produção de frutas mais saudáveis aos seres humanos.

Liberação de Parasitoides de Ovos

Considerando o modelo (3.2) (denominado Caso II), avaliaremos os efeitos da liberação constante de parasitoides de ovos η , quando a população de mariposas adultas atingir ou ultrapassar o $LE = 0,2$. Na Figura 3.5, apresentamos a evolução temporal da população de lagartas quando aumentamos gradativamente a quantidade de parasitoides de ovos liberada, e mantemos fixada em $\tau = 0$ a liberação de parasitoides de lagartas.

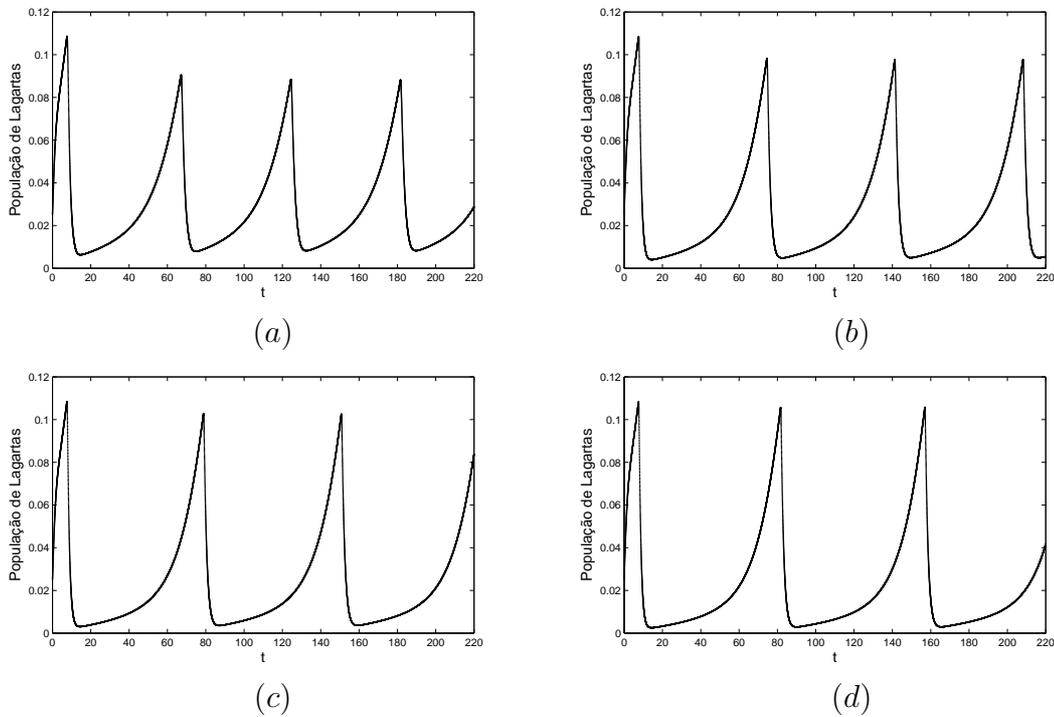


Figura 3.5: Evolução temporal da população de lagartas com liberação de parasitoides de ovos quando $LE = 0,2$, $\tau = 0$ e (a) $\eta = 0,25$; (b) $\eta = 0,5$; (c) $\eta = 0,75$; (d) $\eta = 1$.

Na Figura 3.5, observamos que à medida que a quantidade de parasitoides liberados aumenta, a população de lagartas é reduzida a níveis um pouco menores após cada intervenção, mas também ao recuperar-se atinge níveis maiores até a próxima intervenção ser aplicada. Uma grande quantidade de parasitoides (liberação inundativa), para poucos hospedeiros causa o que conhecemos como superparasitismo, tornando possível que a praga atinja níveis mais elevados quando se recuperar (Tang and Cheke, 2008). Além disso, a população de lagartas não decai imediatamente quando são liberados os parasitoides (o decaimento é gradativo).

Observamos que o tempo entre cada aplicação aumenta com o acréscimo de parasitoides liberados. Isso fica evidenciado nos gráficos para o período de tempo entre as aplicações, apresentados na Figura 3.6. Concluimos que com o controle biológico menos aplicações foram necessárias para manter a praga abaixo do LE, comparado com a quantidade de aplicações de inseticidas necessárias (ver Figura 3.2).

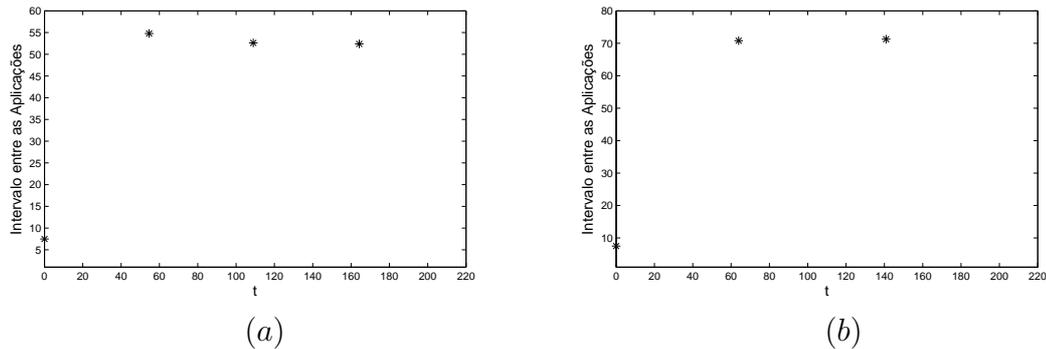


Figura 3.6: Intervalo de tempo entre as liberações de parasitoides de ovos, (a) referente à Figura 3.5 (a) e (b) referente à Figura 3.5 (b).

O controle biológico feito através da liberação constante de parasitoides de ovos, foi eficiente para o controle da *G. molesta* do ponto de vista que reduz a população após cada intervenção. Contudo, os níveis em que as lagartas atingem, após cada liberação de parasitoides, foram altos em comparação com o controle químico. Outro ponto positivo deste controle foi que o período de tempo entre as intervenções foi grande.

Liberação de Parasitoides de Lagartas

Analisaremos os efeitos da liberação constante de parasitoides de lagartas (Caso II) em relação às lagartas da mariposa oriental, toda vez que a população de adultos da mariposa atingir o LE. Um parasitoide *M. ancyliivorus* tem a capacidade de parasitar até 50 lagartas, como visto anteriormente. Logo, liberaremos baixas quantidades desse parasitoide, considerando τ em centenas de insetos.

Na Figura 3.7, em (a) observamos que com a liberação de 1 parasitoide por planta (visto que estamos considerando o modelo local), foram necessárias 6 liberações durante o ciclo de vida da mariposa. Conforme aumentamos para 10 parasitoides em (b), foram necessárias apenas 4 liberações. Contudo, quando a quantidade de parasitoides liberada foi alta em relação ao número de lagartas, conforme os gráficos (c) e (d), observamos que uma maior quantidade de parasitoides liberada não fez tanta diferença em relação a uma quantidade menor (se compararmos (a) com (b) e (c) com (d)). O superparasitismo ocorreu também quando liberamos muitos parasitoides de ovos (Figura 3.5). A liberação inundativa de parasitoides não teve o efeito benéfico no controle da praga como seria

esperado.

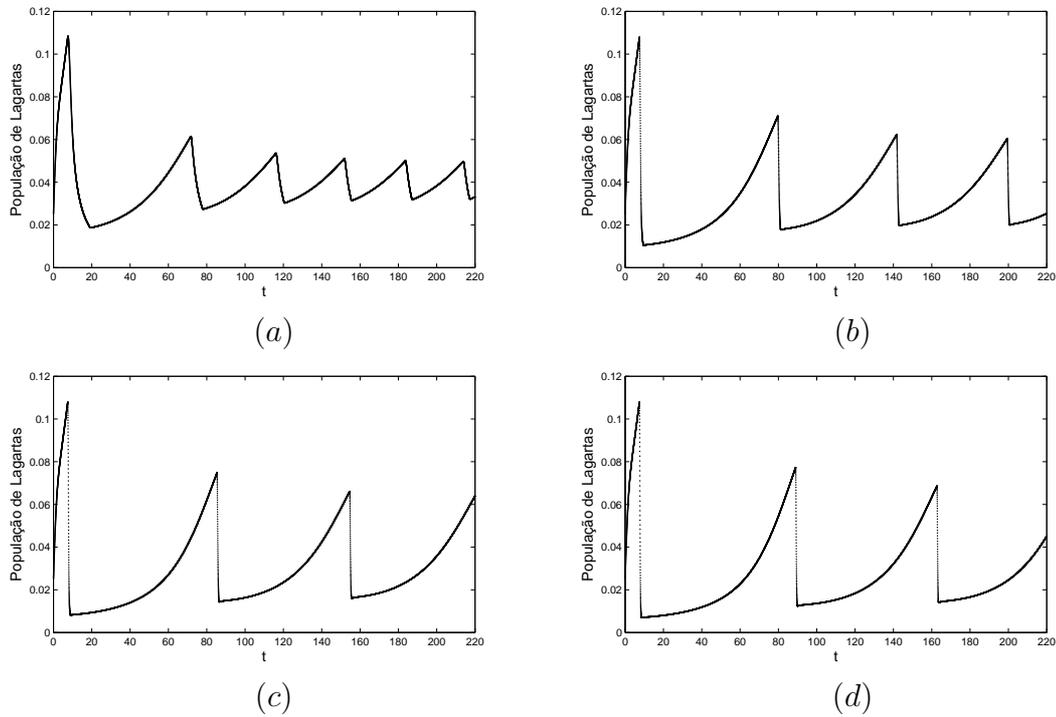


Figura 3.7: Evolução temporal da população de lagartas com liberação de parasitoides de lagartas quando: $LE = 0,2$, $\eta = 0$ e (a) $\tau = 0,01$; (b) $\tau = 0,1$; (c) $\tau = 0,2$; (d) $\tau = 0,3$.

O intervalo de tempo entre cada aplicação é apresentado na Figura 3.8, na qual, observamos que com baixa liberação de parasitoides, o intervalo de tempo entre as aplicações foi menor (a), aumentando a liberação de parasitoides, o intervalo de tempo aumenta bastante (c). Contudo, esse intervalo passa a variar pouco quando a quantidade de parasitoides liberada foi alta em relação à quantidade de lagartas a serem parasitadas (comparar (c) com (d)).

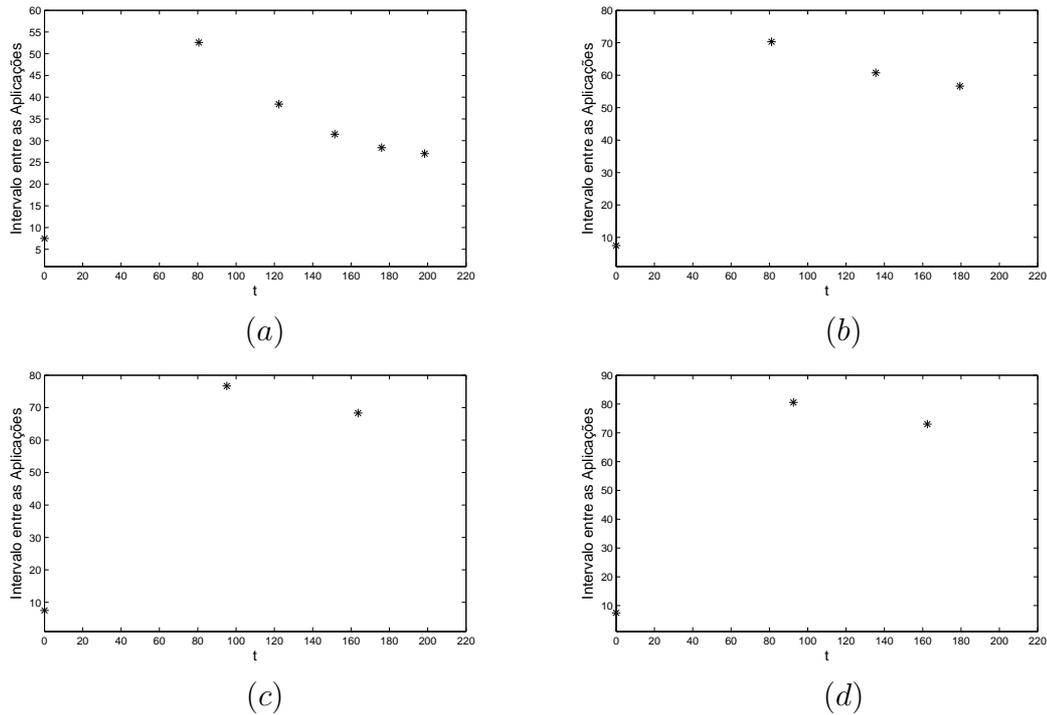


Figura 3.8: Intervalo de tempo entre as liberações de parasitoides, (a) referente à Figura 3.7 (a); (b) referente à Figura 3.7 (b); (c) referente à Figura 3.7 (c); (d) referente à Figura 3.7 (d).

Liberação de Parasitoides de Ovos e de Parasitoides de Lagartas

Analisaremos agora a atuação da liberação conjunta de ambos os parasitoides (Caso II). Inicialmente, na Figura 3.9, apresentamos a evolução temporal da população de lagartas quando fixamos a liberação de parasitoides de lagartas em $\tau = 0, 1$ e variamos a liberação de parasitoides de ovos. Na Figura 3.10, são apresentados os resultados de quando fixamos a liberação de parasitoides de ovos em $\eta = 0, 5$ e variamos a liberação de parasitoides de lagartas. Observamos comportamentos quase iguais em ambos casos, o que não ocorria quando apenas um dos parasitoides era liberado. A atuação conjunta dos dois parasitoides gerou resultados melhores no controle da praga, visto que, com pequenas quantidades liberadas de cada um, a praga pôde ser controlada.

Na Figura 3.11, apresentamos a evolução temporal das demais populações quando são liberados ambos os tipos de parasitoides. Neste caso, a população de ovos apresenta comportamento semelhante ao que ocorre com as lagartas, as mariposas adultas se reduzem mais lentamente ao liberarmos parasitoides, como ocorria quando se aplicava o inseticida. Isto ocorre pois os parasitoides atacam diretamente os ovos e lagartas, provocando a diminuição das mariposas adultas como consequência. Os parasitoides atingem níveis altos quando liberados, mas acabam decaindo até a próxima liberação.

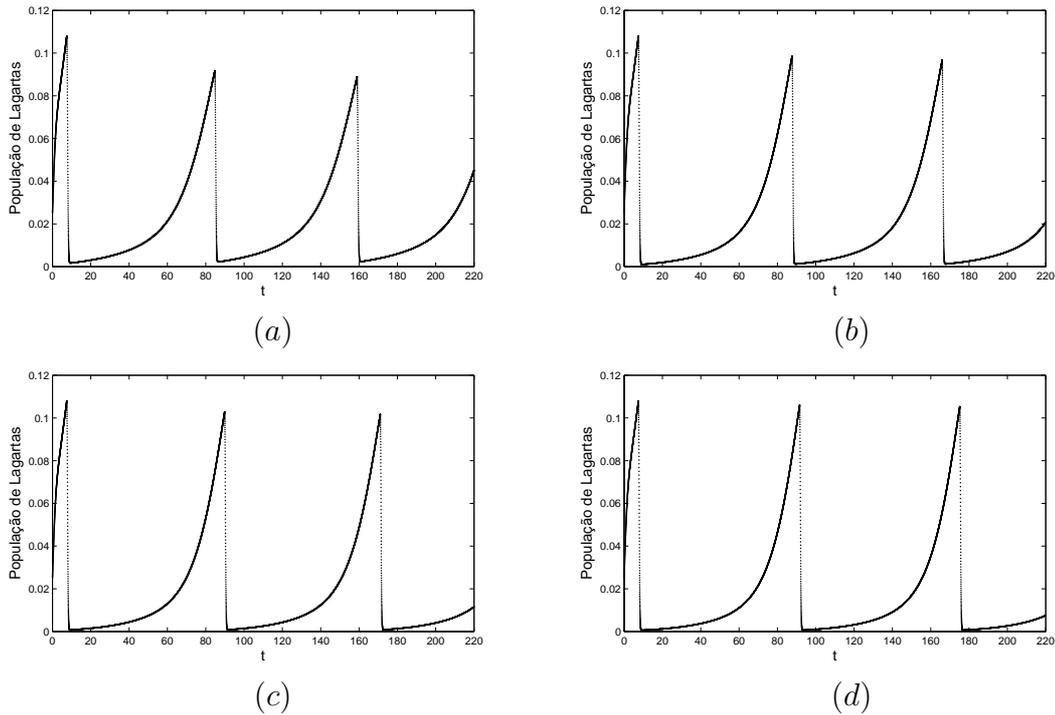


Figura 3.9: Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de parasitoides de lagartas e variando a liberação de parasitoides de ovos quando: $LE = 0, 2$, $\tau = 0, 1$ e (a) $\eta = 0, 25$; (b) $\eta = 0, 5$; (c) $\eta = 0, 75$; (d) $\eta = 1$.

Comentários Gerais sobre a Utilização de apenas uma Técnica de Controle

Separadamente, o controle biológico (liberação de parasitoides de ovos, parasitoides de lagartas ou ambos) e o controle químico (pulverização de inseticida de amplo espectro) foram eficientes na redução da população da praga. Mas cada um possui pontos positivos e pontos negativos, como resumimos a seguir:

- **Controle Biológico: Pontos positivos** - Poucas intervenções foram necessárias, conseqüentemente o intervalo de tempo entre as intervenções foi grande; os parasitoides não se extinguem;
- **Controle Biológico: Pontos negativos** - A população da praga cresceu a níveis maiores após cada intervenção, conforme aumentamos a quantidade de parasitoides liberados e o declínio da população de lagartas não foi imediato após a liberação dos parasitoides;
- **Controle Químico: Pontos positivos** - A população da praga foi reduzida a níveis bem baixos conforme aumentamos a proporção de mortes pelo inseticida (aumento da quantidade de inseticida), além disso os níveis de recuperação da praga foram menores em relação ao controle biológico;

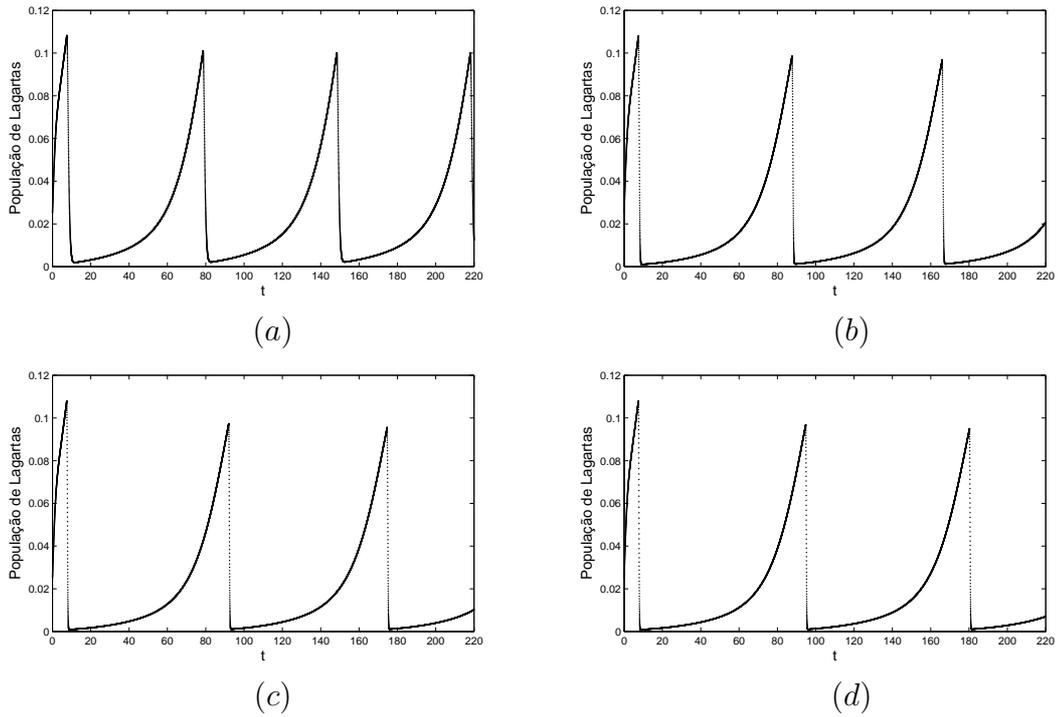


Figura 3.10: Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de parasitoides de ovos e variando a liberação de parasitoides de lagartas quando: $LE = 0,2$, $\eta = 0,5$ e (a) $\tau = 0,01$; (b) $\tau = 0,1$; (c) $\tau = 0,2$; (d) $\tau = 0,3$.

- **Controle Químico: Pontos negativos** - Muitas aplicações de inseticida foram necessárias para controlar a praga e o período de tempo entre as aplicações foi relativamente pequeno, se comparado ao controle biológico. Além disso, ambos os parasitoides são extintos, devido ao efeito nocivo que o inseticida exerce sobre eles.

Diante desses pontos positivos e negativos entre os controles biológico e químico, avaliaremos na próxima subseção a eficiência do MIP no controle da *Grapholita molesta*.

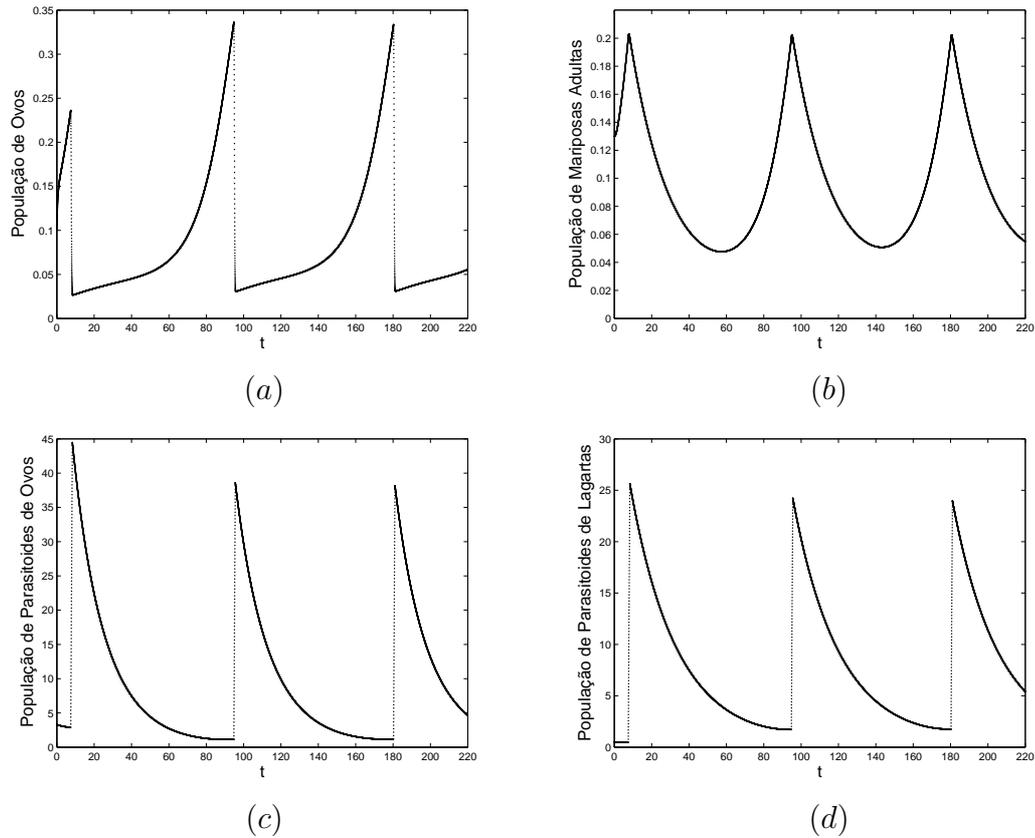


Figura 3.11: Evolução temporal das populações com liberação de ambos os tipos de parasitoides: (a) ovos, (b) mariposas adultas, (c) parasitoides de ovos e (d) parasitoides de lagartas, referente à Figura 3.10 (d).

3.3.2 Simulações com o Controle Integrado: Caso III

Nesta subseção, utilizando o modelo (3.3), avaliamos o desempenho do MIP no controle da *Grapholita molesta* e comparamos com os resultados obtidos com a utilização de apenas uma técnica de controle. No modelo (3.3), toda vez que a população de adultos atingir o LE , consideramos que uma fração do total de ovos, lagartas e mariposas adultas, é eliminada devido à aplicação de um inseticida seletivo, ou seja, que ataca somente as fases de vida da praga, em diferentes proporções, sem prejudicar os parasitoides. Além disso, ocorre a liberação de uma quantidade constante de parasitoides de ovos e de parasitoides de lagartas. Nosso objetivo foi avaliar como a variação na eficácia do inseticida sobre cada fase de vida da mariposa oriental, ou seja, quantidade de ovos, lagartas e adultos eliminados, e como a variação na quantidade de parasitoides liberados, influencia no controle da praga.

Na Figura 3.12, apresentamos os resultados quando supomos que o inseticida seja um lagartocida ($m_2 = 0,85$), por isso não mata os ovos ($m_1 = 0$), e é pouco prejudicial aos adultos ($m_3 = 0,5 < 0,75$). Fixamos a liberação de parasitoides de ovos em $\eta = 1$ e variamos a liberação de parasitoides de lagartas.

Conforme a quantidade de parasitoides de lagartas liberados aumenta, menos aplicações do MIP foram necessárias, e a população de lagartas foi reduzida sempre para a mesma quantidade após cada aplicação do MIP. Além disso, ao recuperar-se, atingiu proporções menores conforme a quantidade de parasitoides de lagartas aumentou. Através da forma das curvas que representam a população de lagartas, concluímos que ocorre um decréscimo instantâneo após cada aplicação, e depois de uma breve recuperação, ainda ocorre um decréscimo menor, que acreditamos ser devido ao efeito não imediato do parasitoidismo.

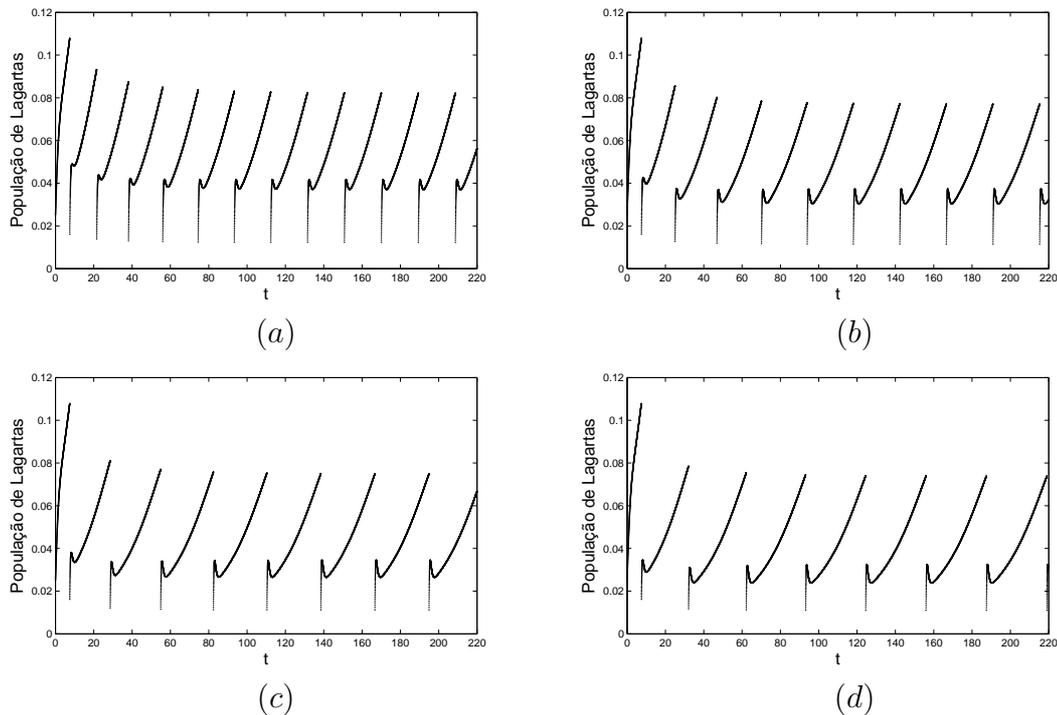


Figura 3.12: Evolução temporal da população de lagartas fixada a quantidade de inseticida aplicado, a liberação de parasitoides de ovos e variando a liberação de parasitoides de lagartas, quando: $LE = 0,2$, $m_1 = 0$, $m_2 = 0,85$, $m_3 = 0,5$, $\eta = 1$ e (a) $\tau = 0,5$; (b) $\tau = 1$; (c) $\tau = 1,5$; (d) $\tau = 2$.

Na Figura 3.13, apresentamos o intervalo de tempo entre cada aplicação do MIP, o qual aumentou significativamente a medida que a liberação de parasitoides aumentou. Isso é uma vantagem, pois menos aplicações acarretam menores gastos com inseticida e com a liberação de parasitoides. Além disso, após os transientes iniciais as aplicações tornaram-se periódicas, como foi observado anteriormente, e também por Tang et al. (2008) para um modelo predador-presa.

Não apresentamos simulações variando a liberação de parasitoides de ovos η , e fixando os demais parâmetros, pois o comportamento foi muito semelhante ao apresentado nas Figuras 3.12 e 3.13. Na Figura 3.14, apresentamos a evolução temporal da população de lagartas quando fixamos a liberação dos parasitoides de ovos em $\eta = 1$, dos parasitoides

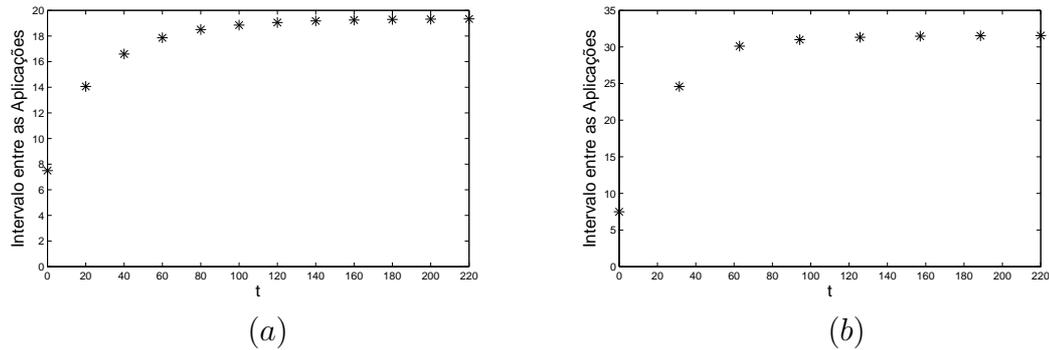


Figura 3.13: Intervalo de tempo entre as aplicações do MIP, (a) referente à Figura 3.12 (a); (b) referente à Figura 3.12 (d).

de lagartas em $\tau = 1$, supomos que os ovos não são atingidos pelo inseticida e que a proporção de lagartas mortas em cada aplicação é $m_2 = 0,85$. Queremos avaliar como a variação na proporção de mariposas adultas mortas pelo inseticida influencia no manejo da praga.

Quando poucas mariposas adultas foram eliminadas (baixa eficácia do inseticida sobre as mariposas adultas) (Figura 3.14 (a)), um grande número de aplicações foi necessário, mas a população de lagartas ao recuperar-se atingiu níveis menores em comparação com o caso em que o inseticida foi considerado moderadamente prejudicial para as mariposas adultas (Figura 3.14 (d)). Neste caso, menos aplicações do MIP foram necessárias, mas as lagartas atingiram níveis maiores ao recuperarem-se. Além disso, como também observado na Figura 3.12, conforme aumentamos a quantidade de mariposas adultas eliminadas pelo inseticida, ocorreu um pequeno decréscimo secundário na população de lagartas, retardando a recuperação das mesmas a níveis considerados prejudiciais.

Na Figura 3.15, observamos que o intervalo de tempo entre cada aplicação do MIP aumentou consideravelmente conforme a quantidade de mariposas adultas eliminadas pelo inseticida aumentou, tornando-se periódico após os transientes iniciais.

Na Figura 3.16, apresentamos a evolução temporal da população de lagartas quando variamos a taxa de mortalidade de ovos, após cada aplicação do MIP, e fixamos os demais parâmetros. Observamos que não ocorrem grandes mudanças conforme a quantidade de ovos eliminados pelo inseticida aumentou, a quantidade de intervenções foi a mesma e a população de lagartas recuperou-se ao mesmo nível após cada aplicação. Uma mudança que ocorreu foi no formato das curvas que representam a população de lagartas, em (a) após uma breve recuperação a população ainda tem um pequeno declínio secundário, mas conforme m_1 aumentou (observe (d)), esse declínio secundário desapareceu. Através da Figura 3.17, confirmamos o resultado obtido na Figura 3.16, ou seja, aumentando a quantidade de ovos eliminados, não se alterou o intervalo de tempo entre as aplicações do MIP.

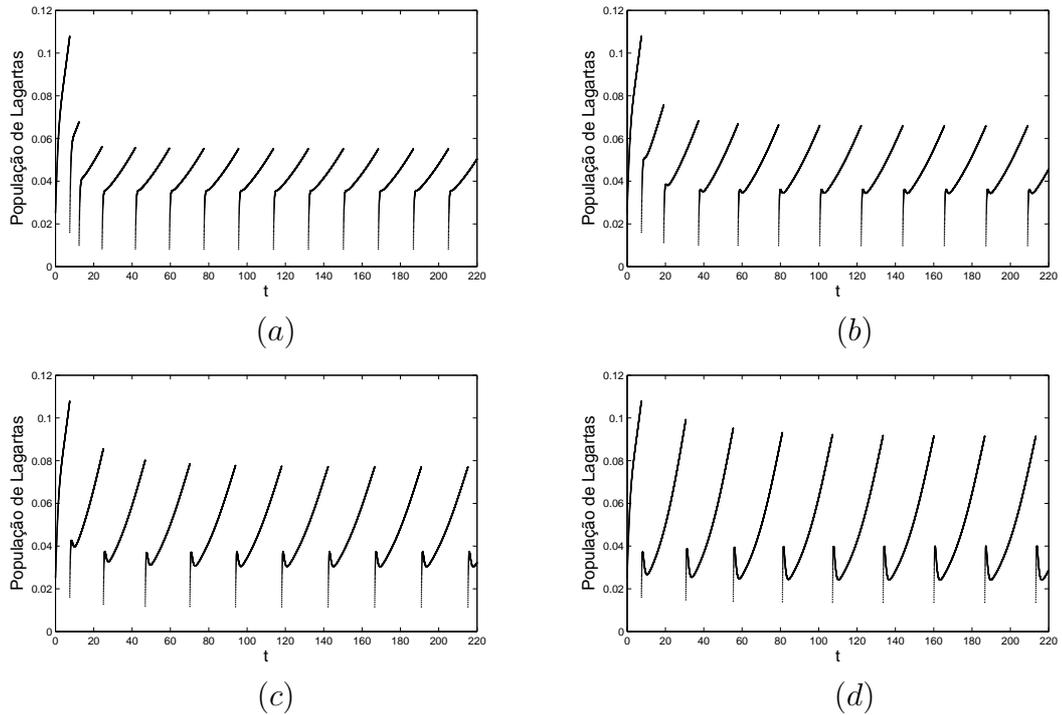


Figura 3.14: Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de ambos os tipos de parasitoides e variando a mortalidade de mariposas adultas, quando: $LE = 0,2$, $m_1 = 0$, $m_2 = 0,85$, $\tau = 1$, $\eta = 1$ e (a) $m_3 = 0,1$; (b) $m_3 = 0,3$; (c) $m_3 = 0,5$; (d) $m_3 = 0,7$.

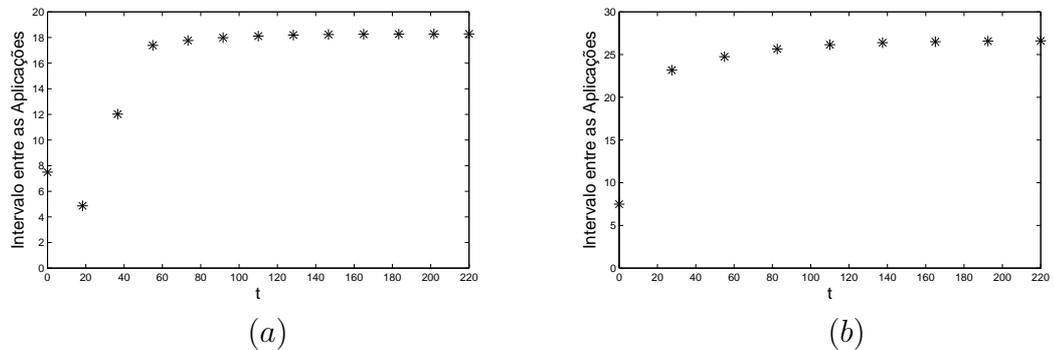


Figura 3.15: Intervalo de tempo entre as aplicações do MIP: (a) referente à Figura 3.14 (a); (b) referente à Figura 3.14 (d).

Na Figura 3.18, apresentamos a evolução temporal da população de lagartas quando variamos a quantidade de lagartas eliminadas pelo inseticida e fixamos os demais parâmetros. Neste caso, ocorreram grandes diferenças na forma das curvas que representam a população de lagartas, conforme aumentamos a taxa de mortalidade das lagartas. Inicialmente, observamos em (a) que após as aplicações a população decai imediatamente a um certo nível, e após ocorre um declínio secundário significativo.

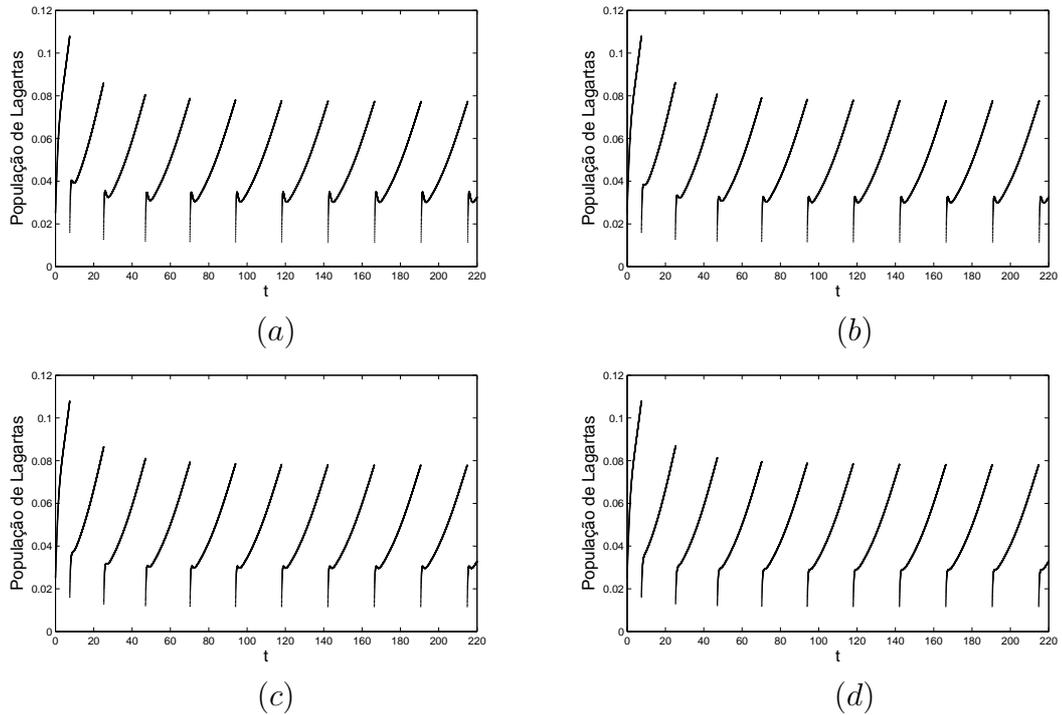


Figura 3.16: Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de ambos os tipos de parasitoides e variando a mortalidade de ovos, quando $LE = 0,2$, $m_3 = 0,5$, $m_2 = 0,85$, $\tau = 1$, $\eta = 1$ e (a) $m_1 = 0,1$; (b) $m_1 = 0,2$; (c) $m_1 = 0,3$ e (d) $m_1 = 0,4$.

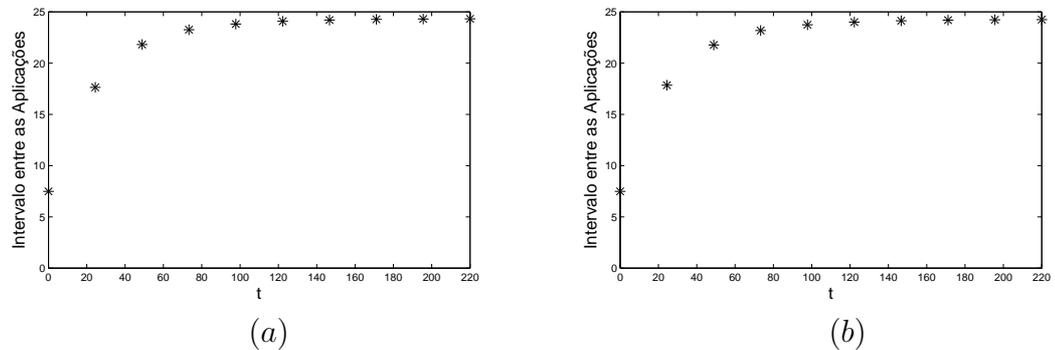


Figura 3.17: Intervalo de tempo entre as aplicações do MIP: (a) referente à Figura 3.16(a); (b) referente à Figura 3.16(d).

A partir de (b), a população de lagartas vai decaindo a níveis menores e este declínio secundário vai se reduzindo, até tornar-se quase imperceptível em (d). Apesar da população de lagartas se reduzir a níveis bem menores conforme aumentamos a quantidade de lagartas mortas pelo inseticida, a quantidade de intervenções necessárias foi a mesma em todos os casos considerados na Figura 3.18. Isso se deve ao fato que o declínio populacional secundário, que acreditamos ser ocasionado pela ação não imediata dos parasitoides,

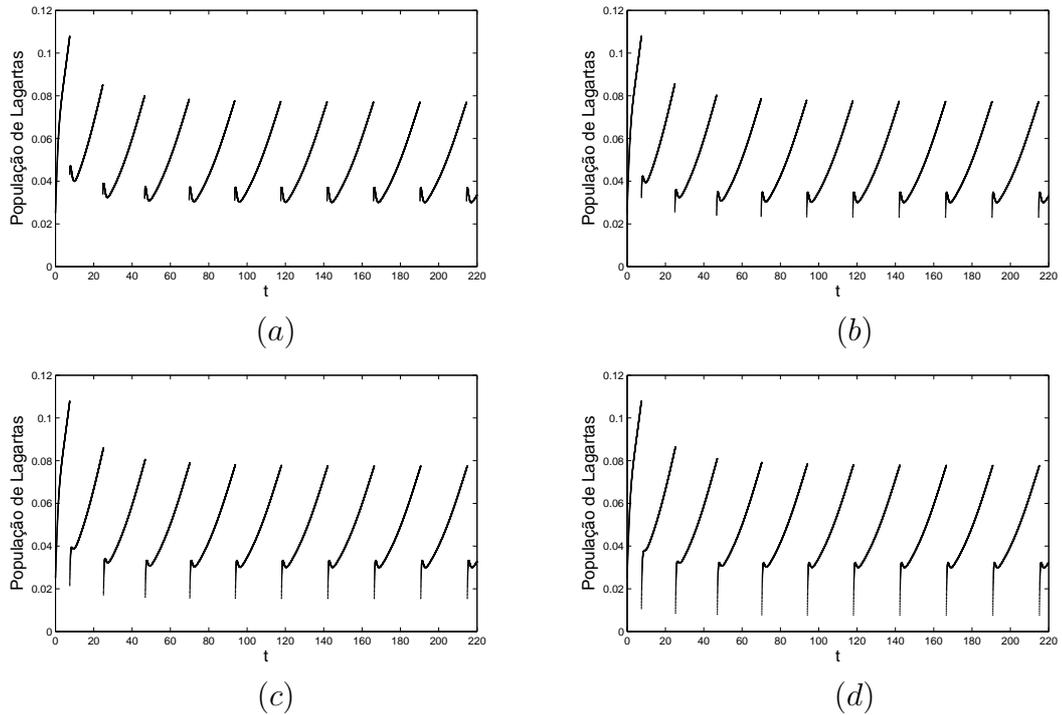


Figura 3.18: Evolução temporal da população de lagartas fixada a liberação de ambos os tipos de parasitoides e variando a mortalidade de lagartas, quando: $LE = 0,2$, $m_1 = 0,2$, $m_3 = 0,5$, $\tau = 1$, $\eta = 1$ e (a) $m_2 = 0,6$; (b) $m_2 = 0,7$; (c) $m_2 = 0,8$; (d) $m_2 = 0,9$.

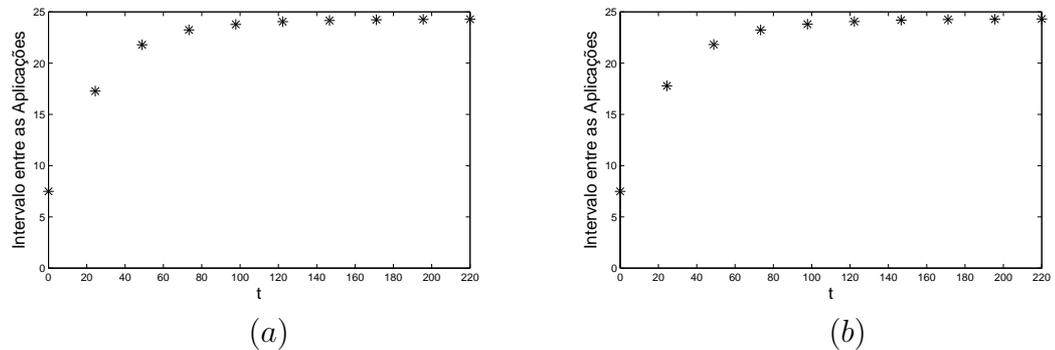


Figura 3.19: Intervalo de tempo entre as aplicações do MIP: (a) referente à Figura 3.18(a); (b) referente à Figura 3.18(d).

se reduz, ao aumentarmos a quantidade de lagartas eliminadas e tendo conseqüentemente menos hospedeiros para o parasitoides. A alta quantidade de mortes pelo inseticida não reduziu a quantidade de intervenções, e pode ter afetado o parasitismo, mesmo considerando que o inseticida é seletivo. Na Figura 3.19, observamos que o intervalo de tempo entre as aplicações do MIP não varia com o aumento da taxa de mortalidade das lagartas.

