

MODELAGEM PARA EPIDEMIA DE DENGUE VIA AUTÔMATO CELULAR. Silvia C. Formoso, Edson D. Leonel, R. E. de Carvalho, M. V. R. M. Egydio. - Física – Engenharia Ambiental – Departamento de Estatística, Matemática Aplicada e Computação – Universidade Estadual Paulista – Campus de Rio Claro.

Autômatos celulares são usados como modelos matemáticos simples para uma grande variedade de fenômenos complexos. Eles consistem na dinâmica determinística ou aleatória de regras previamente definidas. Geralmente, evoluem no tempo e no espaço de forma discreta e conforme regras locais. Estudos sobre vários aspectos da epidemiologia da dengue forneceram informações fundamentais que podem ser usadas para desenvolver um modelo de autômato celular para epidemia de dengue. Com base nisso, um autômato celular para epidemia de dengue é proposto com o objetivo de simular a evolução temporal do número de casos da doença e os resultados comparados com dados fornecidos por órgãos de saúde como a FUNASA.

A dinâmica da transmissão da dengue envolve um vírus e duas populações, a de mosquitos e a humana. O modelo considera a descrição da epidemiologia a partir de duas variáveis: (i) a primeira está relacionada com a presença de pessoas infectadas; (ii) já a segunda se relaciona com a presença do mosquito transmissor. A condição para que se tenha transmissão da dengue entre sítios distintos é a presença simultânea de pessoas infectadas e do mosquito transmissor no sítio infectante. Supõe-se que a transmissão da infecção seja um evento probabilístico, sendo a dengue transmitida por um encontro aleatório.

A duração de uma geração na população de mosquitos é de alguns dias. Comparativamente, a duração de uma geração entre os indivíduos humanos é de dezenas de anos. Por isso, considera-se no modelo uma população humana constante, ao passo que o mosquito apresenta uma vida média de 30 dias.

Para a simulação das variações sazonais e mobilidade dos vetores são utilizadas, respectivamente, (a) uma função periódica do tipo $\sin(t)$ e (b) uma distribuição de Levy:

(a) $n = n_0 + \text{INT} [n_0 \cdot \sin (2\pi \cdot k/ T + \phi)]$, onde n_0 representa o número inicial de focos de mosquito; nn_0 representa um número residual de mosquitos, considerando que, mesmo no inverno, um número de mosquitos continua circulando na dinâmica; INT significa que apenas a parte inteira da operação é tomada no cálculo; k denota o número de interações feitas pelo modelo; T denota o período de um ano (ou 365 dias) e ϕ é um ângulo de fase.

$$(b) p(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} dt \exp (it (\mu - r) - |t|^\alpha), \text{ onde } \mu = 4 \text{ e } \alpha = 0.68.$$

Assim, o alcance de cada um dos vôos não é constante, mas escolhido a partir de uma distribuição que para longas distâncias exibe um decaimento em lei de potência. Cada sítio infectado age como fonte inoculadora para diferentes sítios escolhidos aleatoriamente de acordo com a distribuição de Levy.

Os períodos de incubação e transmissão nos sítios infectados também foram incluídos na dinâmica. Como o modelo proposto considera a circulação de um único sorotipo na dinâmica de transmissão e como a pessoa adquire imunidade específica ao sorotipo após o período de infecção, foi considerado que, depois desse período de transmissão (viremia), a pessoa adquire imunidade, permanecendo assim indefinidamente. O período de incubação do vírus no mosquito pode variar de 3 a 10 dias. O ser humano, por sua vez, apresenta um período de transmissão da dengue que varia de 3 a 7 dias.. A efetiva transmissão da dengue ocorre quando um mesmo mosquito picar sucessivamente um indivíduo infectante e, após um período de tempo (período de incubação do vírus no mosquito), picar um indivíduo suscetível.

Na Tabela 1 encontram-se as condições iniciais e os valores dos parâmetros utilizados nas simulações.

