

Um Estudo de Autômatos Celulares com Parâmetros Fuzzy para a Dispersão da Febre Aftosa em Bovinos no Mato Grosso do Sul

Maristela Missio¹

UEMS – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, 78.060-900,
Dourados/MS.

Laécio Carvalho de Barros²

DMA, IMECC – UNICAMP, 13083-859, Campinas/SP.

Resumo. A febre aftosa é uma patologia viral, aguda e altamente transmissível, própria de animais de casco fendido como bovinos. Nosso trabalho propõe um modelo para estudar a evolução dessa doença em bovinos no Estado do Mato Grosso do Sul. Para isso, utilizamos um modelo de autômatos celulares que distinga dois tipos de contato: local e não local, baseado no modelo de Rodrigues et al. (2005) e um sistema de regras fuzzy para modelar o contato não local, a partir das características que determinam a estrutura funcional de um estabelecimento agropecuário daquele Estado. Simulações numéricas são realizadas para estabelecimentos típicos da região.

Palavras-chave: Febre Aftosa; Autômato Celular; Parâmetro Fuzzy.

1. Introdução

Por um longo período da história a febre aftosa tem sido uma das doenças de maior importância do ponto de vista econômico, justificando sua presença em mais de dois terços dos países membros da Organização Internacional de Epizootias

¹mmissio@ime.unicamp.br

²laeciocb@ime.unicamp.br

(OIE). A doença gera um problema de caráter sócio-econômico que ultrapassa barreiras geográficas. Em nível local reduz o lucro dos pecuaristas e frigoríficos, afeta os pequenos criadores de gado de leite e todo o comércio. Em nível nacional, interrompe o crescimento econômico da pecuária e limita o acesso ao mercado internacional.

O Brasil, em especial o Estado de Mato Grosso do Sul, que ocupa a primeira posição em número de animais bovinos no país, com densidade demográfica de aproximadamente 69 cabeças/Km² e responsável por 13% da produção brasileira de carne bovina, vem enfrentando elevados prejuízos econômicos e sociais causados pelo registro da doença em 2005. Segundo a O. I. E. (2006), foram sacrificados 32.549 bovinos suscetíveis, custando aos cofres públicos R\$ 18.556.071,00 somente de indenização aos proprietários de animais sacrificados nos 33 focos registrados.

Dada a importância da doença da febre aftosa em bovinos, devido ao impacto econômico e social por ela causada, o presente trabalho tem por objetivo estudar a dinâmica de disseminação dessa epidemia no Estado de Mato Grosso do Sul.

Utilizaremos neste estudo um modelo matemático discreto de autômatos celulares, com dinâmica do tipo SIR, levando em conta a estrutura espacial. No modelo consideramos dois tipos de proximidades: vizinhança local, que inclui os oito indivíduos geometricamente mais próximos e contatos não local, considerados aleatórios, que podem ocorrer entre indivíduos que se encontrem a uma distância L .

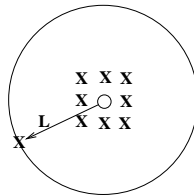


Figura 1: Contato local e não local.

Presumindo que a disseminação da febre aftosa em bovinos envolve, além dos fatores biológicos relacionados à doença, também fatores geográficos, econômicos, culturais e sociais, pretendemos neste trabalho incorporar algumas características que determinam a estrutura funcional de um estabelecimento agropecuário, ao modelar a distância de um contato não local, representada pelo parâmetro L .

2. Descrição do Modelo

Para estudar a dinâmica da doença da febre aftosa em bovinos no Estado do Mato Grosso do Sul propomos um modelo composto de três compartimentos que mudam de magnitude com o tempo e representam os diferentes estados da população de bovinos.

Algumas considerações são pré-estabelecidas:

1. O vírus que transmite a doença da febre aftosa pode ser encontrado em animais doentes e em período de incubação que varia de 2 a 8 dias, na saliva, fezes, urina, leite e sêmem do animal, na carne e subprodutos.
2. O animal infectado será considerado automaticamente infectante. A transmissão do vírus ocorre por: contato local, ou seja, pelo contato direto entre um indivíduo infectado e um suscetível; contato não local, de forma indireta por meio de vetores como: homem, animais silvestres, pássaros, veículos e vento a uma distância até 60 Km.
3. Os animais, uma vez infectados, recuperam-se da infecção a uma taxa μ entre 7 e 15 dias, tornando-se imunes ao vírus por um período de aproximadamente um ano.
4. Não consideraremos a dinâmica vital, em razão de que a escala temporal da enfermidade é muito pequena quando comparada à dinâmica demográfica da população de bovinos.
5. O animal recuperado não perderá sua imunidade em virtude da pequena duração da enfermidade quando comparada com a duração da imunidade adquirida pelo animal recuperado da doença.

