

Um Modelo de Autômatos Celulares para o Espalhamento Geográfico da Morte Súbita dos Citros com Parâmetro Fuzzy

M. S. Peixoto¹, L. C. Barros², R. C. Bassanezi³,
DMA, IMECC–UNICAMP, 13.083-970 – Campinas, SP.

Resumo. A morte súbita dos citros (MSC) é uma doença de causa ainda desconhecida, que tem afetado e matado plantas do sul do Triângulo Mineiro e norte do Estado de São Paulo. Recebeu este nome devido a rapidez com que as árvores cítricas morrem após adquirirem a doença. Neste artigo adotamos um modelo autômato celular para representar o espalhamento da doença, que incorpore aspectos de incertezas, utilizando controladores fuzzy para modelar as variáveis incertas.

Palavras-chave: *Morte súbita de citros; autômato celular; teoria fuzzy.*

1. Introdução

A epidemiologia matemática consiste em estabelecer, a partir de observações do fenômeno epidêmico, hipóteses para quantificar os conhecimentos biológicos a respeito da dinâmica de transmissão de infecções, e validar o modelo resultante.

A epidemiologia matemática relacionada à transmissão de infecções tem dupla finalidade: descrever o fenômeno observado e estudar os efeitos de um mecanismo de intervenção no sistema hospedeiro-parasita.

A necessidade de se estudar o comportamento dinâmico de epidemias é de fundamental importância no que diz respeito à sua evolução, estabilidade e controle. Porém, os modelos matemáticos de epidemias tradicionais determinísticos que os descrevem não lidam com a subjetividade muitas vezes intrínseca nos fenômenos biológicos (Barros et al., 2003).

Nosso principal interesse, nesta área, está relacionado com o estudo de fenômenos biológicos que exibem incertezas graduais e que possam ser modelados pela Teoria de Conjuntos Fuzzy. Devido seu grande poder de aplicação e interdisciplinaridade, tal ferramenta pode facilitar o trabalho do modelador na incorporação do conhecimento de especialista da área, facilitando a análise e compreensão de algumas situações reais, como a propagação e controle de epidemias, onde se tem apenas informação parcial ou lingüística.

¹magda@ime.unicamp.br

²laeciocb@ime.unicamp.br

³rodney@ime.unicamp.br

Assim, dada as características da Teoria de Conjuntos Fuzzy esperamos desenvolver modelos em áreas de epidemiologia mais realistas e que incluam os tradicionais. No nosso caso, estamos interessados em estudar e modelar a morte súbita dos citros.

A morte súbita dos citros (MSC) é uma doença de causa ainda desconhecida, que tem afetado e matado plantas do sul do Triângulo Mineiro e norte do Estado de São Paulo (Gimenes-Fernandes e Bassanezi, 2001). Recebeu este nome devido a rapidez com que as árvores cítricas morrem após adquirirem a doença. É uma nova praga que vem afetando laranjeiras-doces enxertadas em limão "Cravo". Os primeiros sintomas observados nas árvores afetadas são folhagem verde-pálida, a perda generalizada do brilho das folhas, seguido de ligeira desfolha, com poucas brotações internas (ver Figura 1). As plantas doentes têm grande quantidade de raízes podres e mortas (ver figura 2). No estágio final, todas as folhas caem e a árvore morre. Pode-se observar um amarelecimento no câmbio do porta-enxerto (ver Figura 3), sendo esse o principal sintoma diagnóstico da MSC.



Figura 1: 1- Planta morta pela doença. 2- Perda do brilho e diminuição dos tamanhos das folhas é o primeiro sintoma visível ao produtor. 3- a foto mostra a diferença entre folhas de uma planta sadia e uma doente. Planta com sintomas da morte súbita ao lado de palnta saudável.

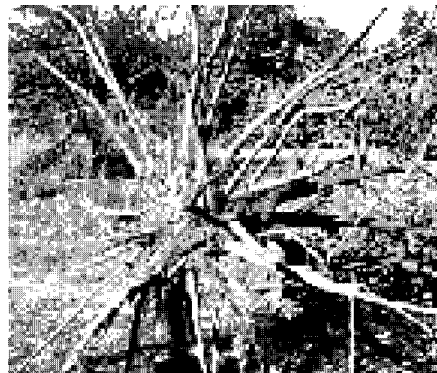


Figura 2: Raízes mortas, um dos sintomas da morte súbita dos citros.

