**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Dinâmica de predação e resposta funcional em *Chrysoperla externa*
(Neuroptera: Chrysopidae) sobre *Toxoptera citricida* (Hemiptera: Aphididae)
aplicada à citricultura orgânica**

Ana Paula Magalhães Borges Battel

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Ciências. Área de concentração: Entomologia

**Piracicaba
2011**

Ana Paula Magalhães Borges Battel
Licenciado em Ciências Biológicas

Dinâmica de predação e resposta funcional em *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae) sobre *Toxoptera citricida* (Hemiptera: Aphididae) aplicada à citricultura orgânica

Orientador:
Prof. Dr. **WESLEY AUGUSTO CONDE GODOY**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Entomologia

Piracicaba
2011

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Battel, Ana Paula Magalhães Borges

Dinâmica de predação e resposta funcional em *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae) sobre *Toxoptera citricida* (Hemiptera: Aphididae) aplicada à citricultura orgânica / Ana Paula Magalhães Borges Battel. - - Piracicaba, 2011.
84 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Calda sulfocálcica 2. Citricultura 3. Insetos predadores 4. Manejo integrado
5. Modelos matemáticos 6. Neuroptera 7. Pulgão I. Título

CDD 634.3
B335d

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que tornaram possível a minha existência neste mundo, para que assim, eu possa contribuir de alguma maneira, mesmo sendo pequena, porém ainda significativa. Afinal, “O todo sem a parte não é todo”.

Aos meus pais, avós, tios, tias, primos, primas, amigos: aos que ainda virão, àqueles que ainda estão entre nós e aos que infelizmente já não fazem mais parte de nossas vidas, porém sempre estarão presentes em nossos corações e em nossas ternas lembranças.

À minha família, pois me deram forças para seguir em frente e não desistir dos meus sonhos. Deixo aqui minha dedicatória e os meus sinceros agradecimentos a todos os familiares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me ajudar a chegar aonde cheguei.

Aos meus amigos Cris (Miss), Camila goiana, Juliana Neves, Rafael (Imoral), Bruno Malaquias, Michelle Santos, Carol (Farol), pelo carinho e atenção de vocês tanto nos momentos difíceis, quanto nos momentos de diversão e por me auxiliarem no desenvolvimento deste trabalho, seja nas horas de desabafo ou mesmo ajudando para que este trabalho se tornasse possível. Agradeço a sincera amizade de vocês, levarei por toda vida.

Ao William Gabriel pela amizade, companheirismo, pelas palavras de carinho e consolo nas horas difíceis, pelos momentos de descontração e também pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de Jaboticabal pela amizade que perdura além da época de graduação: Jessica (Manah), Andrezza (Tarta), Maria Laura (ML) Lucas (Abandonado), Mari (Gringa), Mari (D-vassa), Emeline (Patcheka), Fernanda (Foka), Rodolfo (Xambs), Francisco Sosa.

Agradeço às empresas Citrograf, e Horticitrus por acreditar neste trabalho contribuindo para que este fosse realizado.

À ESALQ e ao programa de pós-graduação em Entomologia.

À FAPESP, pelo apoio concedido para que essa pesquisa fosse realizada.

Ao Dr. Carlos Roberto Sousa Silva e ao meu amigo Dr. Francisco Sosa Duque pela identificação dos insetos utilizados neste trabalho.

Agradeço também aos colegas de pós graduação seja pelo apoio, atenção ou mesmo pelos bons momentos de descontração durante estes 2 anos de mestrado: Alexandre Diniz, Alex Poltronieri, Juliana Brito, Cherry, Leandro (Mossoró), Lorena Nunes, Talita Silveira, Lucila, Guilherme Vasconcelos, Élisson Fabricio, Marina Camargo, Paula Perre, Rízia Andrade, Aline Guidolin, Juliano Faria, Aline Bertin, Jaci, Amanda e aos colegas do laboratório Elisângela, Alexandre, Victor.

Sou grata a Alejandra e ao Jhonatan pela claboração neste trabalho.

Agradeço ao Prof. João Lopes e Pedro Yamamoto pela atenção dada durante a realização deste trabalho.

Ao Wesley Godoy pela amizade e por me dar suporte no desenvolvimento da pesquisa. Agradeço pelo conhecimento adquirido durante esses dois anos.

Agradeço ao Prof. Celso Omoto pelas idéias sugeridas no momento da elaboração do projeto inicial e também pela revisão criteriosa do texto antes da submissão do projeto.

Sou profundamente grata ao Rafael Moral por se dispor a trabalhar conosco na modelagem estatística e matemática deste estudo.

Aos integrantes da banca examinadora, agradeço pela atenção e por se disponibilizarem a avaliar este trabalho.

EPÍGRAFE

*"O que for teu desejo, assim será tua vontade.
O que for tua vontade, assim serão teus atos.
O que forem teus atos, assim será teu destino."*

Deepak Chopra

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
Referências.....	18
2 TESTES PARA ESTIMATIVA DOS EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO DE CALDA SULFOCÁLCICA SOBRE O CRESCIMENTO POPULACIONAL DE <i>Toxoptera citricida</i> E <i>Chrysoperla externa</i>	23
Resumo.....	23
Abstract.....	23
2.1 Introdução.....	24
2.2 Desenvolvimento.....	25
2.2.1 Material e Métodos.....	25
2.2.1.1 Obtenção e manutenção de populações de <i>Toxoptera citricida</i>	25
2.2.1.2 Obtenção e manutenção de populações de <i>Chrysoperla externa</i>	25
2.2.1.3 Testes para estimativa dos efeitos de concentração da calda sulfocálcica sobre o crescimento populacional de <i>Toxoptera citricida</i> e <i>Chrysoperla externa</i>	26
2.2.1.4 Análise Estatística	28
2.2.2 Resultados e Discussão.....	29
2.3 Conclusões.....	32
Referências.....	32
3 ESTIMATIVA DA PREDACÃO POR <i>Chrysoperla externa</i> SOBRE <i>Toxoptera citricida</i> EM MUDAS PULVERIZADAS COM CALDA SULFOCÁLCICA.....	37
Resumo.....	37
Abstract.....	37
3.1 Introdução.....	37
3.2 Desenvolvimento.....	39
3.2.1 Material e Métodos.....	39
3.2.1.1 Análise Estatística.....	40
3.2.2 Resultados e Discussão.....	41
3.3 Conclusões.....	43

Referências.....	43
4 RESPOSTA FUNCIONAL DE <i>Chrysoperla externa</i> SOBRE <i>Toxoptera citricida</i>	47
Resumo.....	47
Abstract.....	47
4.1 Introdução.....	47
4.2 Desenvolvimento.....	48
4.2.1 Material e Métodos.....	48
4.2.1.1 Estimativa de resposta funcional.....	49
4.2.1.2 Ajuste do modelo de resposta funcional.....	51
4.2.2 Resultados e Discussão... ..	52
4.3 Conclusões.....	56
Referências.....	57
5 MODELOS MATEMÁTICOS PREDADOR-PRESA E APLICAÇÕES AO MANEJO INTEGRADO DE PRAGAS: REVISANDO A TEORIA E INCORPORANDO ESTRATÉGIAS DE CONTROLE.....	61
Resumo.....	61
Abstract.....	61
5.1 Introdução.....	62
5.2 Desenvolvimento.....	65
5.2.1 Material e Métodos.....	65
5.2.2 Resultados e Discussão.....	69
5.3 Conclusões.....	82
Referências.....	83

RESUMO

Dinâmica de predação e resposta funcional em *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae) sobre *Toxoptera citricida* (Hemiptera: Aphididae) aplicada à citricultura orgânica

A citricultura orgânica Brasileira tem se destacado no mercado internacional no tocante às exportações de suco e concentrado de laranja, polpa peletizada para alimentação animal e óleos para indústria química e farmacêutica. A calda sulfocálcica vem sendo empregada como produto alternativo para a agricultura orgânica em razão da sua baixa toxicidade se comparada aos inseticidas sintéticos frequentemente usados na agricultura convencional. O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de *C. externa* como predadora de *T. citricida* em citros tratado com calda sulfocálcica em diferentes concentrações. Especificamente, foi investigada a dinâmica de predação de *C. externa* sobre *T. citricida* considerando a inclusão de predadores e presas em citros tratados com calda sulfocálcica. A resposta funcional de *C. externa* sobre *T. citricida* também foi analisada com base na teoria ecológica e aplicação de funções não-lineares. A proposta de um modelo matemático para descrever a ação da calda sulfocálcica sobre o sistema trófico foi também incluída no estudo. Dos resultados encontrados pode-se concluir que a concentração de enxofre em 6000 µg/mL pode ser prejudicial ao desenvolvimento do crisopídeo, diminuindo significativamente a viabilidade da população. Entretanto, a calda sulfocálcica não altera a capacidade predatória do crisopídeo. No que diz respeito à *T. citricida*, não parece ser atingida pelas formulações da calda sulfocálcica e também não parece ser presa atrativa ao predador. A regressão logística polinomial indicou resposta funcional do tipo II, caracterizada por uma assíntota que exhibe saturação em densidades mais elevadas, tanto para o experimento com a aplicação de calda sulfocálcica quanto para a testemunha. O processo de modelagem resultou em equações em tempo discreto para avaliar o efeito da concentração da calda sulfocálcica sobre a dinâmica predador-presa das espécies envolvidas no estudo. Os resultados obtidos pelas simulações descrevem adequadamente o que foi encontrado nos experimentos, o que sugere boa acurácia dos modelos ao problema investigado. Este tipo de resultado motiva a continuidade dos estudos com foco em modelagem, com vistas ao aperfeiçoamento do modelo.

Palavras-chave: Citros; Manejo integrado; Calda sulfocálcica; Crisopídeo; Pulgão preto; Modelagem matemática

ABSTRACT

Dynamics of predation and functional response in *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae) on *Toxoptera citricida* (Hemiptera: Aphididae) applied to organic citrus

The Brazilian organic citrus has distinguished itself in the international market as regards to exports of concentrated orange juice, pelletized pulp for animal feeding and oils for chemical and pharmaceutical industry. The lime sulphur has been employed as an alternative product for organic agriculture because of its low toxicity, when compared to synthetic insecticides commonly used in conventional agriculture. This study aimed to evaluate the performance of *Chrysoperla externa* on its prey *Toxoptera citricida* in citrus, where lime sulfur was applied in three different concentrations. Specifically, the predation dynamics of *C. externa* on *T. citricida* was investigated considering the inclusion of predators and prey in citrus previously treated with lime sulfur. The functional response of *C. externa* on *T. citricida* was analyzed based on ecological theory relying on the use of non-linear functions. A mathematical model to describe the action of lime sulphur on the trophic system was also proposed. The results suggest that the concentration of sulphur in 6000 µg/mL can be detrimental to the development of green lacewing, significantly reducing the viability of its population. The lime sulphur does not change the predatory ability of the green lacewing. With respect to *T. citricida* does not seem to be attained by lime sulfur and to show enough attractiveness for the predator's larvae development. Polynomial logistic regression indicated type II functional response, which is characterized by an asymptote that exhibits saturation in higher densities for both lime sulphur applied citrus and control citrus. The modeling process resulted in discrete-time equations to evaluate the effect of concentration of lime sulphur on the dynamics of the system. The results obtained by simulations are suitable description for the results experimental found. This suggest a good accuracy of the models to the problem. This kind of result encourage new studies focused on modeling and improvement of the model.

Keywords: Citrus; Integrated management; Lime sulfur; Lacewings; Aphids; Mathematical modeling

1 INTRODUÇÃO

O Brasil lidera o mercado mundial de citros, sendo o maior produtor e exportador de suco concentrado (SANCHES et al., 2008). Contudo, a citricultura brasileira ainda é uma das culturas em que mais se utiliza agroquímicos (TURRA, 2005). A agricultura orgânica surgiu como estratégia alternativa para a melhoria da qualidade de vida do consumidor e vem sendo empregada no Brasil, contudo ainda em baixa escala (TURRA, 2005). Apesar disso, a citricultura orgânica Brasileira já tem recebido a atenção do mercado internacional, destacando o país no tocante às exportações de suco e concentrado de laranja, além de polpa peletizada para alimentação animal e óleos para indústria química e farmacêutica (SILVA et al., 2007). O Estado de São Paulo é um dos mais importantes detentores da produção orgânica brasileira (CAMARGO et al., 2006), sendo que diversos produtores rurais já têm se preocupado com a certificação de produtos orgânicos (Instituto Biodinâmico, <http://www.ibd.com.br>) .

Entretanto, como na agricultura convencional, a citricultura orgânica não está isenta do ataque de pragas, que geralmente encontram condições propícias ao desenvolvimento na planta, causando muitas vezes danos importantes (HOLB et al., 2003; AFONSO et al., 2007). Dentre os produtos alternativos para o controle de pragas considerados com baixa toxicidade para a agricultura orgânica, destaca-se a calda sulfocálcica, já utilizada frequentemente no passado por apresentar ação inseticida, fungicida e acaricida (ABBOTT, 1945). Seu principal ingrediente ativo é o enxofre que atua na inibição da respiração celular (IRAC, 2007). O baixo custo do produto o tornou bastante utilizado em anos passados, porém, com o surgimento dos inseticidas orgânicos sintéticos o consumo do pesticida diminuiu bastante (SMITH, 1983).

A eficiência da calda sulfocálcica tem sido testada em alguns estudos envolvendo diferentes culturas e pragas. Os resultados são positivos no que tange à redução da infestação de pragas, sobretudo considerando a sua baixa toxicidade se comparada aos pesticidas sintéticos convencionais (DANIEL et al., 2001; AFONSO et al., 2007). O nível de toxicidade da calda sulfocálcica também tem sido avaliado em frutas e os resultados indicam a necessidade de se investigar em maior detalhe, aspectos como o custo-benefício do uso do produto em meio aos efeitos fitotóxicos, bem como a sua eficácia (HOLB et al., 2003). Recentemente, Moura et al. (2010) investigaram os efeitos do uso de agrotóxicos sobre um importante predador utilizado em controle biológico de pragas, *Chrysoperla externa* (HAGEN, 1861) em culturas de maçã,

concluindo que o enxofre, principal ingrediente ativo da calda sulfocálcica, é inócuo para a espécie.

Apesar da existência dos estudos acima mencionados, não há trabalhos sistematicamente delineados para investigar os efeitos de produtos como a calda sulfocálcica em pragas e inimigos naturais. Além disso, as investigações realizadas até o momento não analisam os efeitos dos agrotóxicos sobre o desempenho dos inimigos naturais em relação às suas presas ou hospedeiros. Estudos desta natureza poderiam contribuir sobremodo com futuras decisões sobre estratégias de manejo de pragas, incluindo importantes decisões sobre escolha de espécies, densidades populacionais adequadas de inimigos naturais e combinações com formulações de produtos para o manejo integrado.

Dentre as pragas importantes da cultura de citros destaca-se o pulgão-preto-dos-citros, *Toxoptera citricida* (KIRKALDY, 1907), por causar atrofia e encarquilhamento de folhas e brotos, além de veicular o vírus da tristeza dos citros (MICHAUD, 1998; GALLO et al., 2002). O vírus da tristeza dos citros é altamente prejudicial à citricultura, tendo sido relatado por Müller et al. (2002) como causador da morte de 9 em 11 milhões de pés de laranja no Estado de São Paulo entre as décadas de 30 e 40, o que representou significativa perda para a citricultura Paulista na ocasião. Embora o problema da tristeza dos citros tenha sido resolvido com o uso de porta-enxertos resistentes, permanece ainda a preocupação com o inseto por outras razões citadas a seguir.

Toxoptera citricida também pode induzir à formação de fumagina, fungo altamente patogênico para a planta, pela produção do líquido açucarado (GALLO et al., 2002). Além disso, o papel desse afídeo como fonte de alimento para alguns agentes de controle biológico de pragas tem sido fundamental para a manutenção do equilíbrio do Agrossistema citrícola. Soma-se a isso ainda, a importância de estudos desta natureza para a estruturação de modelos de controle aplicáveis na agricultura orgânica, bem como a criação de fundamentos ecológicos para a construção de modelos matemáticos importantes para o manejo de pragas. *Toxoptera citricida* tem ampla distribuição, tendo sido registrado em diversas áreas da África ao Sul do Saara, Sudeste da Ásia, Austrália, Nova Zelândia, Ilhas do Pacífico, além de México, Porto Rico, Trinidad e América do Sul em geral (SOUZA-SILVA; ILHARCO, 1995), razão pela qual também destaca-se em meio ao cenário de pragas importantes para a citricultura.