O modelo mais simples para descrever uma doença na qual um indivíduo se recupera tornando-se imune, pode ser esquematizado no seguinte diagrama compartimental:

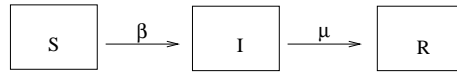


Figura 2: Modelo compartmental do tipo SIR

onde as variáveis de estado $S(t)$, $R(t)$ e $I(t)$ representam, respectivamente, a proporção de indivíduos suscetíveis, infectados e recuperados da doença no instante t . A população total $N(t) = S(t) + I(t) + R(t)$ é constante.

Assumindo que a população esteja distribuída homoganeamente, a passagem de um indivíduo da classe S para a classe I ocorre a uma taxa β e o indivíduo se recupera da doença a uma taxa μ . Consequentemente, μ^{-1} representa o período médio de recuperação.

Um parâmetro de grande interesse em modelos epidemiológicos é *Valor Reprodutividade Basal* R_0 , definido como o número de infecções secundárias que um indivíduo infectado é capaz de produzir quando introduzido numa população inteiramente suscetível. Para valores de $R_0 > 1$ a doença pode tornar-se endêmica, em oposição, para valores de $R_0 < 1$, a infecção não conseguirá se estabelecer.

Levando-se em conta que a proximidade entre indivíduos seja relevante para um novo contágio, uma vez que a transmissão do vírus ocorre por contato direto e indireto, deve-se considerar no modelo as variáveis tempo e espaço. Desta forma, a fim de incluir os aspectos de dispersão espacial da doença, será utilizado neste trabalho um sistema discreto de autômato celular baseado no modelo de Rodrigues et al. (2005).

3. Modelo do Tipo SIR com Autômato Celular

Um autômato celular consiste de um espaço euclidiano, dividido em uma grade de células uniforme e regular, onde tais células possuem um conjunto finito de estados predefinidos e um conjunto de condições necessárias para a mudança de estados. Autômatos celulares evoluem a passos de tempo discretos, nos quais as células são simultaneamente atualizadas com base no estado das células em suas vizinhanças, de acordo com um conjunto de regras locais.

Peixoto e Barros (2004) descrevem que, a principal característica dos autômatos celulares é a facilidade com que podem ser implementados em virtude da simplicidade de sua formulação matemática.

Nesta abordagem, consideramos as variáveis de estado e a variável tempo discretas. O sistema será representado espacialmente por um reticulado bidimensional com coordenadas inteiras, descrevendo regiões do Estado de Mato Grosso do Sul. Assim, cada célula será ocupada por um bovino, que pode estar entre um dos três estados: suscetível (S), infectado (I) ou recuperado (R).

No modelo descrito por Ferreira (2000), uma proporção β dos contatos entre animais suscetíveis e animais infectados produzem novos indivíduos infectados. Assim, βSI indivíduos por Km^2 por unidade de tempo saem do compartimento S para o compartimento I . Emmendorfer e Rodrigues (2001) consideram que a transmissão da doença representada segue um processo probabilístico, onde cada indivíduo infectado tem igual e independente probabilidade de infectar um outro indivíduo com o qual tenha contato. Ainda segundo os autores, a chance de que um indivíduo suscetível se torne infectado depende do número de contatos que ele estabelece com outros indivíduos no intervalo de tempo Δt e também da probabilidade de que cada contato resulte em transmissão.

Em nosso modelo, assim como em Rodrigues et al. (2005), o número médio de contato não local (N_{cnl}) que um animal infectado faz num intervalo de tempo Δt é dado pela fração pnl de animais suscetíveis distantes a um raio L do animal infectado. Sendo L a distância média que o vírus da febre aftosa percorre ao ser deslocado por vetores como: homem, animais silvestres, pássaros e veículos.

Desta forma, o número total de contatos que um animal faz num intervalo de tempo Δt é dado por: $N_c = N_{cl} + N_{cnl}$, onde N_{cl} é igual a vizinhança estritamente local composta por 8 células.