Tabela 1: *Condições iniciais e valores dos parâmetros utilizados nas simulações*

n_0	350
nn_0	n_0+150
T	365 dias
ϕ	-60°
período de incubação do vírus no mosquito	3-10 dias
sobrevida do mosquito	30 dias
período de transmsão (viremia) no ser humano	3-7 dias

As curvas de progresso temporal do número de casos da doença obtidas são sigmóides, o que indica que a dengue é uma doença policíclica, caracterizada pela existência de dois períodos: um em que a doença se espalha rapidamente (altas temperaturas e alta pluviosidade), contrastado com outro período em que o desenvolvimento da doença é quase interrompido (Figura 1). Com a introdução do sorotipo, ocorre um aumento do número de casos em função da densidade de vetores e da população suscetível. Em seguida, verifica-se uma “interrupção” do número de casos, coincidente com o período de meses frios, entretanto, sem que o vírus deixe de circular na população. Com a chegada dos meses quentes, há uma elevação da temperatura, dos índices pluviométricos e da umidade relativa do ar, fatores ambientais altamente propícios à proliferação do vetor da doença. Assim, uma nova onda epidêmica ocorre. Este fato possivelmente está relacionado ao comportamento do processo epidêmico ter sido regulado fundamentalmente por questões de ordem climática e populacional. A possibilidade de uma nova infecção aumenta quando a população de mosquitos cresce, pois nesse caso ocorrerá maior número de contatos entre indivíduos e mosquitos.