Chrysoperla externa é um inseto predador amplamente distribuído, ocorrendo desde o Sudeste Norte Americano até a América do Sul (ADAMS, 1983; AGNEW et al., 1981; ADAMS; PENNY, 1985). Sua ampla distribuição potencializa sua utilização como agente de controle biológico em diferentes culturas agrícolas e localidades (FREITAS, 2002). A alta capacidade predatória, bem como a tolerância a diversos inseticidas (BRETTELL, 1982) faz dos crisopídeos importantes agentes para o controle biológico em diversos Agrossistemas, tais como, algodão (NURINDAH; INDRAYANI 1989), citros (BONANI et al., 2009), crisântemo (SCOPES, 1969), berinjela (HASSAN, 1978), beterraba (HASSAN et al., 1985), maçã (HAGLEY, 1989) e melão (MALET et al., 1994).

A dinâmica populacional de *C. externa* já foi investigada em citros para avaliar como os fatores climáticos podem influenciar na regulação da população (SOUZA; CARVALHO, 2002) e em cafeeiros para comparar sistema orgânico com o convencional (SILVA et al., 2006). Em citros, a variação da precipitação, umidade relativa e temperatura influenciaram significativamente a dinâmica de *C. externa*, sugerindo aumento da população em resposta ao decréscimo dos valores em cada fator ambiental (SOUZA; CARVALHO, 2002). O sistema orgânico em cafeeiros também produziu maior número de insetos do que o convencional (SILVA et al., 2006). Os estudos acima produziram importantes informações sobre o Crisopídeo, porém, em nenhum dos casos a dinâmica do predador foi investigada em associação com a dinâmica de presas. A dinâmica predador-presa, quando investigada em sistemas em que o predador não é facultativo, como acontece com *C. externa*, depende essencialmente das presas para que a população de predadores persista durante gerações subseqüentes. Sistemas como este carecem de condições capazes de viabilizar um número mínimo de presas para que o predador possa persistir ao longo de diversas gerações, tornando o sistema auto-sustentável.

Em sistemas agrícolas em que o manejo integrado faz parte da rotina, o uso de inseticidas pode eliminar por completo a presa e conseqüentemente também o predador. Sendo assim, os sistemas caracterizados por este tipo de prática não são suficientemente adequados para investigar a dinâmica e a resposta funcional de populações predadoras em relação às suas presas, devido a ausência de auto-sustentabilidade. Paralelamente, a citricultura brasileira tem sido motivada no que diz respeito a implementação de metodologias capazes de gerar produção condizente com a demanda atual requerida pelo consumidor, ou seja, caracterizada por alimentos saudáveis, como se vê na agricultura orgânica (SILVA et al., 2007).

Ferramentas analíticas tais como, modelos matemáticos e funções estatísticas tem sido empregadas para a investigação da dinâmica de sistemas tróficos (LIMA et al., 2009; JALALI et al., 2010). Modelos matemáticos dão uma descrição concisa e simplificada geralmente de um sistema complexo pela sustentação de premissas básicas do sistema ao qual se pretende modelar (LIMA et al., 2009). Modelos estatísticos buscam por sua vez o ajuste de funções matemáticas aos dados obtidos, de forma a explicar tendências às vezes não claramente observadas por análises descritivas (DAVISON, 2003). Em sistemas biológicos envolvendo mais que uma espécie, sobretudo os que incluem interações tróficas, o uso de modelos para análise de dados, bem como para a produção de simulações computacionais tem papel importante no tocante à análise exploratória dos dados obtidos experimentalmente. No presente estudo a aplicação destes recursos pode servir para compreender melhor que padrões ecológicos podem governar a interação dos fatores que influenciam a dinâmica predador-presa em experimentação aplicada à problemas da agricultura, balizar futuras propostas de experimentos e simular situações críticas para inimigos naturais e de risco para cultivares, sobretudo em sistemas de manejo integrado. Assim, buscou-se nesta oportunidade combinar experimentação com modelagem matemática para analisar a sensibilidade de sistemas interativos no cenário da entomologia agrícola.

Referências

ABBOTT, C.E. The toxic gases of lime-sulfur. **Journal of Economic Entomology**, Lanham, v. 38, p. 618-620, 1945.

ADAMS, P.A. A new subspecies of *Chrysoperla externa* (Hagen) from Cocos Island, Costa Rica (Neuroptera: Chrysopidae). **Bulletin of Southern California Academy Science**, Columbia, v. 82, n. 1, p. 42-45, 1983.

ADAMS, P.A.; PENNY, N.D. Neuroptera of the Amazon basin: Part IIA. Introduction and Chrysopini. **Acta Amazonia**, Manaus, v. 15, p. 413-479, 1985.

AFONSO, A.P.S.; FARIA, J.L.C.; BOTTON, M.; ZANARDI, O.Z. Avaliação da calda sulfocálcica e do óleo mineral no controle da cochonilha-parda *Parthenolecanium persicae* (Hemiptera: Coccidae) na cultura da videira. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 74, n. 3, p. 167-169, 2007.

AGNEW, C.W.; STERLING, W.L.; DEAN, D.A. Notes on the Chrysopidae and Hemerobiidae of eastern Texas with keys for their identification. **The Southwestern Entomologist**, College Station, v. 4, p. 1–20, 1981.

BONANI, J.P.; SOUZA, B.; SANTA-CECÍLIA, L.V.C.; CORREA, L.R.B. Aspectos biológicos de *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) alimentada com *Planococcus citri* (Risso, 1813) (Hemiptera: Pseudococcidae) E *Toxoptera Citricida* (Kirkaldy, 1907) (Hemiptera: Aphididae). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 31-38, 2009.

BRETTELL, J.H. Green lacewings (Neuroptera, Chrysopidae) of cotton fields in central Zimbabwe .3. Toxicity of certain acaricides, aphicides and pyrethroids to larvae of *Chrysopa-boninensis* Okamoto, *Chrysopa-congrua* Walker and *Chrysopa-pudica* Navas. **Zimbabwe Journal of Agricultural Research**, Mount Pleasant Harare, v. 22, p. 133-139, 1982.

CAMARGO, A.M.M.P.; CASER, D.V.; CAMARGO FILHO, W.P.; CAMARGO, F.P.; COELHO, P.J. Área cultivada com agricultura orgânica no Estado de São Paulo, 2004. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 33-62, 2006.

DANIEL, C.; HAESELI, A.; WEIBEL, F. **The side effects of lime sulphur on predaceous arthropods, i.e. Typhlodromus pyri, and other leaf occupying arthropods.** Disponível em: <www.fibl.net/archiv/pdf/daniel-et-al-2001-lime-sulphur.pdf, 2001>. Acesso em: 05 fev. 2010.

DAVIDSON, A.C. **Statistical models**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 803 p.

FREITAS, S. O uso de Crisopídeos no controle biológico de pragas. In: PARRA, J.R.P.; BOTELHO, P.S.M.; CORRÊA-FERREIRA, B.S.; BENTO, J.M.S. (Ed.). **Controle Biológico no Brasil: parasitóides e predadores**. Barueri: Manole, 2002. p. 209-219.

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

HAGLEY, A.C.E. Release of *Chrysoperla carnea* Stephens (Neuroptera: Chrysopidae) for control of the green apple aphid, *Aphis pomi* Degeer (Homoptera: Aphididae). **Canadian Entomologist**, Ottawa, v. 121, p. 309-314, 1989.

HASSAN, S.A. Release of *Chrysoperla carnea* (Stephens) to control *Myzus persicae* (Sulzer) on egg plant in small greenhouse plot. **Journal of Plant Diseases and Protection**, Lysolaje, v. 8, n. 2, p. 118-123, 1978.

HASSAN, J.A.; KLINGAUF, F.; SHALIN, F. Role of *Chrysopa carnea* and aphid predator on sugar beet and the effect of pesticides. **Zeitschrift fur Angewandte Entomologie**, Hamburg, v. 100, p. 163-174, 1985.

HOLB, I.J.; JONG, P.F.; HEIJANE, B. Efficacy and phytotoxicity of lime sulphur in organic apple production. **Annals of Applied Biology**, Warwick, v. 142, p. 225-233, 2003.

INSECTICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE. **The Irac classification: an interactive mode of action (MoA) tool, 2007**. Disponível em: <<http://www.irac-online.org/eclasification/>>. Acesso em: 22 jan. 2007.

JALALI, M.A.; TITTY, L.; De CLERCQ, L. Effect of temperature on the functional response of a *Lalia bipunctata* to *myzus persicae*. **Biocontrol**, Dordrecht, v. 55, n. 2, p. 261-269, 2010.

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

MALET, J.C.; NOYER, C.; MAISONNEUVE, J.C.; CANARD, M. *Chrysoperla lucasina* (Lacroix) (Neur., Chrysopidae), prédateur potentiel du complexe méditerranéen des *Chrysoperla* Steinmann: premier essai de lutte biologique contre *Aphis gossypii* Glover (Hom., Aphididae) sur melon en France méridionale. **Journal of Applied Entomology**, Berlin, v. 118, n. 4/5, p. 429-436, 1994.

MICHAUD, J.P. A review of the literature on the brown citrus aphid, *Toxoptera citricida*, (Kirkaldy). **Florida Entomologist**, Lutz, v. 81, p. 37-61, 1998.

MOURA, A.P.; CARVALHO, G.A.; LASMAR, O.; MOSCARDINI, V.F.; REZENDE, D.T. Efeitos da aplicação de agrotóxicos utilizados na produção integrada de maçã sobre pupas de *Chrysoperla externa*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 8, p. 2285-2292, 2010.

MULLER, G.W.; NEGRI, J.D.; AGUILAR-VILDOSO, C.I.; MATTOS JUNIOR, D.; POMPEU JUNIOR, J.; TEOFILO SOBRINHO, J.; CARVALHO, S.A.; GIROTTO, L.F.; MACHADO, M.A. Morte Súbita dos Citros: uma nova doença na citricultura brasileira. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 23, n. 2, p. 371-386, 2002.

NURINDAH, A.A.A.G.; INDRAYANI, I.G.A.A. New records of natural enemies of *Heliothis armigera* on cotton in Indonesia. **Industrial Crops Research Journal**, Amsterdam, v. 2 n. 1, p. 1-5, 1989.

SANCHES, I.D.A.; GURTNER, S.; FORMAGGIO, A.R. Discriminação de variedades de citros em imagens CCD/CBERS-2. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 103-108, 2008.

SECOY, D.M.; SMITH, A.E. Lineage of lime sulfur as an insecticide and fungicide. **Bulletin of Entomological Society of America**, Washington, v. 29, p. 18-23, 1983.

SCOPES, N.E.A. The potential of *Chrysopa carnea* as a biological control agent of *Myzus persicae* on glasshouse chrysanthemums. **Annals of Applied Biology**, Warwick, v. 64, p. 433-489, 1969.

SILVA, D.P.; TRECENTE, V.C.; BOSQUÊ, G.G. Produção de laranja orgânica no Brasil. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, n. 12, 2007. Disponível em: <<http://www.revista.inf.br>>. Acesso em: 17 nov. 2011.

SILVA, R.A.; REIS, P.R.; SOUZA, B.; CARVALHO, C.F.; CARVALHO, G.A.; COSME, L.V. Flutuação populacional de adultos de *Chrysoperla externa* (Hagen 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) em cafeeiros conduzidos em sistemas orgânico e convencional. **Manejo Integrado de Plagas y Agroecología**, Turrialba, v. 77, p. 44-49, 2006.

SOUZA, B.; CARVALHO, C.F. Population dynamics and seasonal occurrence of adults of *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) in a citrus orchard in southern Brazil. **Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae**, Gödöllő, v. 48, p. 301-310, 2002.

SOUZA-SILVA, C.R.; ILHARCO, F.A. **Afídeos do Brasil e suas plantas hospedeiras (lista preliminar)**. São Carlos: Ed. UFSCar, 1995. 85 p.

TURRA, C. **Elementos químicos como critério de discriminação de citros orgânicos de convencionais**. 2005. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2008.

2 ESTIMATIVA DOS EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO DE CALDA SULFOCÁLCICA SOBRE O CRESCIMENTO POPULACIONAL DE *Toxoptera citricida* E *Chrysoperla externa*

Resumo

Estudos sobre o efeito de produtos utilizados no controle de pragas sobre os inimigos naturais são importantes para tomada de decisão em programas de controle biológico e manejo integrado de pragas. Há estudos sobre seletividade de inseticidas, mas são escassos os trabalhos avaliando a ação de calda sulfocálcica sobre as populações de inimigos naturais de pragas do citros. O objetivo deste estudo foi investigar os efeitos da calda sulfocálcica sobre as populações de *Chrysoperla externa* e de *Toxoptera citricida* isoladas, e também estabelecer a melhor concentração de calda a ser utilizada nos experimentos subsequentes. Foram testadas as concentrações de 60, 600 e 6.000 µg de enxofre/mL. Quarenta e oito mudas foram avaliadas, das quais 24 receberam 6 crisopídeos cada, e as outras 24 receberam 15 pulgões. Metade das mudas de cada grupo de inseto foi pulverizada com calda sulfocálcica e a outra metade das mudas constituiu o grupo controle. Houve interferência da calda sobre as populações de crisopídeos, no entanto, somente a concentração de 6.000 µg de enxofre/mL foi significativamente prejudicial à espécie. Para pulgões, não houve influência significativa da aplicação da calda na maioria dos dias com relação à mortalidade, embora em 2 dias se tenha registrado algum dano à população.

Palavras-chave: Crisopídeo; Pulgão preto; Seletividade; Inimigo natural; Citros; Citricultura; Enxofre

Abstract

Studies focusing on the effect of pest control products on natural enemies are important for biological control or integrated pest management decisions. There are studies focused on insecticide selectivity but investigations evaluating lime sulfur action on populations of natural enemies of citrus pests are scarce. The objective of this study was to investigate the effects of the lime sulfur on isolated populations of *Chrysoperla externa* and *Toxoptera citricida* and also establish the best sulfur concentration to be used in the subsequent experiments. The concentrations of 60, 600 and 6.000 µg of sulfur/mL were investigated. Forty-eight plants were evaluated with 24 receiving 6 lacewings each one and, the other 24 received 15 aphids. Half of the plants with each type of insect was sprayed with lime sulfur and the other part was considered the control group. Some influence of lime sulfur was observed on lacewings, but only the concentration of 6.000 µg was significantly harmful to species. In aphids no significant influence of lime sulfur was observed, except in two days of the month.

Keywords: Green lacewing; Brown aphid; Selectivity; Natural enemy; Citrus; Citriculture; Sulfur

2.1 Introdução

A agricultura orgânica baseia-se no uso de recursos naturais para produzir alimentos de qualidade e de baixo impacto ambiental. Embora a produção orgânica tenha impacto no mercado externo, a produção nacional ainda é baixa, e a agricultura convencional é predominante no país. A intensa utilização de agrotóxicos e a predominância de monoculturas no país são responsáveis pelos danos causados para a saúde e para o ambiente (CALVERT et al., 2001; BHANTI; TANEJA, 2007; BERRADA et al., 2010).

Um dos grandes problemas da utilização de agrotóxicos é o impacto causado na população de inimigos naturais. No caso da agricultura convencional alguns produtos utilizados no controle de pragas são seletivos à *C. externa* e outros prejudiciais para a espécie (BUENO; FREITAS, 2001; GODOY et al., 2004a, 2004b, 2010; YAMAMOTO; BASSANEZI, 2003). Na citricultura orgânica um dos poucos produtos aceitos para utilização no controle de pragas é a calda sulfocálcica, utilizada geralmente por pequenos produtores. Formulada inicialmente por Griso em 1852, apresenta na sua composição sulfetos e polissulfetos de cálcio misturados ao enxofre.

Entre 1852 e 1950 foi o período de maior utilização da calda, porém, com o surgimento dos agrotóxicos sintéticos, a calda perdeu sua posição de destaque (SECOY; SMITH, 1983) apesar de ainda ser utilizada por sua ação fungicida, inseticida e acaricida, além de constituir alternativa de baixo custo ao produtor. A única informação disponível sobre a ação do enxofre, principal ingrediente ativo da calda, é sua atuação como inibidor da respiração celular (IRAC, 2009). São poucos os estudos que testam o efeito do enxofre sobre as populações de predadores como o crisopídeo (MOURA et al., 2010) e pragas como o pulgão (ZACHÉ et al., 2010). Os trabalhos existentes tem mais frequentemente mostrado a ação do produto sobre populações de ácaros praga e ácaros predadores (BEERS et al., 2009; SILVA et al., 2009; CASARIN, 2010; ANDRADE et al., 2011).

