

XII. METODOLOGIA E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DO CONTROLE BIOLÓGICO DA BROCA-DA-CANA COM O PARASITÓIDE *TRICHOGRAMMA GALLOI*: I. MODELOS CONCEITUAIS ⁽¹⁾

GLAUCIA MARIA BOVI AMBROSANO ⁽²⁾, JERRY LYNN STIMAC ⁽³⁾,
SINVAL SILVEIRA NETO ⁽⁴⁾, TOSHIO IGUE ⁽²⁾ e VIOLETA NAGAI ⁽²⁾

RESUMO

Um modelo, compartimental e determinístico, foi desenvolvido para simular a dinâmica do sistema cana-de-açúcar-broca (*Diatrea saccharalis*-*Trichogramma galloi*-ambiente, estruturado de modo a permitir que se estude cada parte do sistema, admitindo modificações tanto nos parâmetros como nas equações, que deverão ser realizadas com o avanço das pesquisas. Após a construção dos modelos conceituais, as descrições dos processos, ou seja, as inter-relações entre seus componentes, foram representadas em equações matemáticas e codificadas em linguagem de computador (Pascal). Utilizando dados da literatura e informações de pesquisadores da área, estimaram-se os parâmetros e determinaram-se as condições iniciais para executar o programa. A seguir, foram iniciadas as simulações e a validação do modelo.

Termos de indexação: broca-da-cana, *Diatrea saccharalis*, *Trichogramma galloi*, modelo de simulação.

ABSTRACT

MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATION OF BIOLOGICAL CONTROL OF SUGARCANE BORER USING *TRICHOGRAMMA GALLOI*: I. CONCEPTUAL MODELS

A compartmental and deterministic model was developed in order to simulate the dynamic of sugarcane-borer *Diatraea saccharalis*-*Trichogramma galloi* complex in sugarcane production system. The mathematical model allows to study each part

⁽¹⁾ Trabalho realizado com apoio financeiro da FAPESP. Recebido para publicação em 24 de novembro de 1995 e aceito em 3 de junho de 1996.

⁽²⁾ Seção de Técnica Experimental e Cálculo, IAC, Caixa Postal 28, 13001-970 Campinas (SP).

⁽³⁾ Universidade da Flórida, EUA.

⁽⁴⁾ Departamento de Entomologia, ESALQ/USP, Caixa Postal 9, 13418-900 Piracicaba (SP).

of the system and also to modify parameters and equations according to the evolution of the research data. After the conceptual models were created the processes, i.e., the interrelations among the systems were represented by mathematical equations and coded to microcomputer Pascal language. The parameters used in the equations and the initial conditions for running the program were obtained from references in the literature and personal information of researchers.

Index terms: sugarcane borer, *Diatrea saccharalis*, *Trichogramma galloi*, mathematical model.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é, atualmente, o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, mas, em nossas condições climáticas, essa cultura é atacada por grande número de pragas, das quais, para o Estado de São Paulo, a principal é a broca-da-cana, *Diatraea saccharalis* (Lep., Pyralidae), cujos danos são responsáveis por relevantes perdas na produção de álcool e açúcar.

Entre os vários inimigos naturais de *D. saccharalis* que atacam as diferentes fases do seu ciclo biológico, os parasitóides de ovos, do gênero *Trichogramma* (Hym., Trichogrammatidae), estão sendo estudados para ser uma opção a mais no controle da praga.

Esses inimigos naturais têm sido utilizados em liberações inundativas, em vários países, para o controle de grande número de pragas de importância agrícola. No Brasil, considerando a abundância de *Trichogramma*, que ocorre naturalmente no campo, as perspectivas para o controle com seu uso são muito favoráveis (Parra & Zucchi, 1986; Parra et al., 1987).

Nos últimos anos, tem havido um aumento na aplicação de análise de sistemas e simulação para estudos de problemas agrícolas. Isso se justifica pelo fato de que os sistemas agrícolas são compostos de numerosas interações de componentes e, com o uso de um modelo de simulação, podem ser mais bem compreendidos e os seus comportamentos mais bem descritos, pois o pesquisador passa a ter uma visão do sistema como um todo. Dessa forma, é possível, também, detectar se há falta de dados ou teorias adequadas, identificar entradas, parâmetros e processos e ganhar consideráveis informações para condução das pesquisas, pelos processos de descrição e análise dos sistemas (Jones et al., 1980).

Modelos de graus-dias são ferramentas já avaliadas e bem aceitas para programas de manejo de pragas (Taylor, 1981; Pruess, 1983).

Weidhass & Haile (1980) enfatizaram a importância da modelagem e simulação em computador, para pesquisas e controle de insetos, apresentando um resumo de modelos publicados, métodos de modelagem e simulação.

Segundo Stimac (1982), os computadores têm sido utilizados para organizar e executar modelos complexos de simulação, os quais são úteis na previsão de populações de pragas e seu impacto nas culturas. Segundo o autor, um dos maiores problemas no desenvolvimento desses modelos é a grande quantidade de informações necessárias.

Com o desenvolvimento de modelos mais sofisticados, os computadores estão tendo papel cada vez mais importante no manejo de pragas. Na Flórida, são utilizados para fornecer mais rapidamente as informações necessárias para tomada de decisões (Stimac, 1990).

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um modelo de simulação do sistema cana-de-açúcar-broca-*Trichogramma*-ambiente, estruturado de modo a permitir que se estude cada parte do sistema e, principalmente, possibilite modificações tanto nos parâmetros como nas equações, as quais deverão ser realizadas com o avanço da pesquisa.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir o objetivo proposto, foi desenvolvido um modelo compartimental, determinístico, para simulação da dinâmica do sistema.

Inicialmente, foi construído um modelo conceitual geral para definir as entradas e as saídas de cada parte dos subsistemas, chamados "coupling".

Utilizando-se os dados obtidos por levantamento bibliográfico, sobre a broca, o parasitóide e os fatores climáticos, foi construído um modelo compartimental, em que os compartimentos representam as fases do ciclo dos insetos.

Após a determinação dos componentes do sistema, dos dados necessários para o desenvolvimento do modelo e da precisão dos dados a utilizar, foram formuladas as hipóteses, ou seja, as inter-relações entre os componentes do sistema, isto é, a estrutura que o modelo deve ter para conseguir os objetivos.

