

Autômato Celular no Estudo de um Modelo Presa-Predador

Ângela C. S. Vilcarromero¹,

DENSIS, FEEC – UNICAMP, 13.083-852, Campinas/SP.

Rosana S. Motta Jafelice²,

FAMAT – UFU, 38.408-100, Uberlândia/MG.

Laécio C. Barros³,

DMA, IMECC – UNICAMP, 13.083-859, Campinas/SP.

Resumo. O objetivo deste trabalho é estender o estudo realizado para verificar a eficiência do controle da praga *Mononychellus tanajoa* (*M.tanajoa*) pelo predador fitoseídeo *Typhlodromalus aripo* (*T. aripo*) através de um autômato celular (Vilcarromero e Jafelice, 2009). A presa é o chamado ácaro verde, *M. tanajoa*, nativa do continente americano, que causa grandes danos econômicos à cultura da mandioca. O controle biológico é uma prática alternativa no combate de pragas. Estudos biológicos e ecológicos sugerem que os ácaros da família *Phytoseiid* são os predadores mais eficientes do ácaro verde e encontram-se distribuídos em quase todas as regiões do mundo. O resultado obtido através do autômato celular para interação entre as populações de ácaros em função do tempo é uma aproximação com boas propriedades qualitativas para o sistema presa-predador.

Palavras-chave: Autômato Celular; Presa-Predador; Controle Biológico; Simulação.

1. Introdução

Os ácaros afetam as cinco maiores áreas que dizem respeito aos homens: saúde, agricultura, produtos armazenados, controle biológico e estética (Bellotti e Schoonhoven, 1978). Os ácaros estão presentes em todo lugar, desde a terra, o ar, a água, o mar, até o pico da montanha. Eles são considerados a mesofauna mais comum da terra; e ainda permanecem relativamente discretos no solo. A espécie *Mononychellus tanajoa*, a mais comum, foi constatada por Bondar em 1938, em material colhido no antigo Campo Experimental de Ondina, Salvador, BA, e em diversas pequenas plantações do interior do Estado (Conceição, 1978). No Brasil, *M. tanajoa* (Bondar) é a espécie mais importante, sendo referida no Nordeste, na Amazônia, na região Centro-Oeste e na região Sudeste.

¹angela@denis.fee.unicamp.br

²rmotta@ufu.br

³laeciob@ime.unicamp.br

O nome *tanaioa* é o termo utilizado pelos indígenas da região nordeste aos danos causados pelo ácaro à mandioca (Noronha, 1995). A história de vida de *M. tanaioa* segue um padrão típico da maioria das espécies da família *Tetranychidae*: possuem ciclos de vida curtos, tamanhos pequenos, possuem quatro estágios ativos (móveis): uma larva (com 6 patas), dois estágios de ninfa (proto e deuto-ninfa) e um estágio adulto, Figura 1. A temperatura mínima para o desenvolvimento da espécie é de $14,4^{\circ}\text{C}$. Acima de 34°C sua taxa intrínseca de crescimento é sensivelmente reduzida (Yaninek et al., 1989).

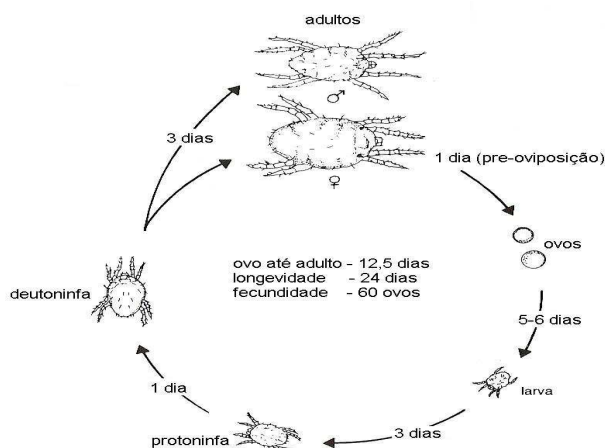


Figura 1: Ciclo de vida da presa (Yaninek et al., 1989).