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de diferentes concentrações da calda sulfocálcica sobre as populações de *Toxoptera citricida* (pulgão preto) e *Chrysoperla externa* em mudas de citros. Além disso, o estudo visou dar subsídios para a escolha da concentração que garantisse a sustentabilidade do sistema para realização dos outros experimentos e da modelagem matemática.

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Materiais e Métodos

2.2.1.1 Obtenção e manutenção de populações de *Toxoptera citricida*

Os experimentos delineados para determinar a concentração de calda sulfocálcica foram realizados com mudas de murta (*Murraya paniculata*), em virtude da contaminação ocorrida em mudas de citros com o ácaro mexicano *Tetranychus mexicanus*. Amostras das populações de *T. citricida* foram enviadas ao Dr. Carlos Roberto Sousa e Silva da Depto. de Ecologia e Biologia Evolutiva/UFSCar para a identificação. Assim, os pulgões foram criados nestas mudas, que constituem eficientes plantas hospedeiras da família Rutaceae. As plantas foram mantidas em estufa agrícola externa, em área anexa ao laboratório de Ecologia e Entomologia Florestal do Departamento de Entomologia e Acarologia.

As mudas foram acondicionadas em recipientes de PVC fechados para proteção dos insetos contra outras pragas (Figura 1) e mantidas em sala com temperatura, fotoperíodo e umidade controlados ($22 \pm 2^\circ \text{C}$; 12h; $70\% \pm 10$ respectivamente). Galhos infestados com o pulgão preto foram obtidos em pomares de citros localizados na área experimental da ESALQ-USP além de área de citros no município de Mogi Mirim nas coordenadas $22^\circ 21' 36.65'' \text{S}$ / $47^\circ 04' 08.97'' \text{O}$ e da Fazenda Areião – Estação experimental da USP / ESALQ localizada em Piracicaba. Os galhos coletados foram distribuídos de maneira uniforme em cada uma das plantas, mantidas no recipiente de PVC para a criação do inseto. Após 20 dias as populações foram utilizadas para experimento.

2.2.1.2 Obtenção e manutenção de populações de *Chrysoperla externa*

Os crisopídeos foram coletados com rede entomológica em gramíneas próximas a área experimental do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ-USP. Os insetos foram sexados e colocados em gaiola de PVC com 10 cm de diâmetro e 23 cm de comprimento (BONANI et al., 2009) (Figura 2). As gaiolas foram colocadas em prateleiras em estufa encubadora tipo B.O.D. e as populações de insetos mantidas à $25 \pm 2^\circ \text{C}$, $60 \pm 10\%$ (UR), 12h (fotoperíodo). A dieta dos adultos foi constituída por levedo de cerveja e mel na proporção de 1:1 e a metodologia utilizada para criação foi a sugerida por Freitas, 2002. Os ovos foram retirados com um raspador,

individualizados em frascos de vidro de 4 cm de altura por 1 cm de diâmetro e vedados com plástico filme. As larvas foram alimentadas com ovos de *Anagasta kuehniella* (Zeller, 1879) (Lepdoptera: Pyralidae) provenientes da criação do Laboratório de Biologia de Insetos do Departamento de Entomologia e Acarologia da ESALQ-USP. Para os experimentos foram utilizadas populações de crisopídeo da geração F2.

Figura 1 - Recipiente para a criação de pulgões

Figura 2 - Recipiente para a criação de crisopídeos

2.2.1.3 Testes para estimativa dos efeitos da concentração de calda sulfocálcica sobre o crescimento populacional de *T. citricida* e *C. externa*

Testes para a escolha da concentração que garantisse a sustentabilidade mínima necessária ao sistema trófico foram realizados, a princípio testando os limites de viabilidade e letalidade, tendo como valores iniciais as concentrações 60, 600 e 6.000 ug de enxofre/mL de água destilada (I.A. (ppm)), com base na concentração média recomendada pelo fabricante na cultura de citros (www.fertibom.com.br). Assim, bioensaios foram delineados para testar o efeito da calda sulfocálcica sobre o crescimento populacional de *T. citricida* e *C. externa*.

Este experimento foi realizado em ambiente com temperatura, umidade e fotoperíodo controlados ($22 \pm 2^\circ \text{C}$; 12h; $60\% \pm 10$, respectivamente). Foram utilizadas 48 mudas de murta (*Murraya paniculata*). Após a transferência de pulgões, as plantas, foram pulverizadas manualmente, uma a uma, com o auxílio de um borrifador até o ponto de escoamento e imediatamente os crisopídeos foram transferidos para a planta e isolados do meio externo com o

auxílio de um copo de plástico (Figura 3). Dez mudas foram aleatoriamente separadas para cada uma das concentrações acima especificadas e pulverizadas.

Todas as 24 plantas continham 6 larvas de crisopídeos recém eclodidas e isoladas em cada planta (Figura 4). Doze plantas receberam água destilada borrifada e na outra metade foi aplicada calda sulfocálcica. Como alimento, foi fornecido aos crisopídeos ovos de *Anagasta kueiella* (comumente utilizado na criação de crisopídeo) pois este experimento visou apenas estudar o efeito da calda sobre as populações isoladas de crisopídeos e pulgões. O mesmo procedimento foi adotado para os pulgões. Todas as 24 plantas receberam 15 pulgões (Figura 3). Metade das plantas receberam pulverização com calda sulfocálcica e a outra metade recebeu apenas pulverização com água destilada. Para a avaliação do efeito da calda sulfocálcica observou-se a mortalidade da população de pulgão durante 10 dias e o número de crisopídeos que chegaram ao estágio adulto, bem como a duração e viabilidade das fases larvais e pupal. O delineamento do experimento foi inteiramente casualizado.

Figura 3 - Copo plástico isolando insetos

Figura 4 - Experimento com larvas de crisopídeo

2.2.1.4 Análise Estatística

Dados de proporções, em geral, são analisados usando um modelo de regressão binomial que é denominado modelo linear generalizado (NELDER; WEDDERBURN, 1972). Supondo que o número de crisopídeos mortos Y_i , de um total de m_i crisopídeos avaliados, $i = 1, 2, \dots, n$, são variáveis aleatórias, o modelo binomial padrão assumiria que $Y_i \sim \text{Bin}(m_i, \pi_i)$, de forma que π_i é a probabilidade de um crisopídeo morrer, com média $\mu_i = E(Y_i) = m_i \pi_i$ e variância $\text{Var}(Y_i) = m_i \pi_i (1 - \pi_i)$. O modelo linear generalizado apresenta as proporções esperadas π_i em termos de variáveis explanatórias x_i (efeitos de tratamentos e covariáveis) através de $g(\pi_i) = x_i' \beta$, de forma que g é uma função de ligação adequada e β é o vetor de parâmetros. A função de ligação mais comum é a logit, isto é, $g(\pi_i) = \ln[\pi_i / (1 - \pi_i)]$, mas outras escolhas comuns são o probito e o complemento log-log.

Já dados de contagens, em geral, são analisados ajustando-se um modelo de regressão Poisson, que também é um modelo linear generalizado (NELDER; WEDDERBURN, 1972). Para um modelo bem ajustado, espera-se que a *deviance* residual (uma medida do ajuste do modelo) seja aproximadamente igual ao número de graus de liberdade do resíduo. Quando isso não acontece, uma explicação é que a variação pode, simplesmente, ser maior que a esperada pelo modelo e este fenômeno é descrito como superdispersão (HINDE; DEMÉTRIO, 1998a, 1998b).

Uma maneira de modelar a superdispersão de dados de proporções é mudar a função de variância do modelo original por uma forma mais geral dada por $\text{Var}(Y_i) = \phi m_i \pi_i (1 - \pi_i)$ e usar um método de quase-verossimilhança para estimar β e o parâmetro adicional ϕ (chamado fator de heterogeneidade), sendo o modelo chamado quasibinomial. No caso de dados de contagens, pode-se mudar a função de variância do modelo original por uma forma mais geral dada por $\text{Var}(Y_i) = \phi \mu_i$ em que ϕ é conhecido como parâmetro de superdispersão. Sendo assim, usa-se um método de quase-verossimilhança para estimar os parâmetros do modelo, chamado de quasi-Poisson.

2.2.2 Resultados e discussão

A diferença entre as concentrações de 60µg/mL (93,1%) e 6000µg/mL (76,5%) foi significativa para a viabilidade do segundo ínstar do crisopídeo, sendo maior a mortalidade de indivíduos na concentração mais alta. Já para o terceiro instar, as três concentrações testadas diferiram apenas do controle e não diferiram entre si (Tabela 1). Com relação à sobrevivência geral, registrada do primeiro instar até a emergência, foi bem menor na concentração de 6000µg/mL (27%). Apesar dos resultados aqui encontrados indicarem diferentes influências da calda sulfocálcica sobre o crisopídeo, sobretudo se forem consideradas as diferentes fases do ciclo biológico, recentes pesquisas sugerem o enxofre como pouco danoso para *C. externa* (MOURA et al., 2010), e espécies de joaninhas que ocorrem em citros, no entanto, mostra-se prejudicial para ácaros predadores (ANDRADE et al., 2011). Embora neste estudo as outras concentrações tenham se mostrado inócuas para o crisopídeo, corroborando os trabalhos de Moura et al. (2010) e Vilela et al. (2010), a concentração de 6000µg/mL de enxofre resultou em baixa sobrevivência para o inseto ao longo do desenvolvimento, levando a população de crisopídeos à uma significativa redução (Tabela 1). O principal ingrediente ativo da Calda Sulfocálcica é o enxofre que atua como inibidor da respiração celular (IRAC, 2009) e neste caso pode ter afetado o crisopídeo ao longo do desenvolvimento quando usada a maior concentração.

Com relação à influência da calda sobre a duração de cada uma das fases do crisopídeo houve diferença significativa apenas na duração do terceiro instar o qual foi menor na concentração de 6000 µg/mL (Tabela 2). Contudo, o efeito da calda sobre os crisopídeos parece ter afetado ligeiramente o desenvolvimento, pois a média de duração do terceiro instar foi de 2,5, enquanto que nas demais concentrações e controle a média variou entre 3,1 e 3,9 dias de duração. Com exceção da concentração de 6000 µ g/mL as outras 3 seguem o padrão esperado quando larvas são alimentadas com *Anagasta kuehniella*. No entanto, a viabilidade do período larva-adulto para estas mesmas concentrações mostrou-se superior aos encontrados por Bonani et al. (2009).

Tabela 1 - Efeito das concentrações de enxofre sobre a sobrevivência dos crisopídeos em cada instar larval até emergência ⁽¹⁾

Concentrações (µg I.A./ml)	Viabilidade da fase larval			Viabilidade da fase pupal	Viabilidade do período larva-adulto
	1° instar	2° instar	3° instar		
Controle	96% a	100% a	100% a	55,6% a	76,9% a
60 µg/mL	90,3% a	93,1% b	82,1% a	44,4% a	66,7% ab
600 µg/mL	73,1% a	100% a	94,7% a	61,1% a	69,2 a
6000 µg/mL	70,4 % a	73,5% c	81,8% a	75% a	27,3% b

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente a 5% de probabilidade.

Produtos químicos podem exercer diferentes impactos sobre os insetos quando em diferentes concentrações e dessa forma agir com diferentes níveis de dano as populações (CARVALHO et al., 2002, 2003). Isso pode incluir problemas relacionados à resistência de pragas ao enxofre, como já observado em ácaros (PATTARO; OLIVEIRA, 2005; CASARIN, 2010). A variação na susceptibilidade a pesticidas em insetos usados em programas de controle biológico tem sido observada através de experimentação incluindo a obtenção de parâmetros de tabela de vida (STARK et al., 2004). Assim, parece não ser rara a ação de pesticidas no formato observado no presente estudo.

A análise do efeito das concentrações sobre a sobrevivência do pulgão, não revelou diferença significativa entre os tratamentos. A tendência geral foi a diminuição da população em todos os tratamentos. Dos resultados obtidos, embora a morte de indivíduos seja maior com a calda na maioria dos dias, houve diferença significativa somente nos dias 2 e 10 (Fig. 5). Poucos relatos têm sido publicados sobre tolerância e susceptibilidade de produtos considerados adequados à agricultura orgânica em *T. citricida* (MAXWELL; PAINTER, 1962; DA PONTE; RIBEIRO, 1998). Especificamente com respeito à aplicação de calda sulfocálcica, não há registros de publicações com este enfoque, apesar de patentes já registradas (H MIYAZAKI - US PATENT APP. 20,100/160,430, 2008).

*Barras com asterisco denotam diferença significativa a 5%.

Figura 5 - Variação no número de pulgões mortos com e sem o efeito da calda sulfocálcica ao longo dos dias

Tabela 2 - Efeito das concentrações de enxofre sobre a duração de cada instar e pupal⁽¹⁾

Concentrações (μg I.A./ml)	Duração do 1° instar (dias)	Duração do 2° instar (dias)	Duração do 3° instar (dias)	Duração pupal (dias)
Controle	3,253 a	2,727 a	3,500 a	9,850 a
60 $\mu\text{g/mL}$	3,392 a	2,828 a	3,861 a	10,111 a
600 $\mu\text{g/mL}$	3,867 a	2,800 a	3,100 ab	10,000 a
6000 $\mu\text{g/mL}$	3,817 a	2,500 a	2,500 b	10,000 a

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente.

2.3 Conclusão

A concentração de enxofre em 6000 µg/mL pode ser prejudicial ao desenvolvimento do crisopídeo, diminuindo pela metade a viabilidade da população. Para a população de pulgões, entretanto, a calda não parece exercer influência nas concentrações examinadas neste estudo.

Referências

ANDRADE, D.J.; OLIVEIRA, C.A.L.; PATTARO, F.C.; SIQUEIRA, D.S. Acaricidas utilizados na citricultura convencional e orgânica: manejo da leprose e populações de ácaros fitoseídeos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 32, n. 4, p. 1028-1037, dez. 2010.

BEERA, E.H.; MARTINEZ-ROCHA, L.; TALLEY, R.R.; DUNLEY, J.E. Lethal, sublethal, and behavioral effects of sulfur containing products in bioassays of three species of orchard mites. **Journal of Economic Entomology**, Lanham, v. 102, n. 1, p. 324-335, 2009.

BERRADA, H.; FERNANDÉZ, M.; RUIZ, M.J.; MOLTÓ, J.C.; MAÑES, J.; FONT, G. Surveillance of pesticide residues in fruits from Valencia during twenty months. **Food Control**, Guildford, v. 21, p. 36-44, 2010.

BHANTI, M.; TANEJA, A. Contamination of vegetables of different seasons with organophosphorous pesticides and related health risk assessment in northern India. **Chemosphere**, Oxford, v. 69, p. 63–68, 2007.

BONANI, J.P.; SOUZA, B.; SANTA-CECÍLIA, L.V.C.; CORREA, L.R.B. Aspectos biológicos de *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) alimentada com *Planococcus citri* (Risso, 1813) (Hemiptera: Pseudococcidae) e *Toxoptera Citricida* (Kirkaldy, 1907) (Hemiptera: Aphididae). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 31-38, jan./fev. 2009.

BUENO, A.F.; SERGIO, F. Efeito do Hexythiazox e Imidacloprid sobre ovos larvas e adultos de *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae). **Revista Ecosystema**, Espírito Santo do Pinhal, v. 26, n. 1, p. 74-76, jan./jul. 2001.

CALVERT, G.M.; BARNETT, M.; BLONDELL, J.M.; MEHLER, L.N. Surveillance of pesticide-related illness and injury in humans. In: KRIEGER, R. (Ed.). **Handbook of pesticide toxicology**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2001. v. 1, p. 603-641.

CARVALHO, G.A.; BEZERRA, D.; SOUZA, B.; CARVALHO, C.F. Efeitos de inseticidas usados na cultura do algodoeiro sobre *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 32, n. 4, p. 699-706, 2003.