Na Figura 3.20 apresentamos a evolução temporal das populações de ovos, mariposa-

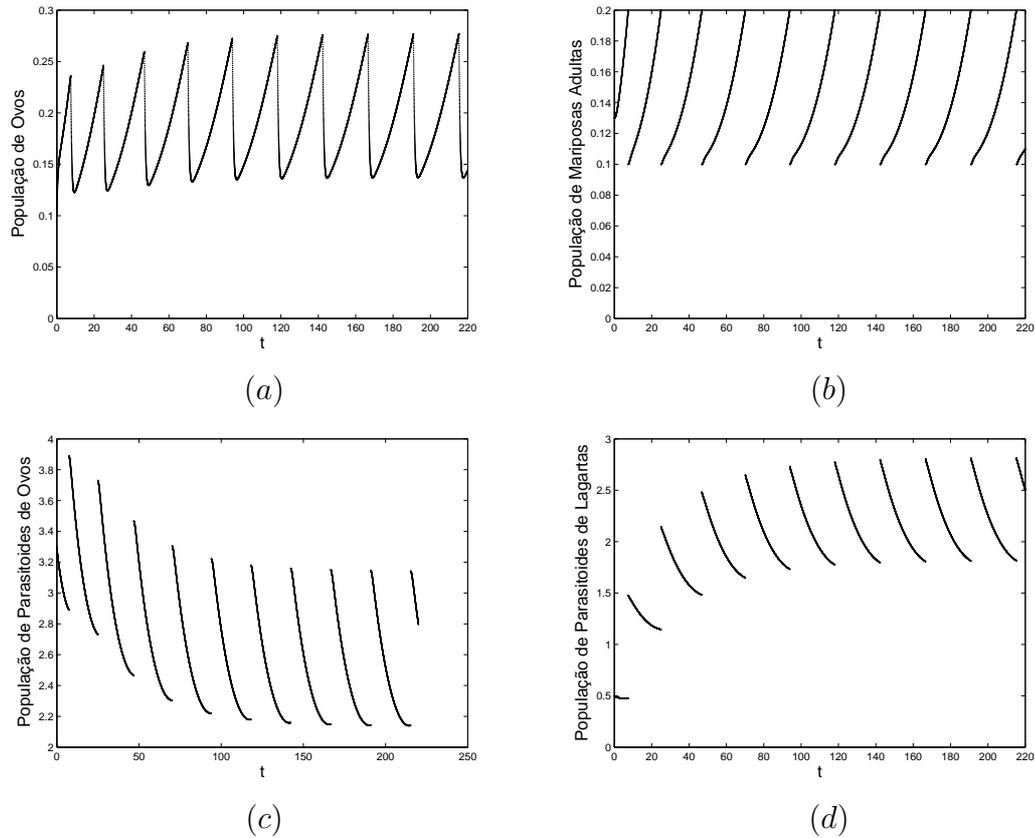


Figura 3.20: Evolução temporal das populações de: (a) ovos, (b) mariposas adultas, (c) parasitoides de ovos e (d) parasitoides de lagartas, quando: $LE = 0, 2$, $m_1 = 0$, $m_2 = 0, 85$, $m_3 = 0, 5$, $\eta = 0, 5$ e $\tau = 0, 3$.

as adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas com a aplicação do MIP. Neste caso, todas as populações oscilam em menores amplitudes que nos casos que apenas uma medida de controle foi adotada (comparar com as Figuras 3.4 e 3.11). Os níveis máximos de ovos são bem menores e os parasitoides não apresentam picos tão altos quanto no caso de liberação apenas de parasitoides.

3.4 Controle Proporcional-Integral

Nesta seção retornaremos ao modelo básico I, sem adimensionalização, para trabalharmos com um novo tipo de controle para a mariposa oriental, denominado controle proporcional-integral. Este tipo de controle visa manter a população de mariposas em uma determinada quantidade, e para isso, supõe que algum tipo de controle esteja sendo aplicado continuamente, como por exemplo a aplicação de um inseticida.

3.4.1 Modelagem do Controle Proporcional-Integral

Representando por V , L , N , S e P , respectivamente, as densidades de ovos, lagartas, mariposas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, no instante T , retornaremos agora ao modelo básico I da Seção 1.4:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV}{dT} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right) - (\alpha_V + \mu_V)V - \frac{\eta_V VS}{\sigma + V}, \\ \frac{dL}{dT} = \alpha_V V - (\alpha_L + \mu_L)L - \frac{\eta_L LP}{\Gamma + L}, \\ \frac{dN}{dT} = \alpha_N \alpha_L L - \mu_N N, \\ \frac{dS}{dT} = \frac{\eta_S \eta_V VS}{\sigma + V} - \mu_S S, \\ \frac{dP}{dT} = \frac{\eta_P \eta_L LP}{\Gamma + L} - \mu_P P, \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Vamos considerar que seja possível medir continuamente o número de mariposas adultas N , e atuar no controle desse número de mariposas aplicando algum tipo de controle (aplicação de inseticida) que afete apenas o seu crescimento, não afetando as demais populações. Suponhamos que seja um controle seletivo, como o que foi considerado no controle com o MIP (3.3). Nosso objetivo é comparar o efeito de um controle aplicado continuamente com o controle aplicado somente quando a população de mariposas atinge o Limiar Econômico.

O modelo considerando um controle proporcional-integral é dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV}{dT} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right) - (\alpha_V + \mu_V)V - \frac{\eta_V VS}{\sigma + V}, \\ \frac{dL}{dT} = \alpha_V V - (\alpha_L + \mu_L)L - \frac{\eta_L LP}{\Gamma + L}, \\ \frac{dN}{dT} = \alpha_N \alpha_L L - \mu_N N + u(t)N, \\ \frac{dS}{dT} = \frac{\eta_S \eta_V VS}{\sigma + V} - \mu_S S, \\ \frac{dP}{dT} = \frac{\eta_P \eta_L LP}{\Gamma + L} - \mu_P P, \end{array} \right. \quad (3.5)$$

onde $u(t)$ é calculado utilizando um controlador proporcional-integral, da seguinte forma:

$$u(t) = K_p[\kappa(t) - N(t)] + K_i \int_{-\infty}^t [\kappa(\tau) - N(\tau)] d\tau. \quad (3.6)$$

Os parâmetros K_p e K_i são denominados de ganho proporcional e ganho integral, e precisam ser ajustados de acordo com o desempenho desejado. O sinal $\kappa(t)$ é o valor desejado para o número de mariposas adultas (por exemplo para $\kappa(t) = 20$, manteríamos o número

de mariposas continuamente no LE).

Para simularmos a aplicação do controle proporcional-integral como descrito acima, consideremos o seguinte modelo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV}{dT} = rN \left(1 - \frac{N}{K} \right) - (\alpha_V + \mu_V)V - \frac{\eta_V VS}{\sigma + V}, \\ \frac{dL}{dT} = \alpha_V V - (\alpha_L + \mu_L)L - \frac{\eta_L LP}{\Gamma + L}, \\ \frac{dN}{dT} = \alpha_N \alpha_L L - \mu_N N + N (K_p(\kappa - N) + E), \\ \frac{dS}{dT} = \frac{\eta_S \eta_V VS}{\sigma + V} - \mu_S S, \\ \frac{dP}{dT} = \frac{\eta_P \eta_L LP}{\Gamma + L} - \mu_P P, \\ \frac{dE}{dT} = K_i(\kappa - N), \end{array} \right. \quad (3.7)$$

onde E é o controlador integral.

Observemos pela última equação do modelo (3.7), que todos os pontos de equilíbrio existem para $N = \kappa$ (se $K_i \neq 0$), logo o sistema converge para o número de mariposas desejado. Além disso, após um certo tempo o valor de $u(t)$ converge para um certo valor, que é exatamente a proporção de mariposas que devem ser continuamente eliminadas pela técnica de controle para garantir a existência do ponto de equilíbrio $N = \kappa$.

3.4.2 Simulações com o Controle Proporcional-Integral

Simularemos o modelo (3.7), com os seguintes valores para os parâmetros dimensionais: $r = 1,22$; $\mu_V = 0,25$; $\mu_L = 0,062$; $\mu_N = 0,051$; $\mu_S = 0,08$; $\mu_P = 0,048$; $\eta_V = 0,4$; $\eta_L = 0,7$; $\alpha_V = 0,8$; $\alpha_L = 0,87$; $\alpha_N = 0,54$; $\eta_S = 0,95$; $\eta_P = 0,8$; $\Gamma = 400$; $\sigma = 300$ e $K = 750$. As condições iniciais em número de insetos são: $V(0) = 30$, $L(0) = 10$, $N(0) = 100$, $S(0) = 500$ e $P(0) = 200$. O controlador será inicializado com $E(0) = 1$ e os ganhos serão assumidos como $K_p = 0,01$ e $K_i = 0,001$; variaremos a função κ . Sem a aplicação de medidas de controle, as populações tendem ao equilíbrio de coexistência (80; 37; 345; 1702; 484), como pode ser observado na Figura 2.1.

Na Figura 3.21, apresentamos em (a) a evolução temporal das densidades populacionais totais e em (b) a variação da função $u(t)$, ou seja, a variação no controlador proporcional-integral. Neste caso, supomos que $\kappa = 20$, ou seja, queremos manter a população de mariposas estabilizada em 20 insetos. Observamos que por causa disso, ocorre um decréscimo nas populações de ovos e lagartas, se compararmos ao ponto de equilíbrio antes atingido. Contudo, por causa dessa redução nas populações de ovos e lagartas, ambos os parasitoides vão à extinção.

As populações tendem ao equilíbrio (22; 19; 20; 0; 0), que é um equilíbrio de extin-

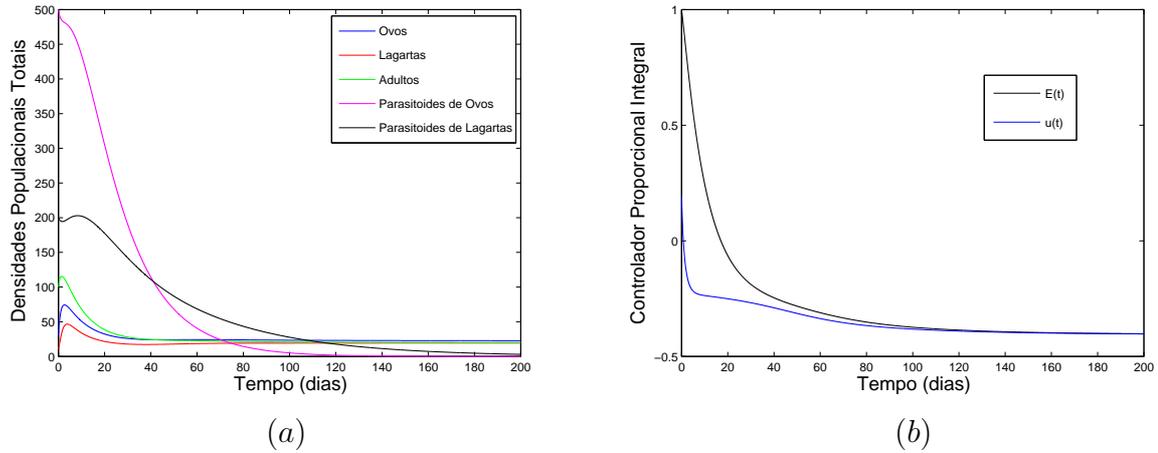


Figura 3.21: (a) Evolução temporal das densidades populacionais para o controle proporcional integral, com $\kappa = 20$; (b) Controlador proporcional integral $u(t)$ da equação (3.6).

ção de ambos os parasitoides e com o número de mariposas adultas pré-fixado em 20. Concluimos que adotando esse tipo de controle, o equilíbrio que antes era de coexistência das populações, agora é de extinção dos parasitoides e além disso, as demais populações se reduzem significativamente. Comparando com o modelo para o controle (Caso I (3.1)), no Caso I os parasitoides se extinguem por causa da ação do inseticida de amplo espectro e agora é pela baixa quantidade de hospedeiros. No controle integrado (Caso III), isso não ocorria porque parasitoides eram liberados conjuntamente com a aplicação de inseticida. Essa necessidade da sobrevivência mínima de hospedeiros para que o parasitoide sobreviva, é natural, visto que consideramos que neste ambiente há somente os ovos e as lagartas da mariposa oriental como hospedeiros.

A função $u(t)$, após os transientes iniciais, tende ao valor $u(t) = -0,4027$. Isso significa que algum tipo de inseticida, por exemplo, se for aplicado continuamente e eliminar aproximadamente 40% das mariposas adultas, a população das mesmas se estabiliza em 20 insetos.

Se mantivermos o número de mariposas adultas em 45 insetos, ou seja, $\kappa = 45$, como podemos observar na Figura 3.22(a), os parasitoides de lagartas não se extinguem. Isso ocorre pois as lagartas tendem ao mesmo equilíbrio de coexistência que atingiam para o modelo sem o controle ($L(T) = 37$) e o equilíbrio atingido pelas populações é (49; 37; 45; 0; 77). Como podemos observar, as demais populações ainda estão abaixo do equilíbrio de coexistência atingido sem o controle. Neste caso, sob o ponto de vista de que as lagartas que são as causadoras dos prejuízos e as mesmas não serão reduzidas, não compensaria adotar este tipo de controle, mantendo a população de mariposas adultas em 45 insetos.

O controlador proporcional-integral na Figura 3.22(b) tenderá para $u(t) = -0,3279$.

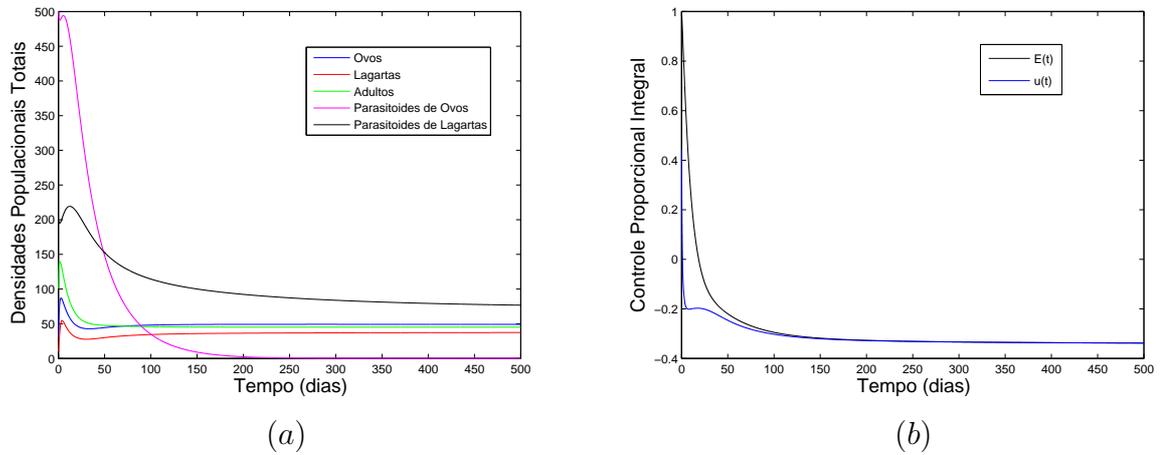


Figura 3.22: (a) Evolução temporal das densidades populacionais para o controle proporcional-integral, com $\kappa = 45$; (b) Controlador proporcional integral $u(t)$ da equação (3.6).

Isto significa que aproximadamente 33% das mariposas adultas têm que ser mortas continuamente para que o número delas se mantenha fixo em 45 insetos.

Na Figura 3.23, apresentamos a evolução temporal das populações em (a) e em (b) a variação no controlador proporcional-integral. Neste caso, mantemos a população de mariposas adultas em 80 insetos ($\kappa = 80$). Assim, todas as populações coexistem e o equilíbrio atingido é $(80; 37; 80; 40; 481)$. O controlador $u(t)$ tende a $u(t) = -0,1793$, ou seja, para que as mariposas adultas sejam mantidas em 80 insetos, é necessário utilizar algum tipo de controle que mate continuamente 18% das mariposas.

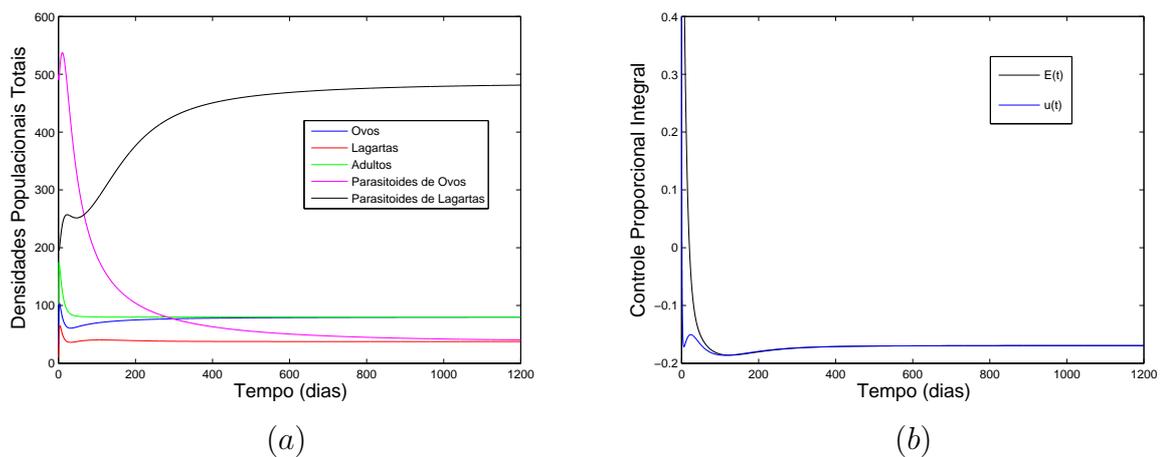


Figura 3.23: (a) Evolução temporal das densidades populacionais para o controle proporcional-integral, com $\kappa = 80$; (b) Controlador proporcional integral $u(t)$ da equação (3.6).

Cabe ressaltar que o tipo de controle adotado para que as mariposas sejam mantidas continuamente numa certa quantidade pode ser a aplicação de um inseticida, daí o resul-

tado obtido para o controlador proporcional integral $u(t)$ seria a proporção de mariposas que devem ser eliminadas continuamente por esse inseticida. Uma modelagem semelhante à que foi feita em (3.7) poderia ser feita para determinar o número de parasitoides que deve ser liberado continuamente para manter as mariposas em um certo nível. Esse e outros tipos de abordagem serão feitos em trabalhos futuros. No prosseguimento deste trabalho daremos ênfase ao MIP.

Os resultados para esse tipo de controle não são muito satisfatórios se considerarmos que para reduzir as lagartas é necessário manter as mariposas em níveis bem baixos continuamente, acarretando a extinção dos parasitoides. Do ponto de vista prático, no caso dos tipos de controle propostos na seção anterior, só era necessário adotar uma medida de controle quando as mariposas adultas atingiam o Limiar Econômico, e com isso todas as populações da praga, principalmente a de lagartas, eram significativamente reduzidas. Já neste caso, a aplicação contínua de alguma medida de controle acarretaria muita mão-de-obra, tanto para a medição contínua da quantidade de mariposas, quanto para a aplicação do controle, quem sabe acarretando gastos desnecessários.

Portanto, comparando o controle adotado considerando um Limiar Econômico e o MIP, e o controle suposto nesta seção, concluímos que o controle com o MIP, de modo geral, é mais eficiente, porque neste caso todas as populações coexistem e ainda as lagartas são bastante reduzidas, diminuindo conseqüentemente o ataque aos pessegueiros.

3.5 Considerações Finais

A utilização de apenas um método de controle para a *G. molesta* é o mais comum atualmente. Aplicações de inseticidas são feitas, muitas vezes, sem levar em consideração a quantidade de pragas existentes. Por isso, começamos fazendo simulações utilizando uma técnica de controle isolada e, depois, com o MIP.

Chegamos a algumas conclusões importantes sobre as técnicas de controle adotadas na Seção 3.3:

- A utilização de uma técnica isolada controla a praga, visto que o inseticida reduz as pragas a níveis baixos, mas muitas aplicações foram necessárias e os parasitoides foram extintos. Já com a liberação de parasitoides de ovos e/ou de parasitoides de lagartas, poucas aplicações foram necessárias;
- No Caso I, o inseticida reduz a população da praga imediatamente após a aplicação, a níveis considerados baixos, contudo muitas aplicações foram necessárias;
- No Caso II, com a liberação de parasitoides de ovos a população de lagartas foi reduzida gradualmente após a liberação, mas recuperou-se a níveis cada vez maiores conforme aumentamos o número de parasitoides liberados. Um ponto positivo foi a necessidade de poucas intervenções;

- No Caso II, com a liberação de parasitoides de lagartas, a redução da população de lagartas após cada intervenção foi mais rápida se comparada à redução ocasionada pelos parasitoides de ovos, sendo assim mais eficiente. Muito poucas aplicações foram necessárias no tempo considerado (220 etapas de tempo, aproximadamente 180 dias);
- No Caso II, com a liberação conjunta de parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, o controle foi mais efetivo, visto que a redução populacional foi mais rápida (em comparação com a liberação de apenas uma espécie de parasitoide) após as aplicações, as lagartas foram reduzidas a níveis baixos e poucas liberações foram necessárias;
- No Caso III, com a aplicação de inseticida seletivo e liberação de ambos os parasitoides, dependendo do efeito considerado, um número médio de aplicações do MIP foi necessário. O melhor efeito obtido, com o MIP foi quando consideramos que a atuação do inseticida matava 85% das lagartas e ocorria uma grande liberação de parasitoides de lagartas. Em quase todos os casos, observamos a ocorrência de declínios secundários na população de lagartas, após as aplicações do MIP, tornando maiores os intervalos de tempo entre cada aplicação. Em todas as hipóteses consideradas o MIP foi eficiente para o controle da mariposa e os parasitoides não foram extintos.

O controle proporcional-integral adotado na Seção 3.4 mantém a população de mariposas no nível desejado, mas a certos custos. Se desejarmos que as mariposas sejam mantidas a níveis baixos, os parasitoides se extinguem. Mantendo as mariposas a níveis maiores, os parasitoides sobrevivem, mas as lagartas não são reduzidas como desejado, visto que elas são as causadoras dos prejuízos. Ainda pretendemos adotar variações desse controle proporcional-integral, de modo a considerar a liberação de parasitoides e aplicação de inseticidas e avaliarmos a sua eficácia. Contudo, isto ficará para trabalhos futuros.

Concluimos que lagartidas específicos seriam a melhor opção, para atuarem conjuntamente com inimigos naturais à praga, como é o caso dos parasitoides. Esta técnica integrada foi abordada no Caso III, e levando em consideração o uso indiscriminado de inseticidas feito atualmente, a técnica conjunta de inseticida e controle biológico seria a solução para, pelo menos, reduzir os danos ambientais e à saúde dos consumidores. Atualmente, não há inseticidas seletivos com registro no AGROFIT-MAPA (2014/2015) que possam ser utilizados na cultura do pessegueiro.

Portanto, pesquisas para a obtenção de produtos químicos para o controle integrado da *G. molesta* são muito relevantes, a fim de manter os inimigos naturais da praga intactos ou pouco prejudicados. Além disso, a utilização de técnicas inovadoras, como a confusão sexual dos machos através de feromônios sexuais sintéticos, promete ser de grande valia para o controle da praga sem causar danos ao meio ambiente. A confusão sexual e as maneiras de aplicá-la serão abordadas nos Capítulos 5 e 6.

Capítulo 4

MODELOS ESPACIALMENTE ESTRUTURADOS PARA O CONTROLE DA *GRAPHOLITA* *MOLESTA*

Neste capítulo, introduzimos a variável espaço ao modelo proposto no Capítulo 2, através de uma malha bidimensional discreta. Um exemplo clássico da importância de se considerar o espaço na dinâmica do modelo, é o modelo discreto parasitoide-hospedeiro de Nicholson-Bailey (Edelstein-Keshet, 1988). Este modelo possui um equilíbrio não trivial que nunca é localmente estável, o que pode acarretar a extinção das espécies. Mas, Hassell et al. (1991), ao incluírem a variável espacial no modelo parasitoide-hospedeiro, mostraram que as espécies persistem e que diferentes padrões espaciais podem ser observados, dependendo dos parâmetros envolvidos na movimentação. Neste caso, a componente espacial teve um papel estabilizador no modelo.

O hábitat é representado por uma malha discreta (matriz) bidimensional de tamanho $m \times m$ sítios ou “patches”, identificados com a posição $x = (i, j)$. Dentro de cada sítio, em que consideramos a existência de um pessegueiro, a dinâmica vital é descrita pelo modelo (2.2). Além disso, assumimos que as populações estejam homogeneamente distribuídas em cada sítio e que as fronteiras sejam reflexivas, ou seja, tais que os indivíduos não atravessem a fronteira, permanecendo no interior do domínio. Este tipo de fronteira é adequado quando os indivíduos da população se encontram numa região favorável (ambiente inóspito fora do domínio) ou quando há limitações geográficas para a dispersão dos mesmos.

No modelo espacialmente estruturado podemos incluir movimentação de populações, bem como outras heterogeneidades espaciais, e adotamos o MIP utilizando o modelo do Caso III que contempla liberação de ambos os parasitoides e aplicação de inseticida

seletivo, formulado na Seção 3.3. A densidade populacional de fêmeas adultas n , é medida a cada iteração temporal, determinando se as técnicas de controle devem ou não ser aplicadas, naquele instante de tempo.

4.1 Formulação do Modelo Espacialmente Estruturado

Nesta formulação, vamos acoplar o modelo adimensional (2.2) composto por um conjunto de equações diferenciais que descrevem a dinâmica vital das populações, com uma movimentação entre os sítios de uma vizinhança. Para esta vizinhança, podemos considerar diferentes formulações, como por exemplo: movimentação entre os quatro vizinhos mais próximos, entre os oito vizinhos mais próximos, entre outras. Se identificarmos cada sítio com a posição $x = (i, j)$, vamos definir as seguintes vizinhanças de x :

1. Movimentação entre os quatro vizinhos mais próximos (vizinhança de von Neumann):

$$V_x^{(1)} \equiv \{(i-1, j), (i, j-1), (i+1, j), (i, j+1)\}; \quad (4.1)$$

2. Movimentação entre os oito vizinhos mais próximos (vizinhança de Moore):

$$V_x^{(2)} \equiv \{(i-1, j+1), (i-1, j), (i-1, j-1), (i, j-1), \\ (i+1, j-1), (i+1, j), (i+1, j+1), (i, j+1)\}. \quad (4.2)$$

Consideramos que apenas os ovos da mariposa não se movimentam. Ao considerarmos a movimentação das lagartas, supomos que elas apresentam uma movimentação mais limitada, movimentando-se até os quatro vizinhos mais próximos. Já no caso das mariposas adultas e dos parasitoides, consideramos que a movimentação ocorre entre os oito vizinhos mais próximos.

A dinâmica do modelo com dispersão ocorre em duas etapas distintas: uma fase de movimentação, em que ocorre a dispersão das lagartas, fêmeas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas e, uma fase de reação, em que ocorre a dinâmica vital (reprodução, mortes e predação), descrita pelo modelo (2.2).

Considerando $v_x(t)$, $l_x(t)$, $n_x(t)$, $s_x(t)$ e $p_x(t)$, respectivamente, as densidades de ovos, lagartas, fêmeas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas no sítio x , no instante t , antes da dispersão; e $v'_x(t)$, $l'_x(t)$, $n'_x(t)$, $s'_x(t)$ e $p'_x(t)$ as densidades populacionais no sítio x , no instante t , após a dispersão, podemos escrever as equações para a etapa de

dispersão das fases de vida da mariposa oriental e dos parasitoides, como segue:

$$\left\{ \begin{array}{l} v'_x(t) = v_x(t), \\ l'_x(t) = l_x(t) - \sum_{y \in V_x^{(1)}} S_y^l(t) + \sum_{y \in V_x^{(1)}} E_y^l(t), \\ n'_x(t) = n_x(t) - \sum_{y \in V_x^{(2)}} S_y^n(t) + \sum_{y \in V_x^{(2)}} E_y^n(t), \\ s'_x(t) = s_x(t) - \sum_{y \in V_x^{(2)}} S_y^s(t) + \sum_{y \in V_x^{(2)}} E_y^s(t), \\ p'_x(t) = p_x(t) - \sum_{y \in V_x^{(2)}} S_y^p(t) + \sum_{y \in V_x^{(2)}} E_y^p(t), \end{array} \right. \quad (4.3)$$

onde $S_y^l(t)$, $S_y^n(t)$, $S_y^s(t)$ e $S_y^p(t)$ representam, respectivamente, as quantidades de lagartas, fêmeas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas que saem do sítio x e vão para cada um dos sítios $y \in V_x^{(i)}$, $i = 1, 2$, a cada instante de tempo t ; $E_y^l(t)$, $E_y^n(t)$, $E_y^s(t)$ e $E_y^p(t)$ representam, respectivamente, as quantidades de lagartas, fêmeas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas que entram no sítio x , oriundas de cada um dos sítios $y \in V_x^{(i)}$, $i = 1, 2$, a cada instante de tempo t .

Após a etapa de movimentação, ocorre a dinâmica vital dentro de cada sítio da malha, ou seja, reprodução, mortes e parasitoidismo, a qual é descrita pelo sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv'}{dt} = \gamma n' (1 - n') - \delta_v v' - \frac{\beta_v v' s'}{1 + v'}, \\ \frac{dl'}{dt} = \rho_l v' - \delta_l l' - \frac{\beta_l l' p'}{1 + l'}, \\ \frac{dn'}{dt} = \alpha_{nl} l' - \mu_n n', \\ \frac{ds'}{dt} = \frac{\beta_{sv} v' s'}{1 + v'} - \mu_s s', \\ \frac{dp'}{dt} = \frac{\beta_{pl} l' p'}{1 + l'} - \mu_p p'. \end{array} \right. \quad (4.4)$$

Consideramos dois tipos distintos de movimentação para as quatro populações que se movimentam:

1. difusão simples para todas as populações;
2. difusão simples para as fases de lagarta e de mariposa adulta, e taxia quase local para os parasitoides. A esta denominaremos “dispersão mista”. A seguir apresentamos as formulações de cada um dos tipos de movimentação.

4.1.1 Dispersão por Difusão Simples

Quando consideramos que os indivíduos se dispersam aleatoriamente, através de um processo difusivo, introduzimos quatro parâmetros D_l , D_n , D_s e D_p ($0 < D_k < 1$, $k = l, n, s, p$), chamados **fatores de dispersão**. D_l representa a fração de lagartas que deixa um sítio a cada etapa de tempo, dispersando-se igualmente entre os seus quatro vizinhos mais próximos. D_n , D_s e D_p representam, respectivamente, as frações de mariposas adultas, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas que deixam um sítio a cada etapa de tempo, dispersando-se igualmente entre os seus oito vizinhos mais próximos. Assim, em (4.3) temos:

$$\begin{aligned} S_y^l(t) &= D_l \frac{l_x(t)}{4}, & S_y^n(t) &= D_n \frac{n_x(t)}{8}, & S_y^s(t) &= D_s \frac{s_x(t)}{8}, & S_x^p(t) &= D_p \frac{p_x(t)}{8}, \\ E_y^l(t) &= D_l \frac{l_y(t)}{4}, & E_y^n(t) &= D_n \frac{n_y(t)}{8}, & E_y^s(t) &= D_s \frac{s_y(t)}{8}, & E_y^p(t) &= D_p \frac{p_y(t)}{8}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

de modo que as equações para as populações que se dispersam dadas em (4.3) são da forma:

$$\left\{ \begin{aligned} l'_x(t) &= (1 - D_l)l_x(t) + \frac{D_l}{4} \sum_{y \in V_x^{(1)}} l_y(t), \\ n'_x(t) &= (1 - D_n)n_x(t) + \frac{D_n}{8} \sum_{y \in V_x^{(2)}} n_y(t), \\ s'_x(t) &= (1 - D_s)s_x(t) + \frac{D_s}{8} \sum_{y \in V_x^{(2)}} s_y(t), \\ p'_x(t) &= (1 - D_p)p_x(t) + \frac{D_p}{8} \sum_{y \in V_x^{(2)}} p_y(t). \end{aligned} \right. \quad (4.6)$$

Se os fatores de movimentação forem constantes, em escala macroscópica, este processo é conhecido como difusão simples.

4.1.2 Dispersão por Difusão e Taxia Quase Local

Quando os indivíduos têm seu movimento orientado por algum estímulo externo (visão, odores, tato) dizemos que a dispersão ocorre segundo um processo de taxia (Edelstein-Keshet, 1988; Segel, 1984). Os indivíduos dispõem de percepção de gradientes de um agente atrator ou repulsor, o que os leva a se movimentar na direção do gradiente ou na direção contrária a ele. Note que, neste caso, a fração de indivíduos que se dispersam de cada sítio não será igualmente distribuída entre os vizinhos considerados, como ocorria no caso da dispersão por difusão.

Consideremos nesta subseção, que as lagartas $l(t)$ e as mariposas adultas $n(t)$ se dispersem segundo um processo difusivo, como descrito na subseção anterior. Já, ambos os parasitoides detectam estímulos provocados pela praga no sítio x em que se encontram

e também em sua vizinhança V_x . Esta detecção pode ser realizada por meio de um campo de sinais (odores, visão) e é conhecida como taxia quase local (Rodrigues, 1998).

Nesta situação, supomos que o hábitat está repleto de recursos para a praga. Além disso, assumimos que as pragas não apresentam um comportamento de defesa contra os parasitoides (Mistro et al, 2010). Segundo Cox e Lima (2006), isto pode ocorrer quando uma espécie predadora, no nosso caso parasitoides, é introduzida em um hábitat. Modelos predador-presa com dispersão difusiva para a presa e por taxia local para o predador foram analisados por Mistro et al. (2010), mas considerando apenas duas populações. Aqui, consideramos a dispersão de quatro populações, duas por difusão e duas por taxia quase local.

As expressões que descrevem a dispersão das lagartas $l(t)$ e das mariposas adultas $n(t)$, por difusão, são as equações para $l'_x(t)$ e $n'_x(t)$ obtidas em (4.6). Os parasitoides de ovos e os parasitoides de lagartas se dispersam de forma orientada (taxia quase local) ou seja, avaliam as densidades de ovos e de lagartas, respectivamente, presentes no sítio x em que se encontram e, numa vizinhança V_x , composta pelos quatro vizinhos mais próximos, e a partir dessas informações coletadas, decidem se permanecem ou saem do sítio x .

Para formular as expressões que descrevem a dispersão de ambos os parasitoides, nos baseamos no esquema de movimentação desenvolvido por Rodrigues (1998) para a dispersão de insetos herbívoros, no qual a taxia decorre do fato dos insetos conseguirem classificar as plantas hospedeiras de acordo com a sua qualidade como alimento. Assim, consideramos as seguintes hipóteses (Silveira, 2014; Silveira, 2010):

- O número de parasitoides que se movimenta do sítio x para o sítio y é proporcional à razão entre o número de hospedeiros no sítio y e o número total de hospedeiros na vizinhança \overline{V}_x ;
- Assim, uma fração maior de parasitoides de ovos ou parasitoides de lagartas, deve se locomover para o sítio de maior densidade de ovos ou lagartas, respectivamente.

De acordo com as hipóteses acima, definimos as saídas de parasitoides $S_y^s(t)$ e $S_y^p(t)$, como segue:

$$S_y^s(t) = \frac{v_y(t)}{k_x^s(t)} s_x(t), \quad (4.7)$$

onde $k_x^s(t) = \sum_{y \in \overline{V}_x} v_y(t)$. Se $k_x^s(t) = 0$, então $S_y^s(t) = 0$.

$$S_y^p(t) = \frac{l_y(t)}{k_x^l(t)} p_x(t), \quad (4.8)$$

onde $k_x^l(t) = \sum_{y \in \overline{V}_x} l_y(t)$. Se $k_x^l(t) = 0$, então $S_y^p(t) = 0$.

As densidades de cada um dos parasitoides que entram no sítio x oriundas de cada

um dos sítios $y \in V_x$ são dadas por:

$$E_y^s(t) = \frac{v_x(t)}{k_y^v(t)} s_y(t), \quad (4.9)$$

onde $k_y^v(t) = \sum_{z \in \bar{V}_y} v_z(t)$. Se $k_y^v(t) = 0$, então $E_y^s(t) = 0$.

$$E_y^p(t) = \frac{l_x(t)}{k_y^l(t)} p_y(t), \quad (4.10)$$

onde $k_y^l(t) = \sum_{z \in \bar{V}_y} l_z(t)$. Se $k_y^l(t) = 0$, então $E_y^p(t) = 0$.

Para cada entrada do sítio y para o sítio x deveremos considerar a vizinhança $\bar{V}_y = V_y \cup \{y\}$, para cada $y \in \bar{V}_x$:

$$y = (i-1, j) \Rightarrow V_y = \{(i-2, j), (i, j), (i-1, j-1), (i-1, j+1)\},$$

$$y = (i+1, j) \Rightarrow V_y = \{(i, j), (i+2, j), (i+1, j-1), (i+1, j+1)\},$$

$$y = (i, j-1) \Rightarrow V_y = \{(i-1, j-1), (i+1, j-1), (i, j-2), (i, j)\},$$

$$y = (i, j+1) \Rightarrow V_y = \{(i-1, j+1), (i+1, j+1), (i, j), (i, j+2)\}.$$

Portanto, a fase de dispersão das populações que se movimentam, de acordo com o processo de difusão (fases de vida da mariposa oriental) é descrita pelas equações $l'_x(t)$ e $n'_x(t)$ em (4.3) com $S_y^l(t)$, $S_y^n(t)$, $E_y^l(t)$ e $E_y^n(t)$ descritas em (4.5); e o processo de taxia quase local (parasitoides) será descrito pelas equações para $s'_x(t)$ e $p'_x(t)$ em (4.3) com $S_y^s(t)$, $S_y^p(t)$, $E_y^s(t)$ e $E_y^p(t)$, descritas por (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10), respectivamente.

4.2 Estratégias para a Implementação do MIP em um Sistema com Dispersão

O MIP para o modelo espacialmente estruturado sem controle de pragas, desenvolvido anteriormente, é considerado tendo como base o modelo para o MIP que considera liberação de ambos os parasitoides e aplicação de inseticida seletivo, desenvolvido na Seção 3.3 (Caso III). Ao incluirmos a estrutura espacial, para simularmos a aplicação das técnicas de controle integrado, consideramos que a malha (domínio) de tamanho 55×55 sítios, seja dividida em 25 blocos de tamanho 11×11 sítios. Adotaremos duas abordagens para a aplicação do controle:

4.2.1 Estratégia I: Verificação da Densidade de Fêmeas Adultas em Todos os Sítios de Cada Bloco

Neste caso, temos:

1. A cada passo de tempo, a densidade populacional de fêmeas adultas n é medida em

todos os sítios de cada bloco da malha.

2. Em cada bloco é adotado o seguinte critério:

- Se a densidade de fêmeas adultas n estiver abaixo do Limiar Econômico (LE) em mais de 90% dos sítios do bloco, não serão aplicadas as técnicas de controle neste bloco, e a dinâmica em cada sítio do bloco é descrita pelo modelo que descreve a dinâmica natural das populações (modelo (2.2));
- Se a densidade de fêmeas adultas n atingir o LE em 10% dos sítios ou mais, aplica-se o MIP em todos os sítios do bloco.

No passo de tempo seguinte, retornamos à etapa 1 do processo.

4.2.2 Estratégia II: Verificação da Densidade de Fêmeas Adultas em Alguns Sítios de Cada Bloco

Neste caso, adotamos a seguinte forma (Lima, 2010):

1. A cada passo de tempo, a densidade populacional de fêmeas adultas n é medida em aproximadamente 10% dos sítios de cada bloco da malha. Isso é feito através de um gerador de números aleatórios, que sorteia os sítios distintos que serão avaliados em cada bloco da malha (este processo foi incorporado ao programa computacional desenvolvido em Matlab).
2. Em cada bloco é adotado o seguinte critério:
 - Se a densidade de fêmeas adultas n estiver abaixo do Limiar Econômico (LE) em mais de 90% dos sítios avaliados em cada bloco, não serão aplicadas as técnicas de controle neste bloco, e a dinâmica em cada sítio do bloco é descrita pelo modelo que descreve a dinâmica natural das populações (modelo (2.2));
 - Se a densidade de fêmeas adultas n atingir o LE em 10% ou mais dos sítios selecionados, aplica-se o MIP em todos os sítios do bloco.

No passo de tempo seguinte, recomeçamos pela etapa 1 do processo.

4.3 Simulações com Dispersão

As simulações foram feitas com o objetivo de mostrar o comportamento das populações quando se considera a dispersão entre sítios de uma malha discreta, com os diferentes processos de movimentação descritos anteriormente. Avaliamos a eficiência do MIP para cada um dos processos de dispersão considerados.

Em todas as simulações consideramos uma malha bidimensional de 55×55 sítios e os parâmetros adimensionais do modelo estabelecidos na Tabela 2.2. Inicialmente, consideramos que somente o sítio central $x = (28, 28)$ esteja ocupado, com as mesmas densidades iniciais estabelecidas na Tabela 2.3, isto é: $v_x(0) = 0,1$; $l_x(0) = 0,025$; $n_x(0) = 0,13$; $s_x(0) = 3,3$ e $p_x(0) = 0,5$, e que o restante do reticulado esteja vazio.

As simulações foram realizadas com o software Matlab, começando em cada passo de tempo t , pela movimentação das populações na rede bidimensional discreta, a partir das condições iniciais estabelecidas. As distribuições, após a etapa de movimentação, serão as condições iniciais para a solução do sistema (4.4) (dinâmica vital) através do Runge-Kutta de ordem 4 (para isso discretizamos o sistema), neste mesmo passo de tempo. A cada instante de tempo t , o Runge-Kutta realiza dez iterações com passo de tamanho 0,1. As soluções do sistema são armazenadas em variáveis e retornam para a etapa de movimentação no tempo $t+1$. Nos casos em que ocorre a aplicação do MIP, ele será feito a cada instante de tempo t , após a avaliação da densidade de fêmeas adultas em cada bloco, que será feita após as etapas de movimentação e dinâmica vital (solução do sistema).

As figuras que representam as distribuições espaciais de cada população estão em um degradê em tons de cinza, onde a cor preta representa a ausência da população, e a cor branca a densidade máxima atingida. Do lado direito de cada distribuição espacial há uma legenda (coluna vertical) quantificando o significado de cada tom de cinza em relação à densidade populacional existente naquele instante de tempo. Para cada população, as escalas foram fixadas; logo, o mesmo tom de cinza representa a mesma densidade em todas as figuras para uma determinada população.

4.3.1 Dispersão por Difusão Simples

Inicialmente, observamos o comportamento das populações se dispersando segundo um processo difusivo. Como estabelecido na Subseção 4.1.1, os ovos da mariposa não se movimentam, as lagartas se dispersam até os quatro vizinhos mais próximos e as demais populações se dispersam até os oito vizinhos mais próximos. Para os fatores de difusão, adotamos os valores estabelecidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Fatores de difusão

D_l	D_n	D_s	D_p
0,25	0,5	0,6	0,6

Na Figura 4.1, apresentamos a soma das densidades populacionais de todos os sítios da malha, ou seja, a população total em toda a malha, de cada uma das espécies consideradas. As densidades totais tendem a um valor fixo após os transientes iniciais. Verifica-se que o equilíbrio das populações totais é igual a $55 \times 55 \times E_4^*$, indicando que em cada sítio, o equilíbrio de coexistência neste sistema é o mesmo que se não houvesse

difusão.

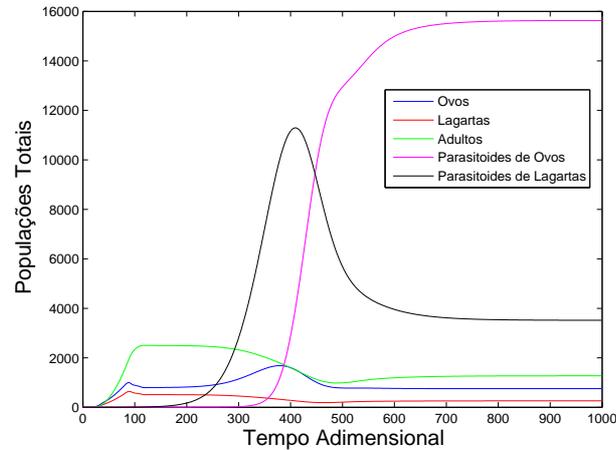


Figura 4.1: Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo com difusão simples e fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.

Na Figura 4.2, apresentamos a evolução temporal das densidades populacionais de ovos, lagartas, adultos, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, no sítio central $x = (28, 28)$, as quais se difundem até atingirem o equilíbrio de coexistência $E_4^* = (v^*, l^*, n^*, s^*, p^*) = (0, 2683; 0, 0929; 0, 4532; 5, 5653; 1, 2523)$. O equilíbrio de coexistência é o mesmo obtido no final do Capítulo 2, para o modelo sem dispersão. Isso ocorre em todos os sítios da malha.