Estudos ecológicos e biológicos sugerem que ácaros fitoseídeos são os predadores mais apropriados para o controle de *M. tanaioa* e encontram-se distribuídos em quase todas as regiões do mundo. Os ácaros fitoseídeos possuem ciclos de vida curtos, tamanho pequeno, boa sobrevivência quando a densidade da presa é baixa, e capacidade de utilizar outros alimentos, como pólen, fungos e excreções de insetos, Figura 2. Entretanto, no geral, os ácaros da família *Tetranychidae* são sua presa preferida. Na mandioca, os ácaros predadores vivem e ovipositam entre as colônias dos ácaros praga e predam seus estágios de ovo à ativos (Guerrero et al., 1983). A prática de controle biológico tem sido cada vez mais preconizada como alternativa ao uso dos produtos químicos no combate às pragas e doenças das explorações agrícolas (Moraes et al., 1996).

O objetivo deste trabalho é estudar a eficiência do controle da praga *M. tanaioa* pelo predador fitoseídeo *T. aripo* através de um autômato celular. Este autômato simula a evolução no tempo destas populações que agem como um sistema presa-predador.

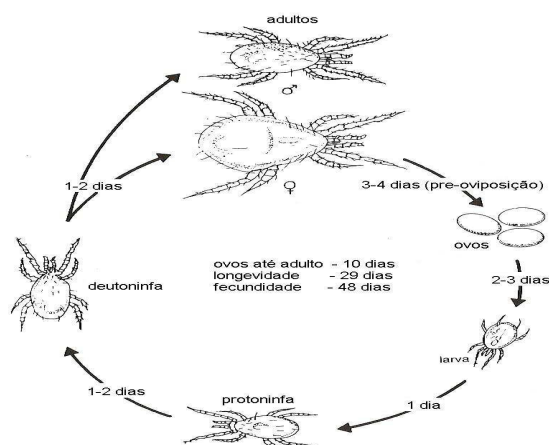


Figura 2: Ciclo de vida do predador (Yaninek et al., 1989).

2. Autômato Celular

O Autômato Celular (AC) foi introduzido na década de 50 pelo matemático John von Neumann, que considerou as sugestões de Stanislaw Ulam, numa tentativa de modelar processos naturais de auto-reprodução (Wolfram, 1994). Os AC consistem de simulações discretas no tempo, espaço e no estado do sistema.

A idéia básica destes sistemas consiste em considerar cada posição (ou região) do domínio espacial como sendo uma célula, à qual é atribuído um estado. O estado de cada célula é modificado de acordo com o seu estado e dos seus vizinhos na etapa de tempo anterior, através de uma série de regras simples que imitam as leis físicas ou biológicas que regem o sistema (Ermentrout e Edelstein-Keshet, 1993). A principal característica dos AC é a facilidade com que podem ser implementados em virtude da simplicidade de sua formulação e o surpreendente retorno visual capaz de reproduzir equilíbrios estáveis ou periódicos, padrões complexos e estruturas organizadas como formações de ondas, entre outras. Além disto, os autômatos celulares podem fornecer muitas informações sobre a dinâmica temporal e espacial de sistemas biológicos, sendo uma alternativa importante na descrição de processos espaciais acoplados a interações locais. O objetivo final dos modelos AC é uma descrição do comportamento macroscópico do fenômeno e não uma descrição exata e fiel do processo microscópico. Não são, em geral, instrumentos de previsão, devendo ser abordados como um meio de experimentação.

Em Freitas e Jafelice (2006) é utilizado um AC para estudar a dinâmica da evolução do HIV no interior do organismo dos HIV-positivos. E, posteriormente em Jafelice et al. (2009), considerou-se uma simulação de AC, acoplado com lógica fuzzy, para simular a evolução do HIV na corrente sanguínea de indivíduos soro positivos sujeitos a tratamento médico; e monitoramento da potência

da medicação e adesão ao tratamento.

