

## MODELAGEM COMPUTACIONAL DA DISSEMINAÇÃO EPIDEMIOLÓGICA DE DOENÇAS CAUSADAS PELO AEADES AEGYPTI

### COMPUTATION MODELING OF THE EPIDEMIOLOGICAL SPREAD OF DISEASES CAUSED BY AEADES AEGYPTI

Amanda O. Fernandes<sup>1</sup>, Livia de O. Rodrigues<sup>1</sup>, Marcella L. Menezes<sup>1</sup>, Gustavo M. Novaes<sup>1</sup>, Evelyn A. de Oliveira<sup>1</sup> e João Gabriel R. Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Modelagem Computacional, R. José Péres, 558 - Centro, Leopoldina - MG, Brasil,  
<http://www.leopoldina.cefetmg.br/>

**Palavras-chave:** modelagem computacional, autômatos celulares, equações diferenciais, *Aedes aegypti*.

**Resumo.** A alta incidência de epidemias de dengue, chikungunya, zika e febre amarela tornou-se um fator preocupante para as autoridades de saúde pública. O *Aedes aegypti* é o principal agente de transmissão dessas doenças e sua erradicação é uma tarefa complexa. A introdução de Mosquitos Geneticamente Modificados (MGM) no meio ambiente é uma das ações em curso para combater a disseminação de doenças. No entanto, algumas informações como "onde" ou "quantos" MGM são necessários para a diminuição da população selvagem de *Aedes aegypti* ainda não são bem conhecidas. Este trabalho utiliza modelagem matemática e computacional para mapear a dinâmica populacional do *Aedes aegypti*, e, assim, simular o comportamento de uma população de mosquitos e suas interações com seres humanos. O modelo além de definir uma máquina de estados para as várias etapas da vida do vetor, reproduz a dinâmica das populações saudáveis e infectadas dos mosquitos, bem como a interação dessas populações com os seres humanos, além de representar a influência do MGM no meio ambiente.

**Palavras-chave:** computational modeling, cellular automata, differential equations, *Aedes aegypti*.

**Abstract.** The high incidences of Dengue, Chikungunya, Zika and Yellow Fever epidemics have become a worrying factor for public health authorities. *Aedes aegypti* is the main transmission agent for those diseases and, its eradication is a complex task. The introduction of Genetically Modified Mosquitoes (GMM) into the environment is one of the actions under course to combat the spread of diseases. However, some information as "where" or "how many GMM mosquitoes" are necessary for the decrease of wild population of *Aedes aegypti* are not well known yet. This work uses computational modeling to map the population dynamics of the *Aedes aegypti*. A mathematical and computational model has been developed to simulate the behavior of a mosquito population and its interactions with human beings. The model, in addition to defining a state machine for the various stages of vector life, reproduces the dynamics of healthy and infected populations of mosquitoes, as well as the interaction of these populations with humans, as well as representing the influence of MGM on the environment.

## 1 INTRODUÇÃO

Algumas doenças, como a dengue, zika, chikungunya e febre amarela, também intituladas arboviroses, são transmitidas pelo mosquito vetor *Aedes aegypti*, o que o torna um dos insetos de grande importância médica na atualidade (Leite, 2018). A implementação de medidas de controle desses transmissores é primordial para a saúde pública (da Silva et al.). No entanto, a presença de *Aedes aegypti* é influenciada por atividades antrópicas (Leite, 2018), que quando combinadas com os fatores climáticos propícios, má-formação e falta de infraestrutura nas cidades, contribuem para o aumento das epidemias. Assim, a cada ano, especialmente no verão, verificam-se novas estatísticas alarmantes sobre as principais epidemias relacionadas ao *Aedes aegypti*. Durante esses períodos, diferentes órgãos governamentais como o Ministério da Saúde utilizam estratégias para tentar conter a proliferação de mosquitos, tais como a promoção de ações educativas, durante a visita domiciliar pelos Agentes Comunitários, e a criação do Plano Nacional de Controle da Dengue (PNCD) (Zara et al., 2016), mecanismos que envolvem muita gente, tempo e altos custos.

Durante muitas décadas, o emprego de inseticidas químicos foi a única maneira de controlar esses vetores (Leite, 2018). Por consequência, empresas privadas e estudiosos buscam alternativas de controle do transmissor. Entre elas, pode-se citar a empresa britânica Oxitec, que criou o mosquito *Aedes* geneticamente modificado, cujo intuito é diminuir a população de *Aedes aegypti* silvestre. Ou mesmo Massahud (2011), com o Projeto “Propagação de Dengue Usando Autômatos Celulares”, o qual produz um modelo matemático para mapear o comportamento de doenças infecciosas, que, quando combinados com recursos computacionais, permitem simulações das características comportamentais dos indivíduos.

A erradicação do *Aedes aegypti* é considerada praticamente impossível (da Silva et al.). Neste sentido, modelos matemáticos que descrevem a dinâmica populacional deste vetor e a propagação de epidemias a ele associada, vêm sendo desenvolvidos. Estes modelos têm o intuito de auxiliar o entendimento da epidemia, bem como possibilitar a proposta de desenvolvimento de ferramentas de combate ao mosquito.

Esses modelos baseiam-se em variáveis sócio-ambientais e climáticas, que influenciam o ciclo vital e buscam inclusive avaliar meios de controle do vetor. (Barsante et al., 2011).