O parâmetro $q = \frac{\mu R_0}{N_c}$ define a probabilidade de que cada contato entre um animal infectado e um suscetível resulte em transmissão da doença.

Portanto, as probabilidades de transição de estados são:

<i>transição</i>	<i>probabilidade</i>
$S \Rightarrow I$	$P = 1 - (1 - q)^{N_c}$
$I \Rightarrow R$	$\mu.$

É de se esperar que, no contato não local, a distância média L de desloca-

mento do vírus dependa de fatores geográficos, econômicos, culturais e sociais que motivam o movimento de pessoas, animais silvestres, pássaros e veículos.

Assim sendo, com o intuito de traduzir o conhecimento que se tem sobre os estabelecimentos agropecuários da região em estudo, optamos por modelar L por meio de um sistema fuzzy baseado em regras lingüísticas.

4. Modelo Fuzzy

Neste modelo, tomamos como ponto de partida a hipótese de que a conduta espacial da febre aftosa está relacionada com as diversas formas de organização da produção animal. Estas formas permitem estabelecer relações de causa-efeito no âmbito da pecuária, entre elas as do tipo epidemiológico.

Estudos, no sentido de elucidar a relação anteriormente citada, podem também ser encontrados em autores como: Maddarena (1991), que em seu trabalho faz uma análise do comportamento da doença e as características sócio-econômicas que condicionam as principais áreas mantenedoras e disseminadoras da enfermidade; Moraes (1993) adverte para a necessidade em integrar variáveis econômicas e biológicas para o estudo febre aftosa e Lyra e Silva (2004) destacam a importância da forma de organização da produção e movimentação dos animais na difusão da doença.

Diante do trabalho desses autores, entre outros, elaboramos variáveis lingüísticas que estão diretamente ligadas à estrutura sócio-econômica e geográfica do estabelecimento onde se encontra o animal infectado e, supomos o parâmetro L dependente dessas variáveis a fim de agregar ao modelo características típicas das regiões em estudo. Ou seja, $L = L(EP, CB, CP, AS)$, onde:

1. *Estrutura de Produção (EP)*: determina o tipo de atividade econômica da bovinocultura, é composta pelos seguintes termos lingüísticos:
 - (a) Pecuária de Subsistência: é representado por minifúndios de baixa produtividade com poucos bovinos.
 - (b) Transformação para leite: representa estabelecimentos dedicados à exploração de vacas para a produção leiteira, intensiva ou semi-intensiva, os rebanhos são pequenos ou médios com renovação populacional lenta.

- (c) Transformação para carne: representa regiões de recria ou engorda semi-intensiva. Ocupa áreas de pastos naturais com intensa movimentação de animais.
 - (d) Pecuária extrativa: corresponde aos estabelecimentos de cria extensiva com grandes rebanhos, caracterizando-se pelas exportações de bezerros ou novilhos.
2. *Comercialização de bovinos (CB)*: está diretamente ligada a intensidade de trânsito bovino e de seus subprodutos, a qual é reconhecida historicamente como uma das principais formas de difusão da febre aftosa. Medimos a variável pela densidade de animais comercializados no estabelecimento com relação ao número de animais existentes no seu município, a qual representamos pelos seguintes termos lingüísticos:
- (a) Baixa
 - (b) Média
 - (c) Alta
3. *Capacitação Pessoal (CP)*: representa a capacidade dos envolvidos com os animais em entender e identificar as implicações ambientais e econômicas da febre aftosa. Sendo a educação, concientização, esclarecimento e parceria o maior desafio no controle da disseminação doença, optamos por medir a variável atribuindo uma nota, na qual foi dividida em:
- (a) Baixa
 - (b) Média
 - (c) Alta
4. *Presença de animais silvestres (AS)*: animais que transitam livremente entre as fazendas, tais como roedores, veados, cães, gatos e aves são responsáveis pela disseminação do vírus de um animal para outro ou entre estabelecimentos. Assim, definimos para a variável os seguintes termos lingüísticos :
- (a) Fraca
 - (b) Acentuada

Desta forma, optamos por modelar L por meio de um sistema baseado em regras fuzzy, com o intuito de traduzir o conhecimento que se tem sobre a dependência de L com respeito às variáveis EP , CB , CP e AS .