Em Vilcarromero e Jafelice (2009) é utilizado um autômato celular para estudar a dinâmica populacional do tipo presa-predador considerando duas espécies de ácaros (*M. tanaioa* é a presa e o predador *T. aripo*), em particular ovo e estágios móveis. Os resultados obtidos na simulação do AC variando em relação ao tempo apresentaram uma boa aproximação qualitativa referente ao primeiro estágio da introdução do predador, para o controle biológico da presa. Neste trabalho estendemos a simulação do AC considerando-se outras introduções do predador para o controle da praga *M. tanaioa*.

3. Modelagem do sistema

A simulação de diferentes cenários para uma avaliação “a priori” do impacto de inimigos naturais e de suas interações propiciará uma contribuição ao conhecimento da relevância esperada da introdução, em termos do aumento da eficiência do controle biológico no campo e dos possíveis impactos.

Em uma população, durante a sua vida cada indivíduo passa por uma sucessão de diferentes estágios. A estrutura etária desta população pode estar representada por matrizes de frequência de estágios. O uso dessas matrizes permitiu a derivação de um modelo adequado para estudar os processos demográficos dado por (Manetsch, 1976):

$$\frac{dr_h(t)}{dt} = \frac{H}{DEL(T(t))} \left[r_{h-1}(t) - r_h(t) \left(1 + \frac{1}{H} \frac{dDEL(t)}{dt} + B(t) \frac{DEL(t)}{H} \right) \right] \quad (3.1)$$

onde h = índice de sub-estágio, r_0 = fluxo de indivíduos entrando no primeiro sub-estágio, $r_h(t)$ = fluxo intermediário, H = número de sub-estágios, $B(t)$ = taxa instantânea de perda, $DEL(t)$ = tempo instantâneo de desenvolvimento e $h = 1, \dots, H$.

Como, de modo geral, o tempo de desenvolvimento dos indivíduos depende da temperatura, esta característica pode ser representada de duas maneiras diferentes: substituindo-se o tempo cronológico por grau-dia, ou a temperatura T influenciando diretamente B e DEL tornando-se $B(T(t))$ e $DEL(T(t))$. De modo geral, a taxa de entrada r_0 do primeiro estágio é dada pelo número de ovos ovipositados durante o intervalo de tempo $[t, t + \Delta t]$. A taxa de saída r_h representa o número de indivíduos que deixam definitivamente o processo (mudam de estágio ou morrem). O parâmetro $DEL(T(t))$ depende de valores específicos de cada espécie de ácaros e através de experimentos de laboratório em (Bonato, 2000), obteve-se os valores dos parâmetros para o modelo (3.1).

Após várias simulações Bonato (2000) constatou que se o predador for introduzido no sistema, ao mesmo tempo em que a presa ou logo no início da simulação, este será capaz de controlar as populações da presa mantendo-as em baixos níveis de densidade de modo a não prejudicar o rendimento econômico da cultura da mandioca.

A Figura 3 mostra as flutuações das populações da presa e do predador nativo, a partir da equação (3.1), para $H = 25$ e com condições iniciais de 20 ovos e 20 presas móveis no primeiro dia da simulação e 1 adulto de predador introduzido 10 dias depois.