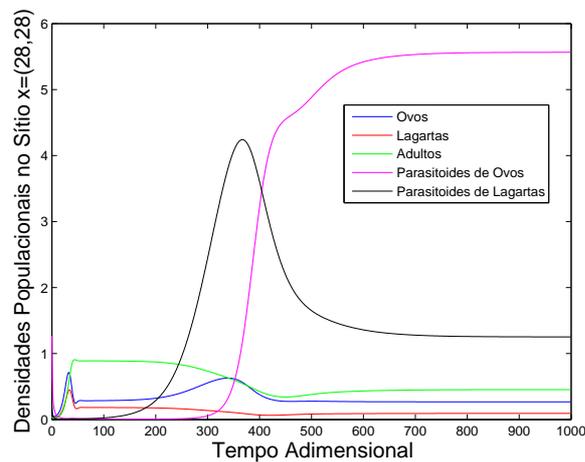


Figura 4.2: Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com difusão simples e fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, apresentamos a distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), lagartas (segunda linha) e fêmeas adultas (terceira linha) em diversos instantes de tempo. As populações se difundem pela malha, a partir da condição inicial (apenas o sítio central ocupado) e, após 1000 iterações temporais, todas as populações estão homogeneamente distribuídas no espaço, isto é, em qualquer sítio, temos o mesmo

número de indivíduos de cada população, estes são os valores de equilíbrio ilustrados no gráfico da Figura 4.1, para $t \geq 800$. Quanto às distribuições espaciais apresentadas na Figura 4.3, em $t = 50, 100, 150$ e na Figura 4.4, em $t = 200, 400$, verifica-se das Figuras 4.1 e 4.2, que estas correspondem a configurações em estados transientes, e interessam para visualizar o que ocorre durante o processo de invasão a partir de um único sítio inicialmente ocupado (o central).

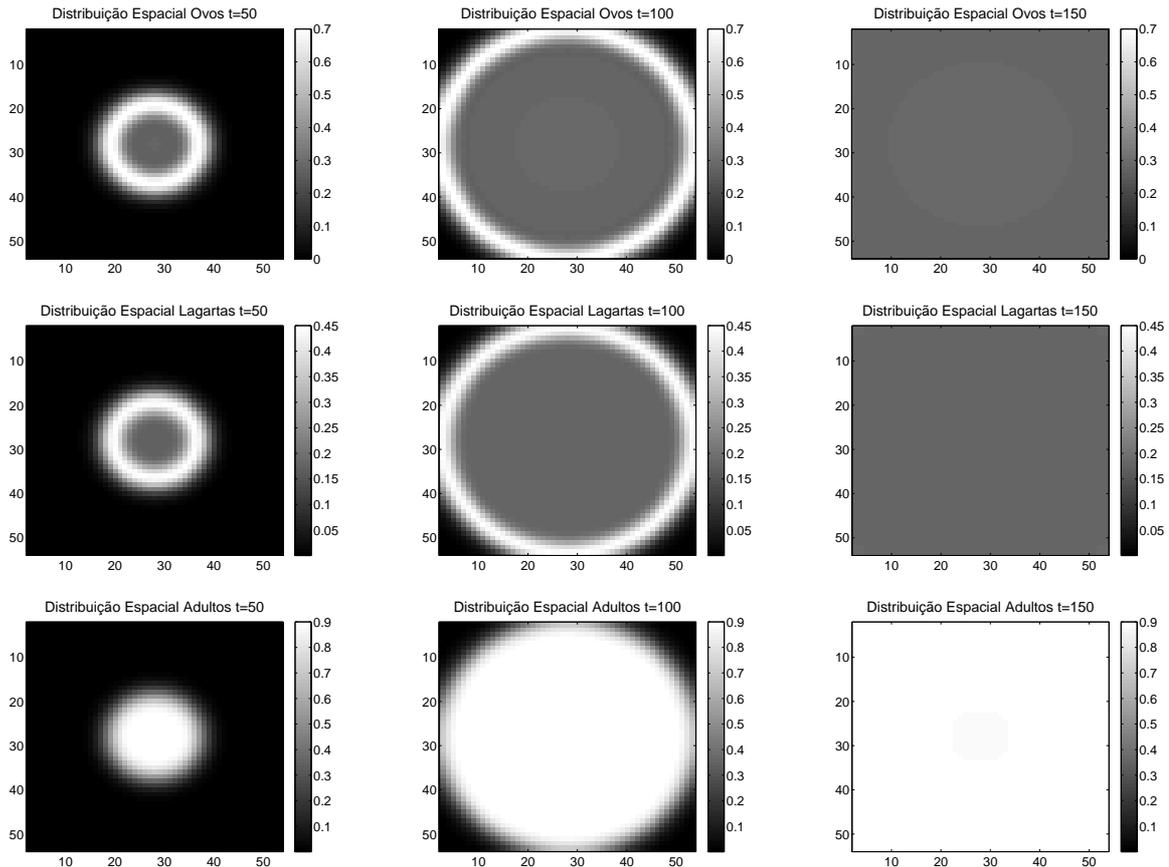


Figura 4.3: Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e mariposas adultas (terceira linha), movimentando-se por difusão, em $t = 50, 100, 150$ com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.

Na Figura 4.5, apresentamos a distribuição espacial dos parasitoides de lagartas (duas primeiras linhas) e parasitoides de ovos (duas últimas linhas) em diversos instantes de tempo. Em comparação com as populações da praga, observamos que eles se difundem mais lentamente, mesmo considerando que os fatores de difusão para os parasitoides são maiores do que os para a praga. As populações de parasitoides de lagartas e de parasitoides de ovos começam a apresentar valores significativos a partir de aproximadamente $t = 200$ e $t = 300$, respectivamente, para a partir daí aumentar sensivelmente. Tal fato é confirmado nos gráficos das Figuras 4.1 e 4.2, onde vê-se claramente que ambas as populações de parasitoides levam mais tempo para aumentar. Interpretamos este fato considerando que

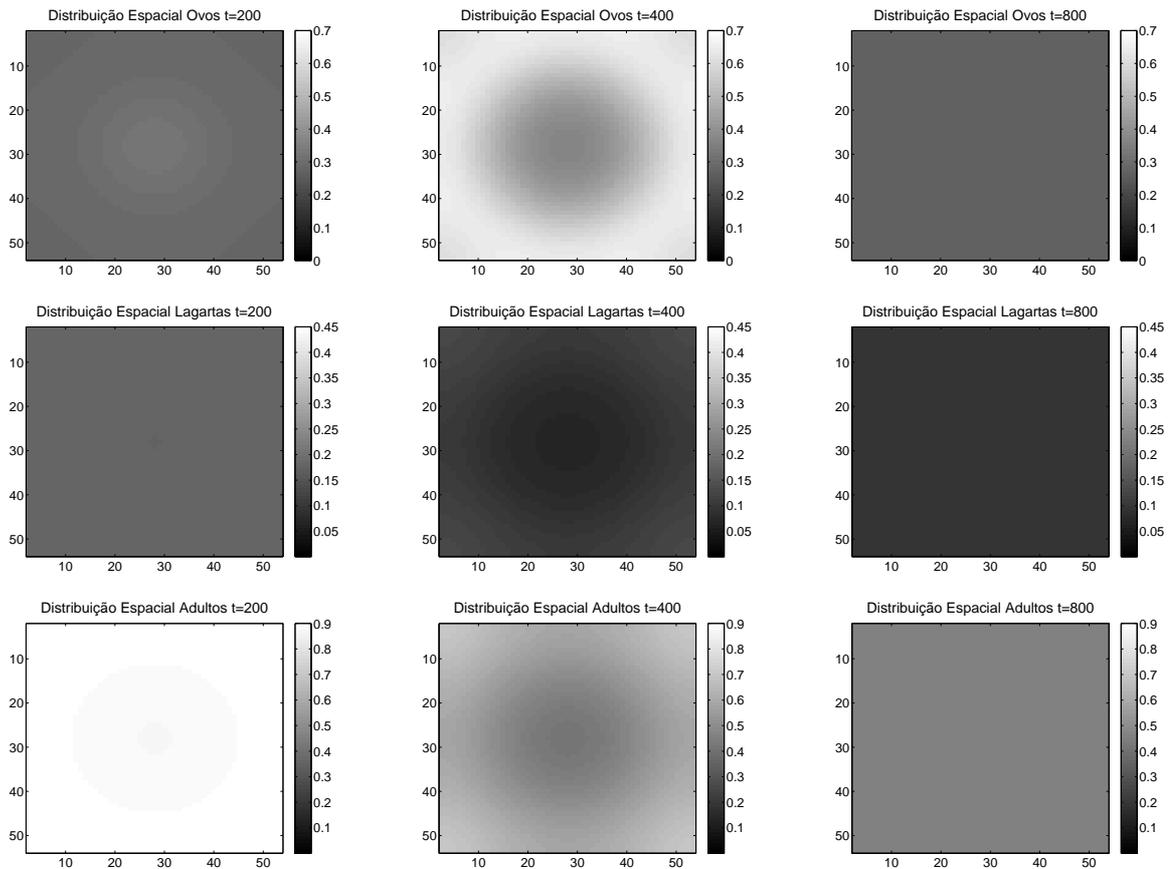


Figura 4.4: Distribuição espacial das mesmas populações da Figura 4.3, em $t = 200, 400, 800$.

enquanto o número de hospedeiros for pequeno, não haverá recursos para se desenvolverem.

Para outras escolhas dos parâmetros de difusão, observamos que as densidades populacionais sempre tendem ao equilíbrio de coexistência em cada sítio. Por isso, utilizamos sempre os mesmos valores para esses parâmetros. Além disso, todas as populações se dispersam de forma simétrica a partir da distribuição inicial no centro do reticulado, mas apresentando diferentes frentes de onda.

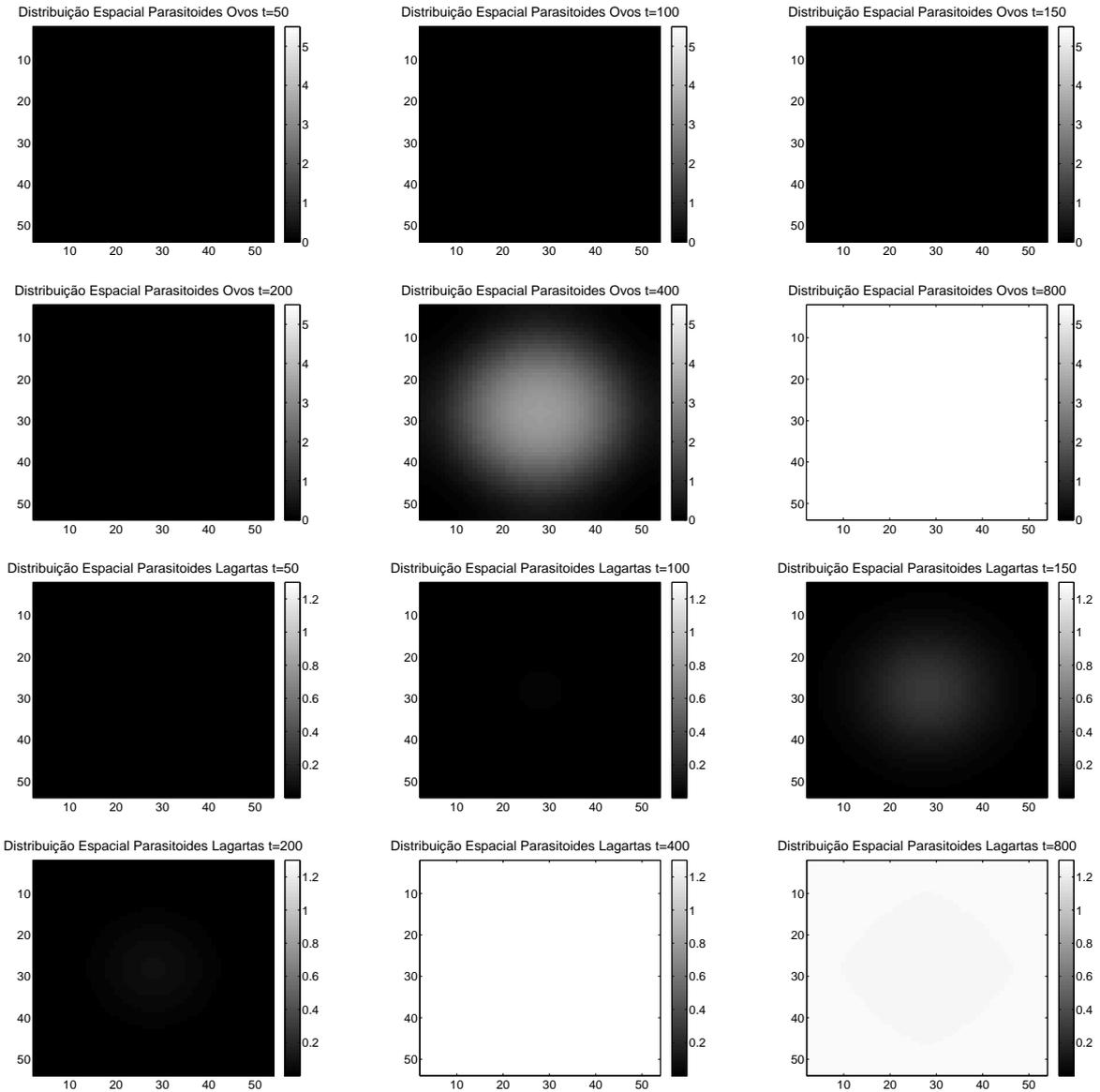


Figura 4.5: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), movimentando-se por difusão em $t = 50, 100, 150, 200, 400, 800$, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.

4.3.2 Dispersão por Difusão e Taxia Quase Local

Nesta seção, vamos analisar o comportamento das populações, considerando que lagartas e adultos tenham um movimento difusivo, enquanto que, as populações de parasitoides se dispersam através de um movimento orientado (taxia quase local), avaliando a presença de hospedeiros no sítio em que se encontram e numa vizinhança dele, para então, se deslocar para os sítios com maiores densidades de hospedeiros.

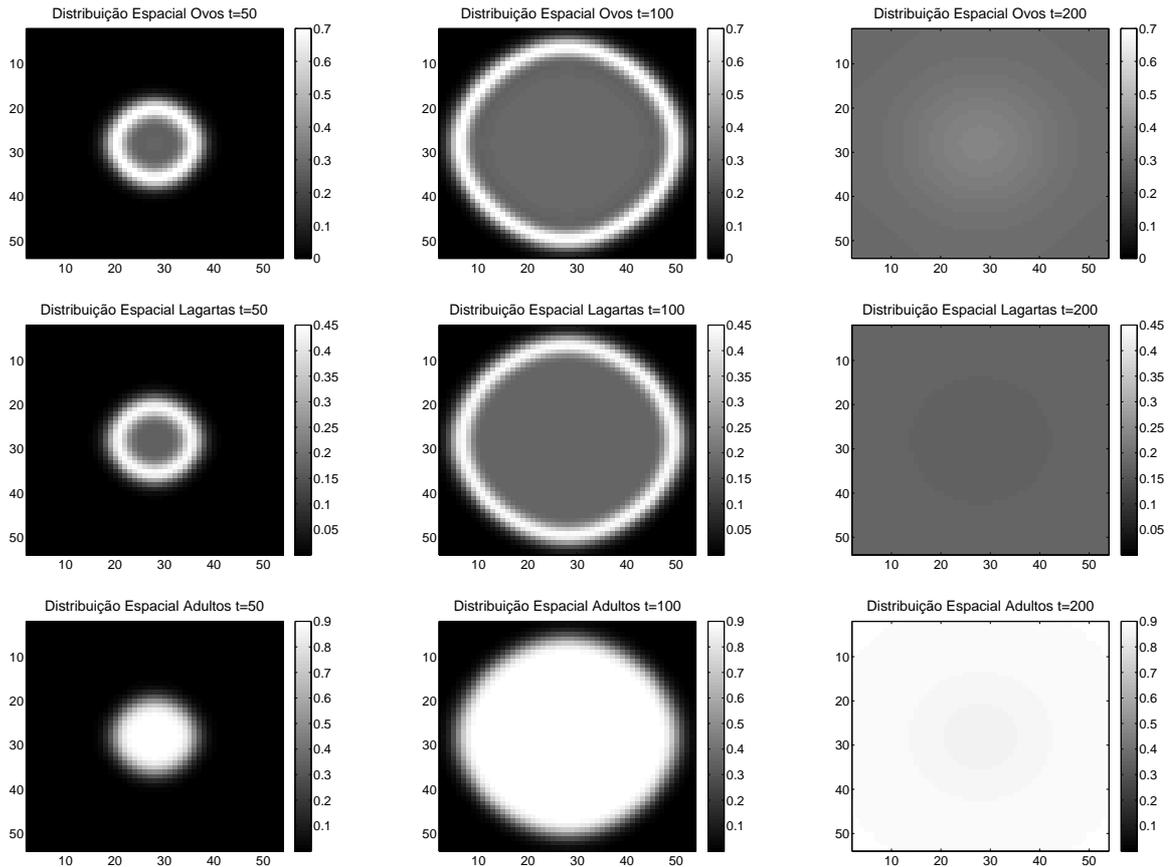


Figura 4.6: Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), movimentando-se por difusão com fatores de difusão descritos na Tabela 4.1, enquanto os parasitoides movimentam-se por taxia, em $t = 50, 100, 200$.

Para as populações de lagartas e mariposas adultas utilizaremos os mesmos fatores de difusão que na Subseção 4.3.1, a saber: $D_l = 0,25$, $D_n = 0,5$, e as mesmas distribuições iniciais no sítio central estabelecidas na Tabela 2.3. Ao traçar as curvas para a evolução temporal das diversas densidades, observamos que após os transientes iniciais, as densidades populacionais em cada sítio atingem o mesmo equilíbrio que no caso difusivo (Figuras 4.1 e 4.2). Além disso, a ocupação nos tempos iniciais também se dá de forma muito semelhante que no caso difusivo.

Nas Figuras 4.6 e 4.7, apresentamos as distribuições espaciais das populações

de ovos (primeira linha), lagartas (segunda linha) e mariposas adultas (última linha) movimentando-se por difusão em alguns instantes de tempo entre $t = 50$ e $t = 1000$. Na Figura 4.8, apresentamos as distribuições correspondentes, para as populações de ambos os parasitoides que se movimentam por taxia quase local.

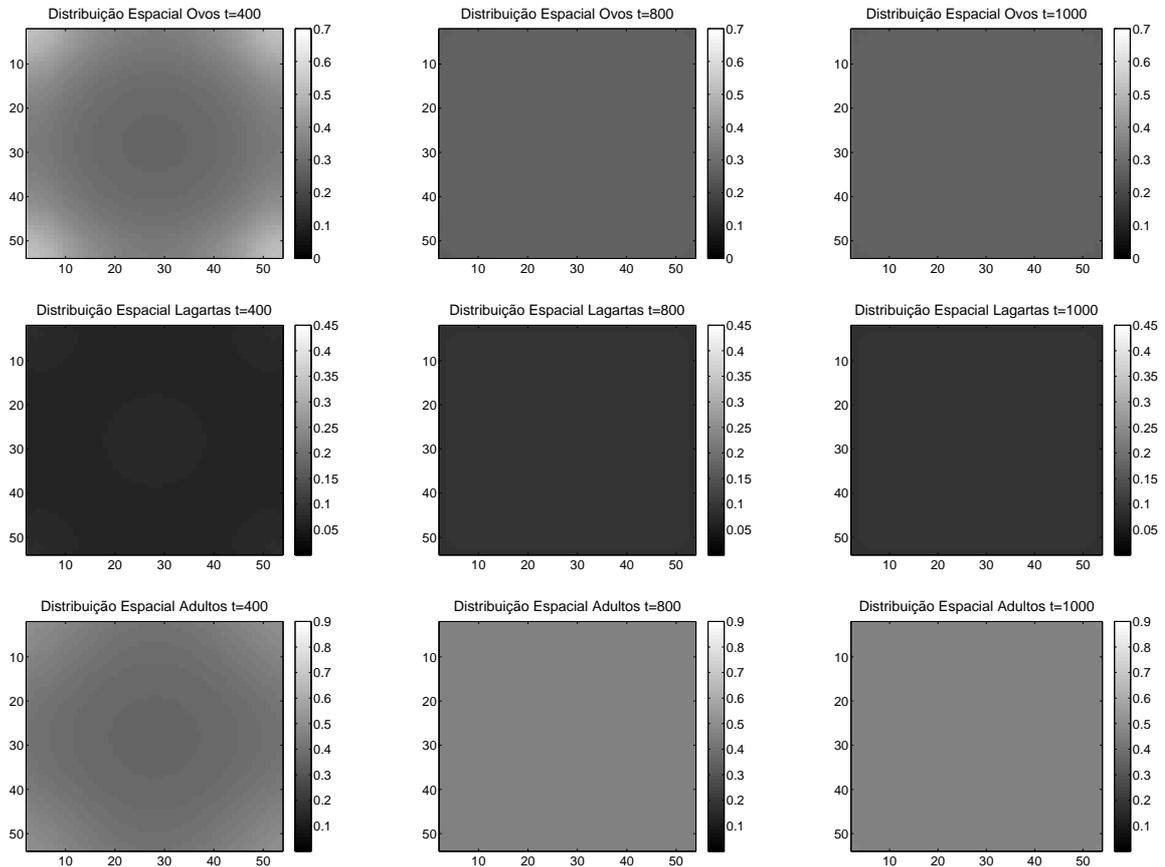


Figura 4.7: Distribuição espacial das mesmas populações da Figura 4.6 em $t = 400, 800, 1000$.

Observamos nas Figuras 4.7 e 4.8, que para $t = 800$, as populações estão distribuídas de maneira aproximadamente homogênea no espaço. Isso fica mais evidente nas distribuições espaciais das lagartas e parasitoides de lagartas. Esta distribuição heterogênea (praticamente homogênea) é estável, pois não se altera a partir de $t = 800$. Esta estabilidade explica o fato de que as populações em cada sítio tendem ao mesmo ponto de equilíbrio que no caso difusivo.

O efeito da taxia para o movimento dos parasitoides pode ser observado ao compararmos as Figuras 4.3 e 4.6, onde temos um movimento de expansão mais lento. Interpretamos este fato pela tendência dos parasitoides em permanecer no sítio onde estão enquanto não houver hospedeiros suficientes nos sítios ao seu redor (sair não é atrativo). Quando o movimento era de difusão, os parasitoides não escolhiam entre sair ou permanecer onde estavam.

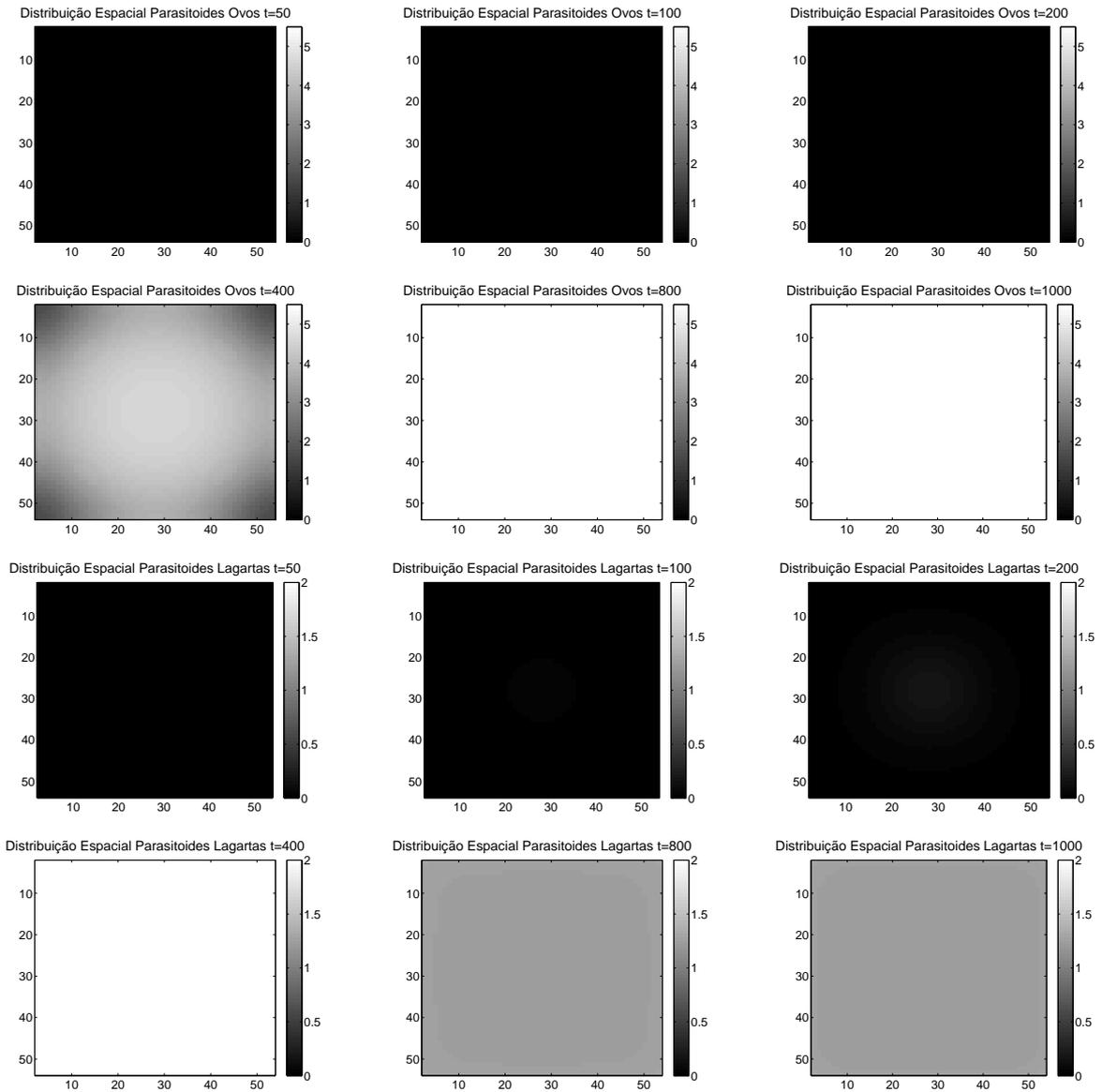


Figura 4.8: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), com dispersão orientada por taxa quase local, enquanto as lagartas e mariposas adultas movimentam-se por difusão, em $t = 50, 100, 200, 400, 800, 1000$, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.

4.3.3 Dispersão por Difusão e MIP

Nesta subseção, implementamos as estratégias do MIP descritas na Seção 4.2, ao sistema com dispersão por difusão. No Capítulo 3, fizemos várias suposições de como poderia ser feito o controle através do MIP, variando a quantidade de insetos eliminados por inseticida, ou por liberação de parasitoides de ambos os tipos, dentre outros. Fixamos os parâmetros de controle como segue: a proporção de ovos eliminados pelo inseticida $m_1 = 0$, a proporção de lagartas eliminadas pelo inseticida $m_2 = 0,85$, a proporção de fêmeas adultas eliminadas pelo inseticida $m_3 = 0,5$, a liberação constante de parasitoides de ovos $\eta = 1$ e a liberação constante de parasitoides de lagartas $\tau = 2$. Com isso, consideramos que o inseticida aplicado tem maior efeito sobre as lagartas, ou seja, que é quase um lagartocida específico. Esta foi uma das combinações estudada na Subseção 3.3.2, sem estrutura espacial.

Já mostramos que, com a hipótese acima, o MIP era eficiente para o controle da *Grapholita molesta*, necessitando de um número baixo de intervenções. Queremos verificar se, incluindo a movimentação por difusão, os resultados positivos se manterão. As simulações foram feitas utilizando os parâmetros acima, os mesmos fatores de dispersão estabelecidos na Tabela 4.1 e o mesmo valor para $LE = 0,2$.

Simulações para a Estratégia I do MIP

Neste caso, em todos os sítios de cada um dos blocos da malha será medida a densidade populacional de fêmeas adultas e, como descrito na Estratégia I da Seção 4.2, caso necessário, será aplicado o MIP em todo o bloco. Na Figura 4.9, apresentamos a variação nas densidades populacionais totais na malha ao longo do tempo.

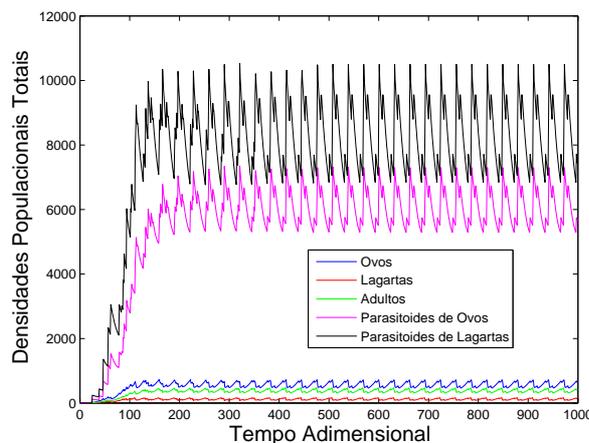


Figura 4.9: Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo, movimentando-se por difusão e com aplicação do MIP, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.

Na Figura 4.10, apresentamos a evolução temporal das densidades populacionais de cada espécie no sítio central $x = (28, 28)$. Como era esperado, aplicação do MIP, cada vez

que o LE é atingido, faz com que a densidade de fêmeas adultas oscile, mantida abaixo do $LE = 0,2$, variando entre 0,1010 e 0,1951. Além disso, pela Figura 4.10 (b), podemos ver que após os transientes iniciais, ocorre uma periodicidade na aplicação do MIP no sítio central, como havíamos observado para os modelos sem dispersão.

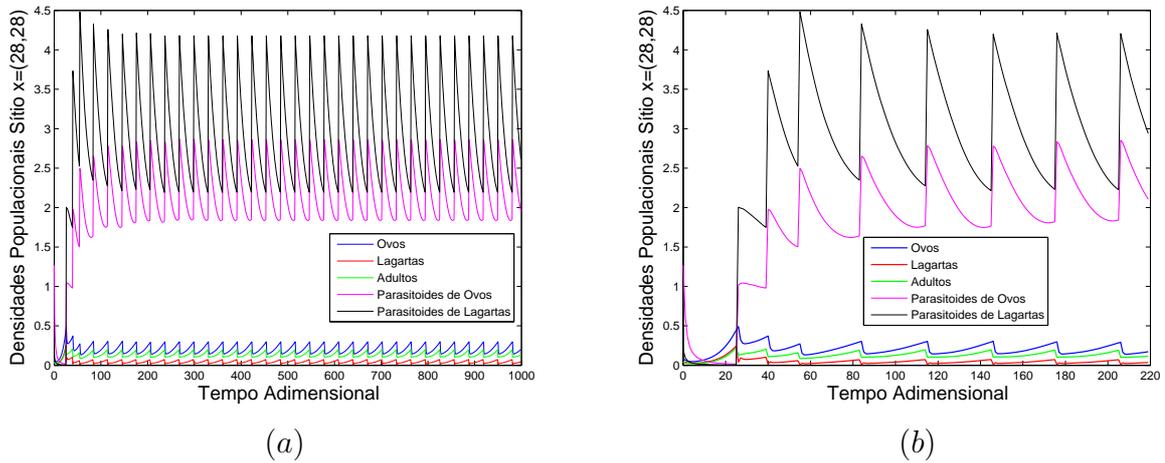


Figura 4.10: Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com difusão simples e MIP e fatores de difusão da Figura 4.9.

Nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, apresentamos a distribuição espacial de todas as populações em diversos instantes de tempo. A distribuição espacial das fêmeas adultas é mantida abaixo do LE em todos os sítios da malha, como acontece no sítio central. Isso comprova que a estratégia adotada para a aplicação do MIP está sendo eficiente para o controle da mariposa oriental quando as espécies se dispersam por difusão. As distribuições espaciais apresentam padrões simétricos, alternando entre blocos e/ou sítios com maiores ou menores densidades populacionais.

Como seria de se esperar, observamos que em $t = 1000$, por exemplo, a distribuição de ovos (Figura 4.12) é menos densa exatamente onde a população de parasitoides de ovos (Figura 4.13) apresenta maiores densidades populacionais. Da mesma forma, a distribuição espacial de lagartas é menos densa onde a distribuição de parasitoides de lagartas apresenta maiores densidades.

Como observamos nas Figuras 4.9 a 4.13, o MIP altera o comportamento espaço-temporal das populações. Anteriormente, as populações estavam em um equilíbrio homogêneo estável (ver Figuras 4.3 a 4.5). Com a aplicação do MIP, todas as densidades populacionais passam a oscilar ao longo do tempo e a distribuição espacial de cada espécie torna-se heterogênea no tempo. Logo, o MIP interfere na tendência homogeneizadora da difusão.

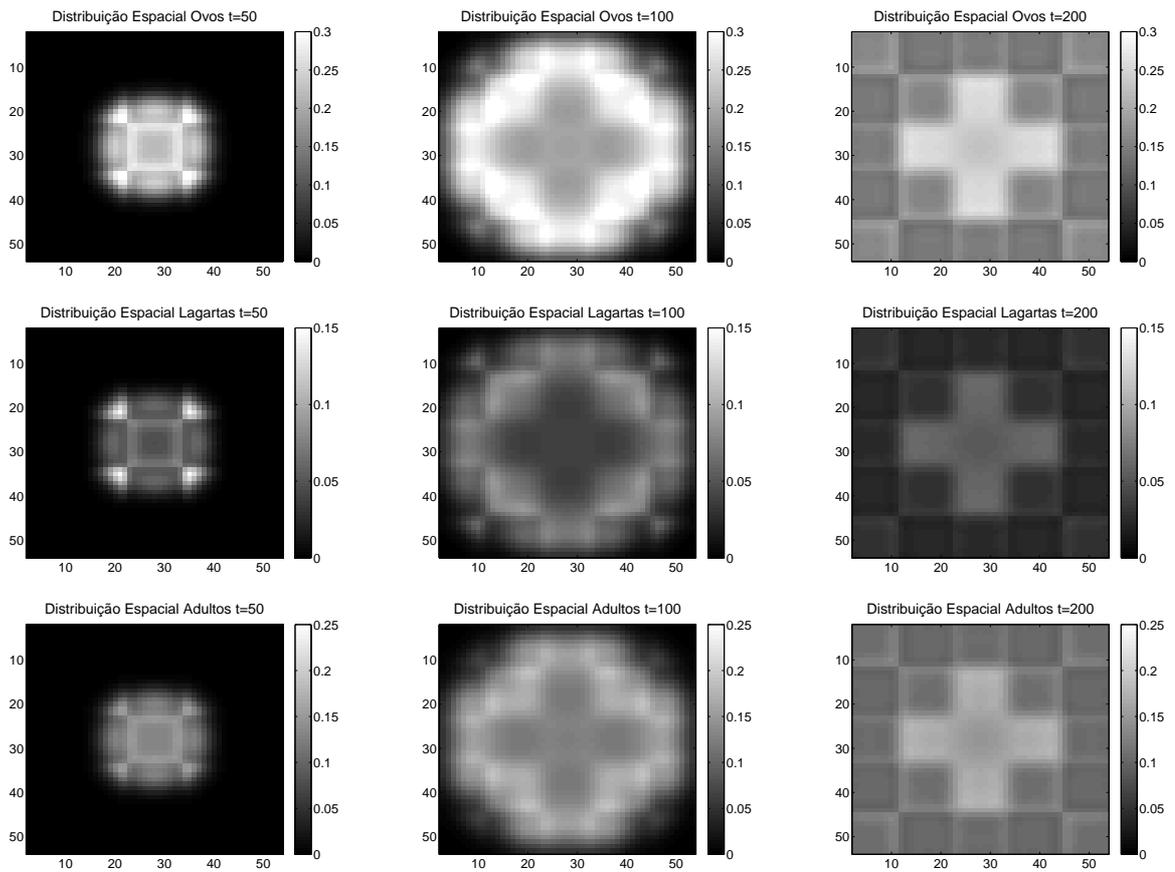


Figura 4.11: Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), movimentando-se por difusão simples e com MIP aplicado de acordo com a estratégia I, com fatores de difusão dados na Tabela 4.1, em $t = 50, 100, 200$.

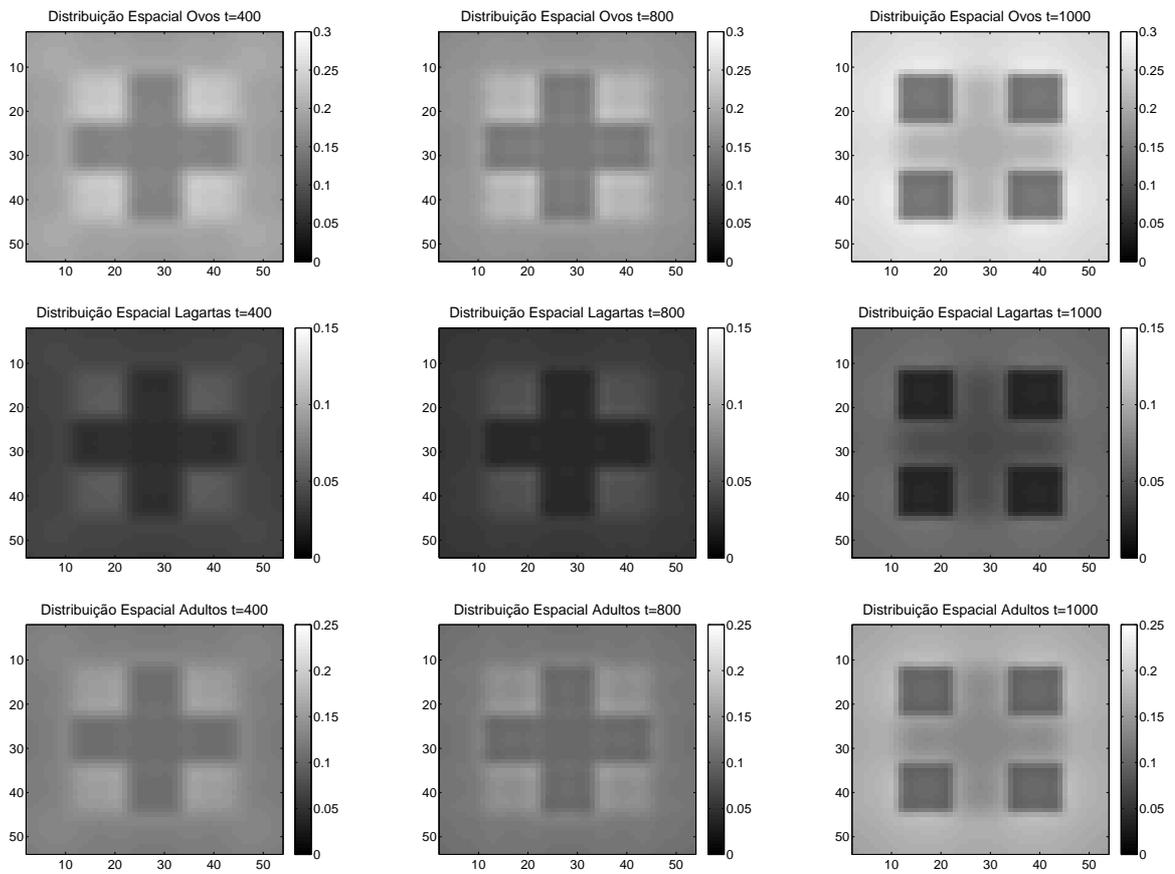


Figura 4.12: Distribuição espacial das mesmas populações que na Figura 4.11, com dispersão por difusão e MIP, em $t = 400, 800, 1000$.

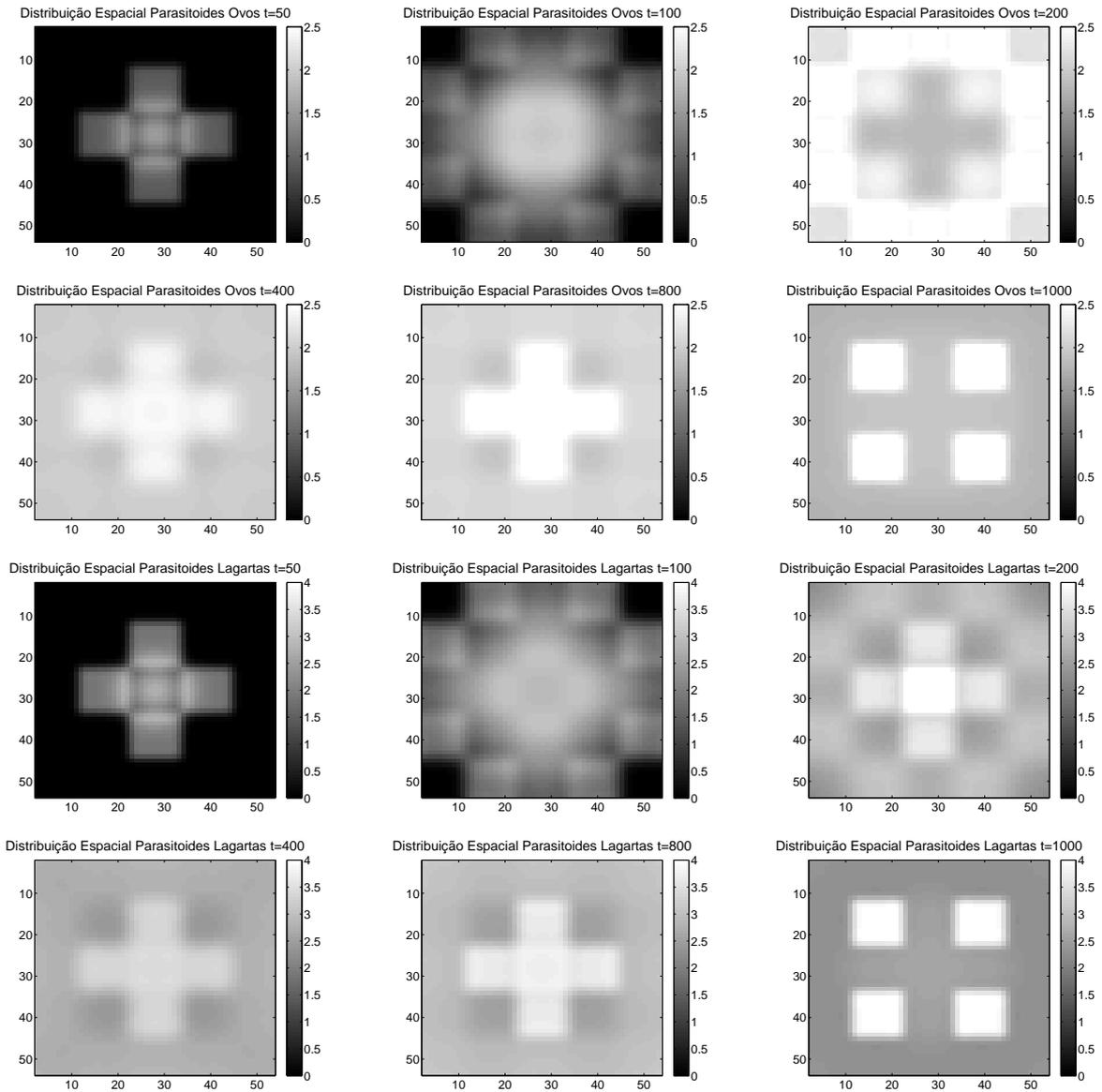


Figura 4.13: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), movimentando-se por difusão e com o MIP aplicado de acordo com a estratégia I, em $t = 50, 100, 200, 400, 800, 1000$; os fatores de difusão são estabelecidos na Tabela 4.1.

Simulações para a Estratégia II do MIP

Neste caso, será medida a densidade populacional de fêmeas adultas em alguns sítios aleatórios de cada bloco e, como descrito na Seção 4.2, caso necessário será aplicado o MIP em todo o bloco. Na Figura 4.14, apresentamos as densidades populacionais totais em toda a malha ao longo do tempo considerado. Ao compararmos com o caso anterior (Estratégia I, ver Figura 4.9), as densidades populacionais totais de cada espécie não atingem um estado em que oscilam de forma periódica ao longo do tempo, mantendo os mesmos valores para a população total máxima e mínima. Interpretamos este fato como decorrente da estratégia adotada que avalia aleatoriamente alguns sítios de cada bloco. Como seria de se esperar, as densidades totais são mantidas bem abaixo das obtidas para o modelo sem o MIP (Figura 4.1), onde o equilíbrio correspondia a um estado de praga severa.

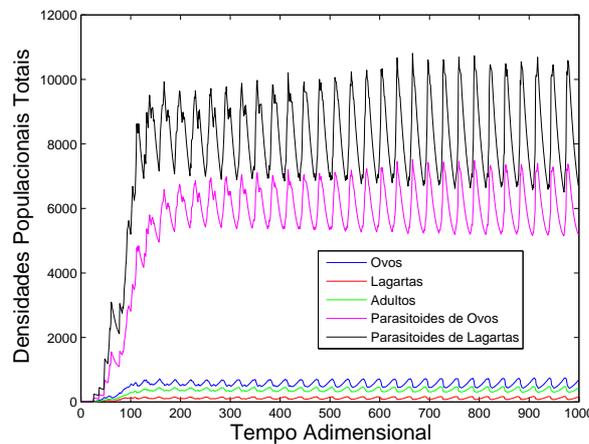


Figura 4.14: Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo, dispersando-se por difusão e com o MIP aplicado de acordo com a estratégia II, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1.

Na Figura 4.15 (a) e (b), apresentamos a evolução temporal das densidades de todas as populações, no sítio central. Novamente, a população de fêmeas adultas é mantida abaixo do LE , e após os transientes iniciais, oscila entre os valores 0,0979 e 0,1932, aproximadamente, mostrando que o MIP é eficiente. Isto acontece também em todos os outros sítios da malha. Além disso, após os transientes, observamos que as aplicações do MIP, neste sítio, são aparentemente periódicas. Com esta estratégia para o MIP, nota-se que as densidades no sítio central são reduzidas, após cada aplicação, a valores ligeiramente menores que as observadas para a Estratégia I.

Nas Figuras 4.16 a 4.18, apresentamos a distribuição espacial de todas as populações em diversos instantes de tempo. Comparando este caso, com a Estratégia I (ver Figuras 4.11 a 4.13), observamos que a heterogeneidade dos padrões se mantém, mas com padrões espaciais diferentes. Com a Estratégia I do MIP, ocorria simetria nas distribuições espaciais e o estado final em $t = 1000$ era similar para todas populações (formato dos blocos).