Um sistema baseado em regras fuzzy possui um processador de entrada (ou fuzzificador), um conjunto de regras lingüísticas, um método de inferência fuzzy e um processador de saída (ou defuzzificador) gerando um número real.

No esquema da figura 3, a base de conhecimentos é traduzida por um método de inferência fuzzy e um conjunto de regras fuzzy que desempenham o papel de uma função matemática.

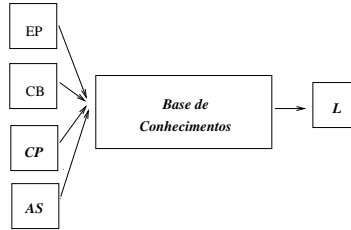


Figura 3: Sistema baseado em regras fuzzy.

Cada uma das variáveis lingüísticas foi modelada matematicamente por um conjunto fuzzy através de sua função de pertinência. Para a variável de saída, *distância L*, atribuímos os seguintes termos lingüísticos: baixa, média baixa, média, média alta e alta. As funções de pertinências são do tipo triangular e trapezoidal, conforme Figuras de 4 a 8.

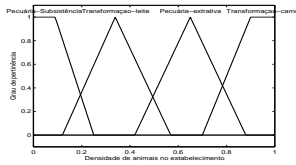


Figura 4: Variável: estrutura de produção.

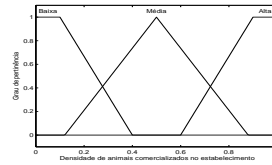


Figura 5: Variável: comercialização bovina.

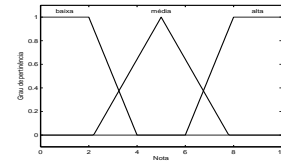


Figura 6: Variável: capacitação pessoal.

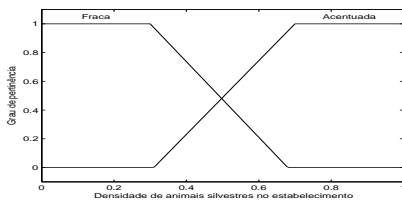


Figura 7: Variável: presença de animais silvestres.

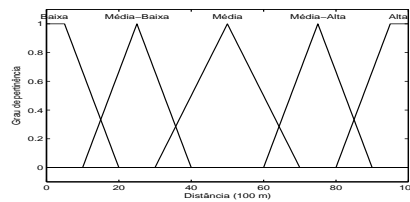


Figura 8: Variável: Distância L.

As regras fuzzy utilizadas foram feitas com as informações de um especialista e o método de inferência utilizado foi o de Mamdani.

5. Simulações Numéricas

Como exemplo desta proposta utilizamos simulações numéricas que nos possibilitam observar o avanço de um pequeno foco da febre aftosa sobre uma população de bovinos suscetíveis em estabelecimentos agropecuários, localizados na região sul de Mato Grosso do Sul

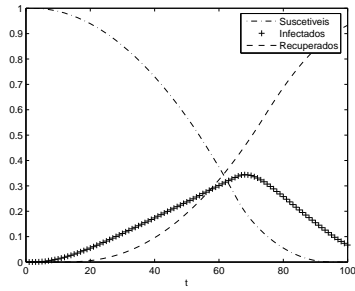
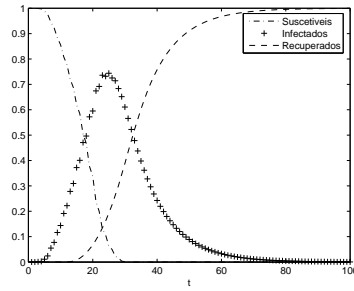
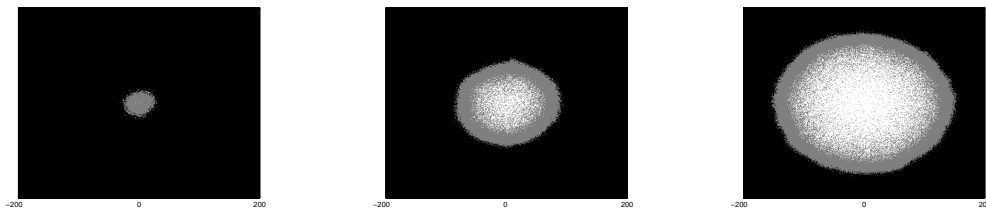
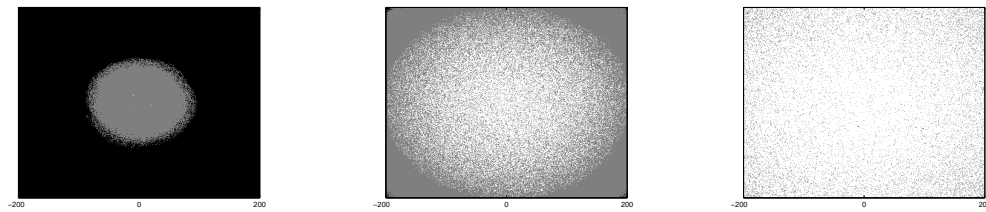
Com base na densidade demográfica desta região, que é de aproximadamente 98 cabeças/Km², tomamos a área de cada célula do reticulado igual a 0,01 Km² e iniciamos as simulações considerando toda população bovina suscetível com apenas um infectado no centro do reticulado. Para o parâmetro R_0 usamos o mesmo valor atribuído por Ferreira (2000) e a fração de suscetíveis com chance de ter contato não local tomamos igual a $pnl = 0.1$.