Os passos seguintes foram os de formulação - a representação das hipóteses em equações matemáticas - e de codificação - a tradução do modelo em uma linguagem de computador, sendo Pascal a utilizada.

A seguir, foram iniciadas as simulações, ou seja, a execução, em computador, do modelo desenvolvido, para verificar a sua exatidão. Nessa fase, empregou-se um microcomputador PC-486 e o compilador Pascal, além do programa Harvard Graphics para a elaboração dos gráficos.

Na primeira verificação, foram determinados e corrigidos os erros na codificação, ou seja, os erros de sintaxe do programa de computador. Na segunda, foi observado se a codificação estava representando as equações matemáticas formuladas. A terceira verificação, chamada de validação I, visou confirmar se a formulação estava representando as hipóteses.

As avaliações feitas até este ponto garantiram um modelo livre de erros matemáticos, computacionais e numéricos.

Na segunda validação, verificou-se se as hipóteses estavam corretas. Para isso, foram usados dados que não haviam sido incluídos na construção do modelo. Essa fase foi dividida em duas partes: **validação qualitativa**, pela qual se observou se o resultado da simulação estava acompanhando a dinâmica dos insetos no campo, e **validação quantitativa**, na qual se comparam os dados simulados com os observados quantitativamente, a fim de calibrar o modelo.

O primeiro modelo desenvolvido foi para a dinâmica da broca, em laboratório, considerando temperatura fixa e sem mortalidade, em função de fatores como predação e parasitismo.

Concluídos todos os passos descritos acima, ou seja, após a validação desse modelo, foi acrescentada a variação da temperatura e novamente feitas as verificações. Assim, o procedimento adotado consistiu em validar o modelo a cada variável introduzida.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Modelos conceituais

O modelo conceitual geral - Figura 1 - foi simplificado - Figura 2 - e apresenta as partes do sistema que irão compor o modelo final, com a identificação das entradas e saídas de cada subsistema.

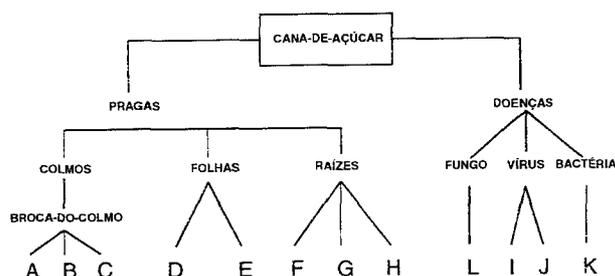


Figura 1. Modelo conceitual geral do sistema. **A:** broca-da-cana; **B:** broca gigante; **C:** broca pequena; **D:** cigarrinha; **E:** pulgões; **F:** percevejo; **G:** cigarrinha; **H:** nematóides; **I:** mosaico; **J:** raquitismo; **K:** escaldadura, e **L:** fungos.

Com o auxílio da figura 2, foram determinados os dados necessários para desenvolver o modelo dessa parte do sistema, representados pelas setas, ou seja, a influência do ambiente (temperatura, umidade, fotoperíodo) na cultura da cana-de-açúcar, no desenvolvimento da broca *Diatraea saccharalis* (Lep., Pyralidae) e do parasitóide *Trichogramma galloi* (Hym., Trichogrammatidae); a influência da broca na cultura da cana-de-açúcar e da cultura no desenvolvimento da broca; a influência da praga na população do parasitóide e vice-versa e a influência da cultura no parasitóide.

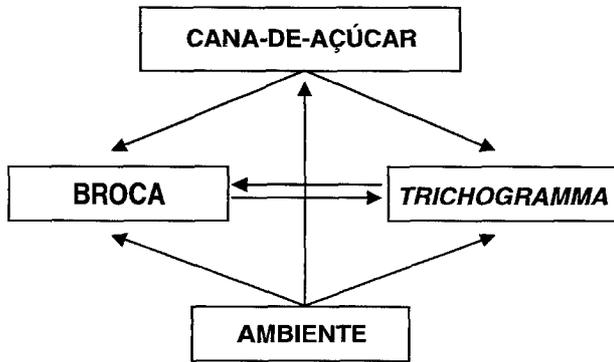


Figura 2. Modelo conceitual simplificado do sistema

Após novo levantamento bibliográfico, foram coletados os dados que permitiram a construção do modelo apresentado na figura 3.

O modelo foi desenvolvido para simular um lote, com cana-planta de ano e meio, considerando as migrações de adultos (imigração e emigração), de forma estruturada e que simula diariamente as mudanças nas populações da praga e do parasitóide, permitindo que sejam estudadas todas as partes que o compõem e se façam modificações, tanto nos parâmetros como nas equações.

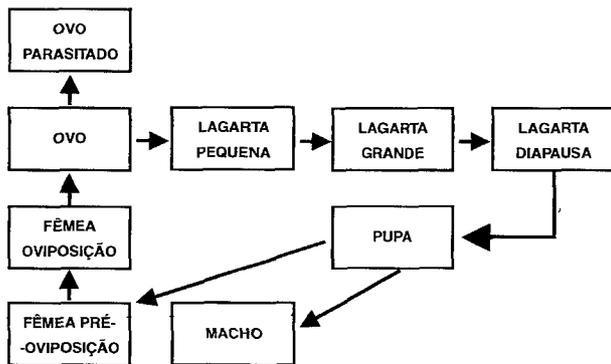


Figura 3. Modelo conceitual do subsistema broca-Trichogramma.

3.2. Equações para o modelo da broca-da-cana

As equações que compõem o modelo, para cada estágio de desenvolvimento do inseto, são apresentadas como fluxos que constituem a passagem de um estágio para outro diariamente.

3.2.1 Equação geral dos fluxos

$$f_{i,j} = X_i \cdot KP_i \cdot (1 - g_i)$$

onde:

$f_{i,j}$ é o fluxo do estágio i para o j ;

X_i é o número de indivíduos no estágio i ;

KP_i é a proporção diária de graus-dias para completar o desenvolvimento dos indivíduos no estágio i ;

g_i é a proporção diária de mortalidade dos indivíduos do estágio i .