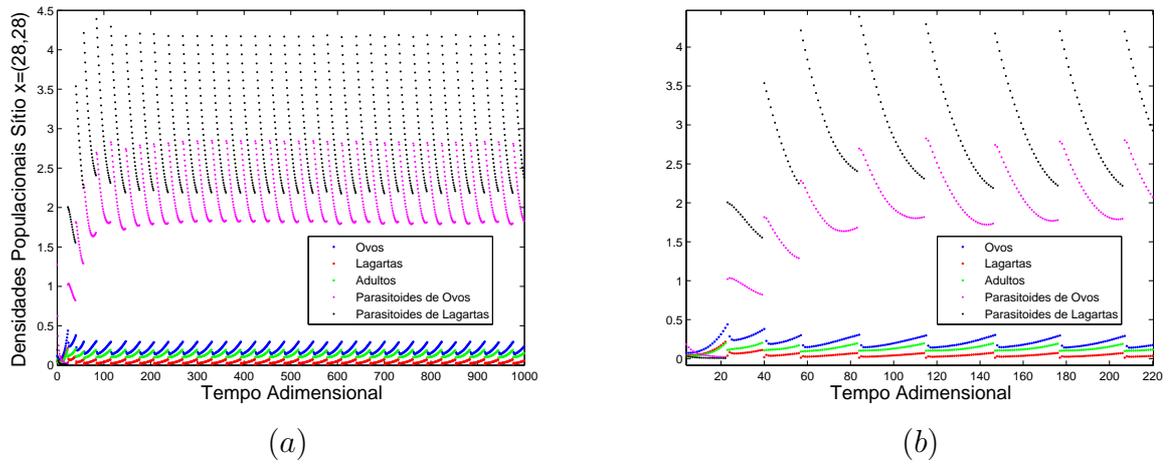


Figura 4.15: Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central, com dispersão por difusão e MIP como na Figura 4.14.

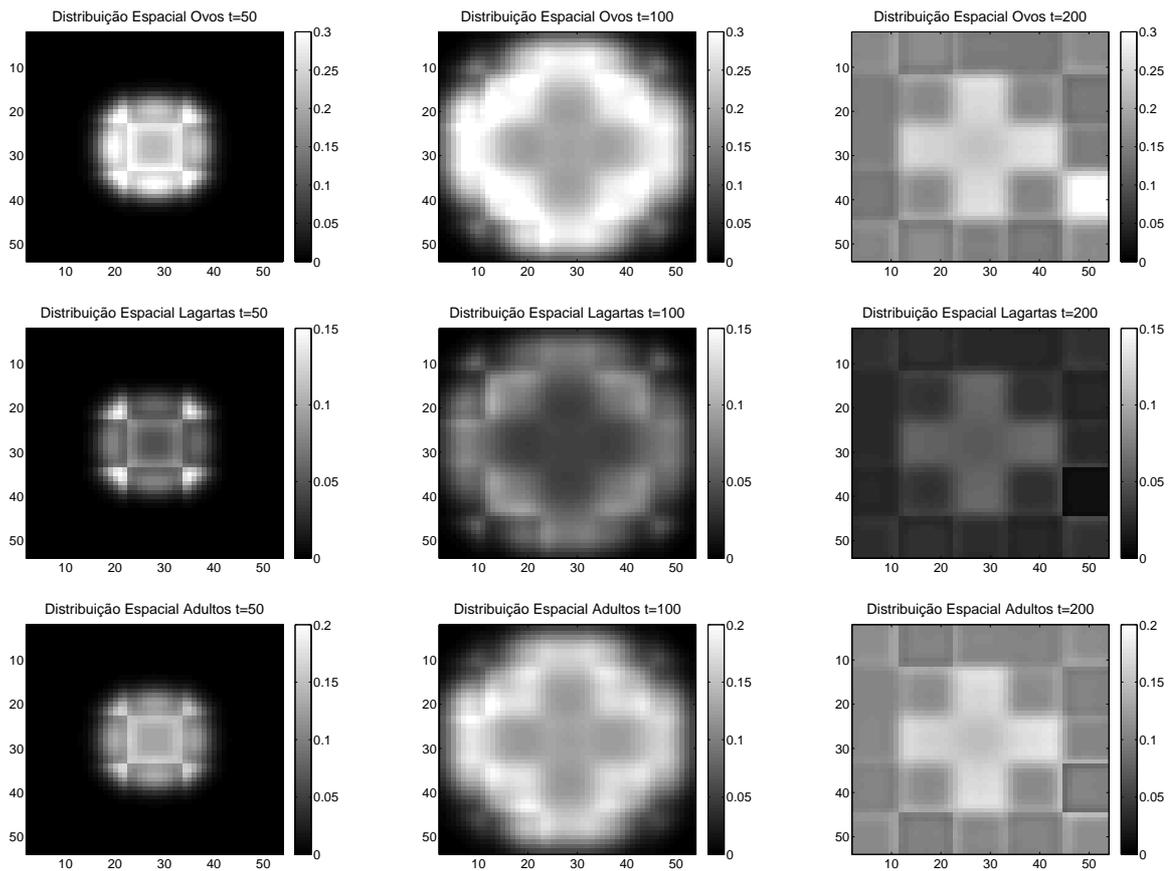


Figura 4.16: Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), movimentando-se por difusão e com o MIP aplicado de acordo com a estratégia II, com fatores de difusão dados na Tabela 4.1, em $t = 50, 100, 200$.

Agora, com a Estratégia II do MIP, a simetria se perde e o estado final das distribuições não é semelhante. As oscilações populacionais tornam-se mais significativas e os padrões espaciais com maior heterogeneidade. Isso se deve à maneira com que o MIP é aplicado, como agora os sítios avaliados são aleatórios e diferentes em cada instante de tempo, a aplicação do MIP difere.

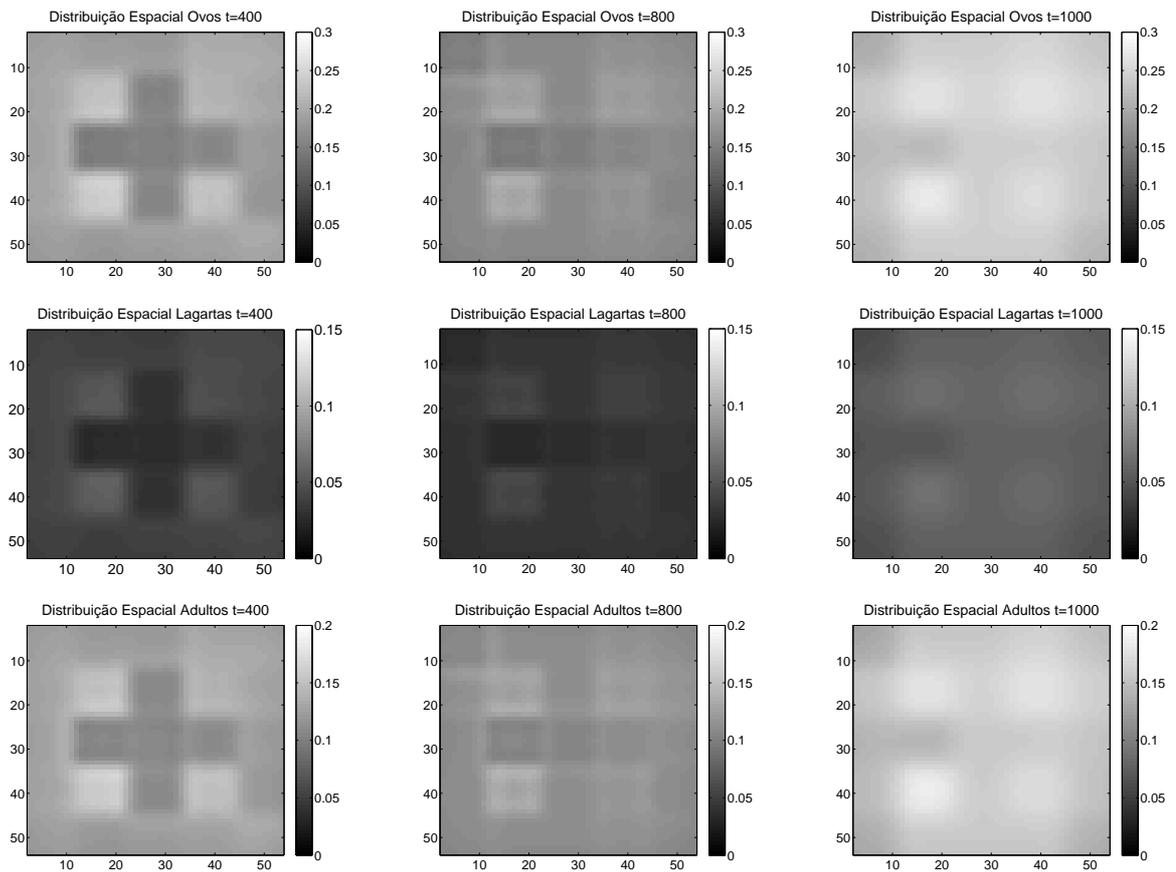


Figura 4.17: Distribuição espacial das mesmas populações que na Figura 4.16, com os mesmos fatores de difusão, em $t = 400, 800, 1000$.

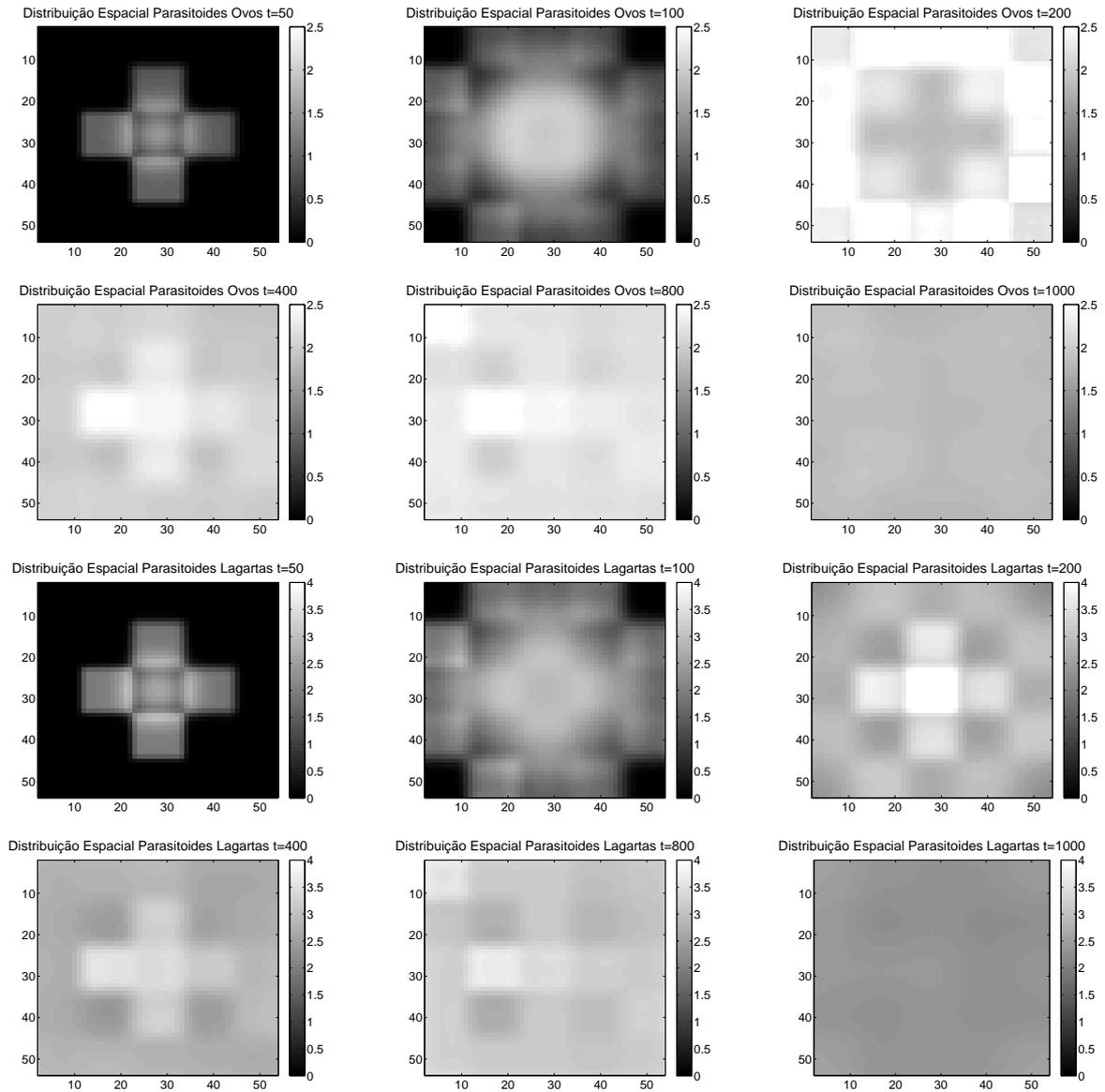


Figura 4.18: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), dispersando-se por difusão e com o MIP aplicado de acordo com a estratégia II, com fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1, em $t = 50, 100, 200, 400, 800, 1000$.

4.3.4 Dispersão por Difusão, Taxia Quase Local e MIP

Nesta subseção, implementaremos as estratégias do MIP descritas na Seção 4.2, ao sistema com dispersão por difusão para as lagartas e mariposas adultas, e taxia quase local para ambos os parasitoides.

Simulações para a Estratégia I do MIP

Na Figura 4.19 (a), apresentamos a evolução temporal das densidades populacionais totais. Após os transientes iniciais, as densidades oscilam de forma não periódica, e essas oscilações não se estabilizam para tempos maiores que os considerados, diferentemente do que ocorre na difusão, quando não há taxia dos parasitoides (Figura 4.9). Além disso, a aplicação do MIP reduz significativamente as densidades totais, mantendo-as bem abaixo das obtidas sem o MIP.

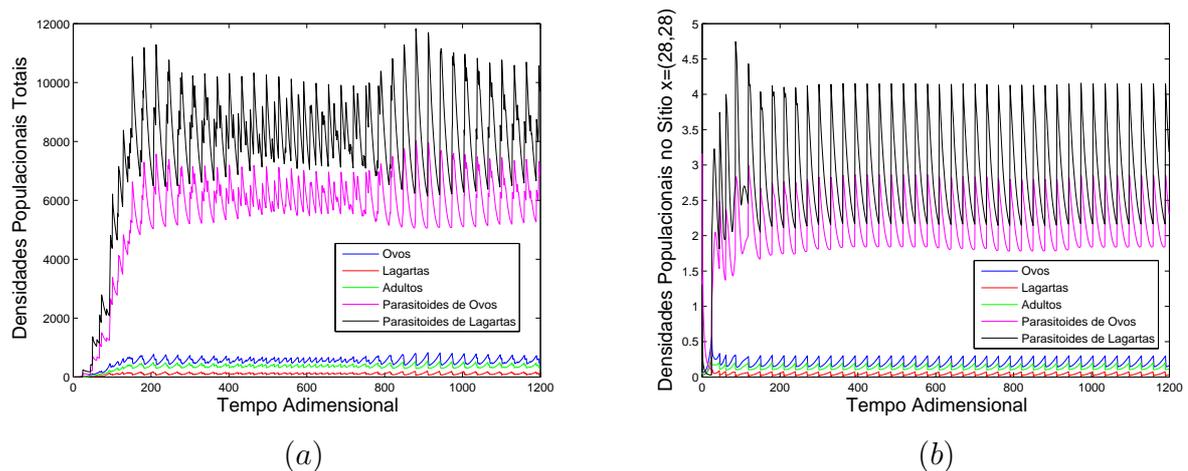


Figura 4.19: (a) Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo; (b) Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com dispersão por difusão para as populações da praga (fatores de difusão dados na Tabela 4.1); dispersão por taxia quase local para os parasitoides e MIP aplicado de acordo com a estratégia I.

Na Figura 4.19 (b), apresentamos a evolução temporal das densidades de cada população no sítio central. A densidade de fêmeas adultas é mantida abaixo do $LE = 0, 2$, e após os transientes iniciais, oscila entre os valores 0, 1025 e 0, 1982, aproximadamente. Essa oscilação não ocorre entre dois valores fixos para cada população, mas varia um pouco a cada aplicação do MIP. Podemos observar também que existe uma certa periodicidade entre as aplicações do MIP, no sítio central, como observado no caso difusivo (Figura 4.9).

Nas Figuras 4.20 e 4.21, apresentamos as distribuições espaciais das fases de vida da mariposa oriental em diversos instantes de tempo. Não há distinção clara entre os blocos, após a malha ser completamente tomada pelas populações; o que ocorre frequentemente

são blocos vizinhos com densidades populacionais semelhantes. A densidade de mariposas adultas é mantida abaixo do LE , comprovando a eficiência do MIP.

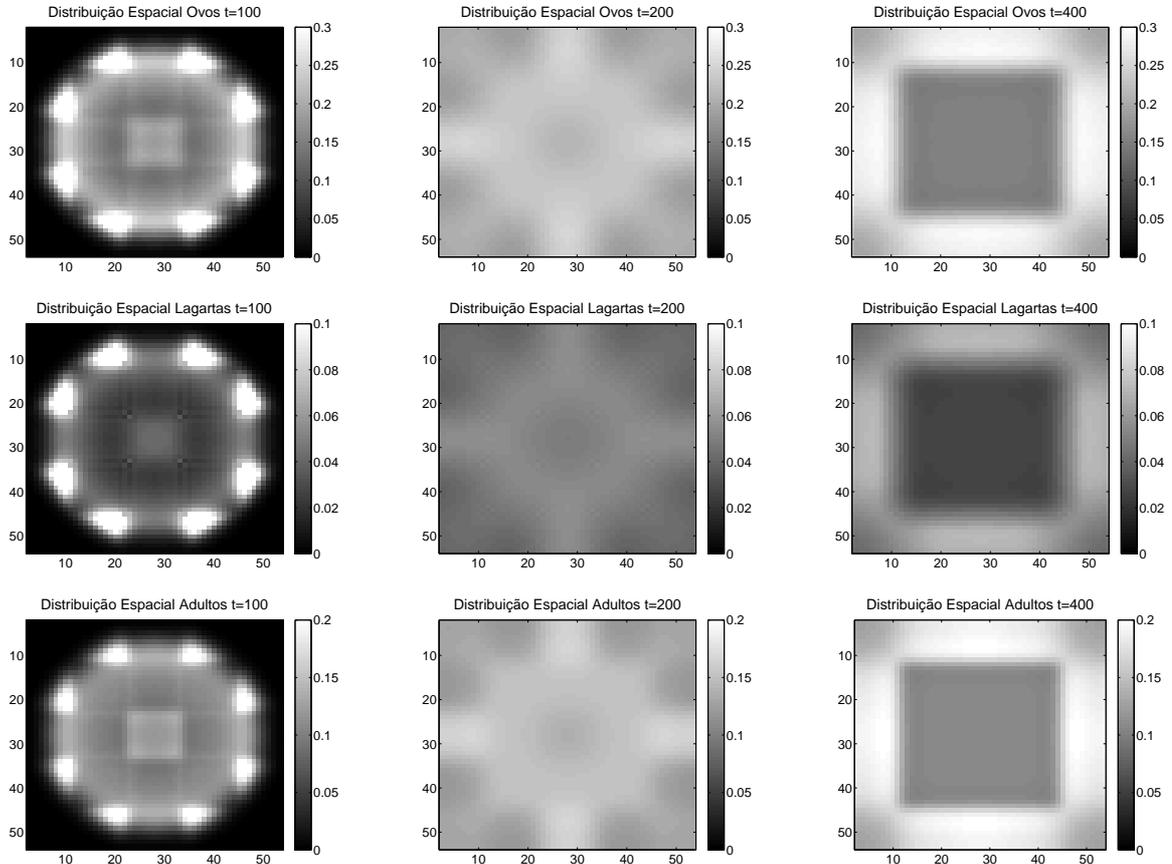


Figura 4.20: Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), dispersando-se por difusão com fatores dados na Tabela 4.1; parasitoides dispersando-se por taxia quase local; e MIP aplicado de acordo com a estratégia I, em $t = 100, 200, 400$.

Na Figura 4.22, apresentamos as distribuições espaciais dos parasitoides em diversos instantes de tempo. Como eles se dispersam segundo um movimento orientado (taxia quase local), observamos padrões diferentes daqueles nas Figuras 4.20 e 4.21. Em alguns instantes de tempo apresentados, observamos significativas variações de densidades, tanto entre sítios vizinhos quanto entre blocos vizinhos. Os padrões mais diferenciados ocorrem nas distribuições espaciais dos parasitoides de lagartas, como por exemplo para $t = 200$, $t = 800$ e $t = 1200$.

Das Figuras 4.21 e 4.22, podemos afirmar que ocorre uma certa simetria nas distribuições espaciais de todas as populações. Além disso, como observado para o caso em que não há taxia para os parasitoides, os estados finais das distribuições espaciais de cada população apresentam semelhanças de padrões, apenas variam nas densidades.

Em geral, blocos (ou sítios) com altas (baixas) densidades de parasitoides (de ovos

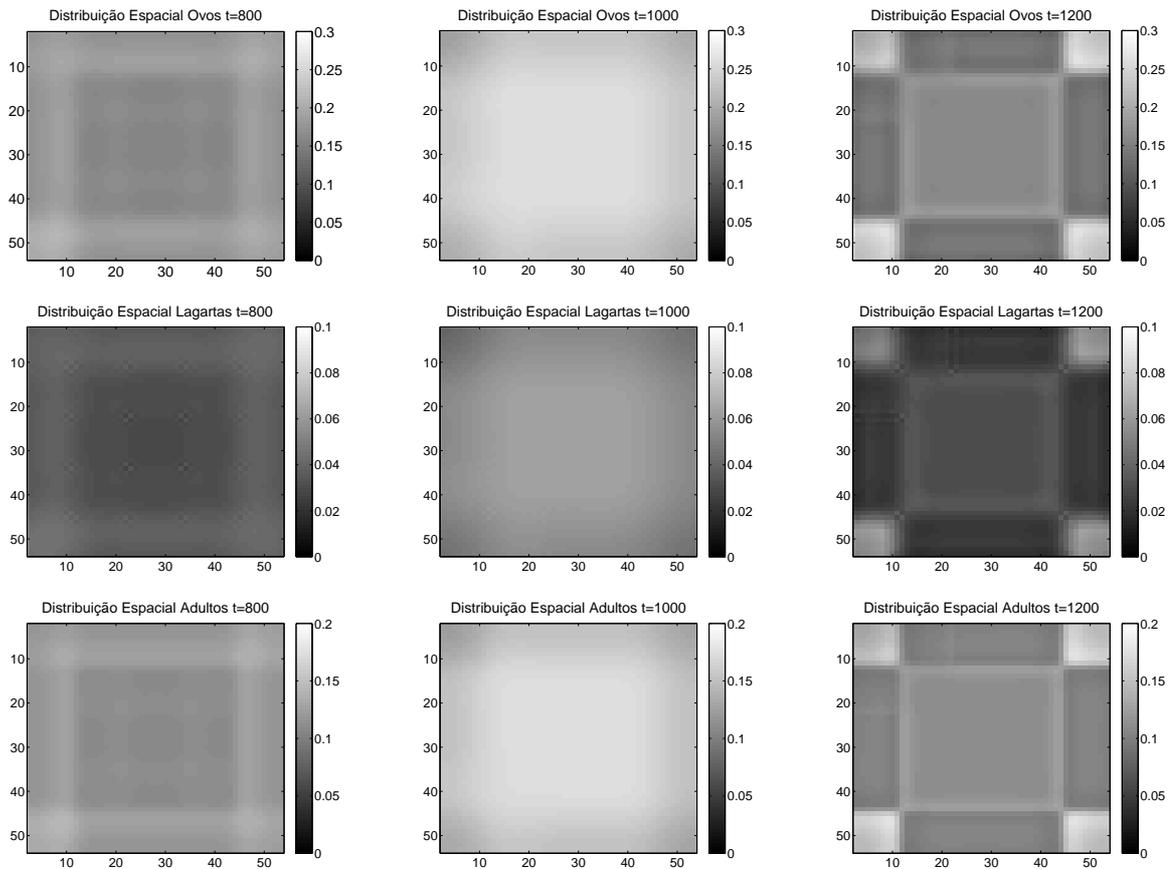


Figura 4.21: Distribuição espacial das mesmas populações da Figura 4.20, em $t = 800, 1000, 1200$.

e de lagartas) no instante t , apresentam baixas (altas) densidades de ovos e lagartas, no mesmo instante de tempo. Novamente, repetindo o que ocorreu no caso difusivo, padrões espaço temporais heterogêneos aparecem em todas as distribuições espaciais apresentadas. Isto ocorre porque o MIP altera o comportamento espaço temporal das populações. Neste caso, incluindo a dispersão por taxia quase local, ocorrem oscilações com diferentes amplitudes nas densidades populacionais.

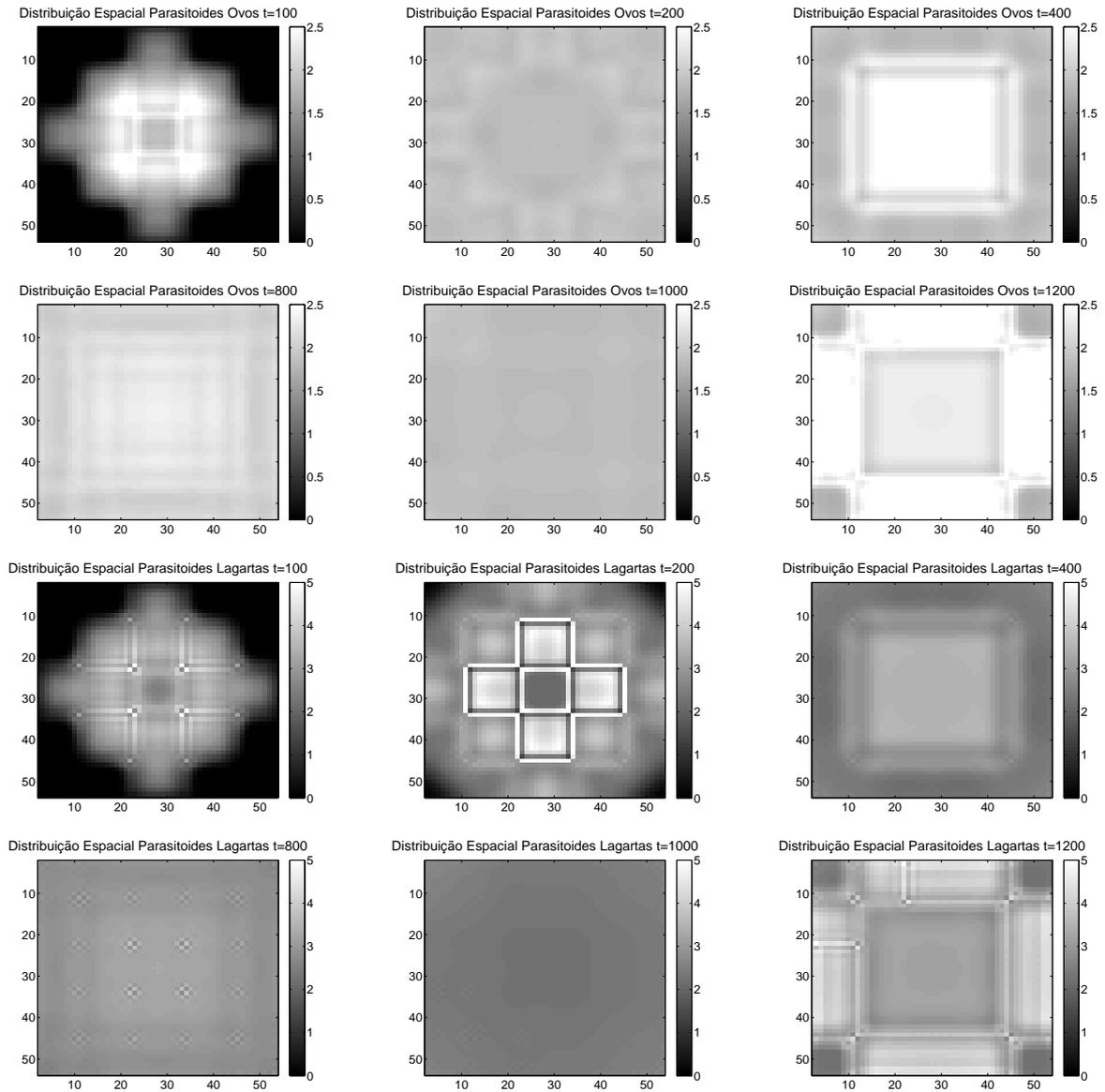


Figura 4.22: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas) com dispersão orientada por taxia quase local; lagartas e mariposas adultas dispersando-se por difusão (fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1) e MIP aplicado de acordo com a estratégia I, em $t = 100, 200, 400, 800, 1000, 1200$.

Simulações para a Estratégia II do MIP

Na Figura 4.23 (a), apresentamos a variação das densidades populacionais totais em toda a malha ao longo do tempo. Neste caso em que a avaliação das densidades de fêmeas adultas é feita em sítios aleatórios, as oscilações nas densidades não apresentam uma amplitude definida e nem periodicidade (oscilações aparentemente caóticas). Já tínhamos interpretado este fato como efeito da taxia (Figura 4.19(a)), mas este agora tornou-se mais significativo. Em tempos maiores que os apresentados não ocorre estabilização. Se compararmos com a Estratégia I (Figura 4.19 (a)), percebemos que as populações oscilam dentro da mesma margem mínima e máxima, salvo alguns instantes de tempo em que ocorrem picos populacionais. Além disso, o MIP reduz significativamente as densidades populacionais totais, se compararmos ao modelo sem o controle, como já era esperado.

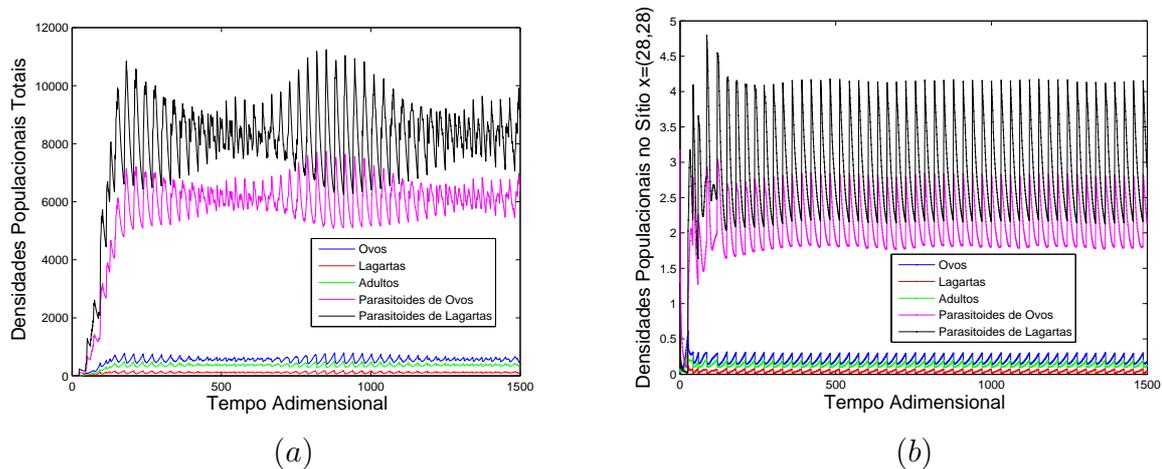


Figura 4.23: (a) Densidades populacionais totais de cada espécie ao longo do tempo; (b) Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com dispersão por difusão para as populações da praga; dispersão por taxia quase local para os parasitoides e MIP aplicado de acordo com a estratégia II.

Na Figura 4.23 (b), apresentamos a evolução temporal das densidades populacionais no sítio central. O comportamento é muito semelhante com o apresentado na Figura 4.19 (b), para a Estratégia I. Após os transientes iniciais as populações oscilam, devido ao MIP, que a cada aplicação diminui as densidades de lagartas e adultos e aumenta as densidades de parasitoides. A densidade de fêmeas adultas é mantida abaixo do LE , variando entre 0, 1020 e 0, 1973, o que demonstra a eficiência do MIP.

Nas Figuras 4.24 e 4.25, apresentamos as distribuições espaciais das fases de vida da mariposa oriental (ovos, lagartas e adultos). As simetrias observadas para a Estratégia I (Figuras 4.20 e 4.21), não estão presentes agora. O controle feito aleatoriamente, faz com que blocos fiquem com baixas densidades em relação aos blocos vizinhos, e após $t = 400$, não é mais possível a distinção dos blocos. A densidade de fêmeas adultas é mantida

abaixo do LE em todos os blocos.

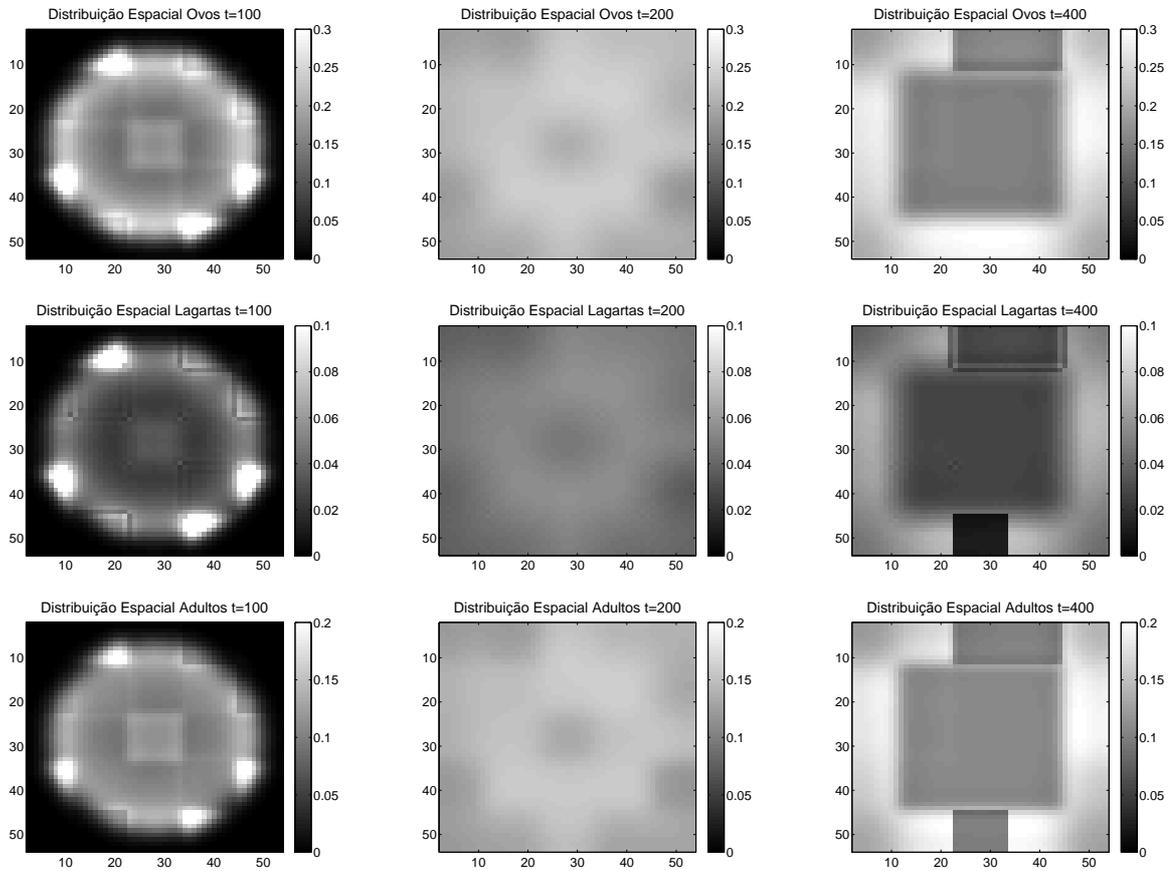


Figura 4.24: Distribuição espacial das populações de ovos (primeira linha), de lagartas (segunda linha) e de mariposas adultas (terceira linha), dispersando-se por difusão (fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1); parasitoides dispersando-se por taxia quase local e MIP aplicado de acordo com a estratégia II, em $t = 100, 200, 400$.

As distribuições espaciais dos parasitoides em diversos instantes de tempo são apresentadas na Figura 4.26. Os parasitoides também não apresentam uma distribuição simétrica, como observada na Estratégia I. Contudo, ainda observamos grandes variações nas densidades populacionais em sítios vizinhos. Os blocos também ficam pouco evidentes após $t = 400$, e as densidades populacionais variam de forma diferente às apresentadas na Figura 4.21 (observe as variações nos tons de cinza).

A aplicação da Estratégia II do MIP para a dispersão orientada, com taxia quase local, também faz com que as distribuições espaciais apresentem padrões espaço temporais heterogêneos. Esta estratégia de controle mostrou-se eficiente no controle da mariposa oriental, baixando as densidades de ovos, lagartas e fêmeas adultas, em relação ao modelo sem a aplicação do MIP.

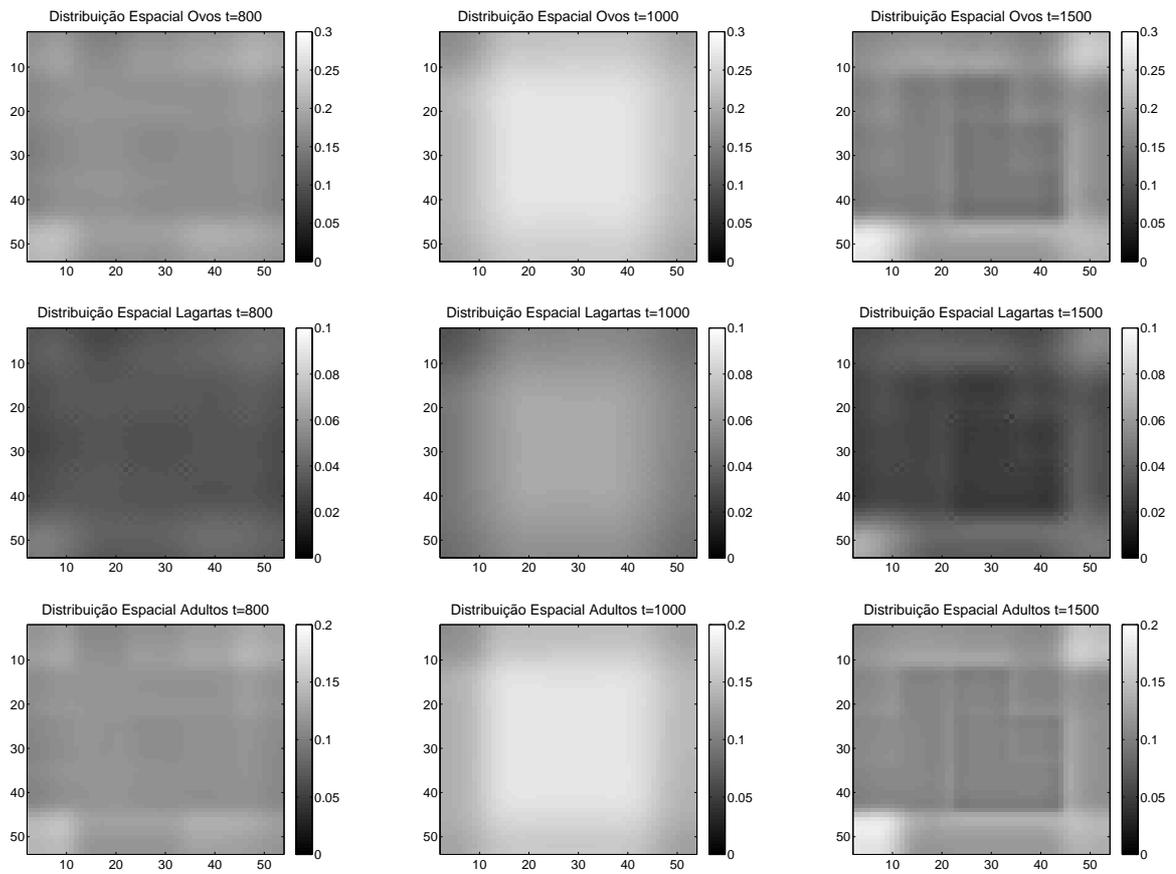


Figura 4.25: Distribuição espacial das mesmas populações da Figura 4.24, em $t = 800, 1000, 1500$.

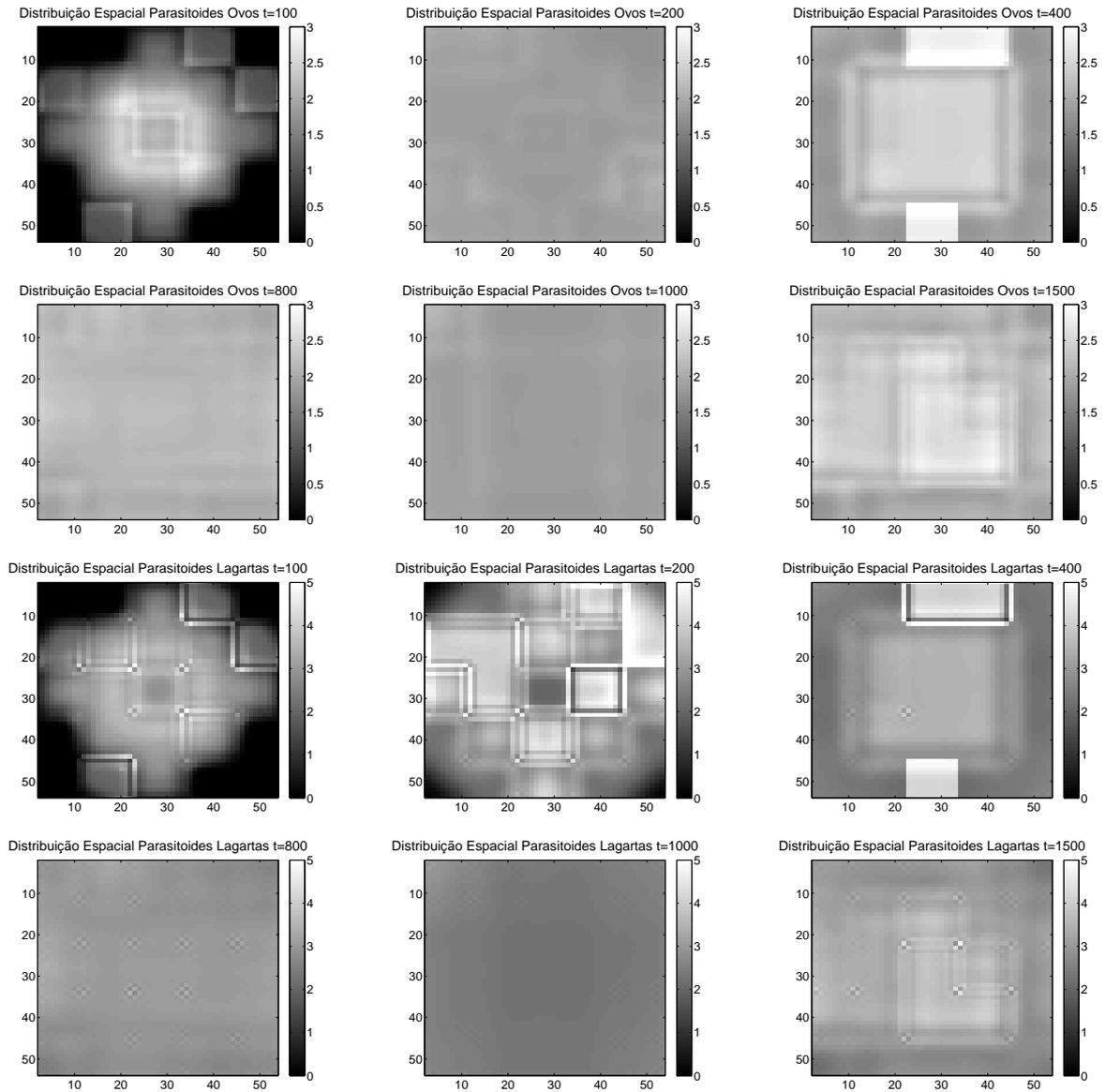


Figura 4.26: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas) com dispersão orientada por taxia quase local; lagartas e mariposas adultas dispersando-se por difusão (fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1) e MIP aplicado de acordo com a estratégia II, em $t = 100, 200, 400, 800, 1000, 1500$.

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo, incluímos ao modelo básico adimensional I proposto no Capítulo 2 a estrutura espacial através de uma rede discreta bidimensional. Permanecendo os ovos do inseto-praga sempre na mesma posição, dois tipos de movimentação foram considerados: 1) difusão simples para as quatro populações restantes; 2) difusão simples para lagartas e mariposas adultas e taxia quase local para ambos os parasitoides.

Os dois tipos de movimentação considerados provocaram mudanças no comportamento das populações, em relação à variação das densidades ao longo do tempo. As densidades populacionais em cada sítio sem o controle (Subseções 4.3.1 e 4.3.2), apresentam o mesmo comportamento obtido com o modelo local (Capítulo 2), para ambos os tipos de movimentação.

Na movimentação apenas difusiva, as populações distribuem-se homoganeamente no espaço com o passar do tempo. Já no caso da movimentação mista, por difusão para lagartas e fêmeas adultas e por taxia quase local para os parasitoides, a distribuição espacial torna-se heterogênea com o passar do tempo. Cabe ressaltar, que esta heterogeneidade espacial apresenta variações muito pequenas de densidades populacionais entre os sítios.

Ao incluímos o MIP, consideramos duas estratégias de aplicação: Estratégia I (Subseção 4.2.1) e Estratégia II (Subseção 4.2.2). Em ambos os casos, e para os dois tipos de movimentação acima citadas, o MIP mostrou-se eficiente no controle da mariposa oriental, mantendo a densidade de fêmeas adultas abaixo do LE , reduzindo a população de ovos e de lagartas a níveis menores que os observados no modelo sem o controle.

Em todos os casos, o MIP provoca alterações no comportamento espaço-temporal das populações. Antes do MIP, a distribuição espacial das populações eram homogêneas (difusão) ou heterogêneas (difusão e taxia quase local), mas após a aplicação de ambas as estratégias do MIP, padrões heterogêneos são observados, surgindo também oscilações nas densidades populacionais ao longo do tempo.

Para os dois tipos de movimentação, utilizando a Estratégia I para a aplicação do MIP, as populações distribuem-se de forma simétrica no espaço, e os estados finais de cada população apresentam padrões heterogêneos semelhantes, variando nas densidades populacionais. No caso da Estratégia II não existe simetria nas distribuições espaciais e nem semelhanças nos estados finais das distribuições. Ao que tudo indica, a aleatoriedade na escolha dos sítios a serem avaliados a cada instante de tempo, para a aplicação do MIP, causa a perda da simetria antes existente.