CARVALHO, G.A.; CARVALHO, C.F.; SOUZA, B.; ULHÔA, J.L.R. Seletividade de inseticidas a *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 615-621, 2002.

CASARIN, N.F.B. **Calda sulfocálcica em pomares de citros: evolução da resistência em *Brevipalpus phoenicis* (Acari: Tenuipalpidae) e impacto sobre *Iphiseiodes zuluagai* (Acari: Phytoseiidae)**. 2010. 39 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

DA PONTE, J.J.; RIBEIRO, H. Efficiency of cassava root extract in the controlo of *Toxoptera citricidus*, the citrus black aphid. **Fitossanidade**, Fortaleza, v. 2, p. 3-5, 1998.

GODOY, M.S.; CARVALHO, G.A.; CARVALHO, B.F.; LASMAR, O. Seletividade fisiológica de inseticidas em duas espécies de crisopídeos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 11, p. 1253-1258, nov. 2010.

GODOY, M.S.; CARVALHO, G.A.; MORAES, J.C.; GOUSSAIN JUNIOR, M.; MORAIS, A.A.; COSME, L.V. Seletividade de inseticidas utilizados na cultura dos citros para ovos e larvas de *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 639-646, 2004a.

GODOY, M.S.; CARVALHO, G.A.; MORAES, J.C.; COSME, L.V.; GOUSSAIN, M.M.; CARVALHO, C.F.; MORAIS, A.A. Seletividade de seis inseticidas utilizados em citros a pupas e adultos de *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 33, n. 3, p. 359-364, 2004b.

HINDE, J.P.; DEMÉTRIO, C.G.B. Overdispersion: models and estimation. **Computation Statistics and Data Analysis**, Amsterdam, v. 27, n.2, p. 151-170, 1998a.

_____. Overdispersion: models and estimation. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 13., 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Estatística, 1998b. p. 73.

INSECTICIDE RESISTENCE ACTION COMMITTEE. **Avanços na implementação de programas de manejo na resistência de pragas a pesticidas no Brasil.** Disponível em: <<http://www.irac-br.org.br/arquivos/avancosimplprog.doc>>. Acesso em: 13 out. 2011.

MAXWELL, F.G.; PAINTER, H. Auxin Content of Extracts of Certain Tolerant and Susceptible Host Plants of *Toxoptera graminum*, *Macrosiphum pisi*, and *Therioaphis maculata* and Relation to Host Plant Resistance. **Journal of Economic Entomology**, Lanham, v. 55, n. 1, p. 47-56, 1962.

MOURA, A.P.; CARVALHO, G.A.; LASMAR, O.; MOSCARDINI, V.F.; REZENDE, D.T. Efeitos da aplicação de agrotóxicos utilizados na produção integrada de maçã sobre pupas de *Chrysoperla externa*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 8, p. 2285-2292, 2010.

NELDER, J.A.; WEDDERBURN, R.W.M. Generalized linear models. **Journal of the Royal Statistical Society**, Series A, Oxford, v. 135, p. 370-384, 1972

PATTARO, F.C.; OLIVEIRA, C.A.L. de. Calda sulfocálcica: aplicações e implicações. **Campo e Negócios**, Uberlândia, v. 3, n. 28, p. 58-61, 2005.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>> Acesso em: 02 nov. 2011.

SECOY, D.M.; SMITH, A.E. Lineage of lime sulfur as an insecticide and fungicide. **Bulletin of Entomological Society of America**, Washington, v. 29, p. 18-23, 1983.

SILVA, M.Z.; OLIVEIRA, C.A.L. de; SATO, M.E. Seletividade de produtos fitossanitários sobre o ácaro predador *Agistemus brasiliensis* Matioli, Ueckermann & Oliveira (Acari: Stigmaeidae). **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 388-396, 2009.

STARK, J.D.; BANKS, J.E.; ACHEAMPONG, S. Estimating susceptibility of biological control agents to pesticides: influence of life history strategies and population structure, **Biological Control**, Orlando, v. 29, n. 3, p. 392-398, 2004.

VILELA, M.; CARVALHO, G.A.; VARVALHO, C.F.; BOAS, M.A.V. Ação de acaricidas utilizados em cafeeiro sobre ovos e fases subsequentes do desenvolvimento de crisopídeos. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 1, p. 10-16, jan./abr. 2010.

YAMAMOTO, P.T.; BASSANEZI, R.B. Seletividade de produtos fitossanitários aos inimigos naturais de pragas dos citros. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 24, n. 2, p. 353-382, 2003.

ZACHÉ, R.R.C.; CARVALHO, G.A.; ZACHÉ, B.; CARVALHO, C.F.; PEREIRA, R.R.C. Efeitos de fungicidas sobre os aspectos biológicos de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) em plantas de pepino. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 6, p. 1431-1438, nov./dez. 2010.

3 ESTIMATIVA DA PREDACÃO POR *Chrysoperla externa* SOBRE *Toxoptera citricida* EM MUDAS PULVERIZADAS COM CALDA SULFOCÁLCICA

Resumo

É crescente a procura por métodos alternativos de controle de pragas em busca da diminuição do uso indiscriminado de agroquímicos. A calda sulfocálcica é um produto a base de enxofre e cal para utilização na citricultura orgânica para o controle de pragas. No entanto, não há estudos que mostrem se há algum tipo de interferência do principal ingrediente da calda sulfocálcica, o enxofre, sobre a interação predador-presa. Neste trabalho avaliou-se o efeito da calda sulfocálcica sobre a capacidade predatória do inimigo natural *Chrysoperla externa*, alimentando-se do pulgão preto do citros, *Toxoptera citricida*. O experimento foi conduzido em salas climatizadas com temperatura fotoperíodo e umidade controlados. No total, foram utilizadas 32 plantas em 4 tratamentos com 8 repetições cada. Todas as plantas receberam 15 pulgões, com metade delas tendo 1 larva de 1º instar de crisopídeo. No grupo controle aplicou-se água destilada e nos tratamentos calda sulfocálcica até o ponto de escoamento. Com os resultados obtidos conclui-se que a calda sulfocálcica nas proporções utilizadas não afeta o número de pulgões consumidos pela larva de crisopídeo. Além disso, pulgões não se revelaram presas adequadas para o desenvolvimento das larvas de crisopídeo, já que nenhuma delas chegou ao estágio adulto, mesmo na ausência da calda sulfocálcica.

Palavras-chave: Crisopídeo; Citricultura orgânica; Manejo integrado de pragas; Pulgão preto do citros

Abstract

The search for pest control alternative products which minimize the use of pesticides is increasing. The lime sulfur is a product based on sulfur generally used in organic citrus for pest control. No study showing possible interference of sulfur on predator prey interaction has been performed. In this study, the effect of the lime sulfur on the predation ability of *C. externa* on the aphid *T. citricida* was evaluated. Experiments were conducted under laboratory conditions. Thirty-two plants were used with 4 treatments and 8 repetitions each one. All plants received 15 aphids, with half of them receiving also 1 lacewing first instar larva. The control group received distilled water and the treatments lime sulfur. The concentrations used in this study were not enough to produce significant negative effects on the number of aphids consumed by the lacewings. In addition, aphids did not seem to be suitable prey since none of them reached the adult stage, even in absence of lime sulfur.

Keyword: Green lacewing; Organic citriculture; Integrated pest management; Brown citrus aphid

3.1 Introdução

A cultura de citros é de grande importância para o Brasil por movimentar intensamente o mercado internacional, situando o país como o maior exportador do produto (FAO, 2009) Para

atender ao mercado, os produtores utilizam da tecnologia para aumentar a produção e assim cultivam em grandes extensões de terra. Essa prática agrícola favorece o crescimento populacional de pragas na área. A aplicação de agroquímicos constitui ainda a forma mais comum de controle de pragas, ainda que responsável pelo ônus causado à fauna entomológica, com reflexos sobre a estabilidade do agroecossistema. Além disso, sérios prejuízos econômicos e ecológicos podem ser notados em razão da resistência das pragas aos agroquímicos (CASARIN, 2010), morte de inimigos naturais presentes na área, poluição do solo, da água, e os possíveis problemas relacionados a saúde humana (CALVERT et al., 2001; BHANTI; TANEJA, 2007; BERRADA et al., 2010).

A busca pela agricultura sustentável e produção de alimentos isenta de agroquímicos resultou na idéia central da agricultura orgânica. No caso da citricultura orgânica, a produtividade no Brasil ainda é baixa, no entanto, aos poucos vem ganhando espaço no mercado e recebendo adesão de produtores. É no estado de São Paulo onde se concentra a produção orgânica nacional representando 0,14% da área cultivada no estado (CAMARGO et al., 2006).

Na citricultura orgânica a fiscalização sobre utilização de produtos para o controle de pragas é rigorosa, levando à utilização de produtos de controle que privilegiem a combinação entre o equilíbrio ecológico e a produção. No entanto, assim como na citricultura convencional, sua prática não está isenta de pragas como cochonilhas, pulgões, cigarrinhas, moscas brancas, psilídeos, lagarta minadora, ácaros e bicho furão. Muitas dessas pragas apresentam-se como vetores de importantes doenças como tristeza do citros, clorose variegada do citros, greening, leprose, etc. A utilização de inimigos naturais para controle de pragas do citros, aliada a outros métodos de controle deve ser incentivada para que haja diminuição do uso indiscriminado de agroquímicos, que muitas vezes tem se mostrado prejudicial para os inimigos naturais presentes no citros (YAMAMOTO; BASSANEZI, 2003) e problemático devido à resistência das pragas aos agroquímicos (FRANCO et al., 2007).

Crisopídeos, joaninhas, parasitóides, tesourinhas e aranhas, são importantes inimigos naturais encontrados em culturas de citros por predarem as pragas anteriormente mencionadas, auxiliando o controle. Dentre eles, os crisopídeos destacam-se por estarem presentes em vários agroecossistemas como predadores generalistas na fase larval e por também se alimentarem de ampla diversidade de pragas tais como: psilídeos, pulgões, tripes, cochonilhas, ovos e larvas neonatas de Lepidópteros, pequenos Heteropteros, ácaros, moscas brancas, moscas negras

(FREITAS; FERNANDES, 1996; AUAD et al., 2005; LUNA et al., 2006; BONANI et al., 2009). A potencialidade do uso de crisopídeos em programas de controle biológico é essencialmente devido à facilidade de criação em laboratório (FREITAS, 2001). Dentre as espécies encontradas em citros, *Cereachrysa everes* e *Chrysoperla externa* destacam-se como as mais abundantes (SCOMPARI, 1995; SOUZA; CARVALHO, 2002). Contudo, a distribuição de *C. externa* é mais ampla que a de *C. everes*, sendo encontrada também em outros países (MUMA, 1959). *Chrysoperla externa* é a mais utilizada em estudos de controle biológico de pragas por apresentarem larga distribuição geográfica indo desde o sul dos EUA até a Argentina (CARVALHO; SOUZA, 2000; TAUBER et al., 2000). Dentre as pragas dos citros, pulgões e cochonilhas são relatadas como presas de crisopídeos (LUNA et al., 2006). O pulgão preto do citros, *Toxoptera citricida*, é uma praga de importância econômica devido a transmissão de vírus causador da tristeza dos citros, patógeno responsável por perdas severas na citricultura (MELO et al., 2008; TIMER et al., 2002).

Neste estudo, a dinâmica de predação por *C. externa* sobre *T. citricida* foi avaliada com experimentos utilizando mudas pulverizadas com calda sulfocálcica. O objetivo do estudo foi verificar se a calda sulfocálcica influenciava a predação do crisopídeo sobre o pulgão.

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Materiais e Métodos

Este experimento foi realizado em plantas de citros obtidas da Horticitrus localizada em Cordeirópolis. A variedade utilizada foi Valência com porta enxerto limão cravo. Pulgões foram coletados do campo, criados em mudas de citros (Figura 6) e após 15 dias utilizados para o experimento na fase adulta (Figura 7). Para a estimativa de predação foram realizados 4 tratamentos com 8 repetições com um total de 32 mudas. A concentração de calda utilizada foi determinada a partir do experimento anterior (60 ug/L). O critério para a utilização desta concentração foi a manutenção das populações das duas espécies em níveis adequados para investigar a ação da calda sobre a taxa de predação do predador sobre a presa e não sobre a letalidade do produto nas espécies. Os pulgões foram transferidos para as mudas com o auxílio de um pincel umedecido, e em seguida as plantas foram pulverizadas com o auxílio de um borrifador manual até o ponto de escoamento. Os insetos foram transferidos para as plantas e isolados com a utilização de um *voil* cobrindo apenas os galhos infestados (Figura 7).

Dentre os tratamentos, 16 plantas foram pulverizadas com água destilada e 16 com calda sulfocálcica. Das plantas pulverizadas com calda, 8 receberam 15 pulgões e as outras 8 receberam 15 pulgões e 1 crisopídeo. O mesmo seguiu-se para as plantas pulverizadas com água destilada. As plantas foram mantidas em sala climatizada, com temperatura de $25 \pm 2^\circ \text{C}$, fotofase de 12h e umidade relativa de $60 \pm 10\%$. O delineamento do experimento foi inteiramente casualizado. Durante 10 dias avaliou-se o efeito da calda sobre as populações de pulgão e sobre o desenvolvimento do crisopídeo.

Figura 6 - Gaiola de criação do pulgão em citros Figura 7 - Voil isolando galhos infestados durante experimento

3.2.1.2 Análise Estatística

Dados de contagens, em geral, são analisados ajustando-se um modelo de regressão Poisson, denominado modelo linear generalizado (NELDER; WEDDERBURN, 1972). Para um modelo bem ajustado, espera-se que a *deviance* residual (uma medida do ajuste do modelo) seja aproximadamente igual ao número de graus de liberdade do resíduo. Quando isto não acontece, uma explicação é que a variação pode, simplesmente, ser maior do que a esperada pelo modelo e este fenômeno é chamado superdispersão (HINDE; DEMÉTRIO, 1998a, 1998b). Uma forma gráfica para verificar se o modelo está bem ajustado aos dados é através do uso do gráfico meio-normal (DEMÉTRIO; HINDE, 1997).

Uma maneira de modelar a superdispersão é mudar a função de variância do modelo original por uma forma mais geral dada por $\text{Var}(Y_i) = \phi \mu_i$ em que ϕ é conhecido como parâmetro de superdispersão. Sendo assim, usa-se um método de quase-verossimilhança para estimar os parâmetros do modelo, chamado de quasi-Poisson.

Dados contínuos, em geral, são modelados com o modelo normal. Para que o ajuste seja satisfatório, as pressuposições do modelo devem ser atendidas. Essas pressuposições são normalidade de resíduos e homogeneidade de variâncias. A partir do ajuste de um modelo normal, pode-se fazer um teste de Tukey com a finalidade de comparar os tratamentos. Aos dados de duração de cada instar do crisopídeo, foram ajustados modelos normais.

Aos dados de proporções de crisopídeos mortos foram ajustados modelos lineares generalizados do tipo binomial (sobrevivência geral e sobrevivência no instar 1) e quasibinomial (sobrevivência nos instares 2, 3 e pupal), com posterior obtenção dos intervalos de confiança para as médias, com finalidade de fazer as comparações múltiplas entre tratamentos. Aos dados de contagens de pulgões predados foram ajustados modelos lineares generalizados do tipo quasi-Poisson. Todas as análises foram feitas com o *software* gratuito R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

3.2.2 Resultados e Discussão

Neste estudo, a calda sulfocálcica não influenciou a eficiência de predação do crisopídeo durante os 11 dias observados. Não houve diferença significativa entre o número de insetos predados com e sem calda. A baixa eficiência de predação observada nos dias 6 e 11 poderia ser atribuída à mudança do crisopídeo do segundo para o terceiro instar, respectivamente (Fig. 8). Em ambos os tratamentos metade das larvas de *C. externa* conseguiram exterminar a população de pulgões entre o 3º e 5º dia após a aplicação da calda.