3.2.2 Fase de ovo

$$f_{1,2} = X_1 \cdot KP_1 \cdot (1 - g_{11})$$

$$KP_1 = (TE - 11,2) / 64,47$$

$$g_{11} = f(g_{12} \quad g_{13} \quad g_{14} \quad b_{11} \quad b_{12})$$

$$g_{12} = f(g_{15} \quad g_{16} \quad g_{17} \quad g_{18})$$

$$g_{13} = 1$$

$$g_{14} = 21,8$$

$$\text{Se: } TE \leq 20^\circ\text{C}$$

$$[(TE - 20) \cdot (8,1)] / 2 + 21,8$$

$$\text{Se: } 20^\circ\text{C} < TE \leq 22^\circ\text{C}$$

$$[(25 - TE) \cdot (11,1)] / 3 + 18,8$$

$$\text{Se: } 22^\circ\text{C} < TE \leq 25^\circ\text{C}$$

$$[(30 - TE) \cdot (5,5)] / 5 + 13,3$$

$$\text{Se: } 25^\circ\text{C} < TE \leq 30^\circ\text{C}$$

$$[(TE - 30) \cdot (9,8)] / 2 + 13,3$$

$$\text{Se: } 30^\circ\text{C} < TE \leq 32^\circ\text{C}$$

$$8,11$$

$$\text{Se: } TE \geq 32^\circ\text{C}$$

$$g_{15} = 20,0$$

$$\text{Se: } TE \leq 18^\circ\text{C}$$

$$[(TE - 18) \cdot (7,24)] / 2 + 20,0$$

$$\text{Se: } 18^\circ\text{C} < TE \leq 20^\circ\text{C}$$

$$[(22 - TE) \cdot (0,3)] / 2 + 26,91$$

$$\text{Se: } 20^\circ\text{C} < TE \leq 22^\circ\text{C}$$

$$[(TE - 22) \cdot (9,52)] / 8 + 26,91$$

$$\text{Se: } 22^\circ\text{C} < TE \leq 30^\circ\text{C}$$

g15

$$[(TE - 30) \cdot (7,16)] / 2 + 36,43$$

Se: $30^{\circ}\text{C} < TE \leq 32^{\circ}\text{C}$

43,59

Se: $TE \geq 32^{\circ}\text{C}$

g18 =

$$[PR \cdot (56,56)] / 0,40$$

Se: $PR \leq 0,40$

$$[(0,80 - PR) \cdot (2,5)] / 0,40 + 54,06$$

Se: $0,40 < PR \leq 0,80$

$$[(TE - 0,80) \cdot (18,99)] / 0,8 + 54,06$$

Se: $0,80 < PR \leq 1,60$

$$[(TE - 1,60) \cdot (12,29)] / 6 + 73,05$$

Se: $1,60 < PR \leq 3,20$

85,34

Se: $PR \geq 3,2$

g16 = 1

g17 = 1

onde:

f_{1,2} é o fluxo de ovos para lagartas pequenas;

X₁ é o número de ovos;

KP₁ é a proporção de desenvolvimento da fase de ovos;

TE é a temperatura ambiente °C;

g₁₁ é a proporção de mortalidade de ovos;

g₁₂ é a proporção de mortalidade devida a parasitóides;

g₁₃ é a proporção de mortalidade em função da umidade;

g₁₄ é a proporção de mortalidade em função da temperatura;

g₁₅ é a proporção de mortalidade devida aos parasitóides, em função da temperatura;

g₁₆ é a proporção de mortalidade devida a parasitóides, em função da umidade;

g₁₇ é a proporção de mortalidade devida a parasitóides, em função da variedade de cana;

g₁₈ é a proporção de mortalidade devida a parasitóides, em função da proporção de adultos de *Trichogramma*/ovos de *Diatraea*;

b₁₁ é a proporção de mortalidade devida a predadores;

b₁₂ é a proporção de mortalidade devida a doenças;

PR é a proporção de parasitóides por ovo de *D. saccharalis*.

3.2.3. Fase de lagartas pequenas

$$f_{2,3} = X_2 \cdot KP_2 \cdot (1 - g_{22})$$

$$KP_2 = (TE - 7,2) / 258,48$$

$$g_{22} = f(g_{23} \ b_{21} \ b_{22} \ b_{23} \ b_{24})$$

$$g_{23} = 1,25$$

Se: $TE \leq 20^{\circ}\text{C}$

$$[(TE - 20) \cdot (3,85 - 2,25)] / 2 + 1,25$$

Se: $20^{\circ}\text{C} < TE \leq 22^{\circ}\text{C}$

$$[(30 - TE) \cdot (3,85 - 0,95)] / 2 + 0,95$$

Se: $22^{\circ}\text{C} < TE \leq 30^{\circ}\text{C}$

$$[(TE - 30) \cdot (8,11 - 0,95)] / 2 + 0,95$$

Se: $30^{\circ}\text{C} < TE \leq 32^{\circ}\text{C}$

8,11

Se: $TE \geq 32^{\circ}\text{C}$

onde:

f_{2,3} é o fluxo de lagartas pequenas para lagartas grandes;

X₂ é o número de lagartas pequenas;

KP₂ é a proporção de desenvolvimento da fase de lagarta pequena;

TE é a temperatura ambiente (°C);

g₂₂ é a proporção de mortalidade de lagartas pequenas;

g₂₃ é a proporção de mortalidade em função da temperatura;

b₂₁ é a proporção de mortalidade devida a predadores;

b₂₂ é a proporção de mortalidade devida a parasitóides;

b₂₃ é a proporção de mortalidade devida a doenças;

b₂₄ é a proporção de mortalidade devida a fatores desconhecidos.

3.2.4. Fase de lagarta grande

$$f_{3,4} = X_3 \cdot KP_3 \cdot (1 - g_{32})$$

$$KP_3 = (TE - 7,3) / 258,48$$

$$g_{32} = (g_{33} \ b_{31} \ b_{32} \ b_{33} \ b_{34})$$

$$g_{33} = 5,35$$

$$\text{Se: } TE \leq 20^\circ\text{C}$$

$$[(30 - TE) \cdot (2,25)] / 10 + 3,10$$

$$\text{Se: } 20^\circ\text{C} < TE \leq 30^\circ\text{C}$$

$$[(TE - 30) \cdot (4,49)] / 2 + 7,59$$

$$\text{Se: } 30^\circ\text{C} < TE \leq 32^\circ\text{C}$$

$$7,59$$

$$\text{Se: } TE \geq 32^\circ\text{C}$$

onde:

$f_{3,4}$ é o fluxo de lagartas grandes para pupas;

x_3 é o número de lagartas grandes;

KP_3 é a taxa de desenvolvimento da fase de lagartas grandes;

TE é a temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$);

g_{32} é a proporção de mortalidade de lagartas grandes;

g_{33} é a proporção de mortalidade em função da temperatura;

b_{31} é a proporção de mortalidade devida a predadores;

b_{32} é a proporção de mortalidade devida a parasitóides;

b_{33} é a proporção de mortalidade devida a doenças;

b_{34} é a proporção de mortalidade devida ao corte da cana.