A Estratégia I necessita de maior mão de obra se fosse aplicada nos pomares, pois se considerarmos que cada sítio contém um pessegueiro, todos os pessegueiros de cada bloco teriam que ser verificados, ou seja, armadilhas teriam que ser instaladas em todas as plantas. Isto não é viável economicamente e nem necessário, segundo a literatura (Botton et al., 2011), embora, nos pareça ser a maneira mais segura de evitar que a praga atinja

altas densidades populacionais e que venha a afetar todo o pomar.

A Estratégia II é semelhante ao que é feito na prática, armadilhas são colocadas em algumas plantas aleatórias no pomar (sítios), dependendo do tamanho do pomar há um número de armadilhas recomendado. Somente os insetos capturados nestas armadilhas é que serão contabilizados para a posterior aplicação ou não das técnicas de controle (Botton et al., 2011). Acreditamos que adotar este método pode causar falhas, pois determinada armadilha pode não ter capturado o número de insetos necessário para se fazer uso do controle, mas numa vizinhança, a densidade populacional já pode estar acima do LE . Esta conclusão baseia-se nas distribuições espaciais heterogêneas e sem padrões simétricos obtidas nas simulações numéricas.

Capítulo 5

FEROMÔNIOS SEXUAIS SINTÉTICOS NO MANEJO DA *GRAPHOLITA MOLESTA*

Neste capítulo, abordaremos o uso de feromônios sexuais sintéticos como mecanismo para a interrupção do acasalamento, reduzindo assim a reprodução da mariposa oriental, e conseqüentemente, os danos causados por ela à produção de pêssegos. Inicialmente, faremos uma breve introdução ao que são feromônios e como são utilizados no manejo de pragas. Na seqüência apresentaremos a abordagem matemática para a utilização de feromônios e posteriormente simulações com os casos considerados.

5.1 Feromônios Sexuais e a sua Aplicação no Manejo de Pragas

Algumas espécies de insetos empregam odores ou sinais químicos para a comunicação entre si ou para reagir à presença de outros seres. Esses odores que mediam a comunicação entre indivíduos de uma mesma espécie são conhecidos como feromônios. O primeiro feromônio isolado de uma espécie de inseto foi o do bicho-da-seda *Bombyx mori*, tratando-se de um álcool liberado pelas fêmeas para atrair os machos para o acasalamento (Vilela e Della Lúcia, 2001).

De acordo com a resposta comportamental produzida pelos feromônios, essas substâncias podem ser classificadas como: sexuais, de dispersão, de alarme, de agregação, de marcação de trilha e de postura (Vilela e Della Lucia, 2001). Os feromônios sexuais de insetos são os mais estudados, pois sua produção em laboratório apresenta perspectivas de aplicação no manejo de pragas (Arioli et al., 2013), na medida em que visam diminuir a reprodução dos insetos; a sua existência já foi confirmada em pelo menos doze ordens de insetos (Vilela e Della Lucia, 2001).

Os principais estudos foram conduzidos com espécies pertencentes à ordem Lepidoptera, cujos feromônios sexuais são constituídos por uma mistura de compostos com funções específicas. Alguns desses compostos atuam na atração de espécimes do sexo oposto que se encontram distantes, enquanto que outros atuam atraindo os que estão próximos (Vilela e Della Lucia, 2001). Esses compostos são produzidos principalmente pelas fêmeas para a atração dos machos para o acasalamento (Mafra-Netto, 1993; Vilela e Della Lucia, 2001).

O feromônio sexual, quando liberado, é dissipado pelo vento, originando uma trilha de odor que segue a direção e a turbulência da corrente de ar, diminuindo a concentração à medida que aumenta a distância da fonte emissora. Nos machos da ordem Lepidoptera, a sequência de respostas desencadeadas pela presença do feromônio sexual começa pela percepção através das antenas, seguido por voo errático e, após localizar a trilha, voa em direção à fonte emissora, até encontrar a fêmea, culminando com o acasalamento (Mafra-Netto, 1993; Vilela e Della Lucia, 2001).

Feromônios sexuais produzidos em laboratório têm sido estudados com dois objetivos: o primeiro é o de monitoramento populacional ou captura massal de insetos, que consiste em atrair os insetos para a fonte emissora de feromônio; o segundo visa impedir o encontro entre machos e fêmeas, técnica denominada “interrupção de acasalamento” ou “disrupção sexual” (Botton et al., 2005; Pastori et al., 2008; Härter et al., 2010; Arioli et al., 2013).

A utilização de feromônio para monitoramento já foi abordada na Seção 3.2 (armadilhas do tipo Delta). Nosso objetivo agora é tratar da utilização de feromônios sexuais para a interrupção do acasalamento. Este método tem por objetivo interferir nos processos ou nos mecanismos que atuam sobre a capacidade dos machos localizarem as fêmeas para o acasalamento, e a liberação de feromônio sexual sintético no ambiente serve para desorientá-los (Arioli et al., 2013). Com uma pequena quantidade de feromônio o macho localiza a fêmea, mas com uma grande liberação dessa substância, o encontro entre machos e fêmeas é dificultado, podendo inclusive não ocorrer, causando assim a diminuição dos acasalamentos (Agosta, 1990).

O feromônio sintético para a interrupção do acasalamento foi utilizado pela primeira vez em campo nos EUA, para controlar a lagarta-rosada *P. gossypiella* em lavouras de algodão (Hummel et al., 1973). No Brasil, foram registrados três produtos para a interrupção do acasalamento da *Grapholita molesta*, a saber: Biolita[®], Splat Grafo[®] e Cetro[®] (Arioli et al., 2013).

A técnica de interrupção do acasalamento utilizando feromônio sexual sintético está sendo empregada para o controle da mariposa oriental (Arioli, 2007; Monteiro et al., 2008; Pastori et al., 2008; Pastori et al., 2012; Santana, 2012) em aproximadamente 30% dos pomares no Brasil, principalmente pelos produtores de maçãs, devido às características do cultivo. Em pessegueiro, ameixeira e pereira, o emprego desta tecnologia já vem sendo

utilizado nos pomares maiores do Estado de São Paulo; em pomares pequenos, como os do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, vem sendo utilizado apenas em caráter experimental (Botton et al., 2005(b); Härter et al., 2010; Arioli e Botton, 2012).

A interrupção dos acasalamentos dos insetos ocorre quando é liberada no ambiente uma quantidade de feromônio sexual sintético maior que aquela emitida naturalmente pela população normal de fêmeas (Arioli et al., 2013). Nos Lepidópteros, como é o caso da mariposa oriental, os mecanismos principais de reação dos insetos à aplicação de feromônios sexuais sintéticos, são:

- **Diminuição da resposta:** Com a adaptação do inseto ao feromônio sintético, pode ocorrer a diminuição da capacidade de percepção do feromônio ou o inseto pode não perceber esse feromônio;
- **Camuflagem das trilhas naturais das fêmeas:** A saturação de feromônio sexual sintético no pomar torna imperceptível o composto emitido pela fêmea, fazendo com que os machos não localizem a trilha de feromônio sexual natural emitido;
- **Competição entre as fontes de feromônios sintéticos e naturais:** Faz com que os machos sigam diversas trilhas do feromônio sexual sintético aplicado no campo, reduzindo assim a possibilidade de encontrar as fêmeas;
- **Desequilíbrio do nível de informação obtida:** Os feromônios sexuais sintéticos apresentam apenas parte dos componentes presentes no feromônio natural; com isso, os machos ao perceberem no ambiente o feromônio natural, sentem somente os componentes que estavam ausentes no feromônio sintético, reduzindo a resposta dos mesmos ao feromônio natural.

Na prática, devido às particularidades nas formulações dos feromônios sexuais sintéticos existentes no mercado, para o controle de insetos na fruticultura, originaram-se subdivisões na técnica de interrupção do acasalamento, denominadas: **confusão sexual**, **atração competitiva**, **autoconfusão** e **atrai-e-mata** (Arioli et al., 2013).

A confusão sexual caracteriza-se pela liberação de uma grande quantidade de feromônio sexual sintético, distribuída em muitos pontos por hectare, o que gera uma camada de ar saturado por essa substância. Essa saturação dificulta aos machos encontrarem a trilha de feromônio natural emitido pelas fêmeas. O feromônio é liberado através da instalação de emissores, que podem ser sachês, ampolas, entre outros (Arioli et al., 2013).

A atração competitiva ou seguimento de falsas trilhas caracteriza-se pela aplicação de uma quantidade bem menor de feromônios do que no caso da confusão sexual, mas em uma maior quantidade de locais, originando um grande número de falsas trilhas com odores semelhantes aos emitidos por fêmeas. Essa técnica diminui os encontros entre machos e fêmeas, pois as falsas trilhas competem na atenção e no tempo dos machos. A vantagem dessa técnica em relação à confusão sexual está na eficiência de controle do inseto alvo

com o emprego de uma quantidade menor de feromônio, mas necessitando de mais mão de obra para a aplicação (Arioli et al., 2013).

A autoconfusão caracteriza-se pela atração dos machos por uma fonte de feromônio sexual sintético (liberador ou armadilha) que se encontra com alta concentração. Ao entrarem em contato com essa alta concentração de feromônio, os machos captam uma elevada quantidade, perdendo assim a sua capacidade para localizar as fêmeas. Além disso, os machos tornam-se difusores de feromônio, pois ficam impregnados com a substância, criando falsas trilhas, que atraem outros machos (Arioli et al., 2013).

A técnica atrai-e-mata tem por finalidade atrair os machos para uma fonte emissora de feromônio sexual sintético contendo inseticida em sua composição. Ao ocorrer o contato com essa fonte emissora, o inseto contamina-se, resultando em morte ou sequelas, fazendo com que o macho não encontre as fêmeas (Bento, 2001).

Os principais fatores que interferem na eficiência da adoção da técnica de interrupção do acasalamento, através da utilização de feromônios sexuais sintéticos, são (Arioli et al., 2013):

- **Formato e dimensão da área:** A eficiência desta técnica é obtida quando os liberadores de feromônio forem espalhados em áreas maiores que 10 ha, em pomares com formato quadrado ou circular. Em áreas menores ou com outros formatos, a técnica pode ser adotada, mas a eficiência nas bordas diminui. Nas bordas a concentração do feromônio diminui, em relação à região central, devido à ação do vento e à migração de fêmeas fecundadas de outras áreas.
- **Densidade populacional do inseto praga:** A densidade populacional da praga é o que mais influencia na eficiência desta técnica, pois quanto mais insetos, maior a chance de haver acasalamento. Por esse motivo, quando a densidade de insetos for alta, é recomendado fazer uma aplicação preventiva de inseticida para baixá-la e após distribuir os liberadores de feromônio no pomar. Para a maioria das espécies não há parâmetros que definam qual é a densidade populacional ideal da praga para a adoção da técnica. Contudo, para o caso das maçãs, Arioli (2007) define que capturas inferiores a 30 machos adultos/armadilha/semana e danos em frutos inferiores a 1% durante a safra, são as condições ideais para a adoção da interrupção do acasalamento.
- **Dose de feromônio:** O feromônio deve ser liberado em taxas constantes e adequadas durante todo o seu período de atividade.
- **Momento da aplicação:** A aplicação é preventiva, visando impedir os acasalamentos. Não tem efeito sobre os insetos já acasalados, ovos e lagartas. Por isso, em áreas com altos índices de acasalamento, a técnica pode não apresentar resultados satisfatórios. Para garantir a eficácia da técnica é preciso instalar os emissores de

feromônio sexual antes que aconteça o primeiro pico populacional da praga. Em locais em que a praga não apresenta diapausa, é necessário manter os emissores no pomar durante todo o ano.

- **Modo de aplicação dos liberadores:** Os liberadores de feromônio sexual são em geral distribuídos de maneira uniforme no pomar.

5.2 Construção do Modelo Básico II

Como visto na seção anterior, para aplicarmos a técnica de interrupção do acasalamento, através da utilização de feromônios sexuais sintéticos, é necessário considerar a presença das mariposas macho no ambiente. Assim, desenvolveremos uma EDO para descrever a variação populacional de mariposas macho em relação ao tempo e também faremos uma modificação na equação para os ovos, como veremos a seguir.

Agora, nosso sistema será composto por seis EDO's de primeira ordem não lineares, quatro para as quatro subpopulações da grafolita e duas para os parasitoides específicos. Incluiremos a variável \mathbf{W} para representar a densidade de machos adultos da *G. molesta* no instante T .

A taxa de variação da densidade de ovos \mathbf{V} no instante T , terá uma contribuição positiva proporcional a quantidade de ovos postos por unidade de tempo, e as seguintes contribuições negativas: a quantidade de ovos que eclodem e dão origem às lagartas, a quantidade de ovos que morrem naturalmente e a quantidade de ovos parasitados pelo *Trichogramma pretiosum*, que darão origem a parasitoide no próximo instante de tempo, por unidade de tempo. Como no modelo básico I, consideramos que o crescimento dos ovos se dá de acordo com o Modelo Logístico, mas agora levando em consideração que o número NW de encontros entre machos e fêmeas é que darão origem a ovos no próximo instante de tempo. O parasitoidismo se dá como no modelo básico I (1.6). Logo, teremos a equação:

$$\frac{dV}{dT} = r\epsilon NW \left(1 - \frac{N}{K}\right) - (\alpha_V + \mu_V)V - \frac{\eta_V VS}{\sigma + V}, \quad (5.1)$$

onde:

- r : é a taxa de ovoposição das fêmeas adultas;
- ϵ : é a proporção por macho de encontros com fêmeas que são viáveis (resultam em ovos);
- K : é a capacidade suporte do meio ambiente em relação às fêmeas adultas;
- α_V : é a taxa de ovos que eclodem e originam lagartas;
- μ_V : é taxa de mortalidade natural dos ovos;

- η_V : é a taxa de parasitoidismo do *Trichogramma pretiosum* nos ovos;
- σ : é o parâmetro de meia saturação do parasitoide de ovos.

A taxa de variação da densidade de mariposas adultas macho no instante T, tem uma contribuição positiva proporcional à quantidade de lagartas que originam pupas e posteriormente adultos e que são machos, por unidade de tempo, e uma contribuição negativa proporcional à quantidade de mariposas macho que morrem naturalmente, por unidade de tempo. Assim, temos a equação:

$$\frac{dW}{dT} = (1 - \alpha_N)\alpha_L L - \mu_A W, \quad (5.2)$$

onde:

- α_N : é o parâmetro que representa a proporção de adultos que são fêmeas;
- μ_A : é a taxa de mortalidade natural das mariposas adultas.

Considerando as equações (5.1), (1.2), (1.3), (5.2), (1.4) e (1.5) temos o modelo básico II para o estudo da dinâmica vital da grafolita e de seus principais inimigos naturais:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV}{dT} = r\epsilon NW \left(1 - \frac{N}{K}\right) - (\alpha_V + \mu_V)V - \frac{\eta_V VS}{\sigma + V}, \\ \frac{dL}{dT} = \alpha_V V - (\alpha_L + \mu_L)L - \frac{\eta_L LP}{\Gamma + L}, \\ \frac{dN}{dT} = \alpha_N \alpha_L L - \mu_A N, \\ \frac{dW}{dT} = (1 - \alpha_N)\alpha_L L - \mu_A W, \\ \frac{dS}{dT} = \frac{\eta_S \eta_V VS}{\sigma + V} - \mu_S S, \\ \frac{dP}{dT} = \frac{\eta_P \eta_L LP}{\Gamma + L} - \mu_P P. \end{array} \right. \quad (5.3)$$

5.2.1 Adimensionalização do Modelo Básico II

A adimensionalização do modelo básico II (5.3), para a dinâmica vital da mariposa oriental e dos parasitoides é efetuada definindo as variáveis adimensionais $v = \frac{V}{\sigma}$; $l = \frac{L}{\Gamma}$; $n = \frac{N}{K}$; $w = \frac{W}{K}$; $s = \frac{S}{\sigma}$; $p = \frac{P}{\Gamma}$ e $t = rT$, onde, v , l , n , w , s e p são as novas populações adimensionais de ovos, lagartas, fêmeas adultas, machos adultos, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, respectivamente, e t é o tempo adimensional. Obtemos o sistema

em sua forma adimensional:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv}{dt} = \phi n w (1 - n) - \delta_v v - \frac{\beta_v v s}{1 + v}, \\ \frac{dl}{dt} = \rho_l v - \delta_l l - \frac{\beta_l l p}{1 + l}, \\ \frac{dn}{dt} = \alpha_{nl} l - \mu_a n, \\ \frac{dw}{dt} = \alpha_{wl} l - \mu_a w, \\ \frac{ds}{dt} = \frac{\beta_{sv} v s}{1 + v} - \mu_s s, \\ \frac{dp}{dt} = \frac{\beta_{pl} l p}{1 + l} - \mu_p p, \end{array} \right. \quad (5.4)$$

envolvendo os seguintes parâmetros adimensionais:

$$\begin{aligned} \phi &\equiv \frac{\epsilon K^2}{\sigma}, \quad \delta_v \equiv \frac{\alpha_V + \mu_V}{r}, \quad \beta_v \equiv \frac{\eta_V}{r}, \quad \rho_l \equiv \frac{\alpha_V \sigma}{\Gamma r}, \quad \delta_l \equiv \frac{\alpha_L + \mu_L}{r}, \quad \beta_l \equiv \frac{\eta_L}{r}, \quad \alpha_{nl} \equiv \frac{\alpha_N \alpha_L \Gamma}{K r}, \\ \alpha_{wl} &\equiv \frac{(1 - \alpha_N) \alpha_L \Gamma}{K r}, \quad \mu_a \equiv \frac{\mu_A}{r}, \quad \beta_{sv} \equiv \eta_S \beta_v, \quad \mu_s \equiv \frac{\mu_S}{r}, \quad \beta_{pl} \equiv \eta_P \beta_l, \quad \mu_p \equiv \frac{\mu_P}{r}. \end{aligned}$$

5.2.2 Pontos de Equilíbrio

O sistema (5.4) apresenta seis pontos de equilíbrio $E^* = (v^*, l^*, n^*, w^*, s^*, p^*)$, a saber:

- Extinção de todas as populações:

$$E_0 = (0, 0, 0, 0, 0, 0);$$

- Extinção de ambos os parasitoides:

$$E_1 = (v_1; l_1; n_1; w_1; 0; 0), \text{ onde:}$$

$$v_1 = \frac{\delta_l \mu_a}{2 \rho_l \alpha_{nl}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \delta_v \delta_l \mu_a}{\phi \rho_l \alpha_{wl}}} \right);$$

$$l_1 = \frac{\mu_a}{2 \alpha_{nl}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \delta_v \delta_l \mu_a}{\phi \rho_l \alpha_{wl}}} \right);$$

$$n_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \delta_v \delta_l \mu_a}{\phi \rho_l \alpha_{wl}}} \right);$$

$$w_1 = \frac{\alpha_{wl}}{2 \alpha_{nl}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \delta_v \delta_l \mu_a}{\phi \rho_l \alpha_{wl}}} \right).$$

$$E_2 = (v_2; l_2; n_2; w_2; 0; 0), \text{ onde:}$$

$$v_2 = \frac{\delta_l \mu_a}{2 \rho_l \alpha_{nl}} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \delta_v \delta_l \mu_a}{\phi \rho_l \alpha_{wl}}} \right);$$

$$l_2 = \frac{\mu_a}{2\alpha_{nl}} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\delta_v\delta_l\mu_a}{\phi\rho_l\alpha_{wl}}} \right);$$

$$n_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\delta_v\delta_l\mu_a}{\phi\rho_l\alpha_{wl}}} \right);$$

$$w_2 = \frac{\alpha_{wl}}{2\alpha_{nl}} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\delta_v\delta_l\mu_a}{\phi\rho_l\alpha_{wl}}} \right).$$

- Extinção do parasitoide de ovos:

$$E_3 = (v_3; l_3; n_3; w_3; 0; p_3), \text{ onde:}$$

$$v_3 = \frac{\phi\alpha_{nl}\alpha_{wl}\mu_p^2(\alpha_{nl}\mu_p - \beta_{pl}\mu_a + \mu_p\mu_a)}{-\delta_v(\beta_{pl} - \mu_p)^3\mu_a};$$

$$l_3 = \frac{\mu_a}{\alpha_{nl}} \left(1 - \frac{(\beta_{pl}^3 - \mu_p^3)}{(\beta_{pl} - \mu_p)^3} + \frac{3\beta_{pl}\mu_p}{(\beta_{pl} - \mu_p)^2} + \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{(\beta_{pl} - \mu_p)\mu_a} \right);$$

$$n_3 = 1 - \frac{(\beta_{pl}^3 - \mu_p^3)}{(\beta_{pl} - \mu_p)^3} + \frac{3\beta_{pl}\mu_p}{(\beta_{pl} - \mu_p)^2} + \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{(\beta_{pl} - \mu_p)\mu_a};$$

$$w_3 = \frac{\alpha_{wl}}{\alpha_{nl}} \left(1 - \frac{(\beta_{pl}^3 - \mu_p^3)}{(\beta_{pl} - \mu_p)^3} + \frac{3\beta_{pl}\mu_p}{(\beta_{pl} - \mu_p)^2} + \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{(\beta_{pl} - \mu_p)\mu_a} \right);$$

$$p_3 = \frac{-\beta_{pl}(\delta_v\delta_l(\beta_{pl} - \mu_p)^2\mu_a^3 + \phi\rho_l\alpha_{nl}\alpha_{wl}\mu_p(\alpha_{nl}\mu_p - (\beta_{pl} - \mu_p)\mu_a))}{\beta_l\delta_v(\beta_{pl} - \mu_p)^3\mu_a^3}.$$

- Extinção do parasitoide de lagartas:

$$E_4 = (v_4; l_4; n_4; w_4; s_4; 0), \text{ onde:}$$

$$v_4 = \frac{\mu_s}{\beta_{sv} - \mu_s};$$

$$l_4 = \frac{\rho_l\mu_s}{\delta_l(\beta_{sv} - \mu_s)};$$

$$n_4 = \frac{\rho_l\alpha_{nl}\mu_s}{\mu_a\delta_l(\beta_{sv} - \mu_s)};$$

$$w_4 = \frac{\rho_l\alpha_{wl}\mu_s}{\mu_a\delta_l(\beta_{sv} - \mu_s)};$$

$$s_4 = \frac{-\beta_{sv}(\phi\rho_l^3\alpha_{nl}^2\alpha_{wl}\mu_s^2 - \phi\rho_l^2\alpha_{nl}\alpha_{wl}\delta_l\mu_s(\beta_{sv} - \mu_s)\mu_a + \delta_v\delta_l^3(\beta_{sv} - \mu_s)^2\mu_a^3)}{\beta_v\delta_l^3(\beta_{sv} - \mu_s)^3\mu_a^3}.$$

- Coexistência de todas as espécies:

$$E_5 = (v_5; l_5; n_5; w_5; s_5; p_5), \text{ onde:}$$

$$v_5 = \frac{\mu_s}{\beta_{sv} - \mu_s};$$

$$l_5 = \frac{\mu_p}{\beta_{pl} - \mu_p};$$

$$n_5 = \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{\mu_a(\beta_{pl} - \mu_p)};$$

$$w_5 = \frac{\alpha_{wl}\mu_p}{\mu_a(\beta_{pl} - \mu_p)};$$

$$s_5 = \frac{1}{\beta_v\mu_s} \left[-\delta_v\mu_s \left(1 + \frac{\mu_s}{\beta_{sv} - \mu_s} \right) + \frac{\phi\alpha_{nl}\alpha_{wl}\beta_{sv}\mu_p^2}{\mu_a^2(\beta_{pl} - \mu_p)^2} \left(1 - \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{\mu_a(\beta_{pl} - \mu_p)} \right) \right];$$

$$p_5 = \frac{1}{\beta_l\mu_p} \left[-\delta_l\mu_p \left(1 + \frac{\mu_p}{\beta_{pl} - \mu_p} \right) + \beta_{pl}\rho_l \left(\frac{\mu_s}{\beta_{sv} - \mu_s} \right) \right].$$

5.2.3 Viabilidade Biológica dos Pontos de Equilíbrio

Analisando a viabilidade biológica de cada um dos equilíbrios, calculados na Subseção 5.2.2, obtemos as seguintes condições necessárias e suficientes de viabilidade biológica: Assim, temos que:

- Para os equilíbrios E_1 e E_2 :

1. $R_0 = \frac{4\delta_v\delta_l\mu_a}{\phi\rho_l\alpha_{wl}} < 1.$

- Para o equilíbrio E_3 :

1. $\mu_p < \beta_{pl};$
2. $R_1 = \frac{\mu_p}{\beta_{pl}} \left(\frac{\alpha_{nl}}{\mu_a} + 1 \right) < 1;$
3. $R_2 = \frac{\beta_{pl}^3 - \mu_p^3}{(\beta_{pl} - \mu_p)^3} - \frac{3\beta_{pl}\mu_p}{(\beta_{pl} - \mu_p)^2} - \frac{\alpha_{nl}\mu_p}{(\beta_{pl} - \mu_p)\mu_a} < 1;$
4. $R_3 = \frac{\delta_l\delta_v(\beta_{pl} - \mu_p)^2\mu_a^2}{\beta_{pl}^2\phi\rho_l\alpha_{nl}\alpha_{wl}\mu_p} + R_1 < 1.$

- Para o equilíbrio E_4 :

1. $\mu_s < \beta_{sv};$
2. $R_4 = \frac{\rho_l\alpha_{nl}\mu_s}{\delta_l(\beta_{sv} - \mu_s)\mu_a} + \frac{\delta_v\delta_l^2(\beta_{sv} - \mu_s)\mu_a^2}{\phi\rho_l^2\alpha_{nl}\alpha_{wl}\mu_s} < 1.$

- Para o equilíbrio E_5 :

1. $\mu_s < \beta_{sv};$
2. $\mu_p < \beta_{pl};$
3. $R_5 = \frac{\phi\alpha_{nl}^2\alpha_{wl}\beta_{sv}\mu_p^3}{(\beta_{pl} - \mu_p)\mu_a} + \frac{\delta_v\mu_s\mu_a^2(\beta_{pl} - \mu_p)^2}{\phi\alpha_{nl}\alpha_{wl}\beta_{sv}\mu_p^2} \left(1 + \frac{\mu_s}{\beta_{sv} - \mu_s} \right) < 1;$
4. $R_6 = \frac{\delta_l\mu_p(\beta_{sv} - \mu_s)}{\rho_l\beta_{pl}} \left(1 + \frac{\mu_p}{\beta_{pl} - \mu_p} \right) < 1.$

5.2.4 Simulações sem Estrutura Espacial e sem Controle

Para as simulações numéricas do modelo básico II adimensional, utilizaremos os mesmos valores para os parâmetros definidos na Tabela 2.2, exceto para os parâmetros novos que assumirão os seguintes valores: $\phi = 5$ e $\mu_a = 0,042$, calculados a partir dos dados encontrados da literatura.

Substituindo em E_5 os valores utilizados para os parâmetros, obtemos o seguinte equilíbrio de coexistência $E_5 = (0,2682; 0,0929; 0,4532; 0,3869; 3,5583; 1,2519)$. Com a inclusão da equação que representa a variação populacional das mariposas macho, ocorre uma mudança no comportamento do sistema. Para que as populações coexistam é necessário que as condições iniciais para as populações de mariposas fêmea e mariposas macho satisfaçam uma condição. Temos agora dois pontos de equilíbrio de extinção dos parasitoides: E_1 e E_2 , $E_1 = (v_1; l_1; n_1; w_1; 0; 0) = (0,0219; 0,01412; 0,0689; 0,0588; 0; 0)$ e $E_2 = (v_2; l_2; n_2; w_2; 0; 0) = (0,296215; 0,190756; 0,931073; 0,794818; 0; 0)$, onde claramente $v_2 > v_1$; $l_2 > l_1$; $n_2 > n_1$ e $w_2 > w_1$. Por outro lado, $E_5 = (v_5; l_5; n_5; w_5; s_5; p_5)$ satisfaz $v_1 < v_5 < v_2$; $l_1 < l_5 < l_2$; $n_1 < n_5 < n_2$; $w_1 < w_5 < w_2$ e $s_5 > 0$ e $p_5 > 0$. A bacia de atração de E_5 , isto é, os valores iniciais para as populações atingirem o equilíbrio de coexistência são os pontos $(v(0); l(0); n(0); w(0); s(0); p(0))$, onde $n_1 < n(0) < n_2$, $w_1 < w(0) < w_2$, e as demais componentes assumindo valores positivos.

Observemos na Figura 5.1 que com condições iniciais $v(0) = 0,2$; $l(0) = 0,1$; $n(0) = 0,4$; $w(0) = 0,3$; $s(0) = 3,2$ e $p(0) = 1$, as populações tendem ao equilíbrio de coexistência E_5 . Na Figura 5.2, apresentamos a projeção do espaço de fase hexadimensional no subespaço tridimensional: (a) vln ovo, lagarta e fêmea adulta; (b) vlw ovo, lagarta e macho adulto. Na Figura 5.3, apresentamos a trajetória do espaço de fase hexadimensional projetada no subespaço bidimensional: (a) vs ovos em relação ao parasitoide de ovos; (b) lp lagartas em relação ao parasitoide de lagartas.

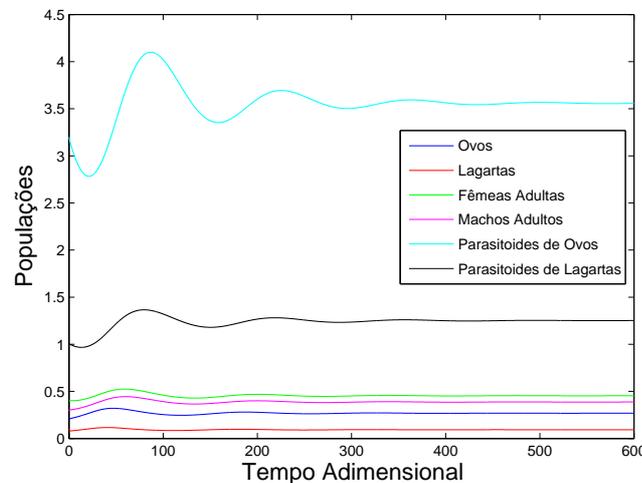


Figura 5.1: Evolução temporal das populações tendendo ao equilíbrio de coexistência E_5 .

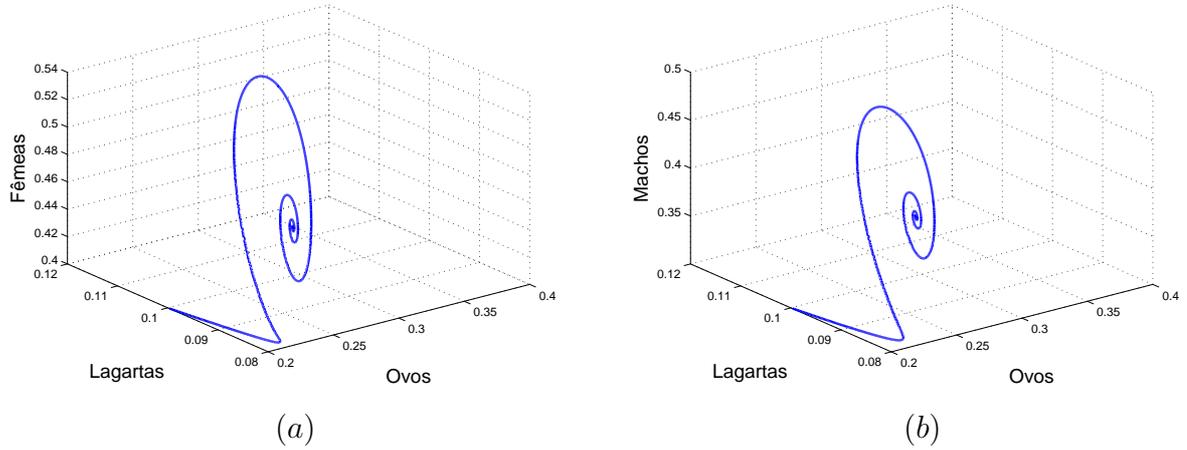


Figura 5.2: Trajetória do espaço de fase hexadimensional projetada no subespaço tridimensional: (a) *vln* (ovo, lagarta e fêmea); (b) *vlw* (ovo, lagarta e macho).

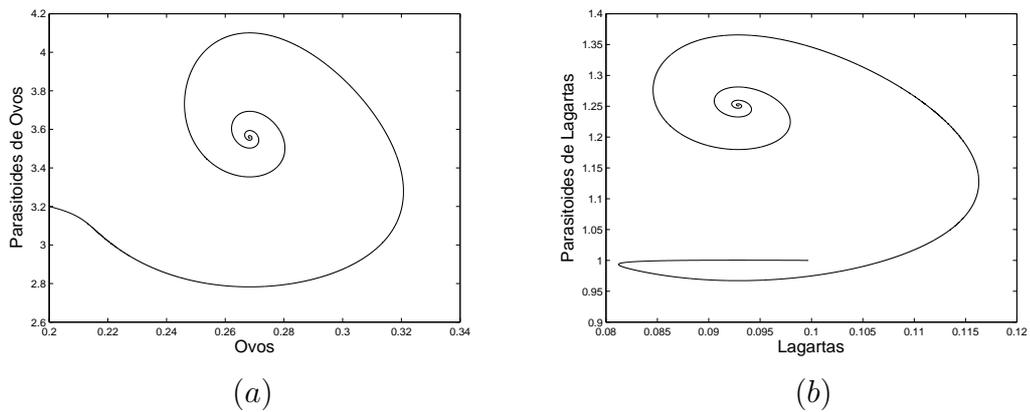


Figura 5.3: Trajetória do espaço de fase hexadimensional projetada no subespaço bidimensional: (a) *vs* (ovos, parasitoide de ovos); (b) *lp* (lagartas, parasitoide de lagartas).

5.3 Inclusão da Dispersão por Difusão e por Taxia Quase Local ao Modelo Básico II

A movimentação das populações será de forma semelhante àquela definida na Subseção 4.1.2. Os ovos não se dispersam, mas as demais populações dispersam-se entre os quatro sítios mais próximos. A população de lagartas e a população de fêmeas adultas movimentam-se por difusão, como descrito em (4.5). Os parasitoides se movimentam de forma orientada por taxia quase local, como descrito em (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10). O que vamos definir agora é como ocorre a movimentação dos machos adultos.

Os machos se dispersarão pelo habitat sendo atraídos pelos feromônios naturais liberados pelas fêmeas adultas no ambiente, ou seja, serão atraídos para os sítios da vizinhança em que houver uma maior densidade de fêmeas. Essa dispersão orientada será da seguinte forma:

- Os machos adultos que estão no sítio x conseguem detectar o feromônio emitido pelas fêmeas no sítio x e nos quatro sítios vizinhos mais próximos, e assim decidem para qual sítio devem se locomover a cada iteração temporal, ou se permanecem no sítio em que se encontram;
- O número de machos que se deslocam do sítio x para o sítio y é proporcional à razão entre o número de fêmeas no sítio y e o número total de fêmeas na vizinhança;
- Uma fração maior de machos deve se locomover para os sítios em que a densidade de fêmeas adultas é maior, pois nestes sítios ocorre maior liberação de feromônio natural das fêmeas.

Assim, definimos as saídas de machos adultos, como segue:

$$S_y^w(t) = \frac{n_y(t)}{k_x^n(t)} w_x(t), \quad (5.5)$$

onde $k_x^n(t) = \sum_{y \in \bar{V}_x} n_y(t)$. Se $k_x^n(t) = 0$, então $S_y^w(t) = 0$.

A densidade de machos adultos que entra no sítio x , oriunda de cada um dos sítios $y \in V_x$ é dada por:

$$E_y^w(t) = \frac{n_x(t)}{k_y^n(t)} w_y(t), \quad (5.6)$$

onde $k_y^n(t) = \sum_{z \in \bar{V}_y} n_z(t)$. Se $k_y^n(t) = 0$, então $E_y^w(t) = 0$. A vizinhança $\bar{V}_y = V_y \cup \{y\}$, para cada $y \in \bar{V}_x$ é como definida na Subseção 4.1.2.

Logo, juntando o modelo (4.3), com a equação

$$w'_x(t) = w_x(t) - \sum_{y \in V_x} S_y^w(t) + \sum_{y \in V_x} E_y^w(t), \quad (5.7)$$

temos o modelo para a dispersão das populações, onde $S_y^l(t)$, $E_y^l(t)$, $S_y^n(t)$ e $E_y^n(t)$ são dados em (4.5); $S_y^s(t)$ e $E_y^s(t)$ são dados em (4.7) e (4.9), respectivamente; $S_y^p(t)$ e $E_y^p(t)$ são dados em (4.8) e (4.10), respectivamente; $S_y^w(t)$ e $E_y^w(t)$ são dados em (5.5) e (5.6).

Após a fase de movimentação, a dinâmica vital dentro de cada sítio da malha é descrita pelo sistema:

$$\begin{cases} \frac{dv'}{dt} = \phi n' w' (1 - n') - \delta_v v' - \frac{\beta_v v' s'}{1 + v'}, \\ \frac{dl'}{dt} = \rho_l v' - \delta_l l' - \frac{\beta_l l' p'}{1 + l'}, \\ \frac{dn'}{dt} = \alpha_{nl} l' - \mu_a n', \\ \frac{dw'}{dt} = \alpha_{wl} l' - \mu_a w', \\ \frac{ds'}{dt} = \frac{\beta_{sv} v' s'}{1 + v'} - \mu_s s', \\ \frac{dp'}{dt} = \frac{\beta_{pl} l' p'}{1 + l'} - \mu_p p'. \end{cases} \quad (5.8)$$

5.3.1 Simulações com Dispersão Mista e sem Controle

Para as simulações consideramos o mesmo reticulado de 55×55 sítios utilizado no Capítulo 4. As distribuições iniciais de cada população serão da seguinte forma:

- $v_x(0) = 0, 2$, $l_x(0) = 0, 1$ e $n_x(0) = 0, 4$, distribuídos uniformemente ao longo das linhas pares do reticulado ($x = (i, j)$, com $i = 2, 4, \dots, 54$, $j = 2, 3, \dots, 54$);
- $w_x(0) = 0, 3$, distribuídos ao longo das colunas pares do reticulado ($x = (i, j)$, com $i = 2, 3, \dots, 54$, $j = 2, 4, \dots, 54$);
- $s_x(0) = 3, 2$ e $p_x(0) = 1$ em todas as posições $x = (i, j)$ do reticulado.

Esta distribuição foi escolhida para que nos instantes iniciais ainda se pudesse ver as populações de parasitoides movimentando-se para os sítios onde a densidade de hospedeiros era maior e principalmente, para verificar se os machos da mariposa oriental seriam atraídos para os sítios em que havia maior densidade de fêmeas. Os fatores de dispersão por difusão das lagartas e fêmeas adultas são $D_l = 0, 25$ e $D_n = 0, 5$, respectivamente (Tabela 4.1). As distribuições iniciais foram escolhidas desta maneira para podermos visualizar a movimentação das populações nos instantes iniciais, diferentemente das escolhidas inicialmente no Capítulo 4, onde apenas o sítio central estava ocupado.

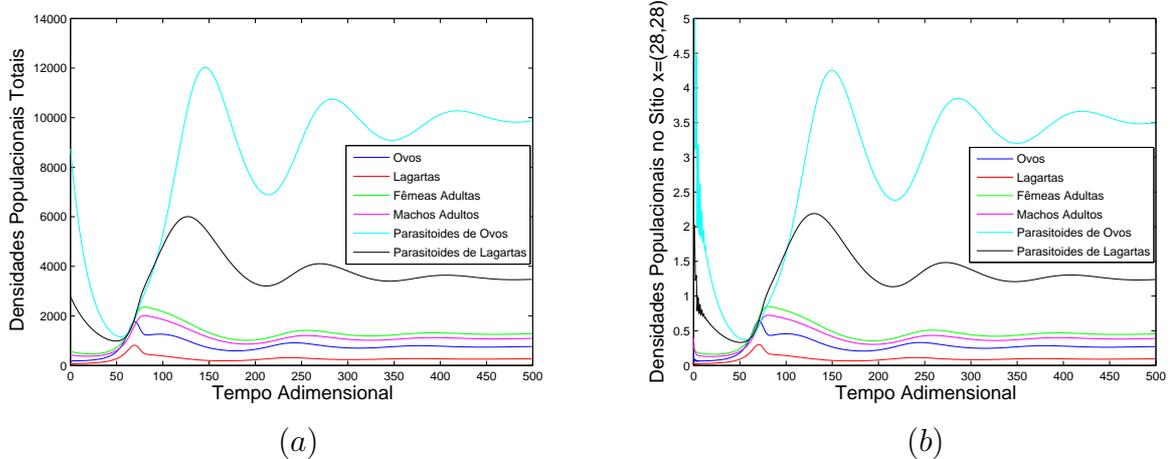


Figura 5.4: (a) Densidades populacionais totais ao longo do tempo; (b) Evolução temporal das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com lagartas e mariposas fêmea dispersando-se por difusão (fatores de difusão estabelecidos na Tabela 4.1), mariposas macho e parasitoides dispersando-se por taxa quase local.

Na Figura 5.4, apresentamos a evolução temporal em (a) das densidades populacionais totais, e em (b) das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, somente com a movimentação definida anteriormente. Observamos que no sítio central, as populações tendem ao mesmo equilíbrio de coexistência E_5 obtido para o modelo sem dispersão (modelo básico II).

Na Figura 5.5, apresentamos as distribuições espaciais das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas) em diversos instantes de tempo. As populações de difundem pela malha, a partir da distribuição inicial e, após 500 iterações temporais, ambas as populações estão homogeneamente distribuídas no espaço. Este mesmo comportamento é observado na Figura 5.6 (duas primeiras linhas) para a população de fêmeas adultas.

Comparando as Figuras 5.5 e 5.6 com a Figura 5.4, confirmamos que as maiores densidades populacionais de ovos, lagartas, fêmeas e machos são atingidas aproximadamente em $t = 70$, ainda nas etapas transitórias. Já comparando a Figura 5.7 com a Figura 5.4, vemos que ambos os parasitoides levam mais tempo para atingir seus picos populacionais, por volta de $t = 150$. Atribuímos este fato à necessidade dos parasitoides de que tenham hospedeiros suficientes para que possam crescer.

No caso das populações de machos adultos e de ambos os parasitoides, que se movimentam de forma orientada, observamos na Figura 5.6 machos adultos (últimas duas linhas), e na Figura 5.7 parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e parasitoides de lagartas (últimas duas linhas) se dispersando pelo reticulado, apresentando após 500 iterações, padrões espaço temporais aproximadamente homogêneos. Esta distribuição praticamente homogênea é estável, pois não se altera a partir de $t = 500$.

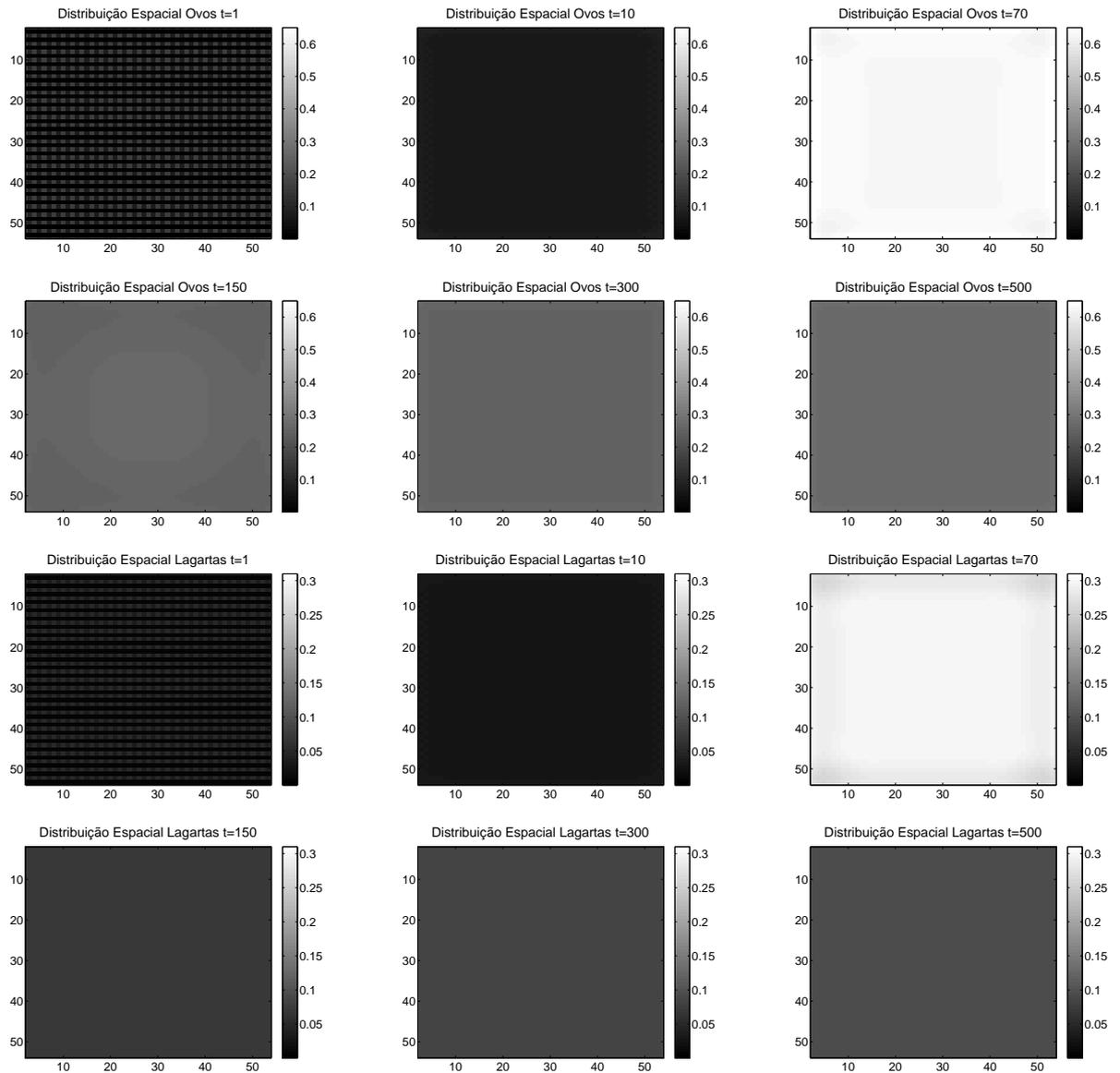


Figura 5.5: Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), com lagartas e mariposas fêmea dispersando-se por difusão, enquanto que mariposas machos e parasitoides dispersam-se por taxa quase local, em $t = 1, 10, 70, 150, 300, 500$.