O desenvolvimento larval dos crisopídeos também foi analisado oferecendo-lhes diariamente pulgões, totalizando 35 ninfas para cada larva de 2º e 3º instar, baseado em testes realizados anteriormente a este trabalho (MARTINS et al., 2009). A duração dos instares foi mais longa quando o crisopídeo foi alimentado com pulgão se comparada à alimentação realizada com *A. kuehniella*, comumente utilizada na criação por apresentar alta viabilidade e menor duração do período larval (De BORTOLI et al., 2006). Neste caso, poucos indivíduos puparam, e não houve

adultos. Bonani et al. (2009), também constatou que o pulgão preto do citros, *Toxoptera citricida*, quando oferecido isoladamente, não é boa presa para o desenvolvimento do crisopídeo *Chrysoperla externa*. Mas quando oferecida presa alternativa como a cochonilha *Planococcus citri*, há maior viabilidade larval e pupal (BONANI et al., 2009) sendo semelhante à dos crisopídeos quando alimentados com *Anagasta Kuehniella*. O fato do crisopídeo ser predador generalista pode auxiliar sua sobrevivência em campo quando há disponibilidade de presas alternativas para complementar as necessidades nutricionais.

Figura 8 - Gráfico de barras relacionando o número de pulgões predados ao longo do tempo com e sem a presença da calda

Com relação aos pulgões não houve diferença significativa entre o número de pulgões mortos com e sem a calda. Foi observado ainda que nas populações em que foi aplicada a calda sulfocálcica, pulgões tiveram até mesmo aumentos na população inicial. O desempenho positivo das populações de pulgão sujeitas ao efeito da pulverização pode estar associado ao fenômeno da “hormoglicose” na qual dosagens subletais do produto podem favorecer o desenvolvimento do inseto fornecendo-lhe maior sensibilidade para responder às mudanças do meio (LUCKEY, 1968).

Além do mais a calda também é constituída de cálcio, que é um nutriente para a planta, e consequentemente o inseto pode ter se beneficiado disso. Os estudos de Zaché et al. (2010) também indicam aumento na fecundidade em pulgões quando pulverizados com enxofre, sendo este fato associado ao fenômeno de “hormoglicose”.

3.3 Conclusão

Sob a perspectiva da toxicidade, *C. externa* poderia ser utilizada em programas de controle de *T. citricida*, visto que a calda sulfocálcica não altera negativamente a capacidade predatória do crisopídeo. Porém, é de se supor para que a população do inimigo natural se mantenha em campo, há a necessidade de se garantir a dieta do predador com presas alternativas por se tratar de predador generalista.

Referências

- AUAD, A.M.; CARVALHO, C.F.; SOUZA, B.; TREVIZANI, F.; MAGALHÃES, C.M.F.R. Desenvolvimento das fases imaturas, aspectos reprodutivos e potencial de predação de *Chrysoperla externa* (Hagen) alimentada com ninfas de *Bemisia tabaci* (Gennadius) biótipo B em tomateiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 327-334, 2005.
- BHANTI, M.; TANEJA, A. Contamination of vegetables of different seasons with organophosphorous pesticides and related health risk assessment in northern India. **Chemosphere**, Oxford, v. 69, p. 63-68, 2007.
- BERRADA, H.; FERNANDÉZ, M.; RUIZ, M.J.; MOLTÓ, J.C.; MAÑES, J.; FONT, G. Surveillance of pesticide residues in fruits from Valencia during twenty months. **Food Control**, Guildford, v. 21, p. 36-44, 2010.
- BONANI, J.P.; SOUZA, B.; SANTA-CECÍLIA, L.V.C.; CORREA, L.R.B. Aspectos biológicos de *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) alimentada com *Planococcus citri* (Risso, 1813) (Hemiptera: Pseudococcidae) e *Toxoptera citricida* (Kirkaldy, 1907) (Hemiptera: Aphididae). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 31-38, jan./fev. 2009.
- CALVERT, G.M.; BARNETT, M.; BLONDELL, J.M.; MEHLER, L.N. Surveillance of pesticide-related illness and injury in humans. In: KRIEGER, R. (Ed.). **Handbook of pesticide toxicology**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2001. v. 1, p. 603-641.

CAMARGO A.M.M.P.; CASER, D.V.; CAMARGO FILHO W.P.; CAMARGO F.P. 'COELHO, P.J. Área cultivada com agricultura orgânica no Estado de São Paulo, 2004. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 33-62, 2006.

CARVALHO, C.F.; SOUZA, B. Métodos de criação e produção de crisopídeos. In: BUENO, V.H.P. (Ed.). **Controle biológico de pragas: produção massal e controle de qualidade**. Lavras: UFLA, 2000. p. 91-109.

CASARIN, N.F.B. **Calda sulfocálcica em pomares de citros: evolução da resistência em *Brevipalpus phoenicis* (Acari: Tenuipalpidae) e impacto sobre *Iphiseiodes zuluagai* (Acari: Phytoseiidae)**. 2010. 39 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

De BORTOLI, S.A.; CAETANO, A.C.; MURATA, A.T.; OLIVEIRA, J.E.M. Desenvolvimento e capacidade predatória de *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae) em Diferentes Presas. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v. 6, n. 1, p. 145-152, 2006.

DEMÉTRIO, C.G.B.; HINDE, J.P. Half-normal plots and overdispersion. **GLIM Newsletter**, Oxford, v. 27, p. 19-26, 1997.

FAO. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 10 nov. 2011.

FRANCO, C.R.; CASARIN, N.F.B.; DOMINGUES, F.A.; OMOTO, C. Resistência de *Brevipalpus phoenicis* (Geijskes) (Acari: Tenuipalpidae) e acaricidas inibidores da respiração celular em citros: resistência cruzada e custo adaptativo. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 36, p. 565-576, 2007.

FREITAS, S. **O uso de crisopídeos no controle biológico de pragas**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 66 p.

FREITAS, S.; FERNANDES, O.A. Crisopídeos em agroecossistemas. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 5., 1996, Foz do Iguaçu. **Anais...** Londrina: EMBRAPA, CNPSo, 1996. p. 283-293.

HINDE, J.P.; DEMÉTRIO, C.G.B. Overdispersion: models and estimation. **Computation Statistics and Data Analysis**, Amsterdam, v. 27, n.2, p. 151-170, 1998a.

_____. Overdispersion: models and estimation. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 13., 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Estatística, 1998b. p. 73.

LUCKEY, T.D. Insect hormoligosis. **Journal of Economic Entomology**, Lanham, v. 61, n. 1, p. 7-12, Jan. 1968.

LUNA, L.A.V.; NÁPOLES, J.R.; CARRASCO, J.V.; SÁNCHEZ, J.L.C.; MARTINEZ, V.L. Taxonomía y Registros de Chrysopidae (Insecta: Neuroptera) en el Estado de Morelos, México. **Acta Zoológica Mexicana**, México, v. 22, n. 1, p. 17-61, 2006.

MARTINS, C.C.; RODRIGUES, C.A.; FREITAS, S.; BATTEL, A.P.M.B. Capacidade predatória de larvas de primeiro e terceiro ínstaes de *Chrysoperla externa* (Neuroptera: Chrysopidae) alimentadas com pulgão-preto do citros. **O Biológico**, São Paulo, v. 71, n.2, p. 83-202, 2009. Apresentado na REUNIÃO ANUAL DO INSTITUTO BIOLÓGICO, 22., 2009, São Paulo.

MELO, C.D.; SANTOS, A.M.C.; LOPES, D.J.H.; PEREIRA, A..M..N. Afídeos como potenciais vetores do vírus da tristeza dos citrinos (CTV) na ilha terceira (Açores). **Boletim do Museu Municipal do Funchal**, Funchal, n. 14, p. 77-82, 2008.

MUMA, M.H. Chrysopidae associated with Citrus in Florida. **Journal of Florida Entomologist**, Gainesville, v. 42, n. 1, p. 21-29, 1959.

NELDER, J.A.; WEDDERBURN, R.W.M. Generalized linear models. **Journal of the Royal Statistical Society**, Series A, Oxford, v. 135, p. 370-384, 1972.

SCOMPARIN, C.H.J. **Crisopídeos (Neuroptera:chrysopidae) em pomar de citros**. Trabalho (Conclusão de Curso) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 1995.

SOUZA, B.; CARVALHO, C.F. Population dynamics and seasonal occurrence of adults of *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) in a citrus orchard in southern Brazil. **Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae**, Budapest, v. 48, suppl. 2, p. 301–310, 2002.

TAUBER, M.J.; TAUBER, C.A.; DAANE, K.M.; HAGEN, K.S. Commercialization of predators: recent lesson from green lacewings (Neuroptera: Chrysopidae: Chrysoperla). **American Entomologist**, Lanham, v. 46, n. 1, p. 26-38, 2000.

TIMER, L.W.; GARNSEY, S.M.; GRAHAM, J.H. **Plagas y enfermedades de los citricos**. St. Paul: APS Press, 2002. 95 p.

TURRA, C. **Elementos químicos como critério de discriminação de citros orgânicos de convencionais**. 2005. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

YAMAMOTO, P.T.; BASSANEZI, R.B. Seletividade de produtos fitossanitários aos inimigos naturais de pragas dos citros. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 24, n. 2, p. 353-382, 2003.

ZACHÉ, R.R.C.; CARVALHO, G.A.; ZACHÉ, B.; CARVALHO, C.F.; PEREIRA, R.R.C. Efeitos de fungicidas sobre os aspectos biológicos de *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) em plantas de pepino. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 6, p. 1431-1438, nov./dez. 2010.

4 RESPOSTA FUNCIONAL DE *Chrysoperla externa* SOBRE *Toxoptera citricida*

Resumo

A resposta funcional foi investigada em larvas de primeiro instar de *C. externa* sobre cinco densidades de *T. citricida* sob e sem a influência da calda sulfocálcica. O modelo de regressão logística polinomial foi aplicado para avaliar o tipo de resposta funcional adequada ao sistema através dos termos linear e quadrático da função, levando em conta o conjunto de dados obtidos experimentalmente. Os resultados sugerem que o padrão inerente do sistema é caracterizado pela resposta funcional do tipo II, tanto para as populações sujeitas à aplicação de calda sulfocálcica como para as populações em que a calda não foi aplicada. O modelo do tipo II foi então ajustado aos dados para a demonstração da tendência. O resultado obtido é uma curva assintótica que reflete a resposta do tipo II, com densidades de saturação de consumo de presas similares independente da aplicação ou não da calda sulfocálcica.

Palavras-chave: Citricultura; Crisopídeo; Pulgão preto do citros; Densidade de presas; Calda sulfocálcica; Predação

Abstract

Functional response was investigated in first instar larvae of *C. externa* on five densities of *T. citricida* with and without influence of lime sulfur. The polynomial logistic regression was applied to evaluate the functional response by using the linear and quadratic terms of the function, taking into account the experimentally obtained dataset. The results suggest that the inherent pattern of the system is characterized by the type II functional response, for the population sprayed with lime sulfur and population without sulfur application. The type II model was fitted to the data to show the trend. The obtained result is an asymptotic curve that reflects the type II response, with similar saturation prey densities regardless of lime sulfur spraying.

Keyword: Citriculture; Lacewing; Brown citrus aphid; Prey density; Lime sulfur; Predation

4.1 Introdução

O conceito de resposta funcional foi introduzido por Holling (1959), que estudando predação em pequenos mamíferos notou que o consumo de presas aumentava em resposta à densidade populacional. O modelo de resposta funcional foi assim proposto com base estrutural no modelo de cinética de enzimas desenvolvido em 1913 por Michaelis e Menten. Essencialmente, o modelo de resposta funcional proposto por Holling (1959) ilustra um mecanismo comportamental traduzido pela relação entre uma variável independente, a densidade de presas e a variável dependente dada pelo consumo delas. A relação assume que o predador gasta seu tempo com dois tipos de atividade: (1) procurando e (2) manuseando sua presa.

Resposta funcional é então definida como a mudança na taxa de ataque do predador quando há variação da densidade de presas (SOLOMON, 1949). A teoria proposta por Holling (1959) sustenta uma subdivisão na resposta funcional em três tipos: I, II e III. No tipo I, o consumo de presas aumenta linearmente em relação ao número de presas. A resposta funcional do tipo II é representada por uma assíntota, na qual o predador vai aumentando o consumo de presas até o momento em que ocorre a saturação. Já a resposta do Tipo III é semelhante à do tipo II e a diferença está nas densidades iniciais. Nelas o consumo é baixo determinando uma curva sigmoide.

A resposta do predador está relacionada ao número de presas ofertadas, ou seja, a densidade de presas determina o comportamento alimentar do predador. Assim, quanto maior a densidade de presas maior a chance de encontro com o predador, garantindo portanto o seu desenvolvimento e a sua persistência em sucessivas gerações. No contexto de manejo de pragas os estudos sobre resposta funcional de predadores são primordiais para a tomada de decisão sobre a liberação do inimigo natural em campo. No presente estudo a resposta funcional de *Chrysoperla externa* sobre *Toxoptera citricida* foi investigada levando em conta o efeito da Calda sulfocálcica. Pretendeu-se assim utilizar práticas experimentais capazes de gerar inferência para aplicação em programas de manejo integrado.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Materiais e Métodos

Para o experimento, os crisopídeos utilizados foram obtidos da criação pré-existente no laboratório, criados seguindo a metodologia proposta por Freitas (2001). Foram utilizados indivíduos obtidos a partir da geração F1, ou seja, geração F2 recém eclodida. Os pulgões foram obtidos do pomar de citros da fazenda Areião, estação experimental da USP – ESALQ, mantidos nas salas de criação, com adultos separados e postos em mudas de citros. Após dois dias os adultos foram retirados da planta para que ficassem somente as ninfas, a fim de se padronizar o tamanho e idade dos indivíduos, sendo somente ninfas de terceiro e quarto instar do pulgão preto.

A variedade de citros utilizada foi Valência com porta enxerto limão cravo, obtidas na Horticitrus, localizada em Cordeirópolis. Para o experimento foram utilizadas 5 densidades de pulgão escolhidas de acordo com testes realizados anteriormente, sendo 5, 10, 20, 40, 60 pulgões para cada planta. Para cada densidade de pulgão foram feitas 16 repetições, sendo 8 para

testemunha, na qual se aplicou água destilada e 8 recebendo calda sulfocálcica. Os pulgões foram colocados nas plantas e, logo após, a planta foi pulverizada até o ponto de escoamento, momento em que a larva de crisopídeo foi adicionada. Os indivíduos foram isolados do meio externo com a utilização de saquinhos confeccionados com *voil*. Após 24 horas os pulgões consumidos foram contados com o auxílio de um microscópio estereoscópico. Os indivíduos predados pelo crisopídeo ficaram sorvidos com um aspecto, "desidratado", enquanto os que morriam por outras causas permaneciam na sua forma natural.

4.2.1.1 Estimativa da resposta funcional

Resposta funcional é definida como a taxa temporal na qual um predador elimina suas presas, ou mais especificamente, a relação entre o consumo e a densidade de presas (HOLLING, 1959, 1965; HASSELL, 1978; TURCHIN, 2001). Os modelos de Holling (1959, 1965) assumem três formas básicas geralmente formalizadas por equações. O primeiro tipo (tipo I) é provavelmente pouco comum na natureza, pois nele o número de presas ou hospedeiras consumidas pelo predador em função da densidade seguem trajetória linear, podendo ser escrita como:

$$Ne = aTN \quad (1) \quad .$$

Na equação (1), Ne é o número de encontros entre predador e presa, a é a taxa de ataque do predador sobre a presa, N o tamanho da população de presas e T o tempo total disponível para o predador atacar sua presa. O segundo tipo de resposta (tipo II) é provavelmente o mais comum, sobretudo em insetos, visto que o predador atinge o ponto de saturação em termos de consumo de presa a partir de determinada densidade. Assim, a relação entre consumo e densidade é assintótica. A equação que descreve o tipo II de resposta funcional é escrita como:

$$Ne = \frac{aNT}{1 + aNTh} \quad (2),$$

onde Th é o tempo de manuseio do predador sobre a presa. A resposta do tipo III é caracterizada por um período inicial com baixa taxa de predação, seguido de uma curva do tipo exponencial

que é finalizada pela saturação a exemplo da resposta do tipo II, o que sugere um padrão sigmóide de consumo de presas (HASSELL et al., 1977; HASSELL, 1978):

$$Ne = \frac{bN^2T}{1 + cN + bN^2Th} \quad (3).$$

Nesta equação a é substituído pelas constantes b e c . Os modelos de resposta funcional do tipo II e III assumem que: (a) a taxa de encontro com a presa está assintoticamente relacionada com a densidade de presas, (b) enquanto os predadores manuseiam suas presas não podem capturar outras e (c) a densidade de presas é constante. Em alguns experimentos de resposta funcional, as presas oferecidas não são repostas à medida que são consumidas, ou seja, há um declínio no número de presas conforme se dá a predação. Sob estas circunstâncias, as equações propostas por Holling não descrevem com absoluta acurácia a resposta funcional e a estimativa dos parâmetros do modelo pode estar sujeita a erros dependentes do grau de decréscimo da densidade de presas (JULIANO, 2003).