3.2.5. Fase de pupa

$$f_{4,5} = X_4 \cdot KP_4 \cdot (1 - g_{42}) \cdot (1 - b_{42})$$

$$f_{4,6} = X_4 \cdot KP_4 \cdot (1 - g_{42}) \cdot b_{42}$$

$$KP_4 = (TE - 10,6) / 126,08$$

$$g_{42} = f(g_{43} \ g_{44} \ b_{41} \ b_{43} \ b_{44} \ b_{45})$$

$$g_{43} = 0,14$$

$$\text{Se: } TE \leq 20^\circ\text{C}$$

$$[(TE - 20) \cdot (0,078)] / 2 + 0,14$$

$$\text{Se: } 20^\circ\text{C} < TE \leq 22^\circ\text{C}$$

$$0,201$$

$$\text{Se: } 22^\circ\text{C} < TE \leq 30^\circ\text{C}$$

$$[(TE - 30) \cdot (0,251)] / 2 + 0,1912$$

$$\text{Se: } 30^\circ\text{C} < TE \leq 32^\circ\text{C}$$

$$0,442$$

$$\text{Se: } TE \geq 32^\circ\text{C}$$

$$g_{44} = 1$$

onde:

$f_{4,5}$ é o fluxo de pupas para machos;

$f_{4,6}$ é o fluxo de pupas para fêmeas em pré-oviposição;

X_4 é o número de pupas;

KP_4 é a taxa de desenvolvimento da fase de pupa;

TE é a temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$);

g_{42} é a proporção de mortalidade de pupas;

g_{43} é a proporção de mortalidade em função da temperatura;

g_{44} é a proporção de mortalidade em função da umidade;

b_{41} é a proporção de mortalidade devida a predadores;

b_{42} é a razão sexual;

b_{43} é a proporção de mortalidade devida a doenças;

b_{44} é a proporção de mortalidade devida à má-formação;

b_{45} é a proporção de mortalidade devida a fatores desconhecidos.

3.2.6. Fêmeas

$$f_{6,7} = X_6 \cdot KP_6 \cdot (1 - g_{61})$$

$$f_{7,1} = f(X_7 \ g_{62} \ g_{63})$$

$$KP_6 = (TE - 7,1) / 172,08$$

$$g_{61} = f(g_{64} \ b_{65})$$

$$g_{62} = 0,90$$

Se: $TE \leq 20^{\circ}C$

$$[(TE - 20) \cdot (0,10)] / 2 + 0,90$$

Se: $20^{\circ}C < TE \leq 22^{\circ}C$

$$[(30 - TE) \cdot (0,24)] / 8 + 0,769$$

Se: $22^{\circ}C < TE \leq 30^{\circ}C$

$$0,769$$

Se: $TE \geq 30^{\circ}C$

$$g_{63} = 607,8$$

Se: $TE \leq 20^{\circ}C$

$$[(25 - TE) \cdot (201,8)] / 5 + 406$$

Se: $20^{\circ}C < TE \leq 25^{\circ}C$

$$[(30 - TE) \cdot (123)] / 5 + 283$$

Se: $25^{\circ}C < TE \leq 30^{\circ}C$

$$283$$

Se: $TE \geq 30^{\circ}C$

$$g_{64} = 0,0318$$

Se: $TE \leq 25^{\circ}C$

$$[(TE - 25) \cdot (0,09)] / 5 + 0,02$$

Se: $25^{\circ}C < TE \leq 30^{\circ}C$

$$[(TE - 30) \cdot (0,192)] / 2 + 0,11$$

Se: $30^{\circ}C < TE \leq 32^{\circ}C$

$$0,302$$

Se: $TE \geq 32^{\circ}C$

$$g_{65} = 1$$

onde:

$f_{6,7}$ é o fluxo de fêmeas para o compartimento de fêmeas em oviposição;

$f_{7,1}$ é o fluxo de entrada no compartimento de ovos;

X_6 é o número de fêmeas em pré-oviposição;

X_7 é o número de fêmeas em oviposição;

KP_4 é a taxa de desenvolvimento da fase de pupa;

TE é a temperatura ambiente ($^{\circ}C$);

g_{61} é a proporção de mortalidade de fêmeas em pré-oviposição;

g_{62} é a proporção de fêmeas férteis em função da temperatura;

g_{63} é o número de ovos por fêmea em função da temperatura;

g_{64} é a proporção de mortalidade devida a deformações genéticas;

b_{65} é a proporção de mortalidade devida a fatores desconhecidos.

3.3. Validação do modelo da broca em condições de laboratório (Validação - série 1)

Essas equações foram codificadas em linguagem Pascal. Na primeira versão, o modelo simula uma população no laboratório, onde todas as variáveis ambientais são controladas e somente se considera a mortalidade intrínseca da espécie. Foram realizadas simulações, comparando-se os resultados com os de trabalhos publicados.

Nas primeiras simulações, observaram-se algumas durações fora do intervalo de variação. Analisando o modelo, nota-se que, como o tempo é sempre um número inteiro, o que não acontece com a duração calculada ($D = K/TE - TB$), a passagem de uma classe para outra ocorre quando o tempo atinge um valor inteiro, superior ao calculado, sendo perdidas as decimais da duração.

Assim, por exemplo, se $D = 8,75$, o inseto deveria permanecer 1,75 dia em cada classe (considerando 5 classes), mas como o tempo de simulação é de um dia, a passagem ocorre após 2 dias quando o "grau-dia" acumulado for maior que $K/5$. Permanecendo 2 dias em cada fase, o período passa a ser de 10 dias e, não, de 8,75, como deveria ser; esse ponto fica, portanto, fora do intervalo de variação, sendo o ciclo do inseto alongado.

As duas soluções propostas para esse problema foram: mudar o tempo de simulação para 0,1 dia em vez de 1 dia, ou utilizar um acumulador para esse resíduo.

As duas modificações foram feitas e, na comparação dos resultados, observou-se que ambas eram eficientes. Optou-se, então, pela segunda alternativa, por não haver valores dos parâmetros com resolução de 0,1 dia.