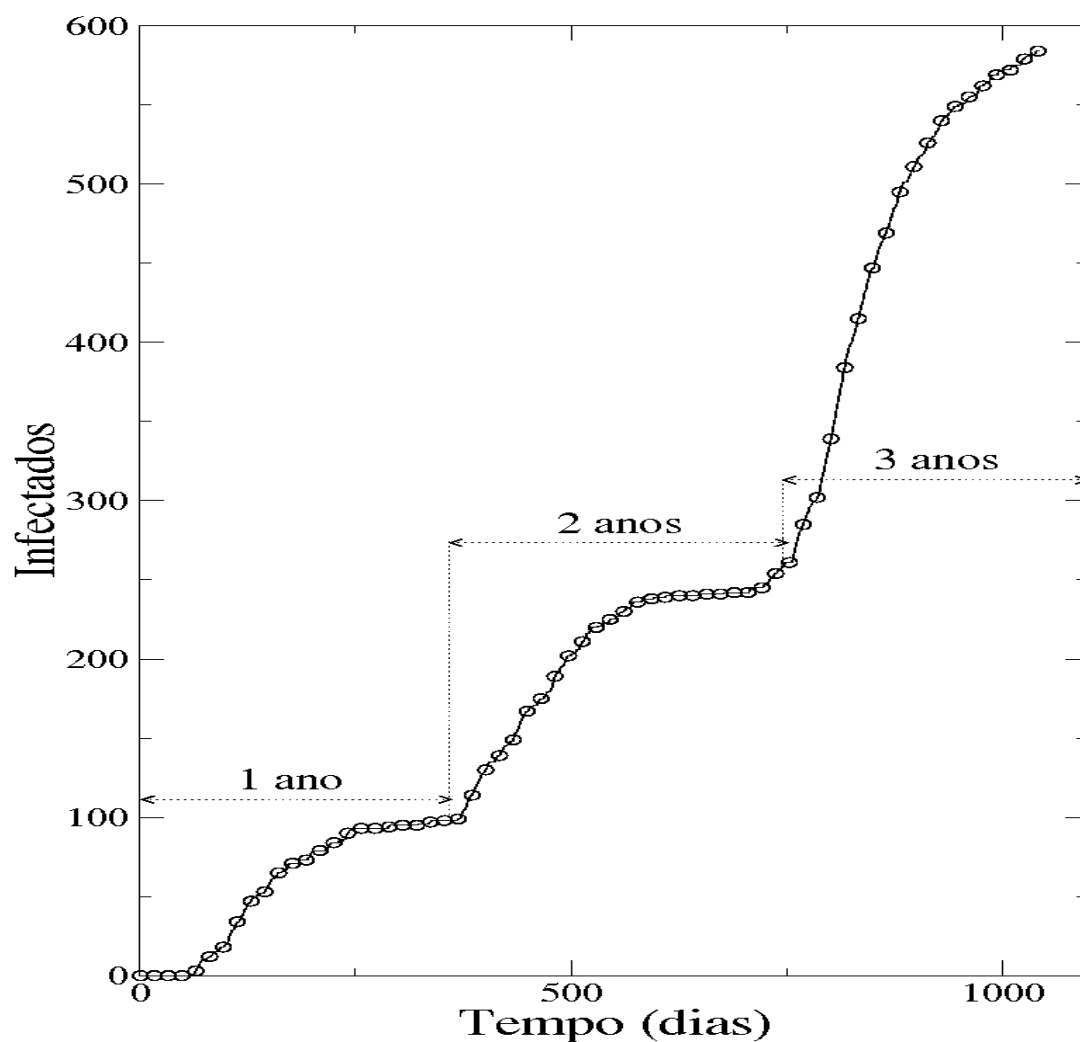


Figura 1: *Evolução temporal do número de casos de dengue considerando um período de três anos.*

Os mapas de incidência da doença indicam que a epidemia se espalha, predominantemente, entre sítios próximos uns dos outros (Figura 2). Desse modo, um possível método de erradicar a proliferação da epidemia é o combate aos focos do mosquito em sítios vizinhos aos que registraram ocorrência da doença.

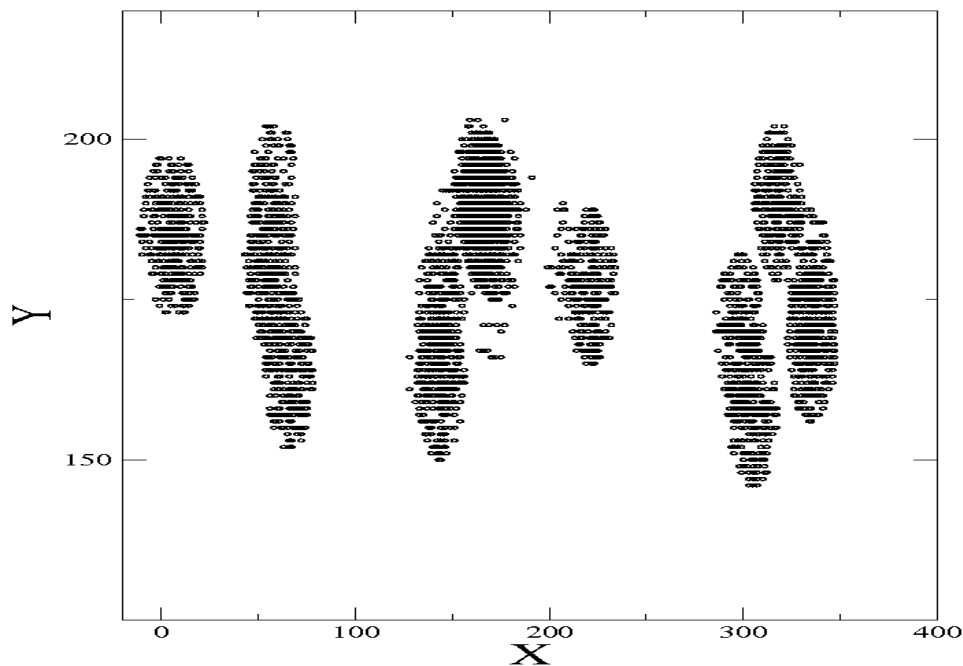


Figura 2: *Evolução espacial da transmissão da dengue durante a simulação de um período de três anos.*

Devido ao período de viremia no homem, após o qual as pessoas infectadas adquirem imunidade específica, o gráfico do número de pessoas com imunidade está deslocado em relação ao gráfico de pessoas infectadas por apenas um pequeno período correspondente ao período de infecção do vírus no homem, que varia de 3 a 7 dias (Figura 3). Estes deslocamentos não são observados na figura por causa da escala.