Quando ocorre a diminuição no consumo de presas sem reposição, o modelo mais apropriado para descrever a resposta funcional é a integral das equações de Holling ao longo do tempo, em função das sucessivas densidades de presas (ROGERS, 1972). Para o tipo II de resposta funcional, a integração da equação de Holling resulta na Equação Randômica do Predador (ROYAMA, 1971; ROGERS, 1972), escrita como:

$$Ne = No\{1 - \exp[a(ThNe - T)]\} \quad (4).$$

Na equação (4) No é o número inicial de presas. Para a resposta funcional do tipo III, a redução no número de presas depende da taxa constante de ataque, b , que é uma função da densidade inicial (No) ou da densidade atual de presas (N) (HASSELL et al., 1977; HASSELL, 1978) e o tratamento matemático mais simples para a equação pode ser encontrado quando b é uma função da densidade inicial de presas:

$$Ne = No\left\{1 - \exp\left[\frac{(d + bNo)(ThNe - T)}{1 + cNo}\right]\right\} \quad (5).$$

Seleção do modelo de resposta funcional

Para uma efetiva escolha entre a resposta funcional do tipo II ou III, é necessário o uso de regressão logística da proporção de presas consumidas pelo número de presas presentes (TREXLER et al., 1988). A regressão logística envolve o ajuste de uma função fenomenológica que prediz que a proporção de indivíduos em um grupo é resposta de uma ou mais variáveis contínuas (NETER; WASSERMAN, 1974; SAS INSTITUTE, 2001; GLANTZ; SLINKER, 1990). A variável Y é dicotômica, representando as presas sobreviventes ($Y = 0$) ou mortas ($Y = 1$) no fim da observação. Neste caso, a variável contínua é No e a forma geral da função é:

$$\frac{Ne}{No} = Prob\{Y = 1\} = \frac{\exp(Po + P1No + P2No^2 + P3No^3 + \dots + PzNo^z)}{1 + \exp(Po + P1No + P2No^2 + P3No^3 + \dots + PzNo^z)} \quad (6)$$

onde, $Po, P1, P2, P3, \dots, Pz$ são parâmetros a serem estimados.

A estimativa dos parâmetros é usualmente feita pelo método de verossimilhança máxima empregando o procedimento CATMOD do pacote estatístico SAS (SAS INSTITUTE, 2001). O objetivo é encontrar a função polinomial que descreve a relação Ne/No por No . A proporção do número de presas consumidas para a resposta funcional do tipo II é representada por uma função exponencial negativa. Já para o tipo III, inicialmente há um aumento da proporção de presas consumidas, seguida de um decréscimo. Com isto, o sinal do coeficiente linear dado pelo ajuste da função polinomial através da regressão logística distingue a resposta do tipo II da resposta do tipo III. Quando o coeficiente linear é negativo a resposta é do tipo II e quando é positivo indica resposta funcional do tipo III.

4.2.1.2 Ajuste do modelo de resposta funcional

A experimentação é geralmente conduzida considerando a diminuição do consumo de presas e tem a propriedade de dar aos dados a dimensão da predação estocástica, por permitir a variação do número de presas disponíveis (SJOBERG, 1980; HOUCK; STRAUSS, 1985). O método mais comum utilizado em análises de resposta funcional é a regressão não-linear pelo método dos quadrados mínimos, envolvendo No e Ne (LIVDAHL, 1979; LIVDAHL; STIVEN,

1983; JULIANO; WILLIAMS, 1996; TREXLER et al., 1988). No presente estudo o modelo de regressão logística polinomial foi ajustado aos dados para avaliação do tipo de resposta funcional. Em razão do resultado obtido os dados foram ajustados à equação de Holling.

4.2.2 Resultados e Discussão

A análise de regressão logística polinomial realizada para investigar os padrões de resposta funcional de *C. externa* sobre *T. citricida* sob e sem a influência da calda sulfocálcica revelou um padrão de resposta do tipo II, resposta dada por uma curva assintótica, com saturação dependente da densidade de presas (Tabelas 3 e 4, Figuras 9 e 10). Para as duas situações, com e sem aplicação de calda sulfocálcica o padrão encontrado foi a resposta funcional do tipo II.

Entretanto, a significância para os termos linear e quadrático só foi encontrada na ausência de aplicação da calda. É provável que a variabilidade encontrada nos resultados advindos do experimento com aplicação de calda sulfocálcica tenha influenciado a significância, já que, principalmente na densidade de 40 pulgões a dispersão dos dados foi bem maior que no experimento sem aplicação de calda (Figuras 9 e 10). Contudo, os resultados encontrados na regressão logística indicam, em ambos os casos, a resposta do tipo II já que o termo linear encontrado é negativo, critério este que recebe fundamentação da teoria de ajuste de funções não-lineares proposta por Juliano (2001).

No que diz respeito à estimativa dos parâmetros inerentes do modelo de resposta funcional do tipo II, taxa de ataque (a) e tempo de manuseio da presa (t_h) obtidos pelo modelo de regressão logística, conclui-se que a taxa de ataque de *C. externa* sobre *T. citricida* foi praticamente a mesma, seja nos experimentos com ou sem aplicação de calda (Tabelas 5 e 6). Já o tempo de manuseio da espécie predadora foi ligeiramente menor nos experimentos com a aplicação de calda sulfocálcica se comparado ao tempo utilizado no experimento sem aplicação da calda.

O tempo de manuseio tem sido investigado em populações de insetos predadores sob a influência de inseticidas e o resultado é bastante variado, com indicações de aumento ou de decréscimo no período em que o predador passa manuseando sua presa (DASTJERDI et al., 2009; AMBROSE et al., 2010). Tanto a taxa de ataque como o tempo de manuseio são

geralmente influenciados de forma diferente nas diversas espécies de insetos predadores por diversos fatores exógenos e endógenos (ENGLUND et al., 2011; MCLURE; DESPLAND, 2011). Assim, a variação na magnitude destes parâmetros pode ser dependente da múltipla ação fatorial advinda de fontes externas ou mecanismos biológicos intrínsecos do indivíduo. O valor calculado para a assíntota das curvas da resposta funcional de cada experimento diferiu entre os tratamentos indicando maior magnitude para populações tratadas com calda. Este resultado sugere que a calda sulfocálcica influencia a saturação de presas pelo crisopídeo, apesar de não influenciar o padrão de resposta no tocante à aplicação da calda.

Tabela 3 - Resultados da análise de regressão logística polinomial da proporção de presas consumidas por *Chrysoperla externa* sob a influência de calda sulfocálcica pelo método de verossimilhança máxima

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	χ^2	Valor de p
Intercepto	-0,8480	0,3337	6,46	0,011
N0	-0,0278	0,0227	1,50	0,22
N02	0,000012	0,000316	0,00	0,96

Tabela 4 - Resultados da análise de regressão logística polinomial da proporção de presas consumidas por *Chrysoperla externa* no primeiro instar sem influência de calda sulfocálcica pelo método de verossimilhança máxima

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	χ^2	Valor de p
Intercepto	-0.3645	0.3245	1.26	0,2614
N0	-0.0738	0.0233	9.99	0,0016
N02	0.000671	0.000329	4.15	0,0417

Tabela 5 - Parâmetros da resposta funcional para *Chrysoperla externa* no primeiro instar sob a influência de calda sulfocálcica

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Intervalos de confiança (95%)	
A (taxa de ataque)	0.0215	0.00848	0.00434	0.0387
t_h (tempo de manuseio da presa)	3.9480	0.6699	2.5906	5.3053

Tabela 6 - Parâmetros da resposta funcional para *Chrysoperla externa* no primeiro instar sem influência de calda sulfocálcica

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Intervalos de confiança (95%)	
a (taxa de ataque)	0.0218	0.00756	0.00652	0.0371
t_h (tempo de manuseio da presa)	4.3679	0.6344	3.0826	5.6533

Figura 9 - Resposta funcional do tipo II para o consumo de *T. citricida* por *C. externa* sem a influência da calda sulfocálcica. Valor calculado para assíntota, $T/Th = 5,66$

Figura 10 - Resposta funcional do tipo II para o consumo de *T. citricida* por *C. externa* sob a influência da calda sulfocálcica. Valor calculado para assíntota, $T/Th = 6,59$.

O ajuste da resposta funcional encontrado para os dados obtidos foi o padrão tipo II tanto para o tratamento com a influência de calda sulfocálcica, como pela testemunha podendo ser visualizado nas Figuras 9 e 10 e confirmando a análise dos termos da equação logística polinomial. A resposta do tipo II já foi observada em crisopídeos para os três instares larvais sobre estágios imaturos de presas (FONSECA et al., 2000; STEWART et al., 2002; HASSANPOUR et al., 2011). Esse tipo de resposta também é comum em outros insetos predadores, tendo sido já relatada para *Orius insidiosus* (Say, 1832) (OLIVEIRA et al., 2006) predando o pulgão branco *Aphis gossypii*.

4.3 Conclusão

O padrão de resposta funcional não é alterado sob a influência da calda sulfocálcica nas concentrações utilizadas neste estudo, a despeito dos valores assintóticos calculados indicarem diferenças na saturação.

Referências

- AMBROSE, D.P.; RAJAN, J.J.; RAJA, J.M. Impact of synergy on the functional response and behavior of the reduviid bug, *Rhynocoris marginatum* **Insect Science**, Elmsford, v. 10, p. 1-10, 2010.
- DANTJERDI, H.R.; HEJAZI, M.J., CAMBALANI, G.N.; SABER, M. Effects of some insecticides on functional response of ectoparasitoid *Habrobracon hebetor* (Say) (Hym.: Braconidae) **Journal of Entomology**, London, v. 6, n. 3, p. 161-166, 2009.
- ENGLUND, G.; OHLUND, G.; HEIN, C.L.; DIEHL, S. Temperature dependence of functional response. **Ecology letters**, Oxford, v. 14, n. 9, p. 914-921, 2011.
- FONSECA, A.R.; CARVALHO, C.F.; SOUZA, B. Resposta funcional de *Chrysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Chrysopidae) alimentada com *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (Hemiptera: Aphididae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**. Londrina, v. 29, n. 2, p. 309-317, jun. 2000.
- FREITAS, S. **O uso de crisopídeos no controle biológico de pragas**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 66 p.
- GLANTZ, S.A., SLINKER, B.K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York: McGraw-Hill, 1990. 777 p.
- HASSANPOUR, M.; MOHAGHEGH, J.; IRANIPOUR, S.; NOURI-GANBALANI, G.; ENKEGAARD, A. Functional response of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae) to *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae): effect of prey and predator stages. **Insect Science**, Elmsford, v. 18, p. 217-224, 2011.
- HASSELL, M.P. **The dynamics of arthropod predator-prey systems**. Princeton: Princeton University Press, 1978. 227 p.
- HASSELL, M.P.; LAWTON, J.H.; BEDDINGTON, J.R. The components of arthropod predation. I. The prey death-rate. **Journal of Animal Ecology**, London, v. 45, p. 135-164, 1977.
- HOLLING, C.S. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. **Canadian Entomologist**, Ottawa, v. 91, p. 385-398, 1959.

_____. The functional response of predators to prey density and its role in mimicry and population regulation. **Memoirs of Entomological Society of Canada**, Ottawa, v. 45, p. 6-60, 1965.

HOUCK, M.A.; STRAUSS, R.E. The comparative study of functional responses: experimental design and statistical interpretation. **Canadian Entomologist**, Ottawa, v. 117, p. 617-629, 1985.

JULIANO, S.A. Non-linear curve-fitting: predation and functional response curves. In: SCHEINER, S.M.; GUREVITCH (Ed.). **Design and analysis of ecological experiments**, 3rd ed. New York: Chapman & Hall, 2003. p. 178-196.

JULIANO S.A.; WILLIAMS, F.M. Functional responses revisited. **Environmental Entomology**, London, v. 25, p. 549-550, 1996.

LIVDAHL, T.P. Evolution of handling time: the functional response of a predator to the density of sympatric and allopatric strains of prey. **Evolution**, Washington, v. 33, p. 765-768, 1979.

LIVDAHL, T.P.; STIVEN, A.E. Statistical difficulties in the analysis of predator functional response data. **Canadian Entomologist**, Ottawa, v. 115, p. 1365-1370, 1983.

McCLURE, M.; DESPLAND, E. Defensive responses by a social caterpillar are tailored to different predators and change with larval instar and group size. **Naturwissenschaften**, Berlin, v. 98, p. 425-434, 2011.

NETER, J., WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. Homewood: Richard S Irwin, 1974. 1181 p.

OLIVEIRA, J.E.M.; DeBORTOLI, S.A.; GUEDES, I.V. Resposta funcional de *Orius insidiosus* (Say, 1832) a diferentes densidades de *Aphis gossypii* Glover, 1877. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v. 6, n. 1, p. 63-72, 2006.

ROGERS, D. Random search and insect population models. **Journal of Animal Ecology**, London, v. 41, p. 369-383, 1972.

ROYAMA, T.A. Comparative study of models for predation and parasitism. **Research Population Ecology**, Kyoto, v. 1, p. 91, 1971. Supplement.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide**: statistics. Version 8 Edition. Cary, 2001.

SJOBERG, S. Zooplankton feeding and theory. **Ecological Modeling**, Copenhagen, v. 10, p. 215-225, 1980.

SOLOMON, M.E. The natural control of animal populations. **Journal of Animal Ecology**, Oxford, v. 18, p. 1-35, 1949

STEWART, C.D., BRAMAN, S.K.; PENDLEY, A.F. Functional Response of the Azalea Plant Bug (Heteroptera: Miridae) and a Green Lacewing *Chrysoperla rufilabris* (Neuroptera: Chrysopidae), Two Predators of the Azalea Lace Bug (Heteroptera: Tingidae). **Environmental Entomology**, College Park, v. 31, n. 6, p. 1184-1190, 2002.

TREXLER, J.C., MCCULLOCH, C.E.; TRAVIS, J. How can functional response best be determined? **Oecologia**, Heidelberg, v. 76, p. 206-214, 1988.

TURCHIN, P. **Complex population dynamics**: a theoretical/empirical synthesis. Princeton: Princeton University Press, 2001. 456 p.

5 MODELOS MATEMÁTICOS PREDADOR-PRESA E APLICAÇÕES AO MANEJO INTEGRADO DE PRAGAS: REVISANDO A TEORIA E INCORPORANDO ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Resumo

A modelagem matemática de sistemas predador-presa e hospedeiro-parasitóide é uma ferramenta importante para descrever as interações entre pragas e inimigos naturais em programas de controle biológico. Os modelos predador-presa desenvolvidos por Lotka e Volterra vêm sendo aprimorados, com a inserção de parâmetros relevantes a cada tipo de estudo. Dentre as inserções realizadas em modelos, abordagens direcionadas para o manejo integrado de pragas têm sido implementadas para avaliar o efeito de inseticidas sobre a dinâmica predador-presa. É possível inserir os efeitos da aplicação de produtos químicos e avaliar o comportamento dinâmico resultante dessa aplicação em presas e predadores ou hospedeiros e parasitóides. Também se pode atribuir estocasticidade aos parâmetros do modelo, a fim de se obter simulações mais próximas à realidade levando em conta os efeitos das variações não-controláveis. O desenvolvimento de novos modelos ou o aperfeiçoamento de modelos existentes é encorajado neste estudo, a fim de que os efeitos dos principais fatores que influenciam a dinâmica em agroecossistemas sejam considerados na descrição das interações.

Palavras-chave: Modelagem matemática de manejo de pragas; Modelos predador-presa

Abstract

Mathematical modeling of predator-prey and host-parasitoid systems is an important tool for describing the interactions among pests and natural enemies in biological control programs. Predator-prey models developed by Lotka and Volterra have been improved with the insertion of relevant parameters for each type of study. Among the insertions made in models, approaches directed towards the integrated pest management have been implemented to evaluate the effect of pesticides in the predator prey dynamics. It is possible to infer the effects of pesticide application and evaluate the dynamic behavior resultant of this application in prey, predator or host and parasitoid. One could also add stochasticity to the models' parameters, in order to obtain dynamic behavior simulations which are closer to reality, with the non-controllable variation effects taken into account. The development of new models or the improvement of models is encouraged in this study, so as to the effects of the main factors which influence the dynamics in agroecosystems are considered in descriptions of interactions.