Novas simulações foram realizadas e, comparando-se os resultados com dados experimentais, verificou-se que os dados simulados estavam dentro do intervalo de variação de dados observados (Figura 4) e que a mesma quantidade de ovos que entrava chegava à fase adulta, ou seja, não estavam ocorrendo perdas nas passagens entre classes nem entre compartimentos.

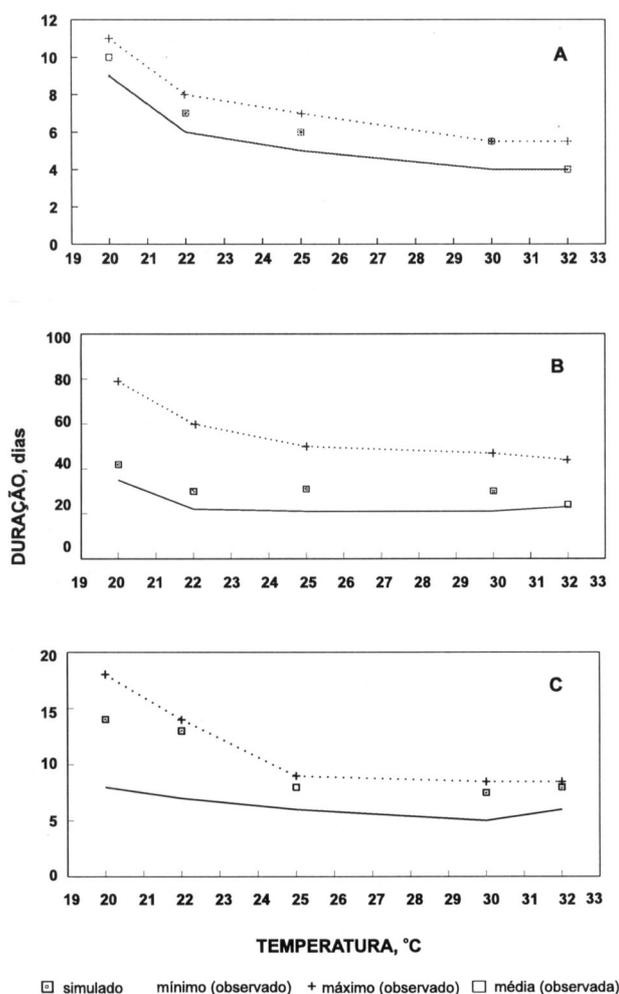


Figura 4. Duração das fases de ovos (A), lagartas (B) e pupas (C) (simulada e observada por Melo, 1984).

As equações foram então alteradas, levando-se em consideração a mortalidade dentro de cada fase. Comparando-se os valores simulados com os observados, corrigiram-se os erros de sintaxe do programa e foi introduzida a variável temperatura, ou seja, a temperatura passou a ser variável com o decorrer do tempo.

Da mesma forma, foram introduzidas as demais variáveis e incorporados outros parâmetros, sempre validando após cada modificação.

3.4. Equações do modelo do *Trichogramma*

As equações de parasitismo dos ovos com *Trichogramma* foram, então, acrescentadas ao modelo.

$$f_{1,9} = X_1 \cdot g_{18}$$

$$g_{18} = [\text{PR} \cdot (56,56)] / 0,40$$

$$\text{Se: PR} \leq 0,40$$

$$[(0,80 - \text{PR}) \cdot (2,5)] / 0,40 + 54,06$$

$$\text{Se: } 0,40 < \text{PR} \leq 0,80$$

$$[(\text{TE} - 0,80) \cdot (18,99)] / 0,80 + 54,06$$

$$\text{Se: } 0,80 < \text{PR} \leq 1,60$$

$$[(\text{TE} - 1,60) \cdot (12,29)] / 1,6 + 73,05$$

$$\text{Se: } 1,60 < \text{PR} \leq 3,20$$

$$85,34$$

$$\text{Se: PR} \geq 3,2$$

onde:

$f_{1,9}$ é o fluxo de ovos para ovos parasitados;

X_1 é o número de ovos;

TE é a temperatura ambiente (°C);

g_{18} é a proporção de mortalidade devida aos parasitoides, em função da proporção adultos de *Trichogramma* ovo de *Diatraea*.

PR é a proporção de parasitoides por ovo de *D. saccharalis*.

3.5. Validação do modelo em condições de campo (série 2)

Nesse ponto, todas as variáveis possíveis estavam incluídas no modelo, e as de que não se tinham informações, zeradas.

Passou-se, então, para a fase das validações, comparando-se com levantamentos de campo.

As mortalidades das diversas fases (Figura 5) foram calculadas a partir de diversas equações, sendo assim verificada a exatidão dos cálculos. Observou-se que a mortalidade de ovos varia em torno de 70%, valor próximo ao obtido por Macedo et al. (1978), Teran (1980) e Degaspari et al. (1983). A mortalidade de lagartas pequenas varia em torno de 90%, a de lagartas grandes, cerca de 95% e a de pupas, de 35%.

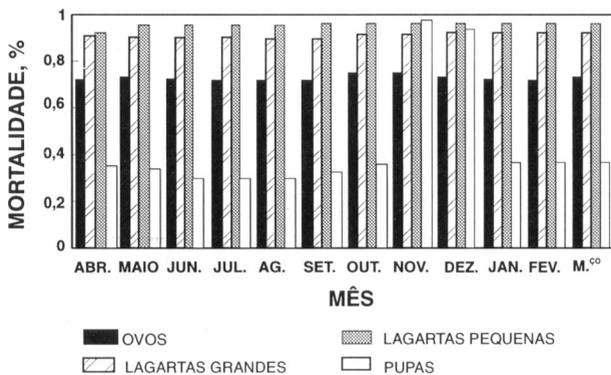


Figura 5. Porcentagem de mortalidade das diferentes fases no decorrer do ano.

A duração de cada fase do ciclo para essas condições simuladas é apresentada na figura 6-A. A fase de ovo variou de 7 a 13 dias; a de lagarta pequena, de 11 a 23 dias; a de lagarta grande, de 15 a 33 dias, e a de pupa, de 11 a 13 dias, com 5 gerações no ano. Segundo Botelho (1985), o período de ovo varia de 7 a 12 dias; o de lagarta, de 50 a 90 dias e, o de pupa, de 10 a 11 dias. Bergamin (1948, 1964) observou um período de incubação de 5 a 8 dias, período larval de 23 a 64 dias e pupal de 6 a 14 dias, sendo estimada a ocorrência de 4 a 5 gerações no ano.