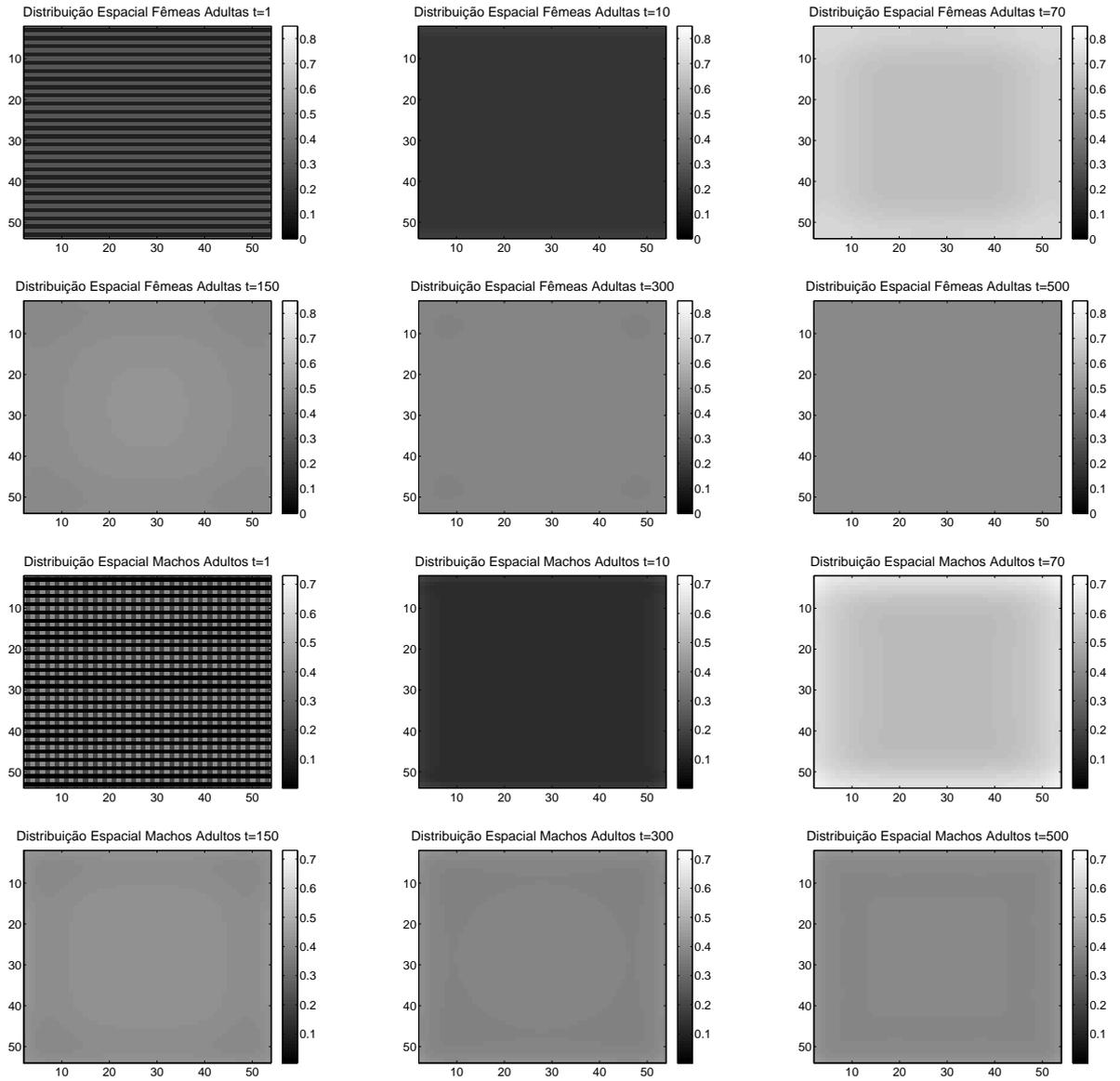


Figura 5.6: Distribuição espacial das populações de fêmeas adultas (duas primeiras linhas) e de machos adultos (duas últimas linhas), com lagartas e mariposas fêmea dispersando-se por difusão, enquanto que mariposas macho e parasitoides dispersam-se por taxia quase local, em $t = 1, 10, 70, 150, 300, 500$.

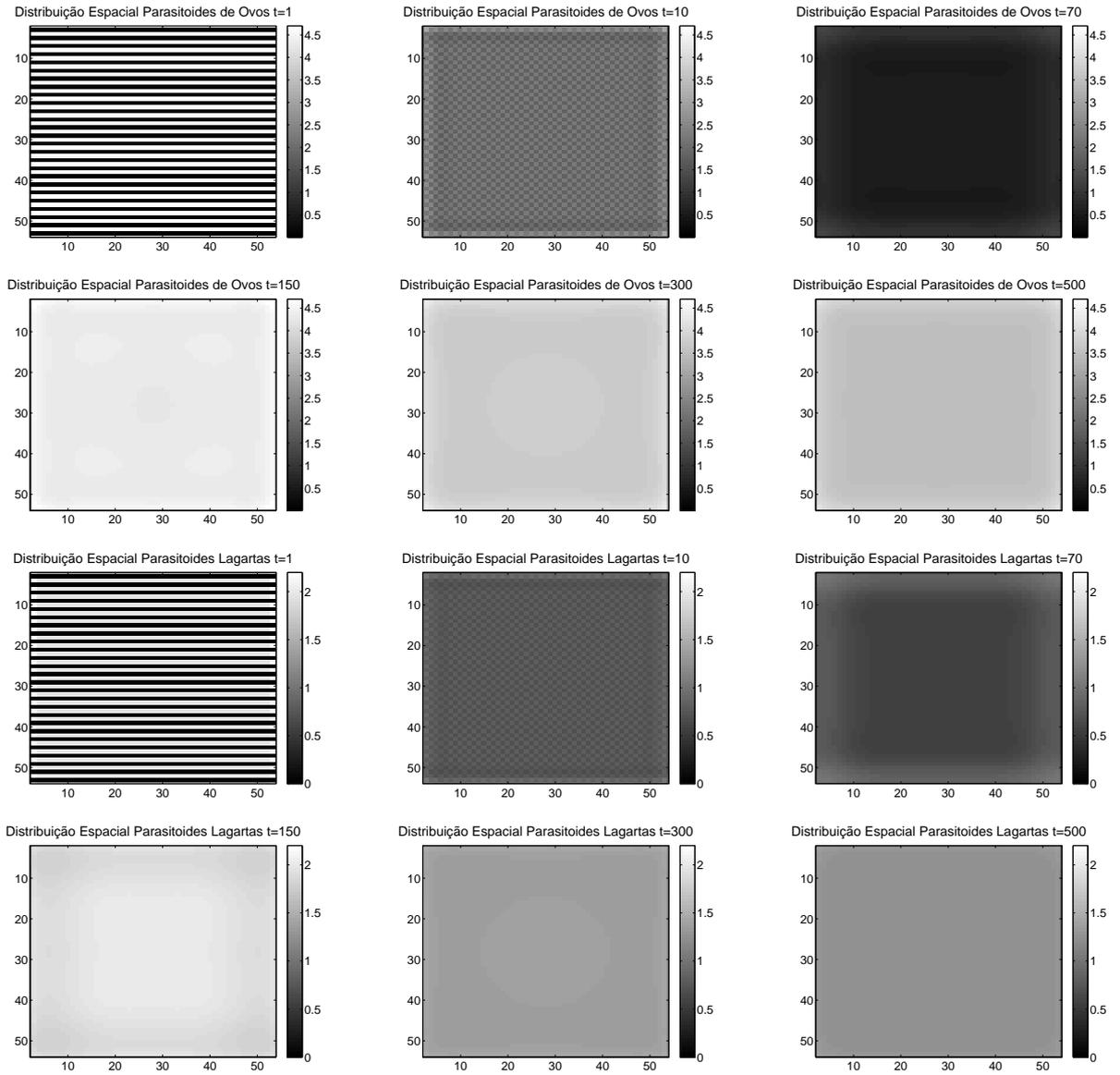


Figura 5.7: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), parasitoides e mariposas macho dispersando-se por taxa quase local, enquanto lagartas e mariposas fêmea dispersam-se por difusão, em $t = 1, 10, 70, 150, 300, 500$.

5.4 Incorporação do Feromônio Sexual Sintético ao Modelo Básico II com Dispersão

Como comentado na Seção 5.1, existem três produtos registrados no Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários (AGROFIT) para a interrupção do acasalamento da *Grapholita molesta* compostos por feromônios sexuais sintéticos. O feromônio sexual sintético, em suas formulações disponíveis para o controle da mariposa oriental em pessegueiros, pode ser uma substância pastosa (Splat Grafo[®]), sachês (Biolita[®]) ou dispensers plásticos (Cetro[®]), que tem que ser aplicados diretamente nas plantas (Arioli et al., 2013). Testes experimentais e em campo foram realizados em pomares de maçãs e pêssegos (Botton et al., 2005; Arioli, 2007; Monteiro et al., 2008; Pastori et al., 2008; Pastori et al., 2012; Santana, 2012; Arioli e Botton, 2012; Arioli et al., 2014), utilizando esses produtos à base de feromônio sexual sintético.

Queremos agora incorporar a utilização de feromônios sexuais sintéticos ao modelo (5.4), através da definição de uma equação diferencial ordinária que represente a concentração do feromônio sexual e verificar a sua atração no controle da mariposa oriental.

Podemos supor que a variação na concentração f de feromônio no instante T seja descrita pela equação:

$$\frac{df}{dT} = -Cf, \quad (5.9)$$

onde C , com $0 < C < 1$, é uma constante de degradação natural do feromônio, decorrente da exposição ao sol, chuvas, ventos, entre outros fatores. O cálculo do valor de C é determinado a partir da quantidade de dias em que a atuação do feromônio pode ser detectada no pomar (ainda produz efeito), que segundo Santana (2012), poderá chegar a 180 dias. Considerando que quando $T = 1/C$, a concentração de feromônio estará reduzida a 37% do seu valor inicial, e sendo este o tempo máximo em que o feromônio poderá fazer efeito, fazemos $\frac{1}{C} = 180$ dias, resultando em $C = 0,0055/\text{dia}$.

De acordo com as mudanças de variáveis feitas na Subseção 5.2.1 para a adimensionalização do modelo básico II (5.3), temos que o tempo adimensional é dado por $t = rT$, com $r = 1,22$ (Seção 2.5). Assim, 180 dias correspondem a 220 etapas de tempo adimensionais, e a equação (5.9), com o tempo adimensional, será da forma:

$$\frac{df}{dt} = -cf, \quad (5.10)$$

onde $c = C/1,22 = 0,055/1,22 = 0,046$. Queremos determinar quais são as maneiras eficientes de distribuição desse feromônio no pomar, de modo a garantir a interrupção do acasalamento.

Consideremos que a concentração do feromônio sexual sintético vai dispersar-se por meio de difusão simples, resultando de um movimento aleatório de suas moléculas, e

também por convecção, já que suas moléculas pode ser carregadas pelo vento. As fronteiras para a dispersão do feromônio são do tipo absorvente, pois ele poderá sair do reticulado devido à movimentação. Para a dispersão difusiva, consideremos que uma fração constante (pequena) $0 \leq \xi \leq 1$ da concentração do feromônio é distribuída entre os quatro vizinhos mais próximos. Consideremos também um vento de baixa intensidade na direção do eixo x (horizontal), atuando da esquerda para a direita do domínio, tal que, a cada instante de tempo, uma pequena fração da concentração de feromônio seja carregada pelo vento, do sítio (i, j) para o sítio $(i, j + 1)$. Definimos a intensidade do vento por φ , tal que $0 \leq \varphi \leq 1$, onde φ e ξ devem satisfazer $0 \leq \xi + \varphi \leq 1$. Representamos por $f'_x(t)$ a concentração de feromônio no sítio $x = (i, j)$, após a dispersão no tempo t , e por $x^1 = (i, j - 1)$ o sítio da rede à esquerda do sítio x (Rodrigues et al., 2013). Temos assim que a equação para a dispersão de feromônio é dada por:

$$f'_x(t) = (1 - \xi - \varphi)f_x(t) + \frac{\xi}{4} \sum_{y \in V_x} f_y(t) + \varphi f_{x^1}(t). \quad (5.11)$$

A movimentação das populações vai ocorrer como descrito na seção anterior, exceto que agora vamos considerar a atuação do feromônio sobre a movimentação dos machos adultos, além da atração natural já exercida pelas fêmeas. Vamos supor que uma fração q ($0 < q < 1$) dos machos, será atraída pelo feromônio natural liberado pelas fêmeas, e que $(1 - q)$ do total de machos será atraída pelo feromônio sexual sintético distribuído no pomar. Logo, a quantidade de machos que sai ou entra no sítio x no instante t vai depender da densidade de fêmeas e também da concentração de feromônio no sítio x e nos quatro sítios vizinhos mais próximos.

As saídas e entradas de machos pela atração natural exercida pelas fêmeas serão como definidas em (5.5) e (5.6), respectivamente. A movimentação dos machos adultos orientada de acordo com a concentração de feromônio sexual sintético, é definida como segue:

$$S_y^w(t) = \frac{f_y(t)}{k_x^f(t)} w_x(t), \quad (5.12)$$

onde $k_x^f(t) = \sum_{y \in \bar{V}_x} f_y(t)$. Se $k_x^f(t) = 0$, então $S_y^w(t) = 0$.

A densidade de machos adultos que entra no sítio x , oriunda de cada um dos sítios $y \in V_x$ é dada por:

$$E_y^w(t) = \frac{f_x(t)}{k_y^f(t)} w_y(t), \quad (5.13)$$

onde $k_y^f(t) = \sum_{z \in \bar{V}_y} f_z(t)$. Se $k_y^f(t) = 0$, então $E_y^w(t) = 0$. A vizinhança $\bar{V}_y = V_y \cup \{y\}$, para cada $y \in \bar{V}_x$ é como definida na Subseção 4.1.2.

Assim,

$$S_y^w(t) = q \frac{n_y(t)}{k_x^n(t)} w_x(t) + (1 - q) \frac{f_y(t)}{k_x^f(t)} w_x(t), \quad (5.14)$$

$$E_y^w(t) = q \frac{n_x(t)}{k_y^n(t)} w_y(t) + (1 - q) \frac{f_x(t)}{k_y^f(t)} w_y(t), \quad (5.15)$$

onde $k_y^n(t)$, $k_x^n(t)$, $k_y^f(t)$ e $k_x^f(t)$ são como definidos anteriormente.

Após a fase de movimentação, a fase de reação é descrita por (5.8), juntamente com a equação que obtivemos a partir de 5.10:

$$\frac{df'}{dt} = -cf'. \quad (5.16)$$

5.4.1 Simulações com Dispersão Mista na Presença de Feromônio Sexual Sintético

Nestas simulações apenas vamos analisar como será o comportamento das populações considerando a ação de um feromônio sexual sintético no pomar, ainda sem levar em conta a aplicação das técnicas de interrupção do acasalamento. Essas técnicas serão abordadas no próximo capítulo.

Segundo Botton et al. (2005)(b), os pessegueiros são plantados nos pomares com um espaçamento de $4m \times 4m$ entre plantas vizinhas. Logo, consideremos que em cada sítio da malha bidimensional que estamos utilizando, de tamanho 55×55 sítios, haverá um pessegueiro. Com isso, trabalharemos com um pomar de aproximadamente $5ha$, com um total de 3025 plantas. Este formato quadrado, segundo Arioli et al. (2013) é adequado para a utilização de feromônios sexuais sintéticos para a disrupção sexual da mariposa oriental.

Além disso, devem ser levados em conta os chamados efeitos de bordadura, ou seja, para evitar altos índices de ataque da praga nas bordas do pomar, uma quantidade maior de feromônio deve ser distribuída nestes locais. Segundo os pesquisadores, a quantidade de liberadores de feromônio a serem distribuídos no pomar varia de acordo com o produto a ser utilizado, por exemplo, Santana (2012) utilizou 500 dispensers/ha, já Pastori et al. (2008) e Arioli et al. (2014) utilizaram de 300 a 1000 pontos de liberação de feromônio por ha. O que todos enfatizam é que os liberadores tem que ser distribuídos uniformemente pelo pomar. Contudo, testaremos em nossas simulações uma distribuição não uniforme desses liberadores de feromônio.

As distribuições iniciais das populações são como definidas na Subseção 5.3.1. A distribuição dos liberadores de feromônio será simulada da seguinte forma:

- Nas bordas do pomar, em todas as posições, será distribuída uma concentração $f_x(0) = 3$, para evitar os efeitos de bordadura;

- No interior do pomar, o feromônio será distribuído de forma a parecer um tabuleiro de xadrez, podemos dizer que os sítios que têm feromônio são as casas brancas e os sítios sem feromônio são as casas pretas. A distribuição será da seguinte forma: $f_x(0) = 3$ numa coluna sim e na outra não, ao longo das linhas ímpares ($x = (i, j)$, $i = 3, 5, \dots, 53$, $j = 3, 5, \dots, 53$) e da mesma forma ao longo das linhas pares ($x = (i, j)$, $i = 2, 4, \dots, 54$, $j = 2, 4, \dots, 54$).

Esta distribuição está ilustrada na Figura 5.9, onde quadrados pretos significam ausência de feromônio, quadrados brancos significam presença de feromônio, na quantidade especificada acima.

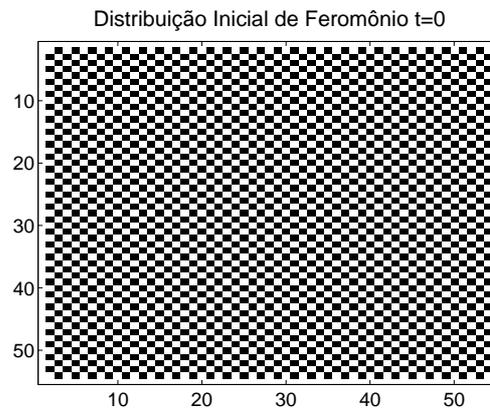


Figura 5.8: Distribuição inicial de feromônio no reticulado, onde quadrados pretos significam ausência de feromônio e quadrados brancos significam presença de feromônio.

Em todas as simulações utilizamos $\xi = 0,1$ (coeficiente de difusão) e $\varphi = 0,1$ (coeficiente de convecção). Na Figura 5.9, apresentamos a variação da concentração de feromônio ao longo do tempo no sítio central, com a constante de degradação $c = 0,046$.

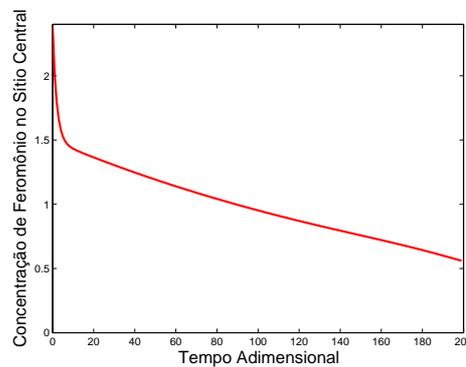


Figura 5.9: Variação da concentração de feromônio sexual sintético ao longo do tempo, com constante de degradação $c = 0,046$.

Na Figura 5.10, apresentamos a variação espacial da concentração de feromônio em diversos instantes de tempo. Com o passar do tempo a substância vai degradando-se e dispersando-se lentamente, desaparecendo a heterogeneidade inicial. Observa-se ainda o

efeito da convecção, a densidade de feromônio do lado esquerdo do reticulado vai sendo levada com o passar do tempo. A concentração de feromônio é reduzida gradativamente, devido essencialmente à degradação.

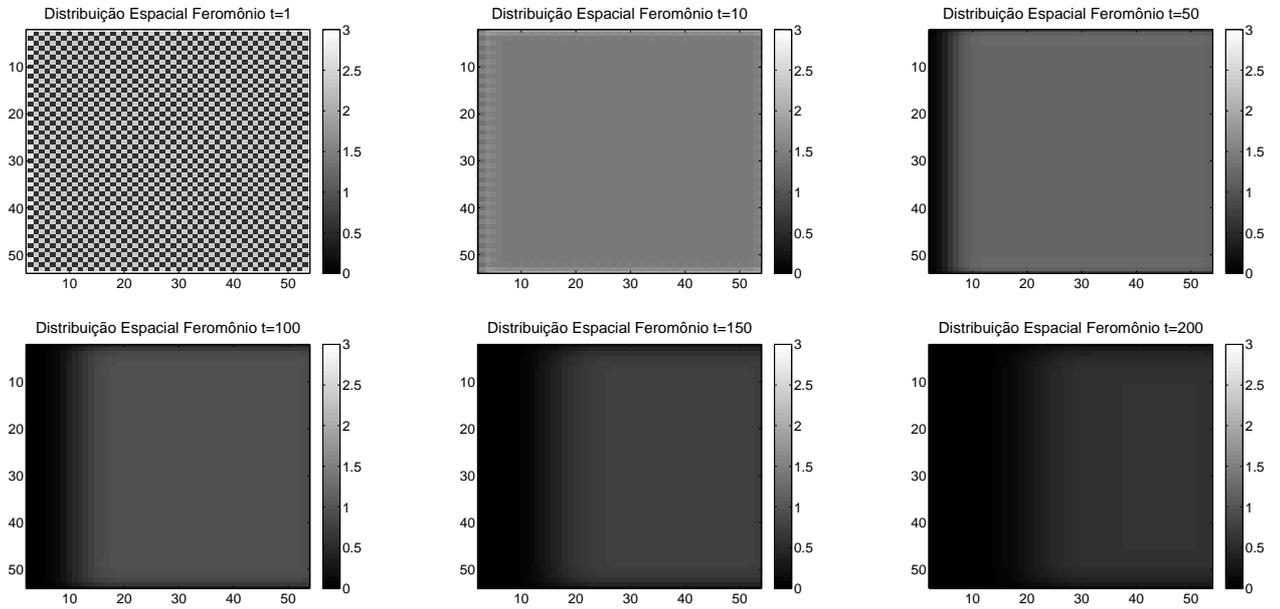


Figura 5.10: Distribuição espacial do feromônio em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$, com $\xi = 0, 1$ (coeficiente de difusão) e $\varphi = 0, 1$ (coeficiente de convecção).

Para as simulações feitas a seguir utilizamos os fatores de difusão $D_l = 0, 25$ e $D_n = 0, 5$ (Tabela 4.1), além da proporção $q = 0, 2$ (proporção do total de machos que é atraída pelas fêmeas). Na Figura 5.11, apresentamos em (a) as densidades populacionais totais e em (b) a evolução temporal das densidades populacionais no sítio central.

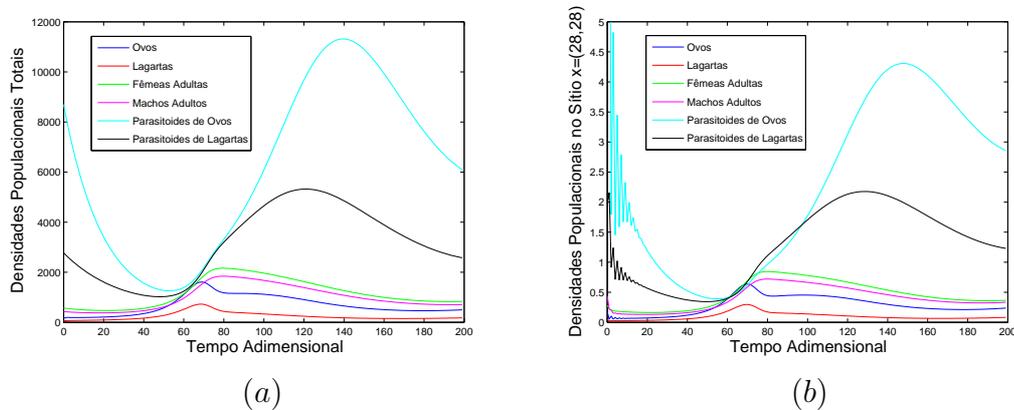


Figura 5.11: Evolução temporal das: (a) Densidades populacionais totais e (b) Densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$; com lagartas e fêmeas adultas dispersando-se por difusão; machos adultos e parasitoides dispersando-se por taxaia quase local e o feromônio dispersando-se por difusão e convecção.

Nas Figuras 5.12 e 5.13, apresentamos as distribuições espaciais de todas as populações da praga em diversos instantes de tempo. Para $t = 1$, em todas as distribuições populacionais ainda podemos ver a forma com que elas foram distribuídas inicialmente. Mas por volta de $t = 50$, notamos a influência do feromônio, pois as populações apresentam-se distribuídas com densidades maiores onde a concentração de feromônio é maior. Isso ocorre mesmo considerando que apenas os machos sofrem a atração do feromônio sexual sintético.

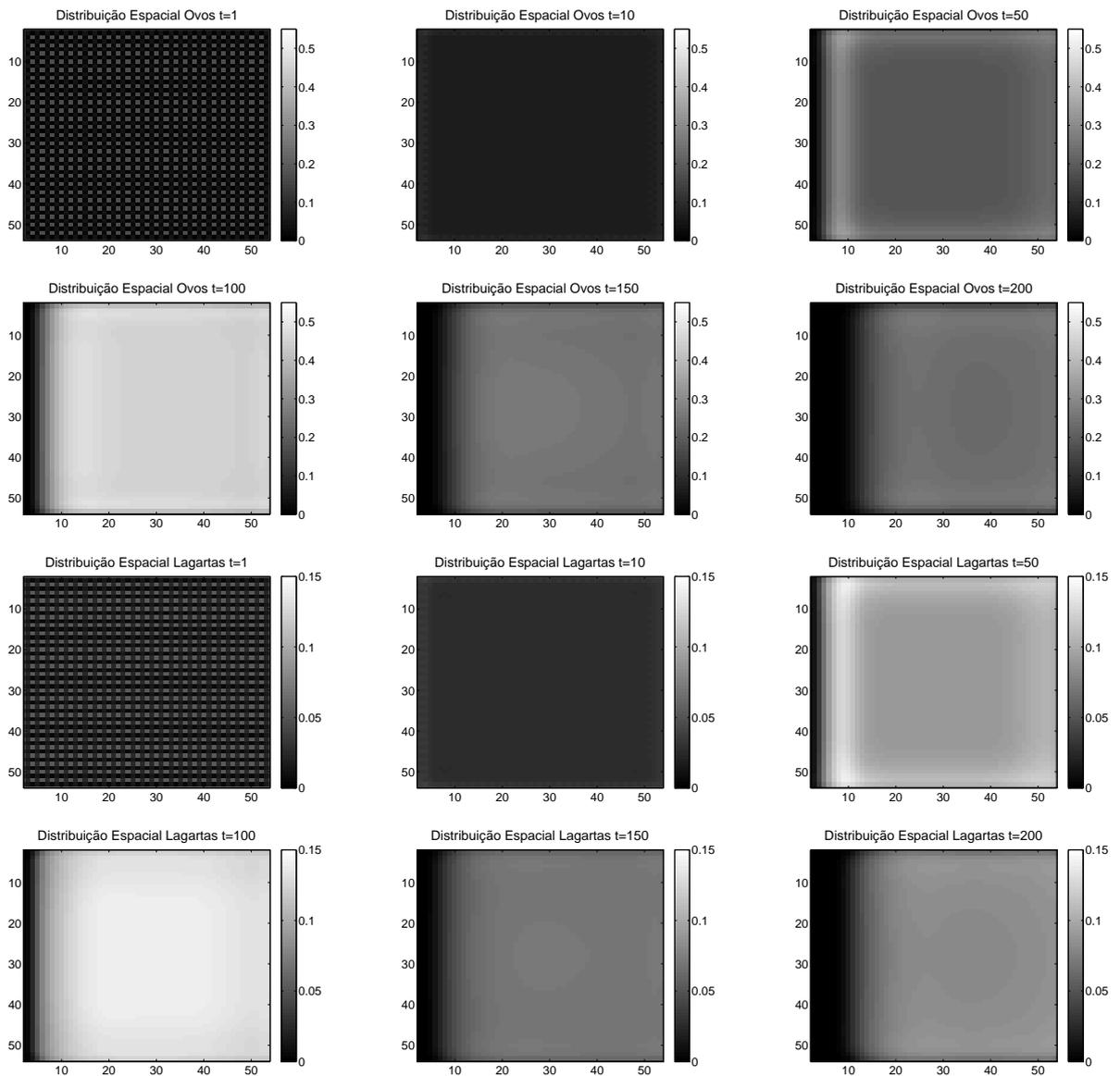


Figura 5.12: Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), com lagartas e fêmeas adultas dispersando-se por difusão; machos adultos e parasitoides dispersando-se por taxaia quase local e o feromônio dispersando-se por difusão e convecção, para $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$.

Na Figura 5.14, apresentamos as distribuições espaciais dos parasitoides de ovos

(duas primeiras linhas) e parasitoides de lagartas (duas últimas linhas). A distribuição inicial (em $t = 0$) de ambos os parasitoides é homogênea e uniforme, mas em $t = 1$ eles já estão agregados nos sítios onde as densidades de ovos e lagartas são altas, devido à movimentação por *taxia* com atração para os sítios com maior densidade de ovos e de lagartas. O efeito causado pelo feromônio aos ovos, lagartas e mariposas adultas (fêmeas e machos) também faz-se notar para os parasitoides ($t = 100$), visto que se dispersam para onde a densidade de hospedeiros é maior.

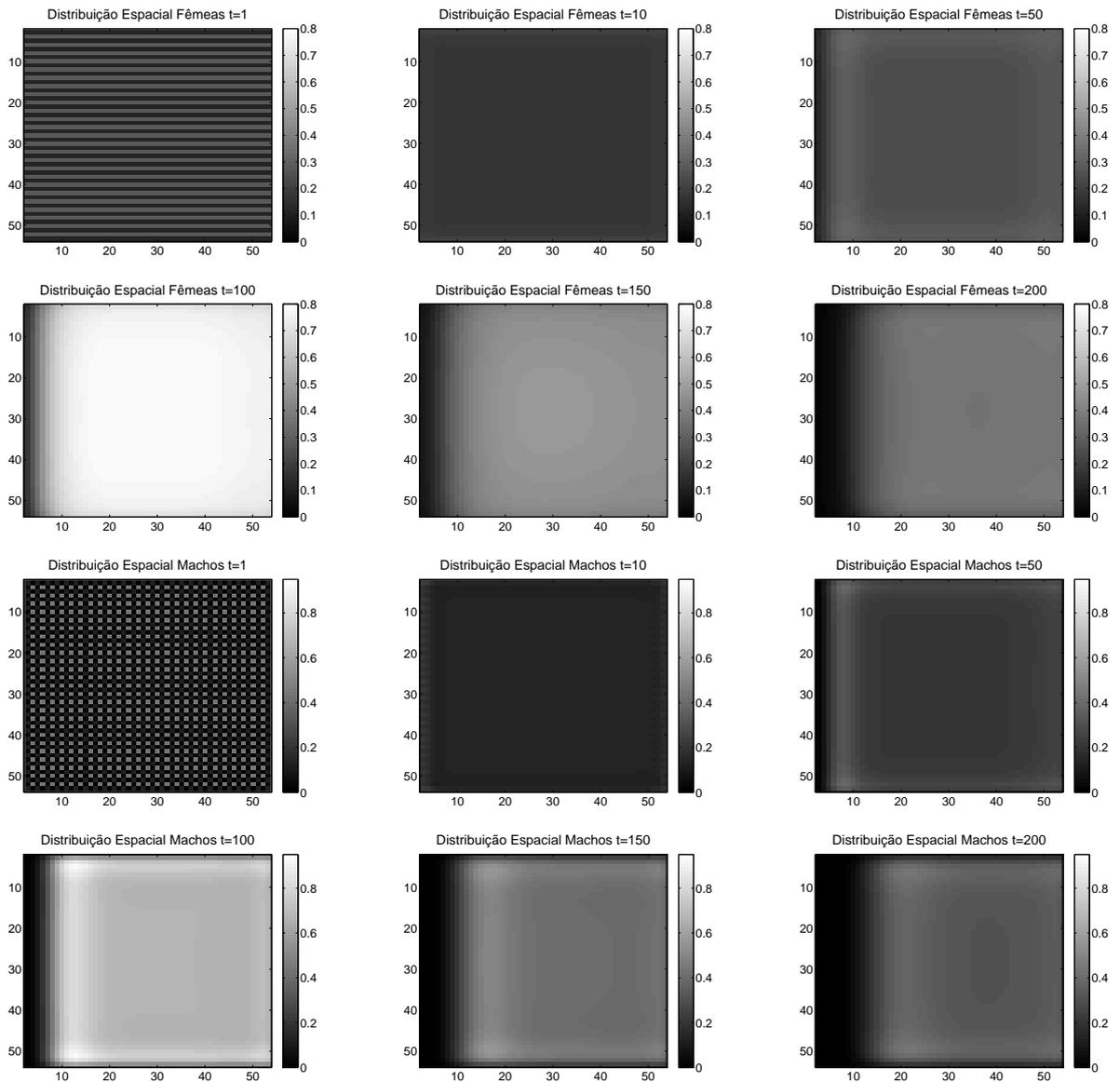


Figura 5.13: Distribuição espacial das populações de fêmeas adultas (duas primeiras linhas) e de machos (duas últimas linhas), com lagartas e fêmeas adultas dispersando-se por difusão; machos adultos e parasitoides dispersando-se por *taxia* quase local e o feromônio dispersando-se por difusão e convecção, para $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$.

De modo geral, observamos nas Figuras 5.12 a 5.14, que todas as populações são

tendenciadas, devido à regra de movimentação, a também abandonar os sítios em que não há feromônio, visto que o feromônio vai sendo levado da esquerda para a direita por convecção (vento horizontal). Isto se deve ao tipo de movimentação proposto.

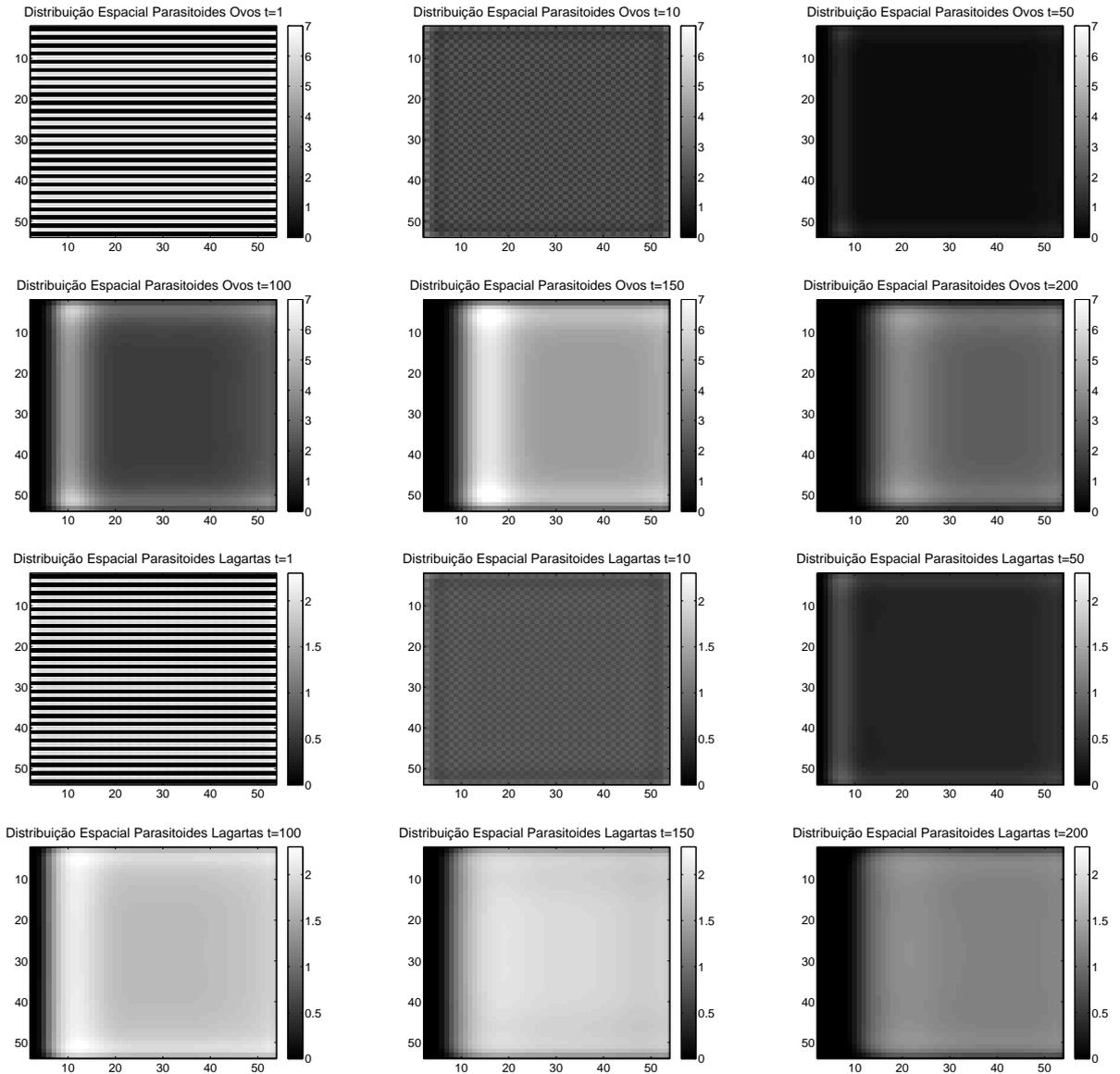


Figura 5.14: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), com lagartas e fêmeas adultas dispersando-se por difusão; machos adultos e parasitoides dispersando-se por taxia quase local e o feromônio dispersando-se por difusão e convecção, para $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$.

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo, tratamos da utilização de feromônios sexuais sintéticos para o controle de pragas agrícolas, com ênfase em pragas que atacam árvores frutíferas. Esse feromônio sexual sintético é produzido em laboratório e liberado nos pomares com o objetivo de reduzir os encontros para o acasalamento entre machos e fêmeas da espécie alvo, técnica conhecida como interrupção do acasalamento.

Inicialmente introduzimos a técnica e abordamos os principais fatores que influenciam na eficiência da mesma. Construímos um novo modelo básico considerando também a presença da mariposa macho, pois o efeito do feromônio ocorre sobre os machos, os quais são atraídos para as fontes emissoras de feromônio e assim não localizam as fêmeas para o acasalamento.

Após o desenvolvimento e adimensionalização do novo sistema, foi feita a análise local através do cálculo dos pontos de equilíbrio e respectivas condições de viabilidade biológica. Contemplamos a dispersão das populações da mesma forma que no Capítulo 4, isto é, lagartas e mariposas fêmea por difusão simples, mariposas macho por taxia quase local preferencialmente para onde há maiores concentrações de feromônio e ambos os parasitoides por taxia quase local preferencialmente para onde há mais hospedeiros respectivos.

Acrescentamos uma EDO para descrever a variação na concentração do feromônio e agregamos ao modelo previamente desenvolvido para a movimentação das populações. O feromônio se dispersa por difusão simples e por convecção, considerando para esta última um vento horizontal atuando da esquerda para a direita. Realizamos simulações considerando inicialmente o modelo sem a atuação do feromônio e em seguida com o feromônio atraindo os machos para as suas fontes emissoras, mas ainda sem simular os efeitos causados pelo feromônio para os encontros entre machos e fêmeas. A adoção das técnicas específicas (tipos de efeitos causados pelo feromônio) para o controle da mariposa oriental serão simuladas e descritas no próximo capítulo, onde adotaremos as técnicas de confusão sexual e atrai-e-mata.

Capítulo 6

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE INTERRUPÇÃO DO ACASALAMENTO NO CONTROLE DA *GRAPHOLITA MOLESTA*

Neste capítulo faremos uso das técnicas denominadas **atrai-e-mata** e **confusão sexual**, descritas na Seção 5.1, para a interrupção do acasalamento da mariposa oriental. Em ambas as técnicas a ferramenta utilizada é o feromônio sexual sintético que imita o odor liberado pelas fêmeas para atrair os machos para o acasalamento. Cabe ressaltar que as equações obtidas no capítulo anterior independem da técnica adotada para a interrupção do acasalamento.

Utilizaremos em todas as simulações seguintes as distribuições iniciais das populações como descritas na Subseção 5.3.1, e a distribuição do feromônio sexual sintético como descrita na Subseção 5.4.1. Lagartas e fêmeas adultas dispersam-se por difusão, machos adultos e ambos os parasitoides dispersam-se por taxa quase local (Seção 5.3). O feromônio sexual sintético dispersa-se por difusão e convecção (Seção 5.4). Os coeficientes de difusão das lagartas e fêmeas adultas, difusão e convecção do feromônio sexual sintético são: $D_l = 0,25$; $D_n = 0,5$; $\xi = 0,1$ e $\varphi = 0,1$, respectivamente. A proporção de machos q que serão atraídos para onde houver maior densidade de fêmeas é $q = 0,2$, logo $1 - q$ serão atraídos para onde houver maior quantidade de feromônio.

6.1 Atrai-e-Mata

A técnica atrai-e-mata consiste na utilização conjunta do feromônio sexual sintético com um inseticida. O feromônio promove a atração dos machos adultos aumentando a chance deles entrarem em contato com o inseticida e haver a contaminação. Além disso, a aplica-

ção localizada do inseticida químico, impede que o produto atinja o ambiente e o produto a ser colhido (Arioli et al., 2013).

Arioli et al. (2014), realizaram um experimento em um pomar de maçãs, com duas formulações de Splat Grafo, uma para confusão sexual e a outra com Splat Grafo atraí-e-mata, a primeira resultou em um índice de interrupção do acasalamento de 77,6% e a segunda em um índice de 84,7%. Neste experimento, a formulação de feromônio com inseticida que causa a morte dos machos adultos que entram em contato com ele, foi mais eficiente. Experimentalmente, Pastori et al. (2012) adotaram a técnica atraí-e-mata para o controle da mariposa oriental conjuntamente com a lagarta enroladeira, no cultivo de maçãs. A técnica mostrou-se mais eficiente no controle da mariposa oriental, visto que reduziu o índice de acasalamentos em até 92%, enquanto que para a lagarta enroladeira reduziu em até 75,5%.

Nas simulações, que realizaremos a seguir, a aplicação da técnica atraí-e-mata será feita da seguinte forma:

- A cada instante de tempo t , após a dispersão das populações e do feromônio, será medida a densidade de machos adultos que são atraídos para os sítios onde há maior concentração de feromônio, contendo o inseticida químico;
- Se o resultado da medição for positivo (existem machos nesse sítio), supomos que 50% desses machos são eliminados pela ação do inseticida. Com isso, haverá menos machos que passam para a fase de reação (dinâmica vital), conseqüentemente, diminui a densidade populacional de ovos, lagartas e mariposas adultas no próximo instante de tempo.

Neste caso, quando a técnica atraí-e-mata é adotada, teremos o seguinte modelo após a dispersão das populações:

$$\begin{cases} v'_x(t^+) = v'_x(t), \\ l'_x(t^+) = l'_x(t), \\ n'_x(t^+) = n'_x(t), \\ w'_x(t^+) = (1 - a)w'_x(t), \\ s'_x(t^+) = s'_x(t), \\ p'_x(t^+) = p'_x(t), \end{cases} \quad (6.1)$$

onde $v'_x(t^+)$, $l'_x(t^+)$, $n'_x(t^+)$, $w'_x(t^+)$, $s'_x(t^+)$ e $p'_x(t^+)$ denotam o número de ovos, lagartas, fêmeas adultas, machos adultos, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, respectivamente, no sítio x após cada aplicação da técnica atraí-e-mata, no tempo t . O parâmetro constante a denota a fração de machos da mariposa que serão eliminados ao entrarem em contato com o feromônio composto com inseticida. Consideraremos que 50% desses machos que entrarem em contato com o feromônio serão eliminados, então $a = 0,5$.

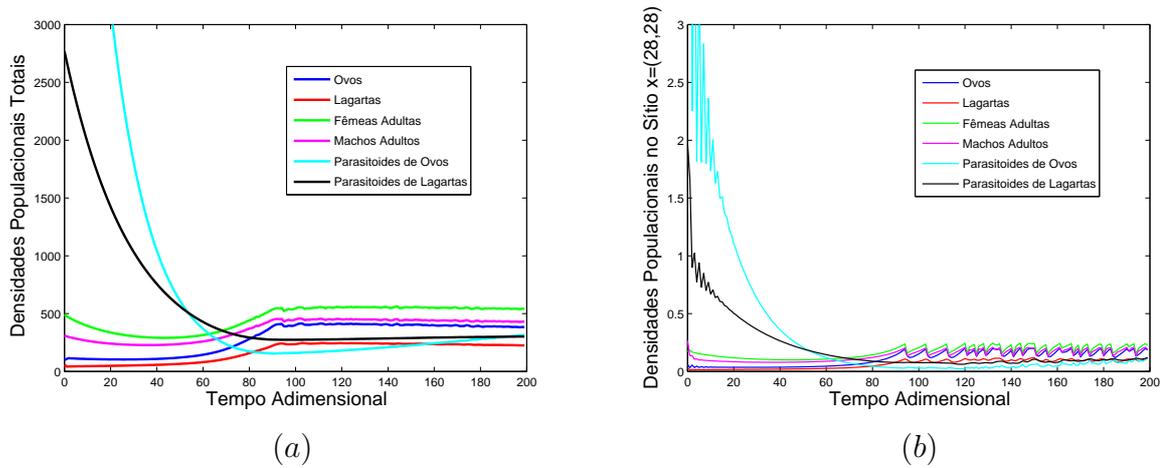


Figura 6.1: Evolução temporal: (a) das densidades populacionais totais; (b) das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com a aplicação da técnica atrai-e-mata, com lagartas e fêmeas dispersando-se por difusão, machos e parasitoides dispersando-se por taxia quase local e feromônio dispersando-se por difusão e convecção.