Keywords: Pest management; Mathematical model; Predator-prey models

5.1 Introdução

Lotka (1925) e Volterra (1926) foram os precursores da idéia de investigar as relações entre predadores e presas assumindo, inicialmente, premissas extremamente simples, porém capazes de produzir visualização do que é primordial para o sistema. A proposição pressupunha que, exceto pela presença de predadores, presas poderiam sobreviver satisfatoriamente em ambientes desprovidos de limitações de recursos e, por sua vez, predadores seriam limitados somente pela disponibilidade de presas. O modelo preliminar foi assim proposto para descrever um sistema que se auto sustentaria por tempo indeterminado somente com estas simplificações, gerando ciclos periódicos. Contudo, para viabilizar este processo outras pressuposições foram feitas, como por exemplo, a reprodução contínua de predadores e presas produzindo indivíduos idênticos e a taxa de predação sendo proporcional à taxa de encontro entre os componentes do sistema, com função aleatória da densidade populacional (COSTA; GODOY 2010). As equações (1) e (2) descrevem o processo de predação proposto por Lotka & Volterra.

$$\frac{dp}{dt} = rp - fpP \quad (1),$$

$$\frac{dP}{dt} = -mP + nfpP \quad (2).$$

Nas equações acima, a trajetória da população de presas (p) e de predadores (P) seguem em tempo contínuo, de acordo com as equações diferenciais. A população de presas (eq. 1) depende da sua taxa intrínseca de crescimento (r) e do seu número inicial de indivíduos (p). A taxa de encontro entre p e P é governada por f , comumente denominada de resposta funcional do predador. Assume-se, para este caso simplificado, que essa constante varia linearmente de acordo com a abundância de presas. A equação para predadores (eq. 2) descreve o crescimento populacional pressupondo que m é a mortalidade da população de predadores na ausência da população de presas. A resposta numérica, definida como a eficiência de conversão de presas em predadores, é dada por n , que mede a produção *per capita* de prole de predadores também como uma função da abundância de presas.

A inclusão da dependência da densidade no modelo descrito pelas equações (1) e (2) pode ser obtida pela modificação da equação (1) resultando em:

$$\frac{dp}{dt} = rp\left(1 - \frac{p}{K}\right) - fpP \quad (3).$$

Com a dependência da densidade inserida na equação da presa, o sistema é estabilizado, deixando de exibir as oscilações periódicas. As formulações teóricas pioneiras para estudar a dinâmica de pragas em agrossistemas foram propostas por Nicholson & Bailey (1935), que partiram de pontos básicos para investigar sistemas dinâmicos mais complexos. A teoria foi fundamentada em duas simplificações: (1) o encontro (E) entre parasitóides ou predadores (P) com hospedeiros ou presas (p) deveria ser proporcional à densidade de hospedeiros ou presas e (2) os encontros seriam aleatoriamente distribuídos entre as presas. Esta função pode ser descrita pelo termo zero da distribuição de Poisson, escrita como

$$p_0 = \exp\left(\frac{-E}{p}\right) \quad (4)$$

e o número de presas (ou hospedeiros) atacadas (ou parasitadas) assume a forma:

$$p_a = p \left[1 - \exp\left(\frac{-Ec}{p}\right) \right] \quad (5).$$

Então, o encontro entre predadores P e presas p pode ser expresso por

$$E = apP \quad (6),$$

onde a é uma constante de proporcionalidade denominada área de captura pelo predador. Trata-se de uma estimativa da eficiência de encontro. Assim, $E_c / p = aP$ e o número de presas consumidas pode ser escrito como

$$p_a = p[1 - \exp(-aP)] \quad (7).$$

A equação (7) denota que a predação ou parasitismo aumentará até determinado ponto de saturação aP , visto que a taxa de encontro entre predadores e presas diminui à medida que a

eficiência de encontro também aumenta. Isto vem da conclusão que o número de presas disponíveis diminui em decorrência da boa eficiência de encontro de presas pelo predador. Muitos sistemas como, por exemplo, aqueles em que os indivíduos se reproduzem sem sobreposição de gerações, são melhores descritos por equações em tempo discreto. Nesse caso, as equações recursivas assumem o formato:

$$p_{t+1} = \psi p f(p, P) \quad (08)$$

$$P_{t+1} = p[1 - f(p, P)] \quad (09),$$

onde $f(p, P) = \exp(-aP)$ determina o número de presas não atacadas ou de hospedeiros não parasitados. O parâmetro ψ representa a taxa intrínseca de crescimento geométrico para presas. Com este formato, a dinâmica predador-presa seria descrita por um padrão linear de resposta funcional (tipo I). Para descrever a dinâmica do sistema com resposta funcional assintótica (tipo II), basta assumir

$$f(p, P) = \exp\left(\frac{-aTP}{1 + aT_m p}\right) \quad (10).$$

Na equação (10) T_m determina o tempo de manipulação que um predador requer sobre a presa, a' é a taxa de ataque e T representa o tempo total. Em altas densidades de presa, o tempo utilizado pelo predador para consumir a presa deve ser otimizado, o que pode levar à saturação da resposta funcional, traduzida pela resposta assintótica, conhecida como do tipo II. Quando a e T_m são constantes e a busca por presas é aleatória, a função que determina a sobrevivência das presas é

$$f(p, P) = \exp\left(\frac{-aTP}{1 + aT_m p}\right) \quad (11).$$

A resposta sigmóide (tipo III) aparece quando um ou mais parâmetros associados à captura de presas (a , T , ou ambos) são funções crescentes da densidade de presas. Já a função de sobrevivência das presas para a resposta do tipo III pode ser escrita como:

$$f(p, P) = \exp\left(\frac{-b_1 T p P}{1 + b_2 p + b_1 T_m p^2}\right) \quad (12).$$

Nesta função, b_1 e b_2 são constantes, sendo que b_2 denota a resposta numérica do predador, ou seja, o número de presas convertidas em prole.

5.2 Desenvolvimento

5.2.1 Materiais e métodos

O efeito de produtos químicos - Modelos de Hassell (1984)

O que foi demonstrado até a equação (12) sintetiza de certa forma os fundamentos ecológicos para a aplicação de modelos matemáticos do tipo predador presa em agroecossistemas, sobretudo quando se pensa em controle biológico de pragas. Contudo, raramente em agroecossistemas aplicam-se somente estratégias estritamente de controle biológico. Outros métodos de controle de pragas estão geralmente associados às práticas de controle, trazendo também a dimensão de manejo integrado de pragas MIP (PEDIGO; ZEISS 1996) para o arcabouço teórico aqui mencionado. O manejo integrado de pragas consiste de uma combinação de métodos de controle de pragas, usualmente desenvolvido para programas de longa duração. O programa de controle inclui estratégias capazes de combinar controle biológico, cultural, e aplicações de produtos químicos para reduzir populações de pragas a níveis toleráveis para a agricultura (PEDIGO; ZEISS 1996, van LENTEREN 2000). Geralmente, os níveis são determinados por monitoramento periódico com fundamento no nível de dano econômico (PEDIGO; ZEISS 1996, LIMA et al., 2009).

Um estudo pioneiro na combinação entre modelo dinâmico para hospedeiro-parasitóide ou predador-presa e outro método de controle de pragas, no caso, aplicação de pesticida, foi proposto por Hassell (1984). Em sua proposição, o autor analisa, do ponto de vista teórico, o equilíbrio e a estabilidade de um modelo que combina a dinâmica hospedeiro-parasitóide com os efeitos da aplicação de inseticida no sistema (HASSELL 1984). O sistema foi investigado considerando-se quatro possibilidades: (1) inseticidas agindo antes do parasitismo e eliminando somente hospedeiros, (2) inseticidas agindo após o parasitismo e eliminando somente hospedeiros, (3) inseticidas agindo após o parasitismo e eliminando também os hospedeiros

parasitados na mesma taxa que a possibilidade anterior e, finalmente, (4) inseticidas agindo antes do parasitismo e eliminando também parasitóides adultos.

No presente estudo a motivação vêm do contexto de crisopídeos e pulgões, diferindo sob alguns aspectos do sistema hospedeiro-parasitóide proposto por Hassell (1984). Adaptando os pressupostos de Hassell (1984) ao contexto de predação de crisopídeos sobre pulgões pode-se reescrevê-los como: (1) calda sulfocálcica agindo antes da predação e eliminando somente pulgões, (2) calda agindo após a predação e eliminando pulgões não atingidos pela predação em decorrência, por exemplo, da saturação dada pela resposta funcional, (3) calda agindo após a predação e eliminando tanto pulgões não predados como crisopídeos e (4) calda agindo antes da predação e eliminando crisopídeos e pulgões.

O estudo proposto por Hassell (1984) pressupõe a mesma estrutura teórica empregada na função da resposta funcional tipo II. Contudo, a dimensão de aleatoriedade dada convencionalmente pela distribuição de Poisson, que assume a procura randômica por presas, foi substituída pela dimensão de agregação dada pela distribuição Binomial negativa, com média igual a $aP/(1+aT_m p)$, pressupondo que predadores buscam sítios de agregados de presas, como observado naturalmente para o cenário do pulgão preto dos citros. A função de sobrevivência de presas modificada pode ser escrita como:

$$f(p, P) = \left[1 + \frac{aP}{k(1 + aT_m p)} \right]^{-k} \quad (13).$$

O parâmetro k (eq. 13) descreve o grau de agregação de predadores, sendo que quando k tende à zero obtém-se o maior nível de agregação populacional (SOUTHWOOD; HENDERSON 2006). O processo de agregação espacial em populações biológicas tem sido considerado comum em diferentes espécies, com destaque para parasitas e insetos (HASSELL, 1980; EVANS; TOLER, 2007).

A inserção do termo que caracteriza a aplicação de calda antes da liberação de predadores que resulta na eliminação somente de presas (possibilidade 1) produz as recursões:

$$p_{t+1} = r p_t i f(p_t, i, P_t) \quad (14)$$

$$P_{t+1} = p_t i [1 - f(p_t, i, P_t)] \quad (15),$$

onde i determina a probabilidade de uma presa sobreviver à aplicação de calda. Para tanto, a função de sobrevivência da presa pode ser escrita como:

$$f(p_t, i, P_t) = \left[1 + \frac{aP_t}{k(1 + a(p_t i))} \right]^{-k} \quad (16).$$

A inclusão do efeito da calda no sistema com ação após a predação e eliminando somente presas remanescentes (possibilidade 2) resulta em

$$p_{t+1} = rp_t f(p_t, P_t) i \quad (17)$$

$$P_{t+1} = p_t [1 - f(p_t, P_t)] \quad (18),$$

com $f(p_t, P_t)$ definido na equação (13). Se a aplicação de calda for feita após a predação, porém eliminando também predadores na mesma proporção que o caso anterior (possibilidade 3), as recursões serão escritas como:

$$p_{t+1} = rp_t f(p_t, P_t) i \quad (19)$$

$$P_{t+1} = p_t i [1 - f(p_t, P_t)] \quad (20),$$

com $f(p_t, P_t)$ também definido pela equação (13). Assumindo que a calda atue antes da predação, porém eliminando também os predadores (possibilidade 4) obtém-se:

$$p_{t+1} = rp_t i f(p_t, i, P_t, i^*) \quad (21)$$

$$P_{t+1} = p_t i [1 - f(p_t, i, P_t, i^*)] \quad (22),$$

onde i^* representa a probabilidade de um predador sobreviver à aplicação de calda. Para este caso, a função de sobrevivência da presa é escrita como

$$f(p_t, i, p_t, i^*) = \left[1 + \frac{aP_t i^*}{k(1 + ap_t i)} \right]^{-k} \quad (23).$$

As recorrências para os quatro tipos de efeitos de aplicação de calda podem ser vistas na Figura 11.

Figura 11 - Recorrência no tempo para a dinâmica predador presa com efeitos da aplicação de calda sulfocálcica. Valores dos parâmetros comuns a todos os casos: $r = 2$, $a = 1$, $k = 0.6$, $i = 0.8$, $p = 25$, $P = 10$. Antes da liberação de predadores resultando na eliminação somente de presas (A), $\theta = 1$; após a predação e eliminando somente presas (B), $T_m = 0.05$; após a predação, porém eliminando também os predadores (C), $T_m = 0.05$ e antes da predação, porém eliminando também os predadores (D), $i' = 1$

5.2.2 Resultados e discussão

O parâmetro i foi analisado no que diz respeito à sua sensibilidade às mudanças na sua magnitude. A análise foi feita empregando-se a teoria de bifurcação (MAY; OSTER, 1976). Os diagramas de bifurcação (Fig. 12) dão uma descrição global do espaço paramétrico, mostrando em um único gráfico, todos os comportamentos possíveis do sistema, para todos os valores do parâmetro.

Figura 12 - Diagramas de bifurcação para análise da relação entre tamanho populacional e sobrevivência (i) influenciada pela calda sulfocálcica (pesticida) com presas exibindo crescimento irrestrito (A, D). Valores dos parâmetros são os mesmos dos utilizados na Figura 11.

Nota-se um crescimento irrestrito por parte do predador e da presa em determinada faixa do espectro paramétrico para as possibilidades 1 e 4 (Figuras 12a, 12d). Isso é devido à formulação original do modelo de Hassell (1984), que não possui dependência da densidade (Fig. 11). Assim, mesmo com a ação da calda antes da predação a população cresce ilimitadamente (Fig. 11A). Algebricamente, isso significa que quando o tamanho populacional das presas tende ao infinito, tem-se:

$$\lim_{p_t \rightarrow \infty} f(p_t, i, P_t) = \lim_{p_t \rightarrow \infty} \left[1 + \frac{aP_t}{k(1 + a\theta p_t i)} \right]^{-k} = 1 \text{ e}$$

$$\lim_{p_t \rightarrow \infty} f(p_t, i, P_t, i^*) = \lim_{p_t \rightarrow \infty} \left[1 + \frac{aP_t i^*}{k(1 + ap_t i)} \right]^{-k} = 1,$$

implicando, para o predador, em extinção, pois

$$\lim_{p_t \rightarrow \infty} [1 - f(p_t, i, P_t)] = 0 \text{ e } \lim_{p_t \rightarrow \infty} [1 - f(p_t, i, P_t, i^*)] = 0.$$

Assim, sendo o predador o único fator limitante para o sistema e considerando que parte da população de presas, apesar de atingida pelo produto, não sofre mortalidade integral, observa-se que o crescimento da população de praga (presa) não tem contenção. Contudo, as formulações propostas não caracterizam a dinâmica de um sistema real, pois, conforme presas aumentam infinitamente, predadores são extintos. O evento esperado seria o crescimento das presas sendo acompanhado pelo predador, por tratar-se do recurso exclusivo e necessário à subsistência populacional, como se vê nas possibilidades descritas pelas Figuras 11B,C, 12B e C.

Introduzindo dependência da densidade

Ao investigar a dinâmica com $i = 0.52$ (Figura 13), nota-se que a amplificação do espectro aparece na região de transiência, dada por um período em que o comportamento dinâmico ainda não está consolidado, que se estende por mais de 700 gerações. A figura mostra essencialmente um processo de estabilização, dada pela tendência do sistema oscilante tornar-se

estável, em um único ponto. Isso, no contexto de manejo de pragas deve ser considerado importante no tocante ao planejamento de estratégias de controle (KIDD; AMARASEKARE, 2011). No início da implantação do controle, pode haver diferentes tipos de comportamento dinâmico, todos importantes para que a estratégia implementada seja reavaliada e, posteriormente, reestruturada.