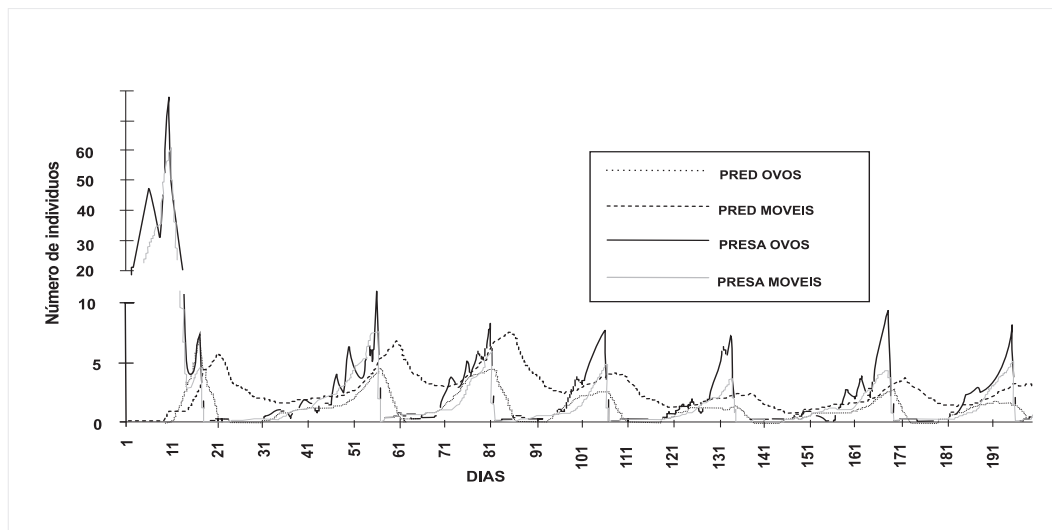


Figura 3: Simulação da dinâmica presa-predador, a partir da equação (3.1) para $H = 25$. Condições iniciais: 20 ovos e 20 presas móveis; introdução de 1 predador após 10 dias (Bonato, 2000).

4. Resultados do Autômato Celular

O autômato celular em questão é uma grade de tamanho 31×31 , com condições de fronteira toroidal (Freitas e Jafelice, 2006) e (Vilcarromero e Jafelice, 2009). As regiões que compõem o mesmo são constituídas de forma a imitar a dinâmica presa-predador em um ambiente controlado, de acordo com experimentos realizados em laboratório. Para a simulação, os seguintes parâmetros foram considerados:

- Número de presas móveis.
- Número de ovos da presa.
- Número de predadores móveis.
- Número de ovos do predador.
- Período de desenvolvimento dos ovos da presa.
- Idade de reprodução da presa.

- Idade de morte da presa.
- Período de desenvolvimento dos ovos do predador.
- Idade de reprodução do predador.
- Idade de morte do predador.

Inicialmente foram considerados 20 ovos de presa e 20 presas móveis, e 1 predador introduzido após 8 iterações (valores próximos aos da Figura 3). A movimentação dentro da grade é feita através de uma busca nos sentidos norte, sul, leste e oeste. Esta busca é realizada pelas presas e pelos predadores a procura de espaços livres para movimentação; e no caso dos predadores a busca também é realizada para determinar a presença de presas em algumas das posições da (Figura 4) para a predação.

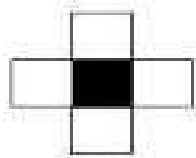


Figura 4: Vizinhança de von Neumann.

As hipóteses consideradas para a movimentação das espécies dentro da grade são descritas a seguir.

4.1. Comportamento dos ovos da presa

Os ovos da presa são distribuídos aleatoriamente dentro da grade. Eles permanecem parados na sua posição inicial até atingirem o seu período de desenvolvimento, e assim passam a agir como presa móvel.

4.2. Comportamento das presas

As presas são distribuídas aleatoriamente dentro da grade, segundo uma distribuição uniforme. Uma busca por lugares vazios para locomoção é feita através de uma busca nos sentidos norte, sul, leste, oeste (Figura 4). Além disto, a cada iteração é verificado se a presa está ou não na idade de reprodução. Se a presa não está na idade de reprodução, ela muda para a nova posição e a posição anterior fica vazia. Caso contrário, a presa move para a nova posição e na posição anterior ela deixa um ovo. A cada iteração é verificado também se a presa atingiu o seu tempo de mortalidade. Se este valor é atingido, a presa morre e sai do sistema.

4.3. Comportamento dos ovos do predador

Tanto os ovos da presa como os dos predadores apresentam exatamente o mesmo comportamento dentro da grade.

4.4. Comportamento do predador

O predador também é distribuído aleatoriamente na grade. Foi considerado que o predador tem a possibilidade de predação tanto o ovo da presa como as presas móveis. Neste caso, o algoritmo verifica se há ovo da presa ou presa móvel nos sentidos norte, sul, leste e oeste, como mostra a Figura 4. Caso exista e o predador esteja na idade de reprodução, ele pratica a predação e ocupa a posição da presa (ou do ovo da presa) e na posição anterior ele deixa um ovo. Caso contrário, a posição anterior fica livre. Se não há ovo da presa ou presa móvel na vizinhança, o predador se movimenta como se fosse uma presa. A verificação para o tempo de mortalidade do predador é feita de modo análogo ao caso das presas.