Na Figura 6.1, apresentamos a evolução temporal em (a) das densidades populacionais totais, e em (b) das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$. Observamos que todas as densidades no sítio central, após os transientes, são oscilatórias aperiódicas, e que as densidades de parasitoides decresceram consideravelmente em resultado da técnica adotada. Como as densidades da praga diminuem bastante, o impacto sobre os parasitoides foi mais forte, principalmente sobre o parasitoide de ovos. Todas as populações totais decrescem, contudo novamente o impacto foi maior sobre os parasitoides, que antes apresentavam densidades bem maiores que as da praga (Ver Figura 5.11), agora essas densidades estão bem próximas. Após os transientes as populações mantêm-se quase constantes.

Apresentamos na Figura 6.2, as distribuições populacionais dos ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), em diversos instantes de tempo. Inicialmente, ambas as populações têm suas densidades bastante reduzidas, mas por volta de $t = 100$ acontecem grandes variações de densidades entre sítios próximos. Interpretamos este fato devido à ação do inseticida juntamente com a atração exercida pelo feromônio. Conforme o feromônio vai sendo levado pelo vento da esquerda para a direita, ambas as populações também desocupam os sítios em que não se detecta a concentração de feromônio. Isso se deve à maneira com que a movimentação das populações foi definida, com os machos sendo atraídos para os sítios onde há maior concentração de feromônio, conseqüentemente, as demais populações, devido à dinâmica vital, também se concentrarão nesses sítios.

Na Figura 6.3, apresentamos as distribuições populacionais das fêmeas adultas da mariposa (duas primeiras linhas) e dos machos adultos da mariposa (duas últimas linhas), em diversos instantes de tempo. Tanto as fêmeas adultas quanto os machos adul-

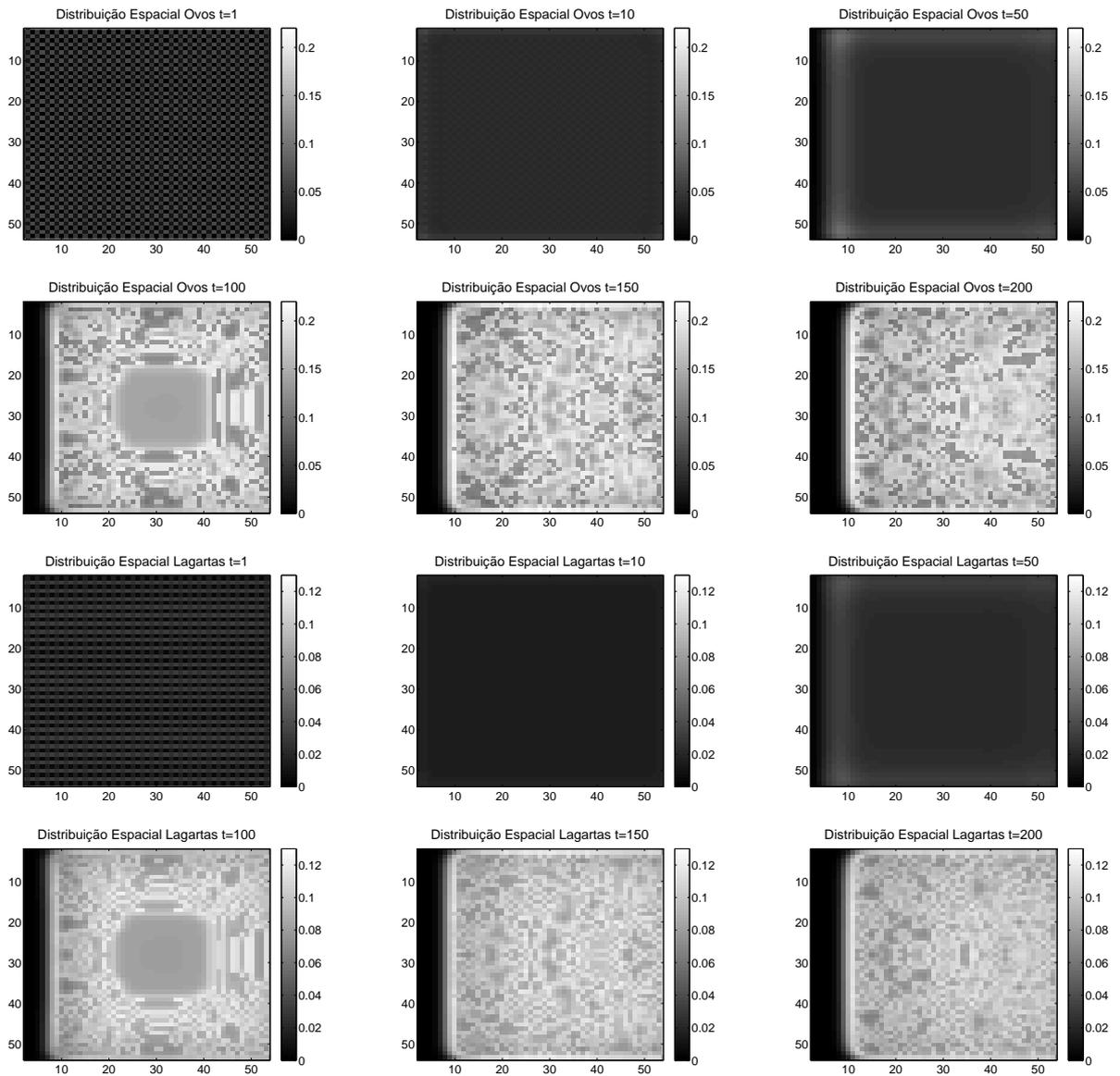


Figura 6.2: Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), com a aplicação da técnica atrai-e-mata; lagartas e fêmeas adultas movimentando-se por difusão; machos adultos e parasitoides movimentando-se por taxaia quase local; feromônio dispersando-se por difusão e convecção, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$.

tos apresentam-se distribuídos heterogeneamente, de forma semelhante à observada para os ovos e para as lagartas. A densidade populacional das mariposas adultas, em geral, reduziu-se bastante com a aplicação da técnica, ocasionado pelo decréscimo no número de encontros entre machos e fêmeas. Comparando as distribuições de fêmeas e de machos adultos, observamos que na fronteira onde o feromônio vai perdendo a força (lado esquerdo, colunas de 1 a 10), a densidade de fêmeas é bem maior que a densidade de machos. Acreditamos que isto seja devido à influência direta exercida pelo feromônio na movimentação dos machos, e à movimentação aleatória das fêmeas.

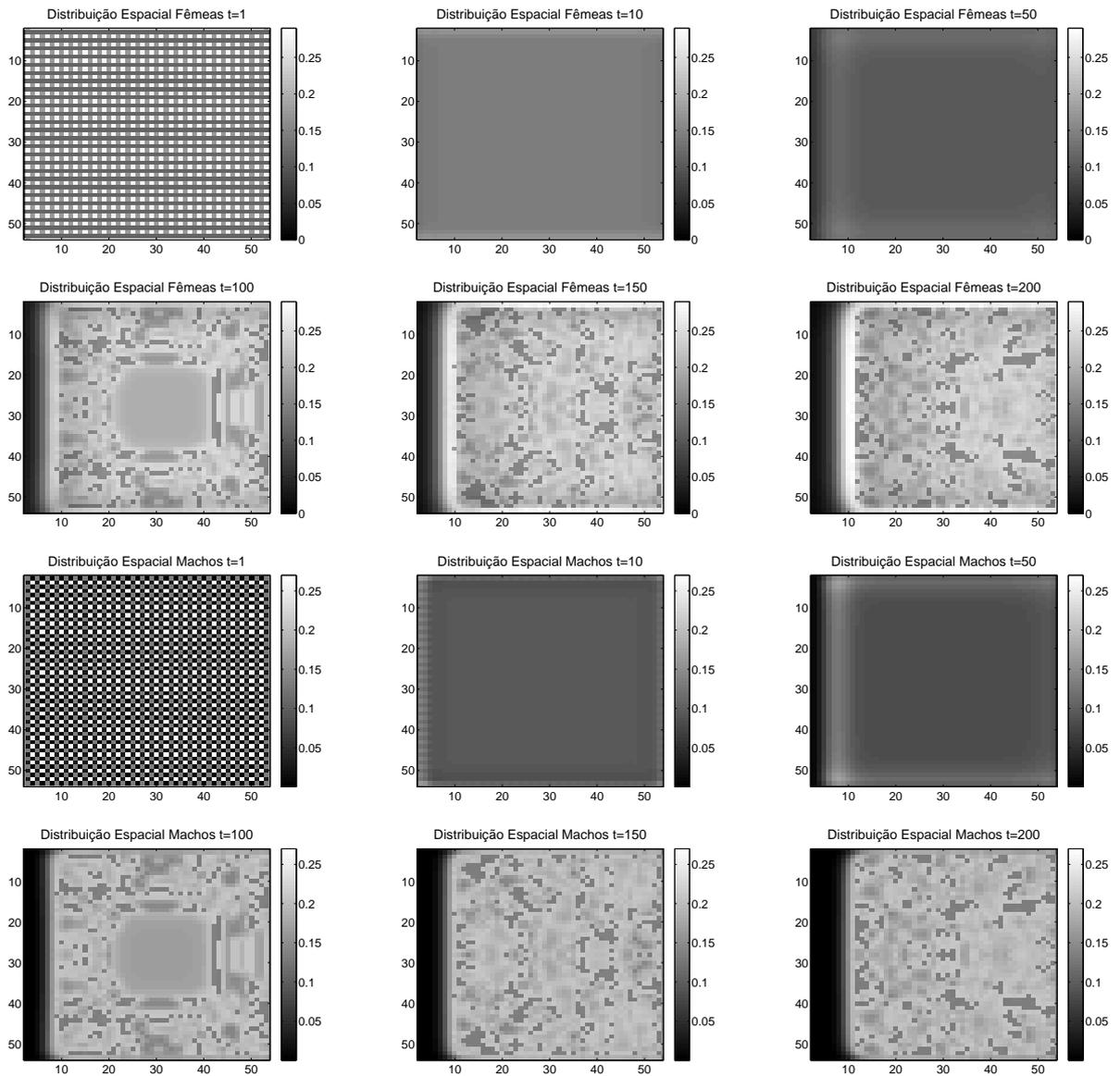


Figura 6.3: Distribuição espacial das populações de mariposas fêmea (duas primeiras linhas) e de mariposas macho (duas últimas linhas), com a aplicação da técnica atrai-e-mata; lagartas e fêmeas adultas movimentando-se por difusão; machos adultos e parasitoides movimentando-se por taxia quase local; feromônio dispersando-se por difusão e convecção, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$.

Na Figura 6.4, apresentamos as distribuições populacionais dos parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e parasitoides de lagartas (duas últimas linhas). A distribuição inicial (em $t = 0$) de ambos os parasitoides é homogênea e uniforme, mas em $t = 1$ eles já estão agregados nos sítios onde as densidades de ovos e lagartas são altas, devido à movimentação por taxia com atração para os sítios com maior densidade de ovos e de lagartas. Nos instantes de tempo iniciais as densidades de ambos os parasitoides ainda estão altas, mas por volta de $t = 50$, decaem bruscamente e passam a oscilar em baixas densidades. Isto se comprova ao compararmos as distribuições populacionais (Figura 6.4)

com a evolução temporal das populações (Figura 6.1).

De maneira geral, com a adoção da técnica atrai-e-mata, as densidades de ovos, lagartas e mariposas adultas (machos e fêmeas) reduzem-se significativamente em relação ao caso somente com movimentação por taxia (ver Figura 5.11), demonstrando que a técnica é eficiente para o controle da mariposa oriental, mesmo com o decréscimo significativo de ambos os parasitoides.

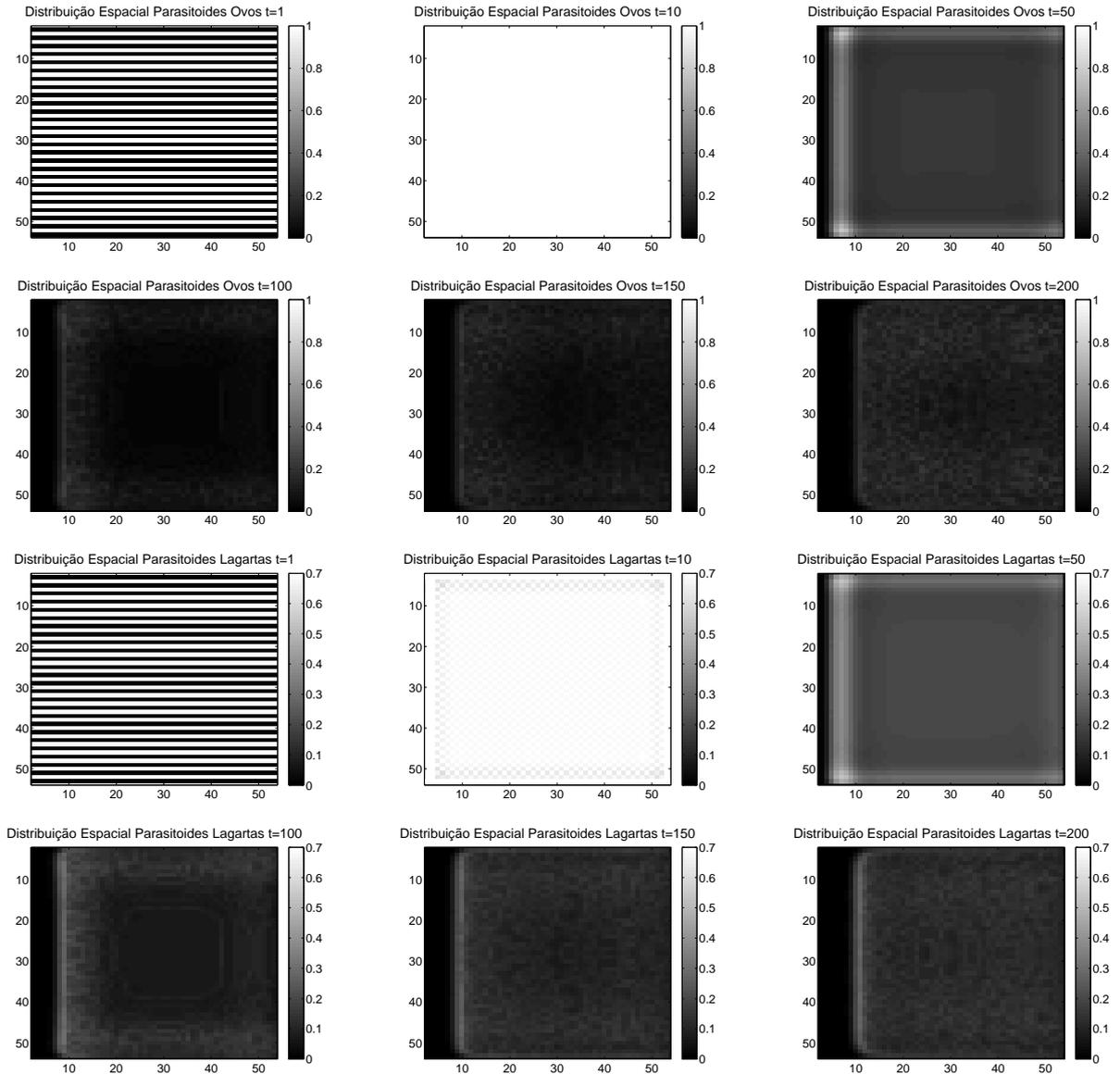


Figura 6.4: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), movimentando-se por taxia quase local; lagartas e fêmeas adultas movimentando-se por difusão; machos adultos movimentando-se por taxia quase local; feromônio dispersando-se por difusão e convecção, com a aplicação da técnica atrai-e-mata, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$.

6.2 Confusão Sexual

A confusão sexual se caracteriza pela liberação de uma grande quantidade de feromônio sexual sintético no pomar, distribuído em muitos pontos, gerando uma camada de ar saturado, que vai impedir que os machos localizem as fêmeas para o acasalamento. Com isso, menos encontros entre machos e fêmeas vão gerar menos ovos, conseqüentemente menos lagartas que causam os prejuízos.

Simularemos a técnica da confusão sexual da seguinte forma:

- Vamos medir a concentração de feromônio em todos os sítios do pomar, e onde esta concentração estiver em um nível considerado eficaz, no caso, maior que 1, consideraremos que estará ocorrendo a confusão sexual;
- Assim, diminuiremos em 80% os encontros entre machos e fêmeas que são eficazes, e com isso ocorrerá uma grande redução na quantidade de ovos, posteriormente nas demais populações;
- Conforme o feromônio vai se degradando seu poder de confundimento vai diminuir, e com isso a redução dos acasalamentos será menor.

Neste caso, quando o nível de feromônio estiver acima de 40% da concentração inicial, o modelo para o controle será da seguinte forma:

$$\begin{cases} v'_x(t^+) = (1 - b)v'_x(t), \\ l'_x(t^+) = l'_x(t), \\ n'_x(t^+) = n'_x(t), \\ w'_x(t^+) = w'_x(t), \\ s'_x(t^+) = s'_x(t), \\ p'_x(t^+) = p'_x(t), \end{cases} \quad (6.2)$$

onde $v'_x(t^+)$, $l'_x(t^+)$, $n'_x(t^+)$, $w'_x(t^+)$, $s'_x(t^+)$ e $p'_x(t^+)$ denotam o número de ovos, lagartas, fêmeas adultas, machos adultos, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, respectivamente, após cada aplicação da técnica de confusão sexual, no sítio x , no tempo t . O parâmetro constante b denota a fração de ovos que é reduzida devido a redução dos encontros entre machos e fêmeas. Como consideramos que a reprodução diminui 80% enquanto o feromônio fizer efeito, temos que $b = 0,8$.

Na Figura 6.5, apresentamos a evolução temporal em (a) das densidades populacionais totais e em (b) das densidades populacionais no sítio central. As densidades populacionais totais decaem muito e se mantêm a níveis bem baixos durante o tempo considerado. As densidades no sítio central decaem bastante em relação ao modelo sem a confusão sexual (ver Figura 5.11), ficam praticamente nulas. Isso vai ocorrer em todos os sítios da malha, pois muito poucos encontros entre machos e fêmeas vão ocorrer enquanto

a concentração de feromônio sexual sintético estiver a níveis altos. O feromônio sintético vai degradando-se com o passar do tempo, com isso os machos serão menos desorientados e a chance de encontrarem as fêmeas e se reproduzir torna-se maior no final do intervalo de tempo considerado.

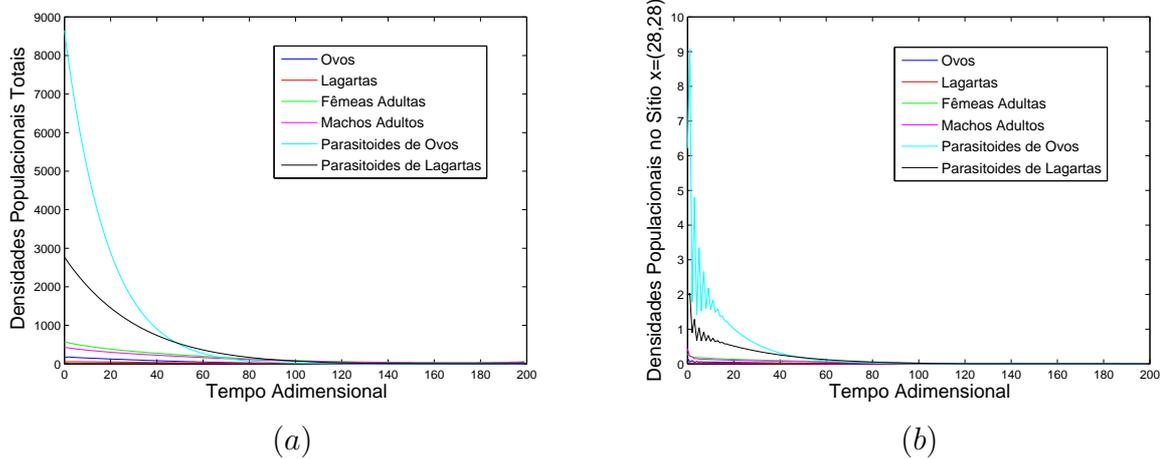


Figura 6.5: Evolução temporal das: (a) densidades populacionais totais; (b) densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$, com a aplicação da técnica de confusão sexual, e movimentação das populações como na Figura 6.1.

Na Figura 6.6, apresentamos as distribuições espaciais da população de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), em diversos instantes de tempo. As densidades de ovos e de lagartas, inicialmente, são maiores onde as densidades de fêmeas e machos são mais altas, mas logo diminuem consideravelmente, sendo que na maior parte do reticulado as densidades são praticamente nulas. A partir de $t = 100$, percebemos que essas densidades tendem a aumentar em regiões específicas do reticulado, próximas à fronteira esquerda, onde o feromônio já está com baixa concentração devido à convecção. As populações distribuem-se heterogeneamente no espaço.

Na Figura 6.7, apresentamos as distribuições espaciais da população de fêmeas (duas primeiras linhas) e de machos (duas últimas linhas) da mariposa oriental, em diversos instantes de tempo. As densidades de ambas as populações decaem de maneira mais lenta que os ovos e lagartas. A redução nessas densidades também é muito significativa até $t = 150$, a partir desse instante as populações se recuperaram significativamente nas mesmas regiões em que ovos e lagartas se recuperaram.

Apresentamos na Figura 6.8, as distribuições espaciais das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas). Essas populações apresentam padrões-espaciais temporais muito semelhantes aos apresentados pelas demais populações. Um diferencial é que o parasitoide de ovos não consegue se recuperar ao final do período de tempo considerado para as simulações, como acontece para as demais populações. Este fato pode ser muito importante para justificar o acrés-

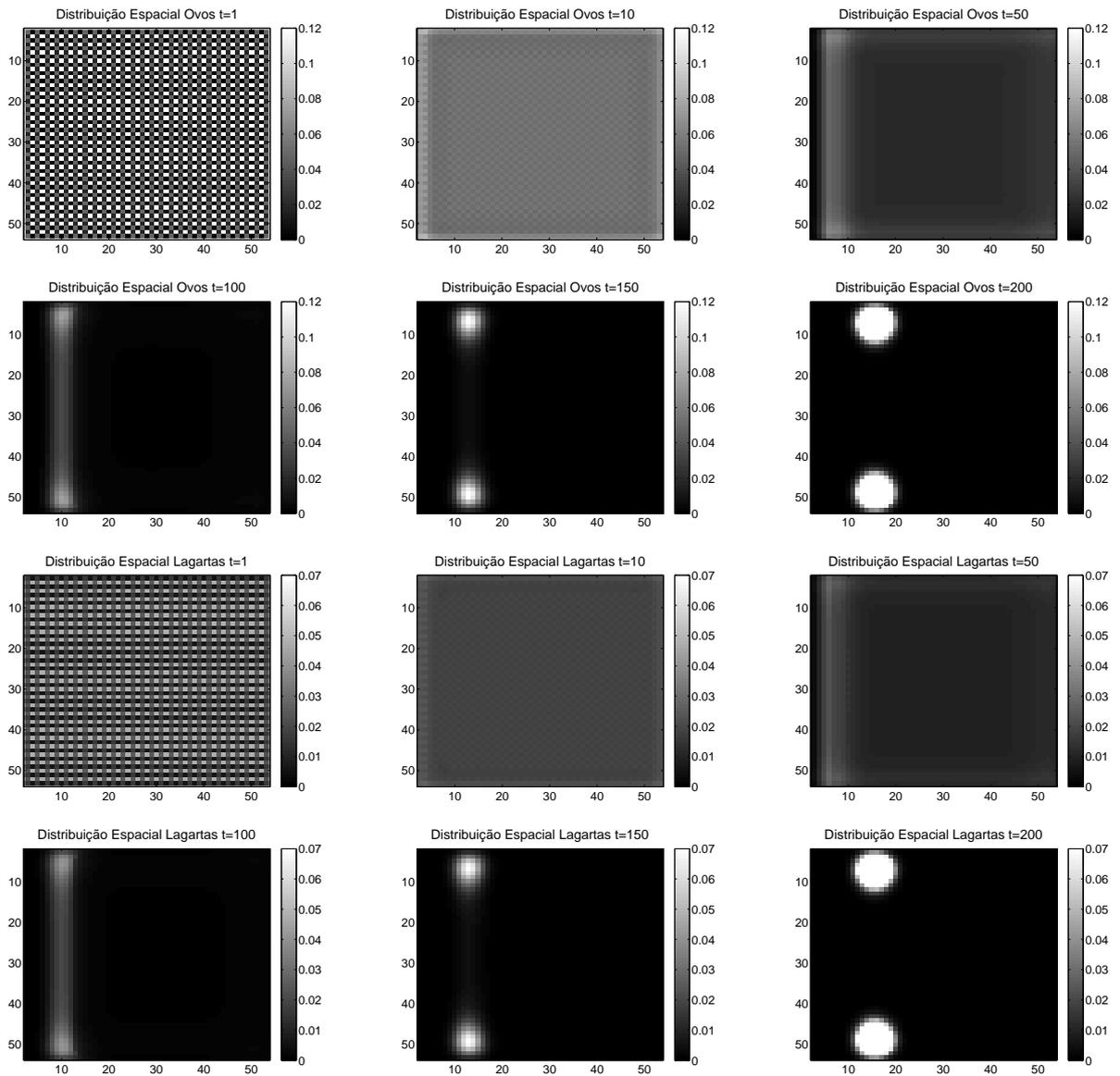


Figura 6.6: Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$, com a aplicação da confusão sexual e movimentação como descrita nas figuras anteriores.

cimo que ocorre nas populações da praga em determinadas regiões, pois se o parasitoide estivesse atuando, ainda poderia manter em níveis baixos a população de ovos da mariposa, mesmo que o feromônio sexual sintético já estivesse perdendo a sua eficácia nessa região específica.

Comparando a Figura 6.5 com as Figuras 6.6 a 6.8, comprovamos que nos instantes iniciais as densidades populacionais ainda estão altas, mas com a atuação do controle reduzem-se até quase a extinção na maior parte do reticulado. Na Figura 6.5 não percebemos a recuperação das populações, isso só pode ser visto através dos gráficos das distribuições espaciais.

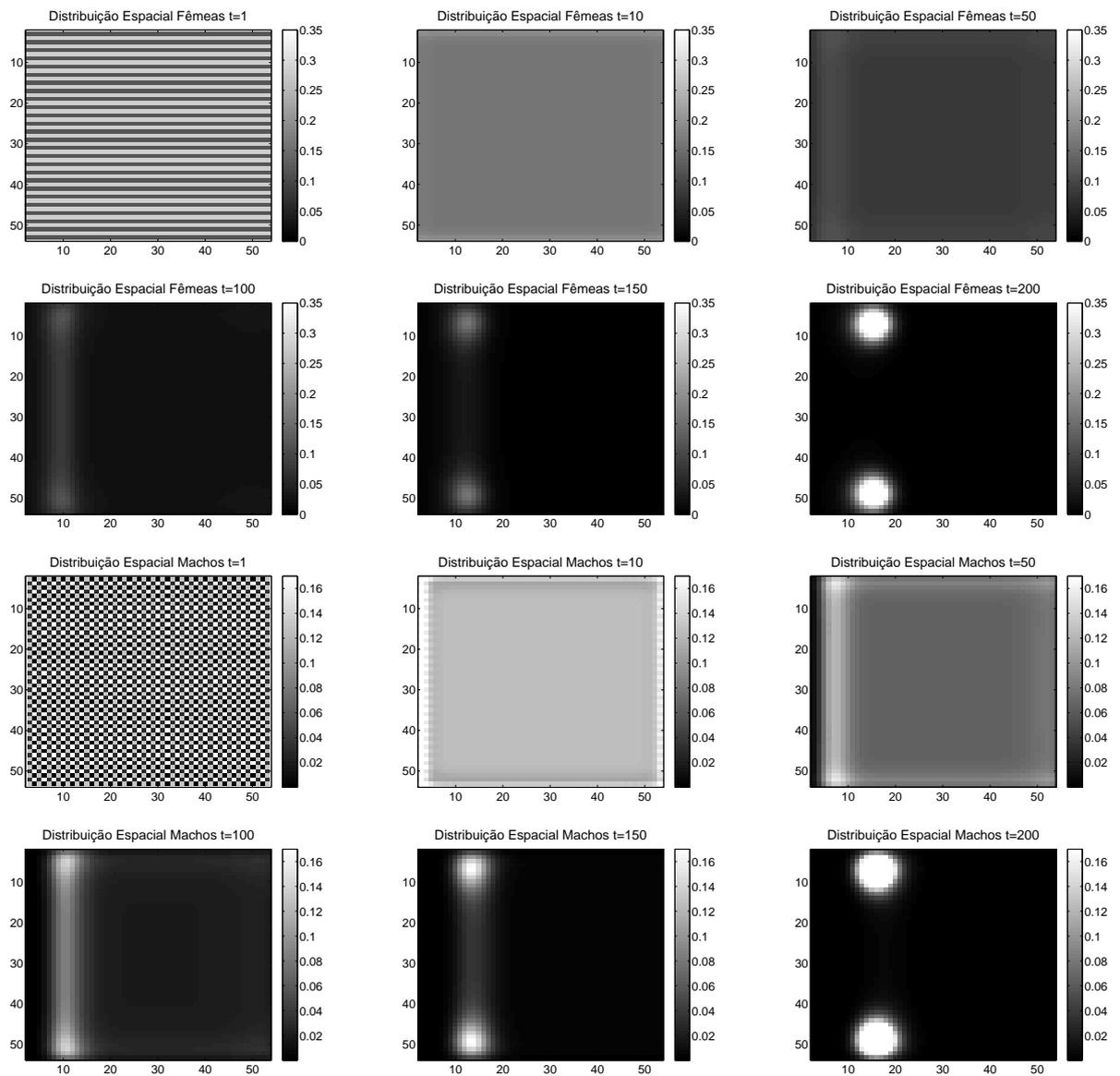


Figura 6.7: Distribuição espacial das populações de fêmeas adultas (duas primeiras linhas) e de machos adultos (duas últimas linhas), em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$, com as populações e o feromônio dispersando-se como descrito nas figuras anteriores.

A recuperação das populações da praga ocorre quando o feromônio sexual sintético vai perdendo a sua eficácia, e isso é no período da pré-colheita da safra de pêssegos. Neste período, aplicações de inseticidas não são permitidas. Por isso, acreditamos que uma liberação artificial de parasitoides de ovos e/ou parasitoides de lagartas possa minimizar o ataque da praga neste período.

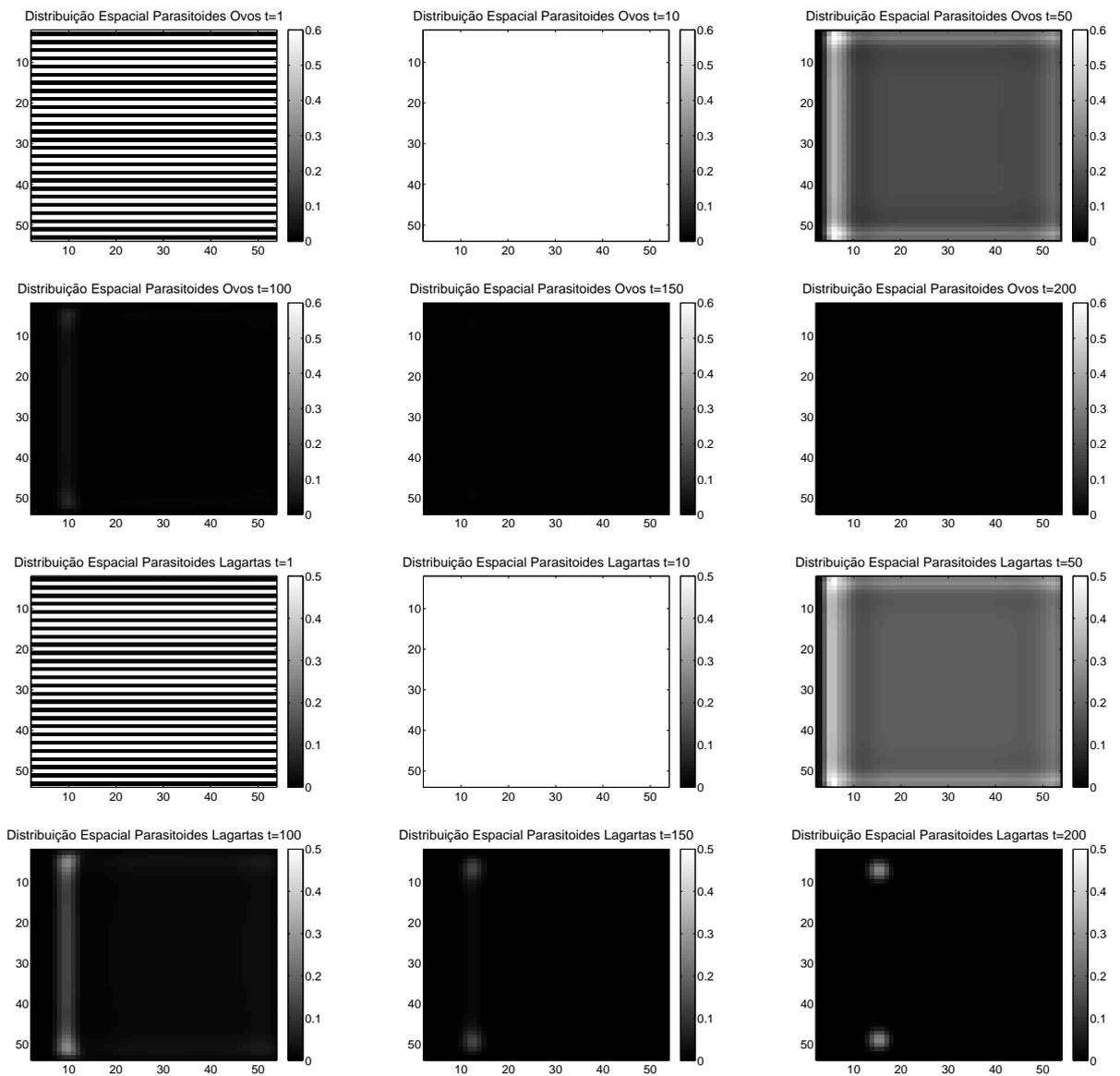


Figura 6.8: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$, com as populações e o feromônio dispersando-se como descrito nas figuras anteriores.

6.3 Controle Integrado: Atrai-e-mata e Liberação Artificial de Parasitoides

A adoção de técnicas de controle para a *Grapholita molesta* que sejam menos agressivas ao meio ambiente e ao mesmo tempo eficientes, é uma das principais metas dos pesquisadores. Por isso, vamos simular a aplicação da técnica atrai-e-mata (feromônio com inseticida) juntamente com a liberação artificial de parasitoides de ambas as espécies. Esperamos que com a adoção do manejo integrado os resultados obtidos, somente com a utilização da técnica atrai-e-mata, sejam melhorados.

O modelo para o controle integrado é dado por:

$$\begin{cases} v'_x(t^+) = v'_x(t), \\ l'_x(t^+) = l'_x(t), \\ n'_x(t^+) = n'_x(t), \\ w'_x(t^+) = (1 - a)w'_x(t), \\ s'_x(t^+) = s'_x(t) + \eta, \\ p'_x(t^+) = p'_x(t) + \tau, \end{cases} \quad (6.3)$$

onde $v'_x(t^+)$, $l'_x(t^+)$, $n'_x(t^+)$, $w'_x(t^+)$, $s'_x(t^+)$ e $p'_x(t^+)$ denotam o número de ovos, lagartas, fêmeas adultas, machos adultos, parasitoides de ovos e parasitoides de lagartas, respectivamente, após cada aplicação do manejo integrado, no sítio x , no tempo t . O parâmetro constante a denota a fração de machos adultos que é reduzida por morte após entrarem em contato com o feromônio ($a = 0,5$). As constantes η e τ determinam a quantidade constante de parasitoides de ovos e de parasitoides de lagartas, respectivamente, liberadas toda vez que o número de machos atingir o Limiar Econômico ($LE = 0,2$).

Na Figura 6.9, apresentamos a evolução temporal das densidades populacionais em (a) as densidades populacionais totais e em (b) no sítio central. Houve uma redução significativa nas densidades da praga (ovos, lagartas, fêmeas e machos), e as densidades de parasitoides após o decréscimo inicial, mantêm-se a níveis consideráveis devido às liberações artificiais. As oscilações nas densidades da praga são menores e as densidades de parasitoides se mantêm bem maiores que as da praga, o que não ocorria quando aplicamos somente a técnica atrai-e-mata (veja Figura 6.1). Isso é benéfico, pois assim surgem menos picos populacionais da praga, reduzindo os danos.

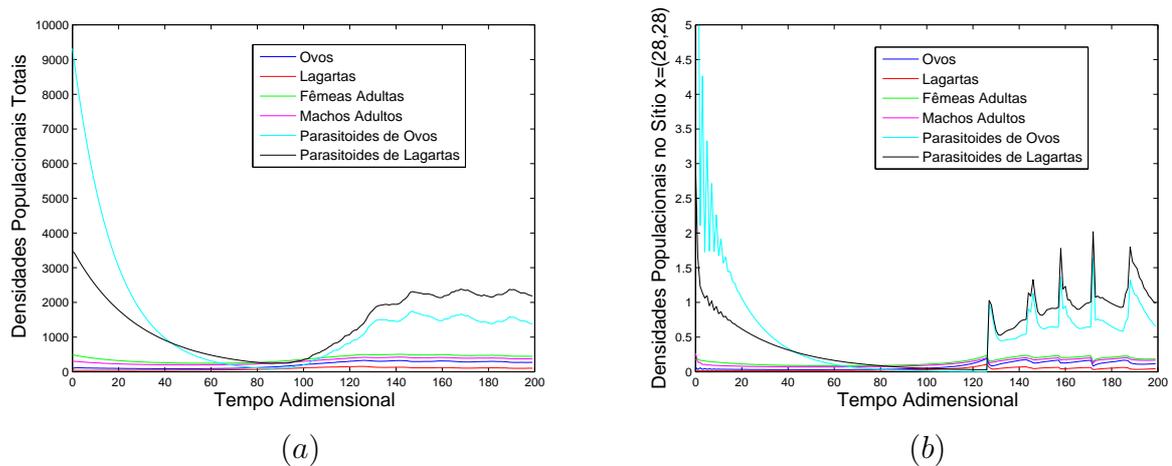


Figura 6.9: Evolução temporal das densidades populacionais totais (a) e das densidades populacionais no sítio central $x = (28, 28)$ (b), com a aplicação do MIP utilizando a técnica atrai-e-mata e liberação artificial de ambos os parasitoides, $\eta = 1$, $\tau = 1$.

Apresentamos na Figura 6.10 as distribuições populacionais dos ovos (duas pri-

meiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), em diversos instantes de tempo. As densidades máximas de ambas as populações diminuíram, o que já era esperado, devido à ação dos parasitoides. A atração exercida pelo feromônio sexual sintético aos machos causa os mesmos efeitos que observados anteriormente, quando aplicamos somente a técnica atrai-e-mata. Uma diferença é que a liberação de parasitoides conjunta à ação do feromônio apresentou uma tendência homogeneizadora das distribuições populacionais. Um bom resultado, pois menos heterogeneidade nas distribuições significam que o controle está atuando de maneira semelhante em todos os sítios.

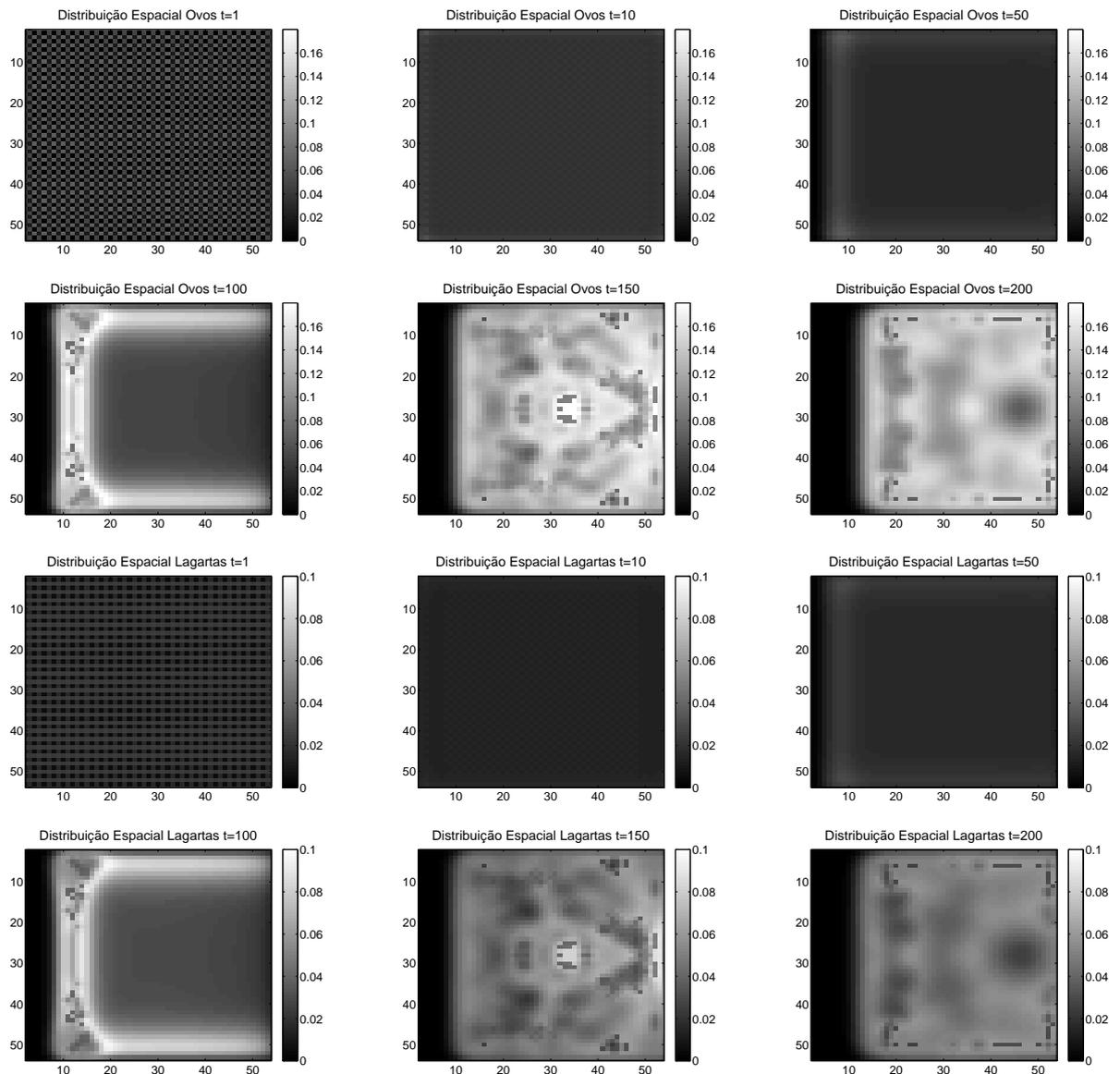


Figura 6.10: Distribuição espacial das populações de ovos (duas primeiras linhas) e de lagartas (duas últimas linhas), com a aplicação do manejo integrado incluindo a técnica atrai-e-mata juntamente com a liberação artificial de ambos os parasitoides, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$.

Na Figura 6.11, apresentamos as distribuições espaciais das populações de fêmeas

adultas (duas primeiras linhas) e machos adultos (duas últimas linhas) e na Figura 6.12, apresentamos as distribuições de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas). As distribuições espaciais mais homogêneas apresentadas pelos ovos e pelas lagartas também são observadas para as demais populações. Os parasitoides apresentam densidades bem maiores que as registradas com a aplicação unicamente da técnica atrai-e-mata.

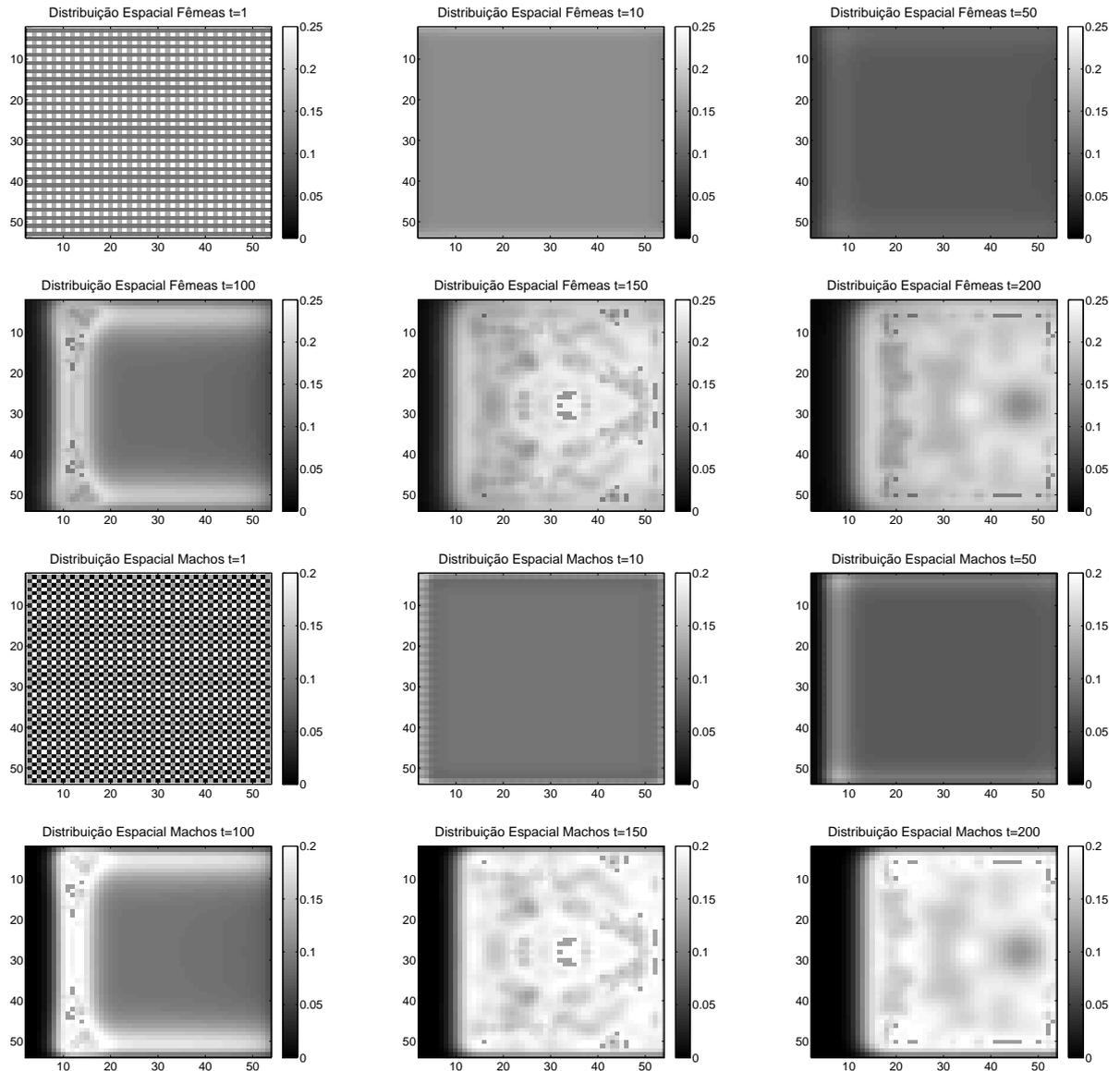


Figura 6.11: Distribuição espacial das populações de fêmeas adultas (duas primeiras linhas) e de machos adultos (duas últimas linhas), com a aplicação do manejo integrado incluindo a técnica atrai-e-mata e a liberação artificial de parasitoides, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$.