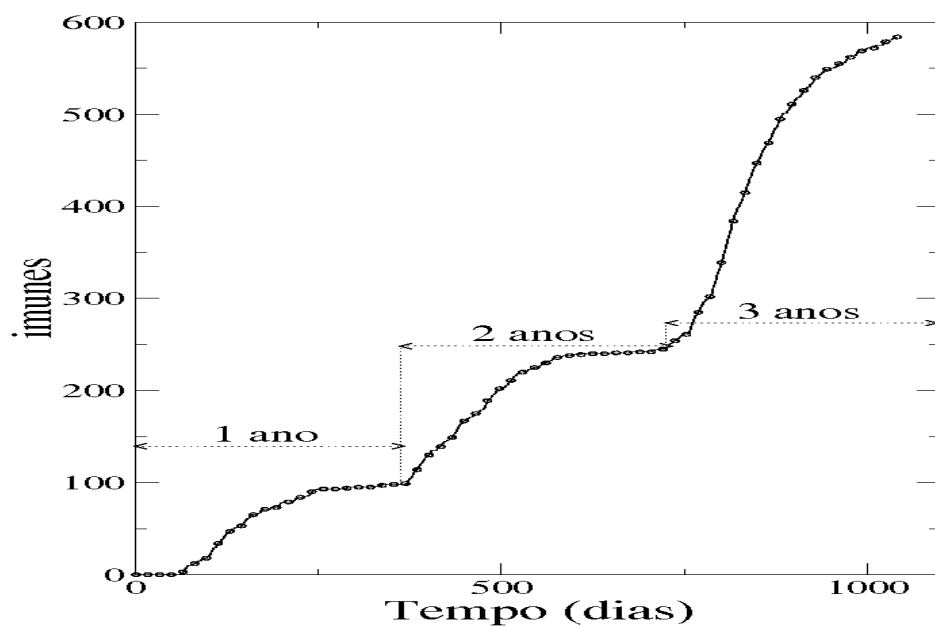


Figura 3: *Evolução temporal do número de pessoas imunes durante um período de três anos.*

De uma forma geral, nas simulações efetuadas verificou-se que quanto maior o período de infecção do homem, tempo durante o qual o indivíduo infectante transmite o vírus (que varia de 3 a 7 dias) maior é o número de indivíduos infectados em um mesmo período de tempo. Com relação ao tempo de incubação do vírus no mosquito (período durante o qual o mosquito possui o vírus, mas ainda não é infectante), o comportamento é o oposto: o aumento dos períodos de incubação acarreta a diminuição do número de infectados.

Variando os parâmetros que controlam a transmissão da dengue, a evolução do número de casos da doença foi capturada, caracterizando a dengue como uma doença policíclica, apresentando períodos de rápido crescimento no número de infectados contrastados com períodos em que o desenvolvimento da doença é quase parado, correspondendo aos meses de verão (altas temperaturas e pluviosidade) e inverno (tempo mais frio e seco), respectivamente. Também foi possível observar que a transmissão se dá, predominantemente, entre sítios próximos uns dos outros (nesse aspecto, é importante salientar que no modelo descrito não foram consideradas rajadas de vento para os vôos dos mosquitos). Desse modo, os efeitos mais fundamentais observados no modelo que determinam os aspectos da transmissão da dengue são as variações sazonais e os vôos dos mosquitos transmissores.

Referências Bibliográficas

- Wolfram, S. Theory and Applications of Cellular Automata (1986), World Scientific, Singapore.
- Silva, S. L.; Ferreira, J. A.; Martins, M. L. Epidemic Spreading in a Scale-free Network of Regular Lattices. Departamento de Física, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, Brasil, 2006.
- Yang, H. M. Epidemiologia da Transmissão da Dengue. TEMA Tend. Mat. Apl. Comput., 4, No. 3 (2003), 387-396.
- Ferreira, C. P.; Yang, H. M. Estudo da Transmissão da Dengue entre os Indivíduos em Interação com a População de Mosquitos Aedes Aegypti. Seleta do CNMAC.

Bolsa: FAPESP