A Figura 5 mostra uma foto do modelo do AC. Na Figura 5 o fundo preto denota a folha, o quadrado cinza o ovo do predador, o quadrado com um círculo a presa, o quadrado com retas o predador, o quadrado preto dentro de outro quadrado o ovo da presa. O AC foi desenvolvido utilizando o Matlab 7.0.

Os resultados das simulações do AC, após várias iterações (por exemplo: 450 iterações) são apresentados na Figura 6. Note que o comportamento do ovo predador, ovo presa, presa e predador apresentados na Figura 6 são similares ao comportamento dos gráficos da Figura 3.

5. Conclusão

É interessante observar que regras simples, como as utilizadas na simulação do AC, podem representar um comportamento complexo onde a ação do todo é mais do que uma simples soma das ações individuais. Este comportamento mostra o poder do autômato celular. Em (Vilcarromero e Jafelice, 2009) iniciamos este estudo considerando apenas a primeira introdução do predador e verificamos que o AC pode apresentar uma boa aproximação dos resultados obtidos por Bonato (2000) (Figura 3). No entanto, verificamos também que foi necessário mais iterações para a simulação do AC. Neste trabalho estendemos este estudo considerando as próximas introduções do predador no sistema. Os dados iniciais considerados na simulação da equação (3.1) foram os mesmos considerados na simulação do autômato, bem como o instante da introdução do predador. Os resultados obtidos pelo AC podem ser comparados com a solução obtida por Bonato (2000) e apresentando as mesmas características, apesar de ter sido necessário um número maior de iterações. Em ambas os gráficos (Figura 3 e Figura 6) pode-se verificar que quando as populações das presas atingem um nível mais elevado faz-se necessário a introdução de novos predadores que conseguem controlá-las razoavelmente bem. Em condições naturais reais, verifica-se que a introdução de predadores se fez

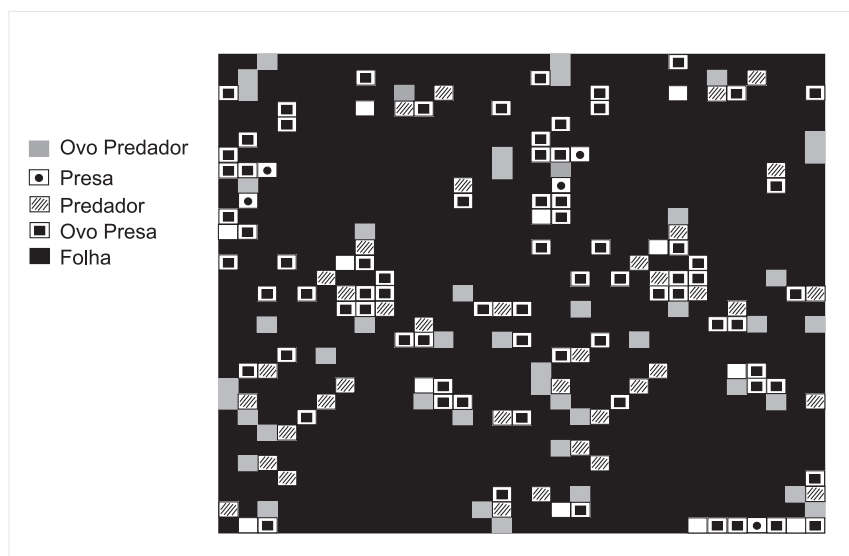


Figura 5: Foto da saída do AC: O fundo preto mostra a folha, o quadrado cinza o ovo do predador, o quadrado com um círculo a presa, o quadrado com retas o predador, o quadrado preto dentro de outro quadrado o ovo da presa.