Concluimos que o manejo integrado, através da aplicação da técnica atrai-e-mata conjuntamente com a liberação artificial de ambos os tipos de parasitoides apresentou melhores resultados que os observados para a aplicação de apenas uma técnica de controle.

A tendência homogeneizadora causada pelos parasitoides contribuiu para a ocorrência de menores variações nas densidades populacionais entre sítios vizinhos, facilitando o controle.

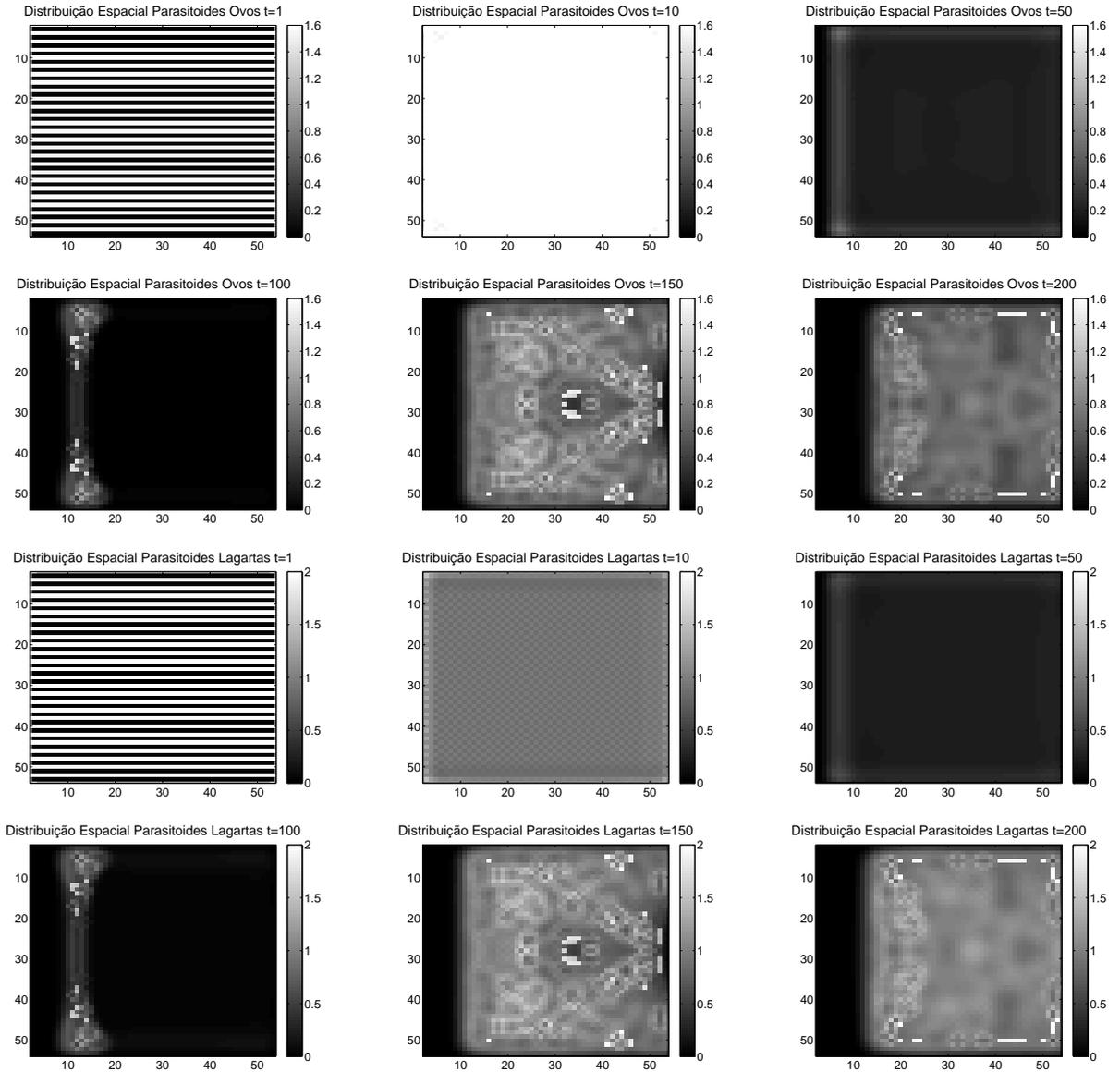


Figura 6.12: Distribuição espacial das populações de parasitoides de ovos (duas primeiras linhas) e de parasitoides de lagartas (duas últimas linhas), com manejo integrado incluindo a técnica atraí-e-mata e a liberação artificial de ambos os parasitoides, em $t = 1, 10, 50, 100, 150, 200$.

6.4 Considerações Finais

Neste capítulo, aplicamos duas técnicas de interrupção do acasalamento, através da utilização de feromônios sexuais sintéticos, para o controle da *Grapholita molesta*: *atrai-e-mata* e *confusão sexual*. Além disso, desenvolvemos um modelo para manejo integrado considerando a liberação artificial de parasitoides de ambas as espécies e a adoção da técnica *atrai-e-mata*.

A distribuição do feromônio sexual sintético no pomar, foi feita em pouco mais de 50% dos sítios, de forma a parecer com um tabuleiro de xadrez, onde as casas pretas representam sítios sem feromônio e as casas brancas, sítios com feromônio.

A técnica *atrai-e-mata* foi eficiente, reduzindo significativamente as densidades populacionais da praga. Além disso, ambos os tipos de parasitoides foram bastante afetados pela adoção da técnica, pois com a redução dos hospedeiros, eles também foram reduzidos. Todas as populações apresentaram padrões espaço-temporais heterogêneos dinâmicos.

A técnica de *confusão sexual* também foi eficiente, reduzindo drasticamente as densidades populacionais de todas as espécies, enquanto a concentração de feromônio se manteve alta. Quando esta concentração reduziu-se bastante, próximo à fronteira esquerda do reticulado, as populações começaram a recuperar-se. Quando isso acontece na prática, o feromônio deve ser reaplicado, para que a sua atuação se restabeleça e volte a ser eficiente.

Esses resultados obtidos com uma distribuição espacial do feromônio sexual em pouco mais da metade dos sítios da malha, é muito importante. Mostrar que ele vai atuar eficientemente mesmo que distribuído em menos pontos pelo pomar, pode trazer uma grande economia de mão-de-obra e de gastos para o produtor. Neste tipo de distribuição gasta-se mais ou menos 60% da quantidade de feromônio que seria utilizada para distribuir em todas as plantas do pomar. Mesmo assim, o feromônio foi eficiente em ambas as técnicas adotadas.

Ao considerarmos o manejo integrado, com a técnica *atrai-e-mata* e a liberação de ambos os tipos de parasitoides (toda vez que a densidade de machos atingir ou ultrapassar o Limiar Econômico) obtivemos resultados melhores que os resultados obtidos somente com a técnica *atrai-e-mata*. A liberação de parasitoides diminuiu as oscilações das populações da praga, fazendo com que as distribuições espaciais se tornassem mais homogêneas. Isso é benéfico, pois menores oscilações das populações da praga diminuem o risco de haver picos populacionais, que causam os prejuízos à produção e qualidade dos frutos.

A interrupção do acasalamento, por meio das técnicas utilizando feromônios sexuais sintéticos apresentadas, mostrou-se, de modo geral, muito eficiente para o controle da mariposa oriental. As densidades populacionais mantiveram-se baixas, em níveis toleráveis. A interrupção do acasalamento é tão eficaz quanto as técnicas utilizando inseticidas químicos, mas com o adendo que não agride o meio ambiente e nem há o risco de contaminação dos frutos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROJETOS FUTUROS

Neste trabalho, propusemos inicialmente um modelo de equações diferenciais ordinárias para descrever a evolução temporal de três estágios de desenvolvimento da mariposa oriental (ovo, lagarta e adulto), juntamente com seus inimigos naturais: o parasitoide de ovos *Trichogramma pretiosum* e o parasitoide de lagartas *Macrocentrus ancylivorus*. No Capítulo 1, antes da formulação do modelo básico I, tratamos sobre a importância da produção de pêssegos no Brasil, em particular no Rio Grande do Sul e, de suas principais características. Detalhamos a biologia da mariposa oriental e de seus inimigos naturais (parasitoides), bem como prejuízos e danos causados por ela.

No Capítulo 2, adimensionalizamos o modelo básico I e posteriormente calculamos seus pontos de equilíbrio, viabilidade biológica e estabilidade local de cada ponto. A estabilidade local para cada um dos cinco pontos de equilíbrio: E_0 (extinção de todas as populações), E_1 (extinção de ambos os parasitoides), E_2 (extinção dos parasitoides de ovos), E_3 (extinção dos parasitoides de lagartas) e E_4 (coexistência de todas as espécies), foi determinada utilizando o critério de Routh-Hurwitz. Em seguida, obtivemos os valores para os parâmetros do modelo dimensional através de dados experimentais existentes na literatura e a partir destes dados calculamos os parâmetros adimensionais. Finalmente, realizamos algumas simulações numéricas para visualizarmos o comportamento das populações sem a adoção de medidas de controle. Com os valores para os parâmetros utilizados, as populações tendem ao mesmo ponto de equilíbrio de coexistência obtido analiticamente.

No Capítulo 3, apresentamos o Manejo Integrado de Pragas, suas principais características e os principais métodos de controle utilizados para a mariposa oriental. Na Seção 3.3, propusemos três medidas para o controle da mariposa oriental, sendo as duas primeiras com a aplicação de apenas uma técnica de controle, como ainda é muito utilizado atualmente: (i) controle químico através da aplicação de inseticidas de amplo espectro, que denominamos Caso I; (ii) controle biológico através da liberação de parasitoides, que denominamos Caso II e (iii) controle incluindo o MIP, e esta denominamos Caso III: controle integrado através da liberação artificial de parasitoides e controle químico através da aplicação de inseticida seletivo.

Nos três casos, observamos que as técnicas são eficientes no sentido de manter a densidade de mariposas adultas abaixo do LE , e conseqüentemente reduzir a densidade de lagartas. No Caso I ambos os parasitoides vão à extinção, pois o inseticida de amplo espectro é muito nocivo aos inimigos naturais. O tempo necessário para alcançar o controle da praga é reduzido quando aplicamos o MIP, sendo que qualquer uma dessas técnicas exige aplicações consecutivas do controle adotado. Considerando que, em nossas simulações mantivemos constante a quantidade de parasitoides liberados e/ou de inseticida pulverizado em cada aplicação do controle, um número menor de aplicações significaria na prática, menos gastos e menor contaminação ambiental.

Em todas as suposições feitas nas simulações numéricas o controle com o MIP (Caso III) foi eficiente, mantendo a população de pragas a níveis toleráveis abaixo do LE . Lagartidas específicos seriam a melhor opção, para atuarem conjuntamente com inimigos naturais à praga, como é o caso dos parasitoides. Além disso, as aplicações de MIP tornaram-se periódicas, o que é muito interessante do ponto de vista da aplicação concreta desta estratégia, pois, nestes casos, depois de um determinado tempo, o produtor não precisa mais medir a população de pragas antes de aplicar as técnicas de controle, passando a aplicá-las com o período adequado. Concluimos também, que a aplicação da estratégia do MIP altera significativamente o comportamento qualitativo das populações, que antes tendiam a um ponto de equilíbrio de coexistência e após as aplicações, passam a oscilar.

Finalizamos o Capítulo 3, apresentando a abordagem de controle proporcional-integral, cujo objetivo é o de manter pré-fixada a população de mariposas adultas em uma certa quantidade. Para isso, alguma medida de controle deve ser adotada continuamente, eliminando uma fração das mariposas. Se desejarmos que as mariposas sejam mantidas a níveis baixos, os parasitoides se extinguem. Ao mantermos as mariposas a níveis maiores, os parasitoides sobrevivem, mas as lagartas não são reduzidas ao nível desejado. Em trabalhos futuros pretendemos adotar variações desse método considerando o MIP e avaliar a sua eficácia e viabilidade de adoção na prática.

No capítulo 4, incluímos ao modelo básico adimensional proposto no Capítulo 2 uma estrutura espacial através de uma rede discreta bidimensional. Dois tipos de movimentação foram considerados: 1) difusão; 2) difusão para as fases de vida da mariposa e taxia quase local para os parasitoides. Os dois tipos de movimentação provocaram mudanças no comportamento das populações, em relação às densidades ao longo do tempo e padrões espaço-temporais. As densidades populacionais em cada sítio, considerando a movimentação das populações, apresentam o mesmo comportamento obtido com modelo local, para ambos os tipos de movimentação.

Na movimentação por difusão, as populações distribuem-se homoganeamente no espaço com o passar do tempo. Já no caso da movimentação por difusão para as lagartas e fêmeas adultas, e taxia quase local para os parasitoides, observa-se após algum tempo uma

distribuição espacial heterogênea (que não varia com o tempo). Cabe ressaltar, que esta heterogeneidade espacial de equilíbrio apresenta variações muito pequenas de densidades populacionais entre os sítios.

Ao incluirmos o MIP, consideramos duas estratégias de aplicação: Estratégia I e Estratégia II. Em ambos os casos, e para os dois tipos de movimentação, o MIP mostrou-se eficiente no controle da mariposa oriental, mantendo a densidade de fêmeas adultas abaixo do LE , reduzindo a população de ovos e de lagartas a níveis menores que os observados no modelo sem o controle. Em todos os casos, o MIP provoca alterações no comportamento espaço-temporal das populações.

Para os dois tipos de movimentação, utilizando a Estratégia I, as populações distribuem-se de forma simétrica no espaço, e os estados finais considerados de cada população apresentam padrões heterogêneos semelhantes, variando somente nas densidades populacionais. No caso da Estratégia II, não existe simetria nas distribuições espaciais e nem semelhanças nos estados finais das distribuições consideradas. Ao que tudo indica, a aleatoriedade na escolha dos sítios a serem avaliados a cada instante de tempo, para a aplicação do MIP, causa a perda da simetria antes existente.

No Capítulo 5, tratamos da utilização de feromônios sexuais sintéticos para o controle de insetos-praga, com ênfase no controle da mariposa oriental. Esse feromônio sexual sintético é produzido em laboratório e liberado nos pomares com o objetivo de reduzir os encontros entre machos e fêmeas para o acasalamento, técnica conhecida como interrupção do acasalamento ou disrupção sexual.

Após introduzir a técnica e analisar os principais fatores que influenciam na eficiência da mesma, desenvolvemos um novo modelo básico considerando também a presença da mariposa macho, pois o efeito do feromônio ocorre sobre os machos, que são atraídos para as fontes emissoras de feromônio e assim não localizam as fêmeas para o acasalamento. Adimensionalizamos este novo modelo, calculamos os seis pontos de equilíbrio e viabilidade biológica dos mesmos. O modelo apresenta dois equilíbrios de extinção de ambos os parasitoides, o menor deles funciona como um limiar, se as condições iniciais estiverem abaixo dele, todas as populações se extinguem.

A variável espacial foi introduzida da mesma forma que no Capítulo 4, bem como a movimentação das espécies, lagartas e mariposas fêmea por difusão simples, já mariposas macho e ambos os parasitoides por taxia quase local. Desenvolvemos uma EDO para descrever a variação na concentração do feromônio e agregamos ao modelo previamente desenvolvido para a movimentação das populações. O feromônio se dispersa por difusão simples e por convecção. Realizamos simulações numéricas considerando inicialmente o modelo sem a atuação do feromônio e em seguida com o feromônio atraindo os machos para as suas fontes emissoras.

No Capítulo 6, aplicamos duas técnicas de interrupção do acasalamento, através da utilização de feromônios sexuais sintéticos, para o controle da *Grapholita molesta*,

denominadas atraí-e-mata e confusão sexual. Além disso, desenvolvemos um modelo para manejo integrado considerando a liberação artificial de parasitoides de ambas as espécies e adoção da técnica atraí-e-mata. O feromônio foi distribuído no pomar em 50% das plantas, aproximadamente, com a mesma concentração em cada planta.

A técnica atraí-e-mata foi eficiente para esta distribuição do feromônio, reduzindo significativamente as densidades populacionais da praga. Contudo, os parasitoides também foram bastante reduzidos em função da técnica adotada. Todas as populações apresentaram padrões espaço-temporais heterogêneos dinâmicos.

A técnica de confusão sexual também foi eficiente para esta distribuição espacial do feromônio no pomar, reduzindo drasticamente as densidades populacionais de todas as espécies, enquanto a concentração de feromônio se manteve alta. Quando a concentração se reduziu bastante, as populações começaram a recuperar-se, próximo a fronteira esquerda do reticulado, onde o feromônio estava com uma concentração muito baixa. Na prática, quando isso acontece, o feromônio deve ser reaplicado nas plantas, para que a sua atuação se restabeleça e volte a ser eficiente.

Através de simulações numéricas, mostramos que o feromônio vai atuar eficientemente, mesmo que distribuído em menos pontos pelo pomar, podendo trazer uma grande economia de mão-de-obra e de gastos para o produtor. No tipo de distribuição adotado, utiliza-se mais ou menos 60% do total da quantidade de feromônio que seria necessária para aplicar em todas as plantas do pomar. Por ser uma técnica ainda considerada cara, a interrupção do acasalamento, está sendo adotada por poucos produtores de pêssegos. Diminuir esses custos é portanto, muito importante para a difundir a sua utilização.

Ao considerarmos o manejo integrado, com a técnica atraí-e-mata e a liberação de ambos os tipos de parasitoides, toda vez que a densidade de machos atingir o Limiar Econômico, obtivemos resultados ainda melhores que os resultados obtidos somente com a técnica atraí-e-mata. A liberação de parasitoides diminuiu as oscilações das populações da praga, fazendo com que as distribuições espaciais se tornassem menos heterogêneas, diminuindo o risco de picos populacionais.

A interrupção do acasalamento, por meio das técnicas utilizando feromônios sexuais sintéticos apresentadas, mostrou-se, de modo geral, muito eficiente para o controle da mariposa oriental. As densidades populacionais se mantiveram baixas, em níveis toleráveis. Portanto, a técnica é tão eficaz quanto as que usam inseticidas químicos, mas com o adendo que não agride o meio ambiente (inimigos naturais e demais insetos benéficos) e nem há o risco de contaminação dos frutos.

Em trabalhos futuros pretendemos:

- Incorporar aos modelos já desenvolvidos a liberação de machos estéreis, técnica adotada por Bhattacharyya e Bhattacharya (2007), no controle de uma praga que ataca plantações de arroz;

- Adotar técnicas da Teoria de Controle Ótimo, com o objetivo de controlar a praga com o menor custo com inseticidas ou descobrir a quantidade ótima de parasitoides a serem liberados;
- Incluir resistência da praga a inseticidas;
- Determinar como varia a distância quadrática média, e a partir daí, obter os fatores de dispersão das populações;
- Utilizar técnicas da Teoria de Controle, com o aperfeiçoamento do controlador proporcional-integral adotado na Seção 3.4, introduzindo novos tipos de controle com abordagens mais sofisticadas;
- Adotar as técnicas desenvolvidas neste trabalho para o tratamento de outros tipos de pragas de importância econômica, como por exemplo, a mosca-das-frutas-sulamericana, pulgões que atacam o algodão, percevejos da soja, dentre outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTA, W. C. **Chemical communication: the language of pheromones**. New York: Scientific American Library, 1990.

AGROFIT-MAPA. **Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. Disponível em http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons, Acessado em 26/10/2014 e em 27/05/2015.

AFONSO, A. P. S.; NAVA, D. E.; MARTINS, J. F. S; WREGE, M. e DIEZ-RODRIGUEZ, G. I. **Zoneamento ecológico de *Spodoptera frugiperda*, *Anastrepha fraterculus* e *Grapholita molesta* para o Rio Grande do Sul e sua relação com as mudanças climáticas globais**. Pelotas: Embrapa, 2008.

ALTAFINI, D. L.; SANT'ANA, J. e REDAELLI, L. R. **Efeito de Fatores Endógenos na Percepção Química de *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae) ao Feromônio Sexual**. Neotropical Entomology, vol. 39, pp. 330-337, 2010.

ALLEN, L. J. S. **An Introduction to Mathematical Biology**. Ed. Pearson Prentice Hall, 2007.

ANDRADE, R. **Hexapoda: a vida secreta dos parasitoides**. 2007. Disponível em hexapoda.blogspot.com.br/2007/05/vida-secreta-dos-parasitoides.html, Acessado em 30/06/2015.

ARIOLI, C. J.; BOTTON, M. **Avaliação da técnica de interrupção de acasalamento no controle de *Grapholita molesta* (Busck,1916) (Lepidoptera: Tortricidae) na cultura da ameixeira**. Congresso Brasileiro de Entomologia, vol. 24, 2012.

ARIOLI, C. J.; BOTTON, M. e CARVALHO, G. A. **Controle químico da *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae) na cultura do pessegueiro**. Ciência Rural, vol. 34, pp. 1695-1700, 2004.

ARIOLI, C. J.; BOTTON, M.; MAFRA-NETO, A.; MOLINARI, F.; BORGES, R. e

- PASTORI, P. L. **Feromônios sexuais no manejo de insetos-praga na fruticultura de clima temperado**. Boletim Técnico EPAGRI, vol. 159, 58 p., 2013.
- ARIOLI, C. J.; CARVALHO, G. A. e BOTTON, M. **Flutuação populacional de *Grapholita molesta* com armadilhas de feromônio sexual na cultura do pessegueiro em Bento Gonçalves-RS**. Ciência Rural, vol. 35, pp. 1-5, 2005.
- ARIOLI, C. J.; CARVALHO, G. A. e BOTTON, M. **Monitoramento de *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae) na cultura do pessegueiro com feromônio sexual sintético**. BioAssay, vol. 01, pp. 1-5, 2006.
- ARIOLI, C. J.; GARCIA, M. S.; ZARTE, M. e BOTTON, M. **Biologia da mariposa-oriental em dieta artificial à base de milho**. Scientia Agraria, vol. 11, pp. 481-486, 2010.
- ARIOLI, C. J.; PASTORI, L. P.; BOTTON, M.; GARCIA, M. S.; BORGES, R. and MAFRA-NETO, A. **Assessment of SPLAT formulations to control *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) in Brazilian apple orchard**. Chilean Journal of Agricultural Research, vol. 74, pp. 184-190, 2014.
- ARIOLI, C. J.; ZART, M.; GARCIA, M. e BOTTON, M. **Avaliação de Inseticidas Neonicotinóides para o Controle da Mariposa-Oriental *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae) em Laboratório e Pomar Comercial de Maçã com Infestações Artificiais**. BioAssay, vol. 02, pp. 1-6, 2007.
- BARBOSA, C. A. e RASEIRA, M. C. **A cultura do pessegueiro**. Brasília: Embrapa SPI, 1999.
- BENTO, J. M. S. **Fundamentos do monitoramento, da coleta massal e do confundimento de insetos-praga**. Holos, pp. 135-144, 2001.
- BHATTACHARYYA, S. and BHATTACHARYA, D. K. **Pest control through viral disease: Mathematical modeling and analysis**. Journal of Theoretical Biology, vol. 238, pp. 177-197, 2006.
- BHATTACHARYYA, S. and BHATTACHARYA, D. K. **An improved integrated pest management model under 2-control parameters (sterile male and pesticide)**. Mathematical Biosciences, vol. 209, pp. 256-281, 2007.
- BORROR, D. J.; TRIPLEHORN, C. A. and JOHNSON, N. F. **An introduction to the study of insects**. New York: Saunders College Publishing, 875p, 1992.

BOTTON, M. **Biologia e controle de *Bonagota cranaodes* (Merick, 1937) (Lepidoptera: Tortricidae) na cultura da macieira**. Tese de Doutorado (Doutorado em Entomologia), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1999.

BOTTON, M.; ARIOLI, C. J. e COLLETA, V. D. **Monitoramento da mariposa oriental *Grapholita molesta* (Busck, 1916) na cultura do pessegueiro**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, Comunicado Técnico, vol. 38, 2001.

BOTTON, M.; ARIOLI, C. J. e MASCARO, F. A. **Manejo de pragas na cultura do pessegueiro**. EPAGRI, vol. 1, pp. 155-159, 2005a.

BOTTON, M.; KULCHESKI, F.; DALLA COLLETTA, V.; ARIOLI, C. J. e PASTORI, P. L. **Avaliação do uso do feromônio de confundimento no controle de *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) em pomares de pessegueiro**. Idésia, vol. 23, pp. 43-50, 2005b.

BOTTON, M.; NAVA, D. E.; ARIOLI, C. J.; GRUTZMACHER, A. D. e GARCIA, M. S. **Bioecologia, monitoramento e controle da mariposa-oriental na cultura do pessegueiro no Rio Grande do Sul**. Circular Técnica Embrapa, vol. 86, Bento Gonçalves, RS, 2011.

BRUNNER, J. F. ***Macrocentrus ancylivorus* Rohwer**. Tree Fruit Research & Extension Center, Orchard Pest Management Online, Whashington State University, 1993, Disponível em <http://jenny.tfrec.wsu.edu/opm/displaySpecies.php?pn=950>, Acessado em 26/10/2014.

CAMPOS, J. V. e GARCIA, F. R. M. **Avaliação de atrativos na captura de adultos de *Grapholita molesta* (Busck, 1916)**. Revista Faculdade Zootecnia, Veterinária e Agronomia, vol. 7, pp. 13-18, 2000.

CAPELLA, A.; GUARNONE, A.; DOMENICHINI, P. e AIROLDI, M. **Acetamipride (EPIK), nuovo insetticida neonicotinoide per la difesa di fruttiferi, orticole, floreali e ornamentali**. Informatore Fitopatologico, vol. 54, pp. 43-47, 2004.

CASTILHOS, R. V.; GRUTZMACHER, A. D.; NAVA, D. E.; SIQUEIRA, P. R. B.; SPAGNOL, D. e ZOTTI, M. J. **Seletividade de Agrotóxicos Recomendados na Persicultura ao Predador *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae)**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, EMBRAPA, vol. 152, 36p, 2011.

COX, J. G. and LIMA, S. L. **Naiveté and an aquatic-terrestrial dichotomy in the**

effects of introduced predators. TRENDS in Ecology and Evolution, vol. 21, pp. 674-680, 2006.

CROCOMO, W. B. **Manejo integrado de pragas.** São Paulo: UNESP, pp. 325-358, 1990.

EDELSTEIN-KESHET, L. **Mathematical Models in Biology.** Ed. McGraw-Hill, New York, 1988.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **EMBRAPA: Pêssego.** Produção, 1ª Edição, Brasília, 2003.

FACHINELLO, J. C. **Produção integrada no Brasil: agropecuária sustentável, alimentos seguros.** Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, pp. 781-809, 2009.

FACHINELLO, J. C. e HERTER, F. G. **Diretrizes para produção integrada de frutas de caroço.** Circular Técnica Embrapa, vol 19, 46p., 2000.

FARIA, C. A.; TORRES, J. B. e FARIAS, A. M. I. **Resposta Funcional de *Trichogramma pretiosum* Riley (Hymenoptera: Trichogrammatidae) Parasitando Ovos de *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae): Efeito da Idade do Hospedeiro.** An. Soc. Entomol. Brasil, vol. 29, pp. 85-93, 2000.

FARIAS, R. M.; NUNES, J. L. S.; MARTINS, C. R.; GUERRA, D. S.; ZANINI, C. e MARRIDIN, G. A. B. **Produção convencional × Integrada em pessegueiro cv. Marli na depressão central do Rio Grande do Sul.** Revista Brasileira de Fruticultura, vol. 25, pp. 253-255, 2003.

FERGUSON, A. W.; KLUKOWSKI, Z.; WALCZAC, B.; CLARK, S. J.; MUGGLESTONE, M. A.; PERRY, J. N. and WILLIAMS, I. H. **Spatial distribution of pest insects in oilseed rap: implications for integrated pest management.** Agriculture and Ecosystems & Environment, vol. 95, pp. 509-521, 2003.

GANTMACHER, F. R. and AIZERMAN, M. A. **Absolute Stability of Regular Systems.** Ed. Holden-Day, 1964.

GHOSH, S. and BHATTACHARYA, D. K. **Optimization in microbial pest control: An integrated approach.** Applied Mathematical Modelling, vol.34, pp. 1382-1395, 2010.

GONÇALVES, J. R.; HOLTZ, A. M.; PRATISSOLI, D. e GUEDES, R. N. C. **Avaliação da qualidade de *Trichogramma pretiosum* (Hemiptera: Trichogrammatidae) em ovos de *Sitotroga cerealella* (Lepidoptera: Gellchiidae).** Acta Scientiarum Agronomy, vol. 25, pp. 485-489, 2003.

GONZÁLEZ, R. H. **Fenologia de la grapholita o polilla oriental del Durazno.** Aconex, vol.12, pp. 5-12, 1986.

GRASSELLI, J. **Estratégias de controle de *Grapholita molesta* (Busck, 1916) (Lepidoptera: Tortricidae) em pomares de pessegueiro.** Monografia (Pós-Graduação em Fitossanidade), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

GUERRA, D. S.; MARODIN, G. A. B.; ZANINI, C. L. D.; ARGENTA, F. e GRASSELLI, V. **Utilização de pesticidas na produção de pêssegos 'Marli', nos sistemas de produção integrada e convencional.** Revista Brasileira de Fruticultura, vol. 29, pp. 91-95, 2007.

HÄRTER, W. R.; GRÜTZMACHER, A. D.; NAVA, D. E.; GONÇALVES, R. S. e BOTTON, M. **Isca tóxica e disrupção sexual no controle da mosca-da-fruta sul-americana e da mariposa-oriental em pessegueiro.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, vol. 45, pp. 229-235, 2010.

HASSELL, M.; COMINS, H. and MAY, R. **Spatial Structure and Chaos in Insect Population Dynamics.** Nature, vol. 353, pp. 255-258, 1991.

HEDRICK, U. P. (1917). The peaches of New York. In: GRASSELLI, J. **Estratégias de controle de *Grapholita molesta* (Busck, 1916) (Lepidoptera: Tortricidae) em pomares de pessegueiro.** Monografia (Pós-Graduação em Fitossanidade), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

HICKEL, E. R. e DUCROQUET, J. H. J. **Monitoramento e controle da grafolita ou mariposa oriental no Alto Vale do Rio do Peixe.** Agropecuária Catarinense, Florianópolis, vol. 11, pp. 8-11, 1998.

HICKEL, E. R.; RIBEIRO, L. G. e SANTOS, J. P. A. **A mariposa oriental nos pomares catarinenses: ocorrência, monitoramento e manejo integrado.** Florianópolis: EPAGRI, Boletim Técnico, vol. 139, 2007.

HUGHES, G. **Incorporating spatial pattern of harmful organisms into crop loss models.** Crop Protection, vol. 15, pp. 407-421, 1996.

HUMMEL, H. E.; GASTON, L. K.; SHOREY, H. H. et al. **Clarification of the chemical status of pink bollworm pheromone**. Science, vol. 181, pp. 893-895, 1973.

JUNIOR, M. E. **Controle biológico de insetos pragas**. I Seminário Mosaico Ambiental: Olhares sobre o Ambiente, ISSN 2236-8256, Campos dos Goytacazes/RJ, 2011.

KOVALESKI, A. e RIBEIRO, L. G. **Manejo de pragas na produção integrada de maçã**. Embrapa-CNPUV, Bento Gonçalves, pp. 61-68, 2003.

LIMA, E. A. B. F. **Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Matemáticos para o Controle da *Diaphorina citri* Via Manejo Integrado e Estudo da Influência da Temperatura sobre a Dinâmica Populacional de *Talitroides topilotum***. Dissertação de Mestrado, Biometria, UNESP-Botucatu, 2010.

MAFRA-NETO, A. **Effects of the structure and composition of pheromone plumes on the response of the male almond moth, *Cadra cautella***. PhD Thesis, University of Massachusetts, 1993.

MAGALHÃES, G. O.; GOULART, R. M.; VACARI, A. M. e DE BORTOLI, S. A. **Parasitismo de *Trichogramma pretiosum* Riley, 1879 (Hemiptera: Trichogrammatidae) em diferentes hospedeiros e cores de cartelas**. Arq. Inst. Biol., vol. 79, pp. 55-60, 2012.

MAHR, S. ***Macrocentrus ancylivorus***. Midwest Biological Control News Online, University of Wisconsin, vol. 5, 1998, Disponível em <http://www.entomology.wisc.edu/mbcn/kyf507.html>, Acessado em 26/10/2014.

MATHEWS, R. W. **Biology of Braconidae**. Annual Review Entomology, vol. 19, pp. 15-32, 1974.

METCALF, R. L. and LUCKMANN, W. H. **Introduction to insect pest management**. New York: John Wiley and Sons, 1975.

MISTRO, D. C.; RODRIGUES, L. A. D. e SILVEIRA, P. A. **Modelo Presa-Predador com *Taxia Local***. Biomatemática, vol. 20, pp. 59-68, 2010.

MONTEIRO, L. B.; MAY DE MIO, L. L.; MONTE SERRAT, B.; MOTTA, A. C. V. e CUQUEL, F. L. **Fruteiras de caroço: uma visão ecológica**. Curitiba: Reproset, pp. 223-262, 2004.

MONTEIRO, L. B.; SOUZA, A. e BELLI, L. **Confusão sexual para o controle de**

Grapholita molesta (Lepidoptera: Tortricidae) em pomares de macieira, em Fraiburgo (SC), Brasil. *Bragantia*, vol. 67, pp. 191-196, 2008.

NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S. e ZUCCHI, R. A. **Entomologia Econômica**. Piracicaba: Editora Livro Ceres, 1981.

NERIO, L. S.; OLIVERO-VERBEL, J.; and STASHENKO, E. **Repellent activity of essential oils: a review**. *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 372-378, 2010.

NORRIS, R. F.; CASWELL-CHEN, E. P. and KOGAN, M. **Concepts in Integrated Pest Management**. New Jersey: Ed. Prentice Hall, 2003.

NUNES, J. L. S.; FARIAS, R. M.; GUERRA, D. S.; GRASSELLI, V. e MARODIN, G. A. B. **Flutuação populacional e controle da mariposa oriental (*Grapholita molesta* Busck, 1916) em produção convencional e integrada de pessegueiro**. *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol. 25, pp. 227-228, 2003.

PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORREA-FERREIRA, B. e BENTO, J. M. **Controle Biológico no Brasil: Parasitoides e Predadores**. São Paulo: Editora Manole, 2002.

PASTORI, P. L.; ARIOLI, C. J.; BOTTON, M.; MONTEIRO, L. B. e MAFRA-NETO, A. **Avaliação da Técnica de Disrupção Sexual Utilizando Emissores SPLAT Visando ao Controle de *Bonagota salubricola* (Meyrick) e *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae) na Pré-colheita de Maçãs da Cultivar “Fuji”**. *BioAssay*, vol. 3, pp. 1-8, 2008.

PASTORI, P. L.; ARIOLI, C. J.; BOTTON, M.; MONTEIRO, L. B.; STOLTMAN, L. and MAFRA-NETO, A. **Integrated control of two tortricid (Lepidoptera) pests in apple orchards with sex pheromones and insecticides**. *Revista Colombiana de Entomologia*, vol. 38, pp. 224-230, 2012.

POLTRONIERI, A. S.; SILVA, E. D. I. B. e MONTEIRO, L. B. **Monitoramento de mariposa oriental com feromônio sintético no estado do Paraná**. *Scientia Agraria*, vol. 9, pp. 225-228, 2008.

RAFIKOV, M.; BALTHAZAR, J. M. and BREMEN, H. F. **Mathematical modeling and control of population systems: Applications in biological pest control**. *Applied Mathematics and Computation*, vol. 200, pp. 557-573, 2008.

RASEIRA, M. C. B. e MADAIL, J. C. M. **Aspectos da produção e mercado do**

pêssego no Brasil. Pelotas - RS: EMBRAPA - CPACT, 2008.

REICHART, G. and BODOR, J. **Biology of the oriental fruit moth (*Grapholita molesta* Busck) in Hungary.** Acta Phitopathologica Academiae Scientiarum Hungaricae, vol. 07, pp. 279-295, 1972.

RODRIGUES, L. A. D. **O Acaso e a Decisão: Modelos Matemáticos para a Dispersão Populacional.** Tese de Doutorado, Matemática Aplicada, IMECC-UNICAMP, 1998.

RODRIGUES, M. L.; GARCIA, M. S.; NAVA, D. E.; BOTTON, M.; PARRA, J. R. P. e GUERRERO, M. **Selection of *Trichogramma pretiosum* lineages for control of *Grapholita molesta* in peach .** Florida Entomologist, vol. 94, pp. 398-403, 2011.

RODRIGUES, L. A. D.; VARRIALE, M. C.; GODOY, W. A. C. and MISTRO, D. C. **Spatiotemporal dynamics of an insect population in response to chemical substances .** Ecological Complexity, vol. 16, pp. 51-58, 2013.

SALLES, L. A. B. **Grapholita (*Grapholita molesta*): bioecologia e controle.** Pelotas: Embrapa-CNPFT, Embrapa CNPFT Documentos, vol. 42, 1991.

SANTANA, J. E. **Flutuação populacional de adultos de *Grapholita molesta* (Busck, 1916) (Lepidoptera: Tortricidae) e índice de danos em pomar de macieira com uso de feromônio sexual para controle.** Monografia, Universidade Federal de Viçosa/MG, 42p., 2012.

SEAMAN, A. J. and RIEDL, H. **Tree fruit crops: oriental fruit moth.** New York State Integrated Pest Management Program, New York State College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, 1988.

SEGEL, L. A. **Taxes in Cellular Ecology.** Lect. Notes Biomath., vol. 54, pp. 407-424, 1984.

SILVA, A. G.; GONÇALVES, C. R.; GALVÃO, D. M.; GONÇALVES, A. J. L.; GOMES, J.; SILVA, M. N. e SIMONI, L. **Quarto catálogo dos insetos que vivem nas plantas do Brasil.** Rio de Janeiro: MARA-SDSV, 1962.

SILVA, O. A. B. N.; BOTTON, M.; GARCIA, M. S.; BISOGNIN, A. Z. e NAVA, D. E. **Desenvolvimento e reprodução da mariposa oriental em macieira e pessegueiro.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, vol. 45, pp. 1082-1088, 2010.

SILVEIRA, P. A. **Perseguição e Fuga em Modelos Presa-Predador**. Dissertação de Mestrado, Matemática Aplicada, UFSM, 2010.

SILVEIRA, P. A. **Explorando Modelos Matemáticos para o Manejo Integrado de Pragas (MIP) Incluindo Otimização**. Tese de Doutorado, Matemática Aplicada, UFRGS, 2014.

SILVEIRA NETO, S.; NAKANO, O.; BARDIN, D. e VILLA NOVA, N. A. **Manual de ecologia de insetos**. Piracicaba: Livro Ceres, 1976.

SMITH, J. M. **Models in Ecology**. Cambridge: Cambridge University Express, 1974.

STERN, V. M. **Economic Thresholds**. Ann. Rev. Entomol., pp. 259-280, 1973.

TANG, S. and CHEKE, R. A. **State-dependent impulsive models of integrated pest management (IPM) strategies and their dynamic consequences**. Journal of Mathematical Biology, vol. 50, pp. 257-292, 2005.

TANG, S. and CHEKE, R. A. **Models of integrated pest control and their biological implications**. Mathematical Biosciences, vol. 215, pp. 115-125, 2008.

TANG, S. and CHEN, L. **Modelling and analysis of integrated pest management strategy**. Discrete and Continuous Dynamical Systems-Series B, vol. 4, pp. 759-768, 2004.

TANG, S.; XIAO, Y. and CHEKE, R. A. **Multiple attractors of host-parasitoid models with integrated pest management strategies: Eradication, persistense and outbreak**. Theoretical Population Biology, vol. 73, pp. 181-197, 2008.

TANG, S.; XIAO, Y.; CHEN, L. and CHEKE, R. A. **Integrated pest management models and their dynamical behaviour**. Bulletin of Mathematical Biology, vol. 67, pp. 115-135, 2005.

TRACKER, J. R. M. **An Introduction to Arthropod Pest Control**. Cambridge University Press, 343 p., 2002.

VAN DEN BOSH, R.; MESSENGER, P. S. and GUTIERREZ, A. P. **An Introduction to Biological Control**. Plenum Press, New York, 1982.

VAN LENTEREN, J. C. **Environmental manipulation advantageous to natural enemies of pests**. In: DELUCCHI, V. Integrated Pest Management. Parasits, Geneva,

pp. 123-166, 1987.

VAN LENTEREN, J. C. **Integrated pest management in protected crops**. Chapman & Hall, London, pp. 311-320, 1995.

VAN LENTEREN, J. C. **Measures of success in biological control of arthropods by augmentation of natural enemies**. In: WRATTEN, S. and GURR, G., Measures of Success in Biological Control, Kluwer Academic Publishers, pp. 77-89, 2000.

VAN LENTEREN, J. C. and WOETS, J. **Biological and integrated pest control in greenhouses**. Ann. Rev. Ent., vol. 33, pp. 239-250, 1988.

VILELA, E. F. e DELLA LÚCIA, T. M. C. **Feromônios de insetos: biologia, química e emprego no manejo de pragas**. Ribeirão Preto: Holos, pp. 9-12, 2001.

XIAO, Y. N. and VAN DEN BOSCH, F. **The dynamics of an eco-epidemic model with biological control**. Ecological Modelling, vol. 168, pp. 203-214, 2003.

Apêndice A

CRITÉRIO DE ROUTH-HURWITZ

O Critério de Routh-Hurwitz, é um importante critério que fornece condições necessárias e suficientes para que todas as raízes do polinômio característico (com coeficientes reais) estejam à esquerda no plano complexo, ou seja, tenham parte real negativa. O nome do critério se refere a E. J. Routh e A. Hurwitz, que contribuíram para a sua formulação. O critério é muito utilizado para determinar a estabilidade local dos pontos de equilíbrio de sistemas não lineares de equações diferenciais ordinárias. O teorema a seguir estabelece o critério de Routh-Hurwitz.

Teorema: Critério de Routh-Hurwitz. *Dado o polinômio,*

$$P(\lambda) = \lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda + a_n,$$

onde os coeficientes a_i são reais constantes, $i = 1, \dots, n$, definimos as n matrizes Hurwitz usando os coeficientes a_i do polinômio característico:

$$H_n = \begin{pmatrix} a_1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & 1 & \cdots & 0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_n \end{pmatrix},$$

onde $a_j = 0$ se $j > n$. Todas as raízes do polinômio $P(\lambda)$ são negativas ou tem parte real negativa se e somente se os determinantes de todas as matrizes Hurwitz forem positivos:

$$\det H_j > 0, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Quando $n = 2$, o critério de Routh-Hurwitz simplifica-se a $\det H_1 = a_1 > 0$ e

$$\det H_2 = \det \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ 0 & a_2 \end{pmatrix} = a_1 a_2 > 0$$

ou $a_1 > 0$ e $a_2 > 0$. Para polinômios de grau $n = 2, 3, 4$ e 5 , o critério de Routh-Hurwitz

resume-se a:

$n = 2$: $a_1 > 0$ e $a_2 > 0$;

$n = 3$: $a_1 > 0, a_3 > 0$ e $a_1 a_2 > a_3$;

$n = 4$: $a_1 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0$ e $a_1 a_2 a_3 > a_3^2 + a_1^2 a_4$;

$n = 5$: $a_i > 0, i = 1, 2, 3, 4, 5, a_1 a_2 a_3 > a_3^2 + a_1^2 a_4$ e
 $(a_1 a_4 - a_5)(a_1 a_2 a_3 - a_3^2 - a_1^2 a_4) > a_5(a_1 a_2 - a_3)^2 + a_1 a_5^2$.

A prova completa do critério de Routh-Hurwitz pode ser encontrada em Gantmacher (1964). A seguir será feita apenas para o caso $n = 2$.

Prova do Teorema: Para o caso $n = 2$, o critério de Routh-Hurwitz é apenas $a_1 > 0$ e $a_2 > 0$. O polinômio característico no caso $n = 2$ é

$$P(\lambda) = \lambda^2 + a_1 \lambda + a_2 = 0.$$

Os autovalores satisfazem

$$\lambda_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2}}{2}.$$

Suponha que a_1 e a_2 são positivos. É fácil ver que se as raízes forem reais, eles são ambos negativos, e se elas são complexas conjugadas, eles tem parte real negativa.

Para provar a recíproca, suponha que as raízes sejam ambas negativas ou possuam parte real negativa. Então, segue que $a_1 > 0$. Se as raízes forem complexas conjugadas, $0 < a_1^2 < 4a_2$, que implica que a_2 é também positivo. Se as raízes forem reais, já que ambas são negativas, segue que $a_2 > 0$.

Todas as informações contidas neste apêndice foram consultadas em Allen (2007).