Na primeira simulação obtemos o valor de $L = 6$. Para isso supomos que o animal infectado estava num estabelecimento agropecuário com as seguintes características: propriedade pequena cuja estrutura de produção é a pecuária de subsistência, comercialização de bovinos baixa, capacitação pessoal média e presença fraca de animais silvestres.

Na segunda simulação supomos que o animal infectado estava num estabelecimento agropecuário cuja estrutura de produção é de transformação para carne com comercialização de bovinos média, capacitação pessoal média e presença fraca de animais silvestres. Assim, nesta simulação obtivemos $L = 18$.

A evolução dos contingentes populacionais ao longo do tempo para os diferentes valores de L está representada nas Figuras 9 e 10.

Os padrões espaciais obtidos através das simulações numéricas no modelo fuzzy, estão representadas nas Figuras 11 e 12, respectivamente. A cor preta corresponde à área ocupada pelos suscetíveis (S), cinza corresponde à área ocupada pelos infectados (I) e branco corresponde à área ocupada pelos animais recuperados (R).

Figura 9: $L = 6$.Figura 10: $L = 18$.Figura 11: Padrões espaciais obtidos através da primeira simulação numérica para $t = 10$, $t = 30$ e $t = 50$ dias, respectivamente.Figura 12: Padrões espaciais obtidos através da segunda simulação numérica para $t = 10$, $t = 30$ e $t = 50$ dias, respectivamente.

Referências

Emmendorfer, L. R. e Rodrigues, L. A. D. (2001). Um modelo de autômatos celulares para o espalhamento geográfico de epidemias. *TEMA Tend. Mat. Apl. Comput.*, 2:73–80.

- Ferreira, F. (2000). *Dinâmica Espacial da Febre Aftosa em Bovinos: Um Modelo Matemático*. Tese de Doutorado, Faculdade de Saúde Pública, USP, São Paulo, SP.
- Lyra, T. M. P. e Silva, J. A. (2004). A febre aftosa no Brasil, 1960–2002. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec*, 56:565–576.
- Maddarena, E. F. (1991). Definição das Áreas endêmicas primárias de febre aftosa em Minas Gerais. Dissertação de mestrado, Escola de Veterinária, UFMG, Minas Gerais, MG.
- Moraes, G. M. (1993). Definição e delimitação dos circuitos de comercialização bovina como elemento metodológico de intervenção sanitária: O caso da febre aftosa no Estado de Mato Grosso do Sul. Dissertação de mestrado, Escola de Veterinária, UFMG, Minas Gerais, MG.
- Organização Internacional de Epizootias (2006). Informaciones sanitarias. http://www.oie.int/esp/info/hebdo/EIS_27.H, 19(11). Acesso em: 08 abril 2006.
- Peixoto, M. S. e Barros, L. C. (2004). Um estudo de autômatos celulares para o espalhamento geográfico de epidemias com parâmetros fuzzy. *TEMA Tend. Mat. Apl. Comput.*, 5(1):125–133.
- Rodrigues, L. A. D., Mistro, D. C., Emmendorfer, L. R., e Cavalin, C. F. (2005). Um modelo matemático discreto para a dispersão da febre aftosa em bovinos. Seminário Latino Americano de Biomatemática.