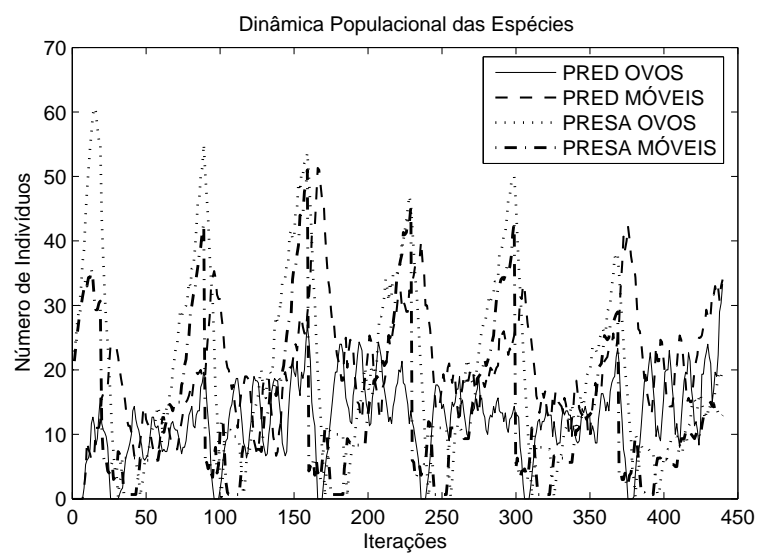


Figura 6: Resultados numéricos do AC após 450 iterações.

necessária nos meses mais quentes do ano, uma vez que a população de presas se desenvolvem mais rapidamente em climas mais quentes do que frios.

Agradecimentos

O terceiro autor agradece FAPESP processo no. 06/05920-7 e ao CNPq processo no. 306872/2009-9.

Referências

- Bellotti, A. C. e Schoonhoven, A. V. (1978). Mite and insect pest of cassava. *Annual Review of Entomology*, 23:39-67.
- Bonato, B. (2000). Relatório das atividades desenvolvidas na embrapa, cnpma, Jaguariúna. no período de junho de 1997 a junho de 2000.
- Conceição, A. J. (1978). Ácaros da mandioca. *Cruz das Almas, BA: Escola de Agronomia da UFBA*.
- Ermentrout, G. B. e Edelstein-Keshet, L. (1993). Cellular automata approaches to biological modeling. *Theor. Biol.*, 160:97-133.
- Freitas, J. C. M. e Jafelice, R. S. M. (2006). Uso de autômato celular no estudo de evolução da aids. *FAMAT em Revista*, 6:159-167.
- Guerrero, J. M., Bellotti, A. C., e Reyes, J. A. (1983). Control de los ácaros en yuca mediante la utilización de sus enemigos naturales. In: “*Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia. Yuca: control integrado de plagas*”, Cali, Colombia, CIAT, páginas 221-225.
- Jafelice, R. M., Bechara, B. F. Z., Barros, L. C., Bassanezi, R. C., e Gomide, F. (2009). Cellular automata with fuzzy parameters in microscopic study of positive hiv individuals. *Mathematical and Computer Modelling*, 50:32-44.
- Manetsch, T. J. (1976). Time-varying distributed delay models and their use in aggregative models of large systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 6:547-553.
- Moraes, G. J., Sa, L. A. N., e Tambasco, F. J. (1996). Legislação brasileira sobre o intercâmbio de agentes de controle biológico. *Documentos, CNPMA/EMBRAPA, Jaguariúna-SP*, 3:1-16.
- Noronha, A. C. S. (1995). Controle biológico de ácaros. *BA: EMBRAPA/CNPMA, Cruz das Almas*, Apostila apresentada no 9º Curso Intensivo Nacional de Mandioca.
- Vilcarromero, A. C. S. e Jafelice, R. S. M. (2009). Uma abordagem computacional no estudo de presa-predador para Ácaros da cultura da mandioca. In: *Anais do II SRMAIS - II Simpósio Regional de Matemática e suas Aplicações de Ilha Solteira*, página 25 a 27 de agosto de 2009.
- Wolfram, S. (1994). *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley Publishing Company.

Yaninek, J. S., Moraes, G. J., e Markham, R. H. (1989). *Handbook on the cassava green mite (Mononychellus tanajoa*. In “Africa. Ibadan, International Institute of Tropical Agriculture”.