Neste artigo adotamos um modelo autômato celular para representar o espalhamento

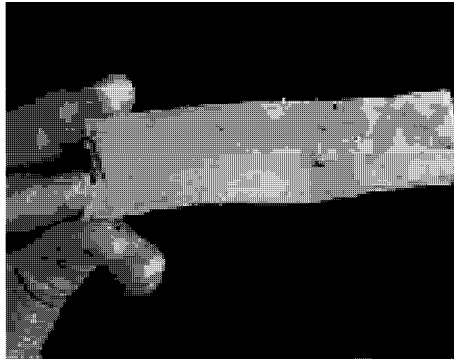


Figura 3: Detalhe do amarelecimento da parte interna da casca da árvore na parte do porta-enxerto. É possível ver claramente a separação entre copa e porta-enxerto.

da doença, que incorpore aspectos de incertezas, utilizando controladores fuzzy para modelar a variáveis incertas.

2. Autômatos Celulares

Os autômatos celulares consistem de simulações discretas no tempo, espaço e no estado do sistema. A idéia destes modelos 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 o de seus vizinhos na etapa de tempo anterior, através de uma série de regras simples que tentam imitar as leis biológicas (ou físicas) que regem o sistema (Ermentrout e Edelstein-Keshet, 1993).

A principal vantagem dos AC é a facilidade com que podem ser implementados decorrente 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 (Wolfram, 1994).

Apesar da simplicidade das regras de transição de estado, os autômatos celulares podem fornecer muitas informações sobre a dinâmica temporal e espacial de sistemas biológicos, o que faz deste tipo de modelo uma alternativa importante na descrição de processos espaciais acoplados a interações locais.

O objetivo final dos modelos AC é uma descrição (a partir de regras tão simples quanto possíveis) 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. Os AC são vistos, não como substitutos dos modelos matemáticos tradicionais, mas como um primeiro passo na formulação destes modelos. Os resultados obtidos através da simulação via autômatos celulares podem confirmar hipóteses para uma posterior formulação de um modelo formal. A postura na qual se situa este projeto está em antever situações, em que cenários são definidos a priori e resultados são simulados criando assim um manual de possibilidades e daí, tomar algumas medidas de controle.

Há uma grande variedade de modelos AC disponíveis e de representação de fenômenos podendo ser unidimensionais ou bidimensionais Gaylord e Nishidate (1996). Os ingredientes básicos para a formulação de um modelo AC são: (1) um conjunto de estados, (2) regras de transição de estado e (3) a determinação da vizinhança.

3. A Teoria Fuzzy

A Teoria de Lógica Fuzzy foi apresentada em 1964 por Zadeh, professor no Departamento de Engenharia Elétrica e Ciências da Computação da Universidade da Califórnia, em Berkeley, quando trabalhava com problemas de classificações de conjuntos que não possuíam fronteiras bem definidas.

O termo fuzzy significa nebuloso, difuso, e se refere ao fato de, em muitos casos, não conhecermos completamente os sistemas que estamos analisando. Existem inúmeras situações em que a relação de pertinência não é bem definida e, nestes casos, não sabemos dizer com exatidão se o elemento pertence ou não a um dado conjunto. A intenção de Zadeh foi flexibilizar a pertinência de elementos aos conjuntos criando a idéia de grau de pertinência. Dessa forma, um elemento poderia pertencer parcialmente a um dado conjunto. Esta sua idéia foi publicada em 1965 Zadeh (1965), sendo este artigo seminal o marco do nascimento da teoria fuzzy. A extensão da função característica da lógica clássica para o intervalo $[0,1]$ originou os conjuntos fuzzy e possibilitou, entre outras coisas, a utilização de variáveis lingüísticas, permitindo a exploração do conhecimento humano no desenvolvimento de muitos sistemas.

Dadas as características da teoria da lógica fuzzy, são esperadas enormes contribuições para o desenvolvimento de modelos em áreas onde é necessário lidar com imprecisão e subjetividade (Gomide e Pedrycz, 1998).

Conceitos subjetivos sempre foram utilizados em nosso cotidiano, já que é intrínseco da linguagem. Apesar de suas incertezas, eles são transmitidos e perfeitamente compreendidos lingüisticamente entre interlocutores. Quando queremos explicar ou entender certos problemas reais, na maioria das vezes não utilizamos uma matemática formal, e sim regras lingüísticas, e quase sempre essas regras são da forma "Se ... então ...". Por exemplo, podemos comparar a cor do tomate com o quanto ele está maduro, podemos explicar isto usando o termo "Se o tomate está vermelho, então ele está maduro", e não precisamos necessariamente de uma tabela numerando as tonalidades de vermelho para explicar o quanto um tomate está maduro. Tendo em mãos a teoria de conjunto fuzzy, é possível se fazer modelagem matemática dessas regras, construindo assim um sistema fuzzy baseado em regras lingüísticas (Barros e Bassanezi, 2001).

4. Descrição do Modelo

O Fundecitrus e mais doze instituições de pesquisa brasileiras e estrangeiras estão desenvolvendo diversas frentes de pesquisa para descobrir as causas da doença, as formas de disseminação e medidas de controle.