A duração do ciclo de ovo a adulto (Figura 6-B) varia de 43 a 74 dias, tendo-se observado 5 gerações da praga no ano. Caminha Filho (1935) verificou que o ciclo completo teve a duração de 40 a 56 dias e, segundo Gallo (1963), no Estado de São Paulo, ocorrem de 4 a 5 gerações no ano.

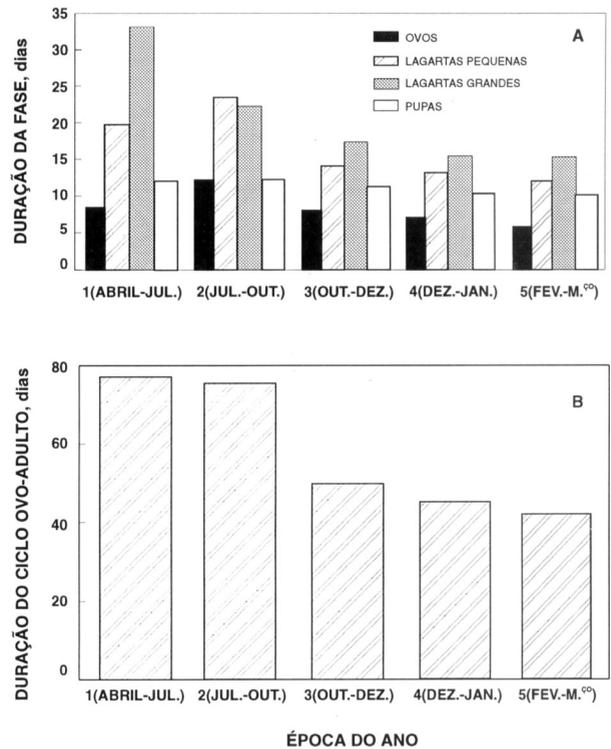


Figura 6. Duração, em dias, das diferentes fases no decorrer do ano (A) e duração do ciclo (ovo-adulto) (B).

Foram feitas simulações da dinâmica da praga nos diversos estádios de desenvolvimento, em condições de campo, e os resultados, comparados com dados da literatura.

Na figura 7, encontram-se os gráficos referentes às simulações da dinâmica da praga. Nota-se predominância de posturas em janeiro e fevereiro, resultado semelhante ao de Botelho (1985) em Araras, e de Micheletti (1987) em Iracemápolis. Quanto a adultos, houve um pico em setembro e novembro e um acme em fevereiro.

Quando foram realizadas simulações mudando de 20 para 95% a mortalidade de lagartas pequenas em maio, junho, julho e agosto, os resultados quantitativos foram próximos aos obtidos por Micheletti (1987) - Figura 8.

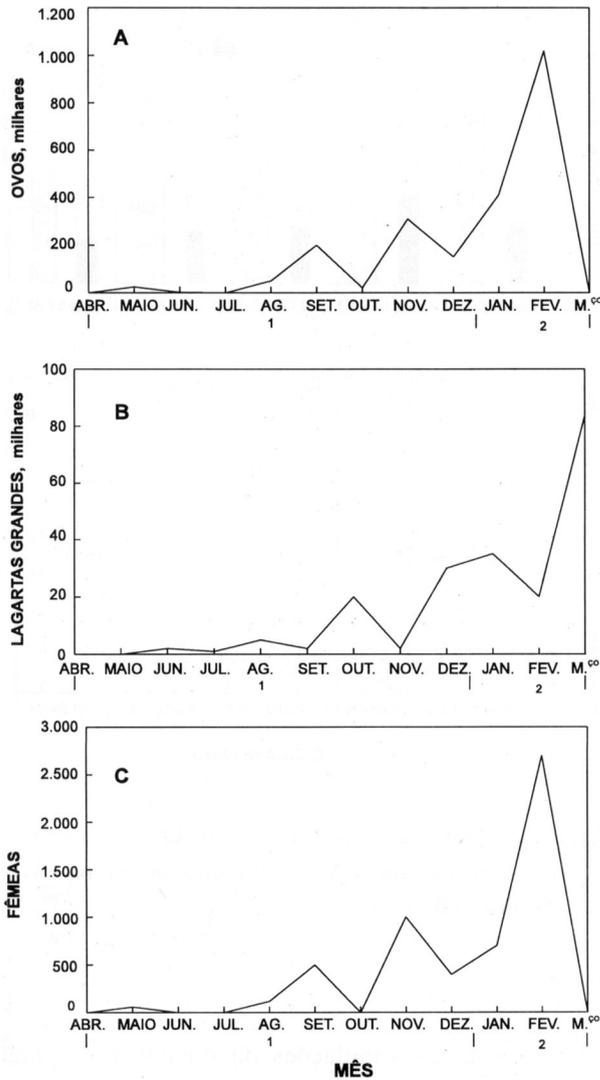


Figura 7. Dinâmica simulada da fase de ovo (A), lagarta grande (B) e adulto (fêmeas) (C), considerando 20% a mortalidade de lagartas pequenas.

Nas simulações com mudança para 95% na mortalidade de lagartas pequenas, em novembro e dezembro (Figura 9), observaram-se picos de adultos em setembro (acme), novembro e fevereiro. Alguns autores, como Gallo et al. (1967), Silveira Neto et al. (1968), Mendes (1976) e Botelho et al. (1979), também encontraram picos de adultos nesses meses. Os resultados do número de ovos foram semelhantes aos encontrados por Lopes (1988), em Barra Bonita, variedade SP 71-1406.