Figura 13 - Dinâmica transiente indicando comportamento assintótico tendendo à estabilidade para presa e predador. Parâmetros: $r = 2$, $a = 1$, $k = 0.6$, $T_m = 0.05$, $i = 0.52$, $p = 25$, $P = 10$

Para corrigir o efeito resultante da explosão populacional de presas nos modelos propostos por Hassel (1984), a dependência da densidade pode ser inserida, sob forma do parâmetro K , que representa a capacidade de suporte do agroecossistema. Assim, os modelos são escritos da seguinte forma:

- Possibilidade 1:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) i f(p_t, i, P_t) \quad (24)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) i [1 - f(p_t, i, P_t)] \quad (25) ;$$

- Possibilidade 2:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) f(p_t, P_t) i \quad (26)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) [1 - f(p_t, P_t)] \quad (27) ;$$

- Possibilidade 3:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) f(p_t, P_t) i \quad (28)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) i [1 - f(p_t, P_t)] \quad (29) ;$$

- Possibilidade 4:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) i f(p_t, i, P_t, i^*) \quad (30)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) i [1 - f(p_t, i, P_t, i^*)] \quad (31)$$

As dinâmicas simuladas para as equações 24 à 31 mostram que a inserção da capacidade suporte, dada pelo termo K , gera estabilidade maior no sistema (Figura 14), contornando o problema decorrente do crescimento ilimitado de presas.

Figura 14 - Recorrência no tempo para a dinâmica predador presa incluindo dependência da densidade e efeitos da aplicação de produto químico antes da liberação de predadores resultando na eliminação somente de presas (A), após a predação e eliminando somente presas (B), após a predação, porém eliminando também predadores (C) e antes da predação, porém eliminando também predadores (D). Valores dos parâmetros idênticos aos da Figura 11, exceto para $r = 4$. Nesta simulação foi incluído o parâmetro $K = 200$, correspondente à capacidade suporte

A análise de sensibilidade do parâmetro i revela equilíbrio estável para a espécie predadora (linha vermelha contínua) e comportamento dinâmico caracterizado pela perda da

estabilidade para a presa (linhas em preto) com a diminuição da magnitude do efeito da calda (i se aproxima de 1). Com $i = 1$ significa que a sobrevivência da presa é máxima, ou seja, a calda não causou nenhuma mortalidade. O resultado do efeito pode ser visto no diagrama de bifurcação (Figuras 15a, d). Com alta influência do efeito da calda sobre a sobrevivência populacional, o resultado observado é o equilíbrio estável de um ponto (lado esquerdo do gráfico). Com o aumento do valor do parâmetro, há uma duplicação de período, resultando em ciclo limite de dois pontos. Novas duplicações de período ocorrem em função dos valores superiores de i , resultando em comportamento caótico (Figuras 15a, d). Nota-se que a transiência também não foi completamente eliminada para produzir os diagramas das Figuras 15b e 15c (valores de i entre 0.2 e 0.4 dados pelos pontos verticais em preto para a presa). Para as possibilidades 2 e 3 (Figuras 15b, c), os diagramas de bifurcação indicam um equilíbrio estável de um ponto em quase todo o espectro de valores atribuídos ao parâmetro i .

Figura 15 - Diagramas de bifurcação para a análise de sensibilidade da sobrevivência influenciada pela aplicação do produto (i). Valores dos parâmetros idênticos aos valores da Figura 14.

Introduzindo estocasticidade

Os modelos até agora apresentados são caracterizados como determinísticos, isto é, todos os parâmetros são fixos durante todos os passos de tempo. É possível introduzir um efeito estocástico em um ou mais parâmetros, fazendo-os variar ao longo do tempo segundo alguma distribuição estatística (SERRA et al., 2007). Isso retrataria efeitos do acaso ou perturbações ao longo do tempo que podem acontecer no sistema. Ao deixar os parâmetros referentes à sobrevivência influenciada pelo produto químico variarem segundo uma distribuição normal, obtêm-se as seguintes equações:

- Possibilidade 1:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) i f(p_t, i, P_t), i \sim N(\mu, \sigma) \quad (32)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) i [1 - f(p_t, i, P_t)], i \sim N(\mu, \sigma) \quad (33);$$

- Possibilidade 2:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) f(p_t, P_t) i, i \sim N(\mu, \sigma) \quad (34)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) [1 - f(p_t, P_t)], i \sim N(\mu, \sigma) \quad (35);$$

- Possibilidade 3:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) f(p_t, P_t) i, i \sim N(\mu, \sigma) \quad (36)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) i [1 - f(p_t, P_t)], i \sim N(\mu, \sigma) \quad (37);$$

- Possibilidade 4:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) i f(p_t, i, P_t, i^*), i \sim N(\mu_i, \sigma_i), i^* \sim N(\mu_{i^*}, \sigma_{i^*}) \quad (38)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) i [1 - f(p_t, i, P_t, i^*)], i \sim N(\mu_i, \sigma_i), i^* \sim N(\mu_{i^*}, \sigma_{i^*}) \quad (39).$$

Limitando os possíveis valores sorteados para i e i^* , segundo a distribuição normal, entre 0 e 1, pode-se simular os efeitos de uma eficiência instável da calda aplicada. Assim, observando-

se as dinâmicas apresentadas na Figura 16, nota-se que a dinâmica predador presa é caracterizada por oscilações instáveis advindas da estocasticidade.

Figura 16 - Recorrência no tempo para a dinâmica predador presa incluindo dependência da densidade, estocasticidade, efeitos da aplicação de calda antes da liberação de predadores resultando na eliminação somente de presas (A), após a predação e eliminando somente presas (B), após a predação, porém eliminando também os predadores (C) e antes da predação, porém eliminando também os predadores (D).

Valores dos parâmetros idênticos à Figura 14. Estocasticidade em i e i' , seguindo distribuição normal com média igual à 0.5 e variância igual à 0.01

Introduzindo periodicidade de aplicação da calda

Diversos estudos utilizaram funções para introduzir efeitos periódicos em modelos (BANKS et al., 2008, ZHANG et al., 2008). Supondo um cenário de aplicação periódica de calda sulfocálcica, o efeito residual resultante da aplicação diminui até o momento da próxima aplicação. Um caso, no qual a calda é aplicada a cada 20 dias com efeito residual variando de 1 (aplicação) até 0,5 (Figura 17), pode ser modelado com uma função trigonométrica:

$$I(t) = 0,75 + 0,25 \cos\left(\frac{t\pi}{10}\right) \quad (40).$$

A função é introduzida no modelo no lugar do parâmetro i , de modo a gerar os modelos:

- Possibilidade 1:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) I(t) f(p_t, I(t), P_t) \quad (41)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) I(t) [1 - f(p_t, I(t), P_t)] \quad (42)$$

- Possibilidade 2:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) f(p_t, P_t) I(t) \quad (43)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) [1 - f(p_t, P_t)] \quad (44)$$

- Possibilidade 3:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) f(p_t, P_t) I(t) \quad (45)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) I(t) [1 - f(p_t, P_t)] \quad (46)$$

- Possibilidade 4:

$$p_{t+1} = rp_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) I(t) f(p_t, I(t), P_t, i^*) \quad (47)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) I(t) [1 - f(p_t, I(t), P_t, i^*)] \quad (48)$$

Figura 17 - Periodicidade de aplicação de calda no sistema

A Figura 18 (a,b,c,d) descreve a dinâmica do sistema predador-presa incluindo a periodicidade de aplicação do produto químico em modelo com capacidade suporte. Das quatro possibilidades analisadas as Figuras 18b e 18c descrevem as melhores trajetórias para predador e presa. Isto reflete oscilações recorrentes situando-se em tamanhos populacionais de baixa magnitude, porém indicando sustentabilidade ao sistema, o que caracteriza comportamento dinâmico representado por ciclos periódicos estáveis.

A esses modelos pode ser introduzida estocasticidade no efeito da calda, a partir da reintrodução do parâmetro i , distribuído normalmente ao longo do tempo:

- Possibilidade 1:

$$p_{t+1} = r p_t \left(1 - \frac{P_t}{K}\right) I(t) i f(p_t, I(t), i, P_t), i \sim N(\mu, \sigma) \quad (49)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) I(t) i [1 - f(p_t, I(t), i, P_t)], i \sim N(\mu, \sigma) \quad (50)$$

- Possibilidade 2:

$$p_{t+1} = r p_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) f(p_t, P_t) I(t) i, i \sim N(\mu, \sigma) \quad (51)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) [1 - f(p_t, P_t)], i \sim N(\mu, \sigma) \quad (52)$$

- Possibilidade 3:

$$p_{t+1} = r p_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) f(p_t, P_t) I(t) i, i \sim N(\mu, \sigma) \quad (53)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) I(t) i [1 - f(p_t, P_t)], i \sim N(\mu, \sigma) \quad (54)$$

- Possibilidade 4:

$$p_{t+1} = r p_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) I(t) i f(p_t, I(t), i, P_t, i^*), i \sim N(\mu_i, \sigma_i), i^* \sim N(\mu_{i^*}, \sigma_{i^*}) \quad (55)$$

$$P_{t+1} = p_t \left(1 - \frac{p_t}{K}\right) I(t) i [1 - f(p_t, I(t), i, P_t, i^*)], i \sim N(\mu_i, \sigma_i), i^* \sim N(\mu_{i^*}, \sigma_{i^*}) \quad (56),$$

com

$$f(p_t, I(t), i, P_t) = \left[1 + \frac{a P_t}{k(1 + a(p_t I(t) i))}\right]^{-k} \quad (57)$$

$$f(p_t, I(t), i, p_t, i^*) = \left[1 + \frac{a P_t i^*}{k(1 + a p_t I(t) i)}\right]^{-k} \quad (58).$$

Figura 18 - Dinâmica do sistema predador-presa incluindo a periodicidade de aplicação de calda em modelo com capacidade suporta inserida. Valores dos parâmetros idênticos à Figura 14

Na Figura 19 (a,b,c,d) nota-se a dinâmica predador presa com efeito periódico da ação da calda sujeito à estocasticidade, segundo distribuição normal. É interessante notar a similaridade entre as possibilidades 1 e 4 em todas as simulações, bem como a similaridade entre as possibilidades 2 e 3. Isso é devido ao parâmetro i inserido dentro do termo da resposta funcional do predador apenas nas possibilidades 1 e 4. Isso implica em uma menor densidade de presas disponíveis para o predador, resultando em densidade menor de predadores ao longo do tempo.

Nas possibilidades 2 e 3, o predador tem toda a densidade de presas disponível no termo de resposta funcional, resultando em uma dinâmica na qual a densidade de predadores acompanha as presas mais nitidamente.

Figura 19 - Dinâmica predador presa com efeito periódico da ação da calda sujeito à estocasticidade, segundo distribuição normal. Valores dos parâmetros idênticos à Figura 21

A despeito do estudo de Hassell (1984) ter representado ótima oportunidade para investigar a combinação entre diferentes estratégias de controle de pragas no contexto da ecologia teórica, do

ponto de vista prático, nenhum estudo com modelos ecológicos realizado nas últimas décadas incorporou estratégias de manejo de pragas como fizeram recentemente Zang et al. (2008) e Tang e Cheke (2008). O modelo proposto por Tang e Cheke (2008) leva em conta as bases ecológicas apresentadas no presente estudo. Tang e Cheke (2008) incorporaram o conceito de manejo integrado às equações de Nicholson e Bailey (1935), considerando a política de monitoramento periódico de pragas e levando em conta a determinação do limiar e do nível de dano econômico (PEDIGO; ZEISS, 1996; LIMA et al., 2010). Para introduzir a estratégia de manejo integrado no sistema, Tang e Cheke (2008) consideraram que, caso o tamanho da população de pragas não atingisse o limiar de dano econômico, o sistema hospedeiro-parasitóide seria governado apenas pelo formalismo teórico proposto nas equações de Nicholson e Bailey.

O modelo proposto por Tang e Cheke (2008) foi revisitado por Lima et al. (2009), que propuseram uma extensão ao modelo, introduzindo a dimensão do espaço no sistema. Lima et al. (2009) demonstraram, numericamente, a diferença entre o modelo original proposto por Nicholson e Bailey (1935), o formalismo teórico de Tang e Cheke (2008) e a proposição do modelo com a estratégia MIP (TANG; CHEKE, 2008) recebendo a estrutura espacial por meio de mapas acoplados em reticulados (LIMA et al., 2009). Os resultados indicam que a introdução da estratégia MIP no modelo teórico permite a intervenção no tamanho populacional da espécie praga quando se estabelece um limiar de dano econômico. Além disso, o arcabouço teórico pertinente à dimensão de espaço introduzida no modelo de Tang e Cheke (2009) revela que a estrutura espacial é essencial para modelos desta natureza, já que sua introdução no sistema altera significativamente os valores de nível de dano econômico (LIMA et al., 2009).

5.3 Conclusão

Modelar sistemas tróficos não é uma tarefa trivial, sobretudo no contexto de manejo de pragas. A complexidade inerente dos agroecossistemas envolve questões multifatoriais que demandam muitas vezes análises pormenorizadas do sistema, a fim de estabelecer conduta de parametrização adequada, realçando os aspectos realmente importantes para o processo de modelagem. O desafio é então selecionar processos que descrevam, sucintamente, o sistema ao qual se pretende modelar, porém sem perder elementos básicos que o governam (SCHAALJE et al., 1989). O presente estudo serviu para apresentar e realçar as bases ecológicas essenciais para a

modelagem da dinâmica populacional de pragas e inimigos naturais, valendo-se da teoria predador-presa direcionada ao manejo integrado de pragas.

Referências

BANKS, H.T.; BANKS, J.E.; JOYNER, S.L.; STARK, J.D. Dynamic models for insect mortality due to exposure to insecticides. **Mathematical and Computer Modelling**, Oxford, v. 48, p. 316-332, 2008.

COSTA, M.I.S.; GODOY, W.A.C. **Fundamentos da ecologia teórica**. São Paulo: Manole, 2010. 66 p.

EVANS, E.W.; TOLLER, T.R. Aggregation of polyphagous predators in response to multiple prey: ladybirds (Coleoptera: Coccinellidae) foraging on alfalfa. **Population Ecology**, Tokyo, v. 49, p. 29-36, 2007.

HASSEL, M.P. Insecticides in host-parasitoid interactions. **Theoretical Population Biology**, New York, v. 26, p. 378-386, 1984.

KIDD, D.; AMARASEKARE, P. The role of transient dynamics in biological pest control: insights from a host-parasitoid community. **Journal of Animal Ecology**, Oxford, DOI: 10.1111/j.1365-2656.2011.01881.x, 2011. Disponível em: <<http://www.journalofanimalecology.org/view/0/index.html>>. Acesso em: 17 nov. 2011.

LIMA, E.A.B.F.; FERREIRA, C.P.; GODOY, W.A.C. Ecological Modeling and Pest Population Management: a Possible and Necessary Connection in a Changing World. **Neotropical Entomology**, v. 38, p. 699-707, 2009

LOTKA. **Elements of physical biology**. Baltimore: Williams and Wilkins, 1925. 460 p.

MAY, R.M.; OSTER, G.F. Bifurcations and dynamic complexity in simple ecological models. **American Naturalist**, Chicago, v. 110, p. 573-599, 1976

NICHOLSON, A.J.; BAILEY, V.A. The balance of animal populations. **Proceedings of the Zoological Society of London**, London, v. 1935, p. 551-598, 1935.

PEDIGO, L.P.; ZEISS, M.R. **Analyses in insect ecology and management**. Ames: Iowa State University Press, 1996. 168 p.

SCHAALJE, G.B.; STINNER, R.L.; JOHNSON, D.L. Modeling insect populations affected by pesticides with application to pesticide efficacy trials. **Ecological Modeling**, Amsterdam, v. 47, p. 233-263, 1989.

SERRA, H.; SILVA, I.C.R.; MANCERA, P.F.A.; FARIA, L.D.B.; ZUBEN, C.J.V.; ZUBEN, F.J.V.; REIS, S.F.; GODOY, W.A.C. Stochastic dynamics in exotic and native blowflies: an analysis combining laboratory experiments and a 2-patch metapopulation model. **Ecological Research**, Tsukuba, v. 22, p. 686-695, 2007

SOUTHWOOD, T.R.E.; HENDERSON, P.A. **Ecological methods**. Victoria: Blackwell Science, 2006. 575 p.

TANG, S.; CHEKE, R.A. Models for integrated pest control and their biological implications. **Mathematical Bioscience**, Atlanta, v. 215, p. 115-125, 2008.

VAN LENTERN, J.C. Measures of success in biological control of arthropods by augmentation of natural enemies. In: WRATTEN, S.; GURR, G. (Ed.). **Measures of success in biological control**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2000. p. 77-103.

VOLTERRA, V. Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. **Nature**, London, v. 118, p. 558-560, 1926.

ZHANG, H.; GEORGESCU, P.; CHEN, L. On the impulsive controllability and bifurcation of a predator-pest model of IPM. **Biosystems**, Amsterdam, v. 93, p. 151-171, 2008.