Linhas de pesquisa procuram identificar o agente causal. A evolução espacial sugere que a praga seja causada por um vírus transmitido por um vetor (pulgão) e que inseto voa

para cima, segue o sentido e a força do vento e daí ele pousa nas novas brotações de outra árvore, infectando-a. Portanto, a intensidade e direção dos ventos, v , influenciam na força de transmissão da doença.

Estas conclusões nos fizeram supor que o espaço percorrido r pelo vetor que dissemina a doença é proporcional a intensidade dos ventos. Como as informações obtidas para v e r são do tipo lingüística, como, por exemplo, baixa, média, alta, dentre outras, optamos pela teoria fuzzy para estabelecer a relação entre estas duas variáveis por meio de uma base de regras fuzzy.

Vamos utilizar um modelo autômato celular para estudar o avanço da doença. Nesta abordagem, as variáveis de estado do sistema, assim como o tempo, são discretos. O intervalo de tempo representa o passo discreto de tempo adotado. O sistema é representado espacialmente através de um reticulado de células que interagem obedecendo a algumas regras de mudança de estado. A dinâmica do sistema como um todo depende desta interação entre as células. Cada célula representa uma árvore, que pode estar em um entre dois estados: sintomáticas e não-sintomáticas.

5. Simulações Numéricas

Nas simulações numéricas, se considerarmos transmissão local, isto é, sem vento (ou vento desprezível), notamos um padrão na formação de manchas doentes. Por outro lado, quando consideramos transmissão não-local (presença de vento), notamos outro padrão na formação de manchas das plantas doentes.

Comparando nossos resultados com dados reais fornecidos por pesquisadores (Bassanezi et al., 2003), é possível perceber semelhança entre os padrões reais e aqueles obtidos em nossas simulações quando considerarmos transmissão não-local. Desse modo, podemos confirmar que o vento exerce um papel fundamental no espalhamento da doença. Este é um fato que os próprios pesquisadores do fenômeno já tinham observado. A diferença é que com um modelo matemático é possível fazer uma avaliação quantitativa do espalhamento da doença.

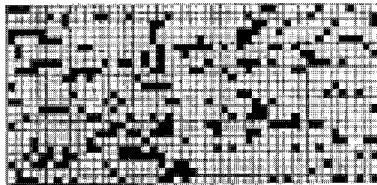


Figura 4: Dados reais.

6. Trabalhos Futuros

Comparar nossos resultados com dados reais fornecidos por estudiosos do fenômeno e procurar validar nosso modelo.

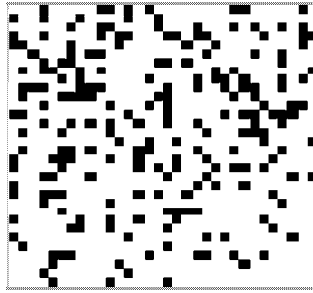


Figura 5: Dados obtidos por simulação numérica.

Fazer, através do modelo matemático, uma avaliação quantitativa do espalhamento da doença. Os modelos matemáticos, embora teóricos, podem auxiliar no entendimento da dinâmica da doença e, a partir daí, indicar alguma política de controle da doença, evitando o espalhamento para plantas saudáveis.

Agradecimentos

Ao CNPq, órgão financiador deste projeto de pesquisa.

Referências

- Barros, L. C. e Bassanezi, R. C. (2001). *Introdução à Teoria Fuzzy - Aplicações em Biomatemática*. IMECC-UNICAMP, Campinas.
- Barros, L. C., Bassanezi, R. C., e Leite, M. B. (2003). The epidemiological models si with fuzzy parameter of transmission. (submetido).
- Bassanezi, R. B., Bergamin, A., Amorim, L., Gimenes-Fernandes, N., Gottwald, T. R., e Bové, J. M. (2003). Spatial and temporal analyses of citrus sudden death as a tool to generate hypotheses concerning its etiology. *The American Phytopathological Society*, ??:502–512.
- Ermentrout, G. B. e Edelstein-Keshet, L. (1993). Cellular automata approaches to biological modeling. *J. Theor. Biol.*, 160:97–133.
- Gaylord, R. J. e Nishidate, K. (1996). *Modeling Nature-Cellular Automata Simulations with Mathematica*. Springer-Verlag, Inc., N. York.
- Gimenes-Fernandes, N. e Bassanezi, R. B. (2001). Doença de causa desconhecida afeta pomares cítricos no norte de São Paulo e sul do Triângulo Mineiro. *Summa Phytopathol.*, 27:93.

Gomide, F. e Pedrycz, W. (1998). *An Introduction to Fuzzy Sets-Analysis and Design*. MIT, N. York.

Wolfram, S. (1994). *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley Publishing Company, N. York.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338-353.