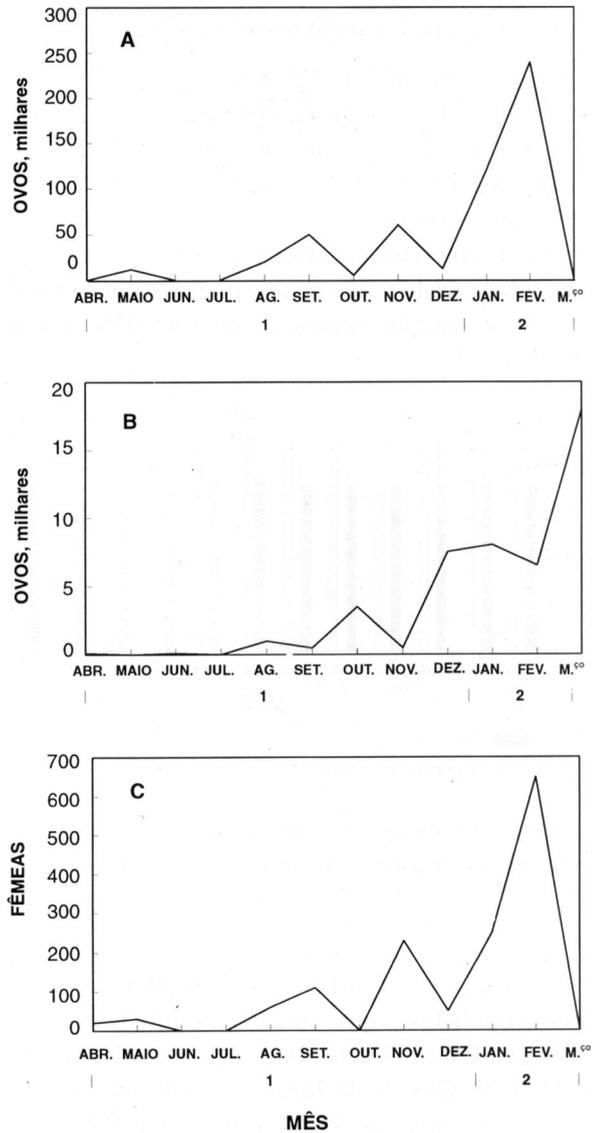


Figura 8. Dinâmica simulada da fase de ovo (A), lagarta grande (B) e adulto (fêmeas) (C), considerando 95% a mortalidade de lagartas pequenas, em maio, junho, julho e agosto.

Nessa simulação, pode-se observar, ainda, que o pico mais elevado foi de 280.000 ovos/hectare (setembro). Lopes (1988) encontrou picos máximos de 478.000 ovos/hectare em 1986 e de 111.000 ovos/hectare em 1987. Nessas condições simuladas, as maiores quantidades de pupas ocorreram em setembro (acme), novembro e março (Figura 9).

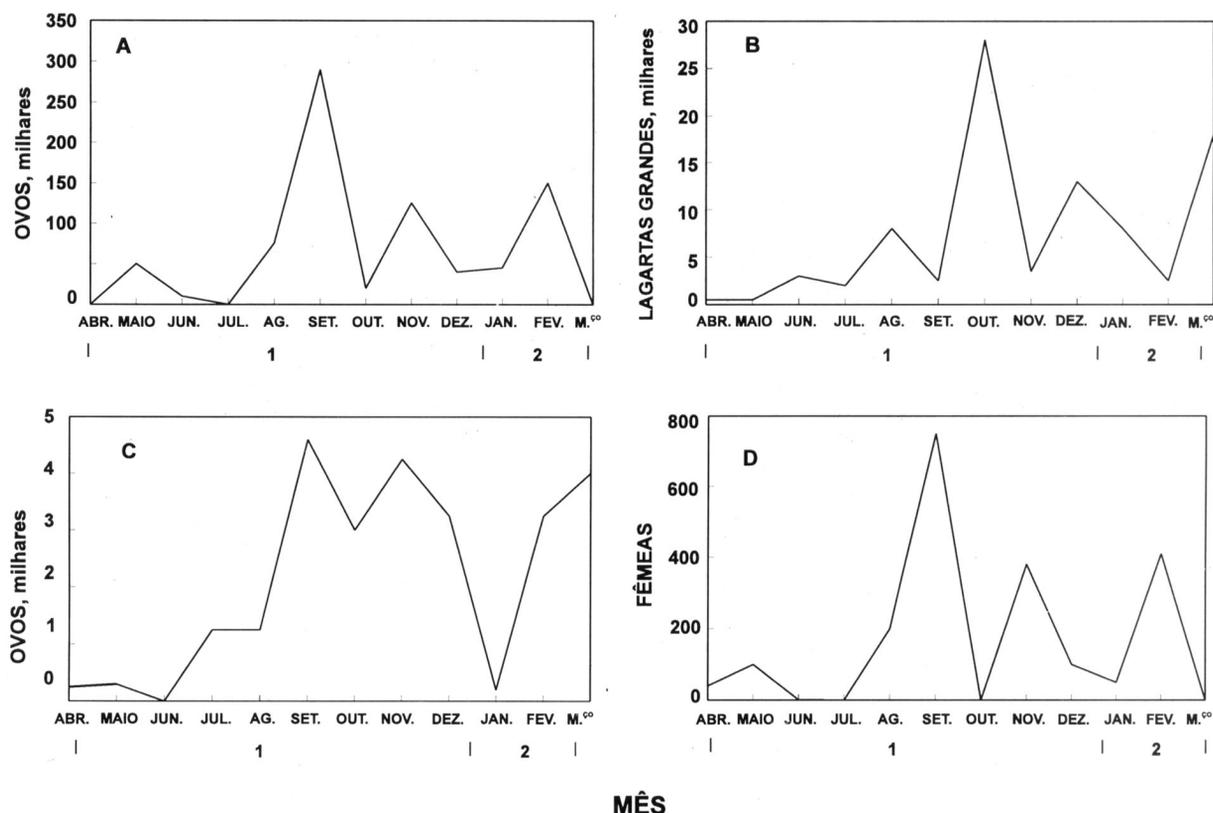


Figura 9. Dinâmica simulada da fase de ovo (A), lagarta grande (B), pupa (C) e adulto (fêmeas) (D), considerando 95% a mortalidade de lagartas pequenas, em novembro e dezembro.

Botelho (1985) observou acúmulos desse estágio nos 5 últimos meses do ano e Walder (1976) notou maiores populações desse estágio em dezembro e agosto.

Os dados da dinâmica da praga, nos diferentes estádios de desenvolvimento, nas simulações, foram semelhantes aos da literatura, em termos de época e amplitude dos picos. Assim, o modelo foi considerado válido.

4. CONCLUSÕES

1. O modelo desenvolvido simula bem a dinâmica da broca com resultados semelhantes aos encontrados na literatura.

2. O modelo pode ser usado para avaliar estratégias (combinações de táticas) de controle da broca, com o parasitóide *Trichogramma galloi* (Hym., Trichogrammatidae), ou com outra forma de controle.

3. O modelo pode ser usado para avaliar um campo específico, mas, para isso, é preciso que se tenham dados desse campo, tais como mortalidade, temperatura e eficiência do parasitóide.

4. Por ter sido desenvolvido de forma estruturada, o modelo permite que sejam estudadas outras estratégias de controle, usando a mesma técnica, e feitas modificações à medida que as pesquisas avançam.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERGAMIN, J. A broca da cana-de-açúcar. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, 32(5):72-76, 1948.
- BERGAMIN, J. Pragas da cana-de-açúcar. In: MALAVOLTA, E. *Cultura e adubação da cana-de-açúcar*. São Paulo, Instituto Brasileiro de Potassa, 1964. p.191-208.
- BOTELHO, P.S.M. *Tabela de vida ecológica e simulação da fase larval de Diatraea saccharalis (Fabr., 1794) (Lep., Pyralidae)*. Piracicaba, 1985. 110p. Tese (Doutorado em Agronomia) - ESALQ-USP, 1985.

- BOTELHO, P.S.M.; MACEDO, N. & MENDES, A.C. Flutuação populacional e densidade média da *Diatraea saccharalis* (Fabr., 1794) em Araras, SP. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, **94**(2):11-19, 1979.
- CAMINHA FILHO, A. A broca da canna de assucar, *Diatraea saccharalis* (Fabricius). *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, **5**(1):7-14, 1935.
- DEGASPARI, N.; MACEDO, N.; BOTELHO, P.S.M.; ARAÚJO, J.R. & ALMEIDA, L.C. Predadores and parasites of eggs of *Diatraea saccharalis* (Fabr., 1794). *Entomology Newsletter*, Araras, **15**(1):12, 1983.
- GALLO, D. Pragas da broca da cana-de-açúcar, *Diatraea saccharalis* (Fabr., 1794) - Piracicaba, 1963. 6p. Tese (cátedra) - ESALQ/USP, 1963.
- GALLO, D.; SILVEIRA NETO, S.; WIENDL, F.M. & PARANHOS, S.B. Influência da armadilha luminosa na população da broca da cana-de-açúcar. *Ciência e Cultura*, São Paulo, **19**(2):307, 1967.
- JONES, J.W.; MISHOE, J.W. & STIMAC, S.L. *Systems Analysis in Research on Pest Management*. St. Joseph, ASAE, 1980. 24p (ASAE Paper, 80-1002)
- LOPES, J.R.S. *Estudos bioetológicos de Trichogramma galloi Zucchi, 1988 (Hym: Trichogrammatidae) para o controle de Diatraea saccharalis (Fabr., 1794) (Lep., Pyralidae)*. Piracicaba 1988. 141p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - ESALQ-USP, 1988.
- MACEDO, N.; BOTELHO, P.S.M. & MENDES, A.C. Ação de parasitos e predadores sobre a viabilidade de ovos de *Diatraea saccharalis* (F., 1794), correlacionadas com parâmetros climáticos em Araras, SP. In: CONGRESSO DE ENTOMOLOGIA, 5, Ilhéus, 1978. p.23. *Resumos*. Ilhéus, Sociedade Brasileira de Entomologia, 1978.
- MELO, A.B.P. de. *Biologia de Diatraea saccharalis (Fabricius, 1794) (Lepidoptera, Pyralidae) em diferentes temperaturas para determinação das exigências térmicas*. Piracicaba, 1984. 101p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - ESALQ-USP, 1984.
- MENDES, A.O. *Influência dos elementos climáticos sobre a população da broca da cana-de-açúcar, Diatraea saccharalis (Fabr.) e da cigarrinha da raiz Mahanarva fimbriolata (Stal.)*. Piracicaba, 1976. 104p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - ESALQ-USP, 1976.
- MICHELETTI, S.M.F.B. *Distribuição espacial e temporal de ovos de Diatraea saccharalis (Fabr., 1794) (Lep., Pyralidae) e seu parasitismo por Trichogramma sp. (Hymenoptera, Trichogrammatidae)*. Piracicaba, 1987. 95p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - ESALQ-USP, 1987.
- PARRA, J.R.P. & ZUCCHI, R.A. Uso de *Trichogramma* no controle de pragas. In: NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; PARRA, J.R.P. & ZUCCHI, R.A. *Atualização sobre métodos de controle de pragas*. Piracicaba, FEALQ, 1986. p.54-75.
- PARRA, J.R.P.; ZUCCHI, R.A. & SILVEIRA NETO, S. Biological control of pests through egg parasitoids of the genera *Trichogramma* and/or *Trichogrammatoidea*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INSECTS, 1., Rio de Janeiro, 1987. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, Rio de Janeiro, **82**:153-160, 1987.
- PRUESS, K.P. Day-degree methods for pest management. *Environmental Entomology*, College Park, **12**(1):613-619, 1983.
- SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R.P.L. & PARANHOS, S.B. Flutuação populacional de pragas da cana-de-açúcar em Piracicaba. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE ENTOMOLÓGICA BRASILEIRA, 1., Piracicaba, 1968. *Resumos*. Piracicaba, Sociedade Entomológica Brasileira, 1968. p.26-27.
- STIMAC, J.L. History and relevance of behavioral ecology in models of insect population dynamics. *Florida Entomologist*, Winter Haven, **65**(1):9-16, 1982.
- STIMAC, J.L. Crop management systems and their effects on biological control of insects. In: BAKER, R. & DUNN, P. *New Directions in Biological Control: alternatives for suppressing agricultural pests and diseases*. New York, Allen R. Liss, 1990. p.449-465.
- TAYLOR, F. Ecology and evolution of physiological time in insects. *American Naturalist*, Chicago, **117**:1-23, 1981.
- TERAN, F.O. Natural control of *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) eggs in sugarcane fields of São Paulo. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17., Manila, 1980. *Proceedings*. Manila, ISSCT, 1980. v.2, p.1704-1714.
- WALDER, J.M.M. *Estudos da população de Diatraea saccharalis (Fabr., 1794) em quatro regiões canavieiras do Estado de São Paulo*. Piracicaba, 1976. 111p. Tese (Doutorado em Agronomia) - ESALQ-USP, 1976.
- WEIDHASS, D.E. & HAILE, D.G. Modeling and integrated pest management. *AMCA Bulletin*, Gainesville, **6**:1-15, 1980.