### 1.1 Motivação

A erradicação do *Aedes aegypti* é uma tarefa complexa, já que, somente a Dengue, chega atingir entre 50 a 100 milhões de pessoas anualmente no mundo, destas 550 mil necessitam de hospitalização e 20 mil vão a óbito (Silva et al., 2008). Dessa forma, devido a esse descontrole, as políticas públicas têm como objetivo o controle e, não mais, a erradicação do vetor.

Campanhas e esclarecimentos sobre as doenças transmitidas pelo *Aedes aegypti* são mecanismos amplamente utilizados, o que exige a participação da população no combate às doenças. (Massahud, 2011). Além disso, existem vacinas em combate a Dengue e Febre Amarela, que, porém, não geram imunidade para Chikungunya e Zika. (TERRA et al., 2018)

Por esses motivos, faz-se crucial o conhecimento a cerca de um maior número de informações sobre o vetor e seu espalhamento, para que assim, sejam realizados estudos de métodos matemáticos para modelar o fenômeno e contribuir para o avanço de estudos na área.

### 1.2 Objetivo

Com o intuito de colaborar com os estudos relacionados às doenças do *Aedes aegypti*, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo matemático-computacional, que

descreve a dinâmica de espalhamento da população de mosquito, levando em consideração todos os seus estados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Mosquito *Aedes aegypti*

O *Aedes aegypti* é um mosquito da família Culicidae (Massahud, 2011). Os culicídeos na natureza nutrem-se de néctar de flores e suco de frutos (Barata et al., 2001). Contudo, o repasto sanguíneo feito pelas fêmeas dos mosquitos anautógenos é fundamental para a maturação dos ovos (Barata et al., 2001).

Essas fêmeas, alimentam-se mais de uma vez entre duas oviposições sucessivas, especialmente quando perturbado antes de estar totalmente ingurgitado (Barata et al., 2001). Essa característica, aliada a sua estreita associação com o homem, e ao fato de ser um mosquito urbano, encontrado em maior abundância em cidades, vilas e povoados (da Saude. Fundacao Nacional de Saude, 2001), aumenta a possibilidade do mosquito ingerir e transmitir doenças.

O vetor se desenvolve através de metamorfose completa (da Saude. Fundacao Nacional de Saude, 2001) e seu ciclo de vida é composto das fases: aquática (ovos, larvas e pupas) e alada (mosquitos adultos) (Barsante et al., 2011). Em contato com a água, os ovos desenvolvem-se rapidamente em larvas, que dão origem às pupas, das quais surge o vetor adulto (Barsante et al., 2011).

### 2.2 Mosquito Geneticamente Modificado (MGM)

O mosquito geneticamente modificado é uma ferramenta criada para o controle do *Aedes aegypti*, sua eficácia já testada em diversos projetos no Panamá e Ilhas Cayman, demonstra supressões da população selvagem do *Aedes aegypti* (Wallace e Moreno, 2014).

Para a criação de MGM, um gene específico é modificado no DNA dos mosquitos, que passam a produzir uma proteína que impede seus descendentes de atingir a fase adulta. Somente mosquitos machos são liberados em vias públicas para realizarem a cópula com fêmeas selvagens. Os descendentes herdaram os genes inseridos e morrem antes de chegar à fase adulta, diminuindo, portanto, a população de mosquitos aptos a transmissão de doenças. (Wallace e Moreno, 2014).

### 2.3 Modelos Matemáticos

A modelagem matemática é uma ferramenta para análise de dispersão de espalhamentos epidemiológicos, e sua utilização tem crescido nos dias de hoje, já que, se razoavelmente fiéis a realidade, auxiliam no controle desejado de parâmetros (YAMASHITA et al., 2014). Nessa sessão serão descritos dois modelos utilizados para descrever a proliferação de doenças, o modelo suscetível, infectado e recuperado (SIR) e os modelos baseados em indivíduos (MBI).

#### 2.3.1 Modelo (SIR)

Proposto por Kermack e McKendrick (1927), o modelo SIR é composto de um sistema equações diferenciais ordinárias e foi proposto para representação de doenças infecciosas. Por meio dele é possível estudar disseminação de doenças. As equações se dividem em 3 classes (Suscetível, Infectado e Recuperado/Removido) (Massahud, 2011). A primeira, representa os indivíduos suscetíveis, aqueles que ainda não foram contaminados por doença. A segunda é a classe dos indivíduos contaminados com a doença. Já a terceira, é a classe que representa

cura ou óbito dos indivíduos. Além disso, as equações desse modelo levam em conta taxas de transição dos estados, como a taxa de infecção e a taxa de mortalidade ou cura da doença (Massahud, 2011).

### 2.3.2 Modelos Baseados em Indivíduos (MBI)

Ao descrever dinâmica de propagação epidêmica, através de sistemas equações diferenciais, torna-se arduo utilizar de muitos fatores que influenciam na dispersão. Assim, os modelos baseados em indivíduos surgem disponibilizando um uso maior de parâmetros que influenciam na dinâmica estudada.

Em um MBI, os indivíduos carregam tantas informações quantas forem necessárias para a composição do modelo (Massahud, 2011). Ao utilizar essa ferramenta, as características que são levadas em conta são biológicas e comportamentais, dessa forma, em um modelo com populações distintas, cada uma é modelada separadamente com suas características específicas.

A quantidade de características associadas ao indivíduo determina o detalhamento do modelo. Esse tipo de modelagem baseada no indivíduo além de permitir a visualização de padrões mais próximos à realidade, auxilia em uma investigação profunda sobre mecanismos responsáveis por tais padrões (Massahud, 2011).

## 2.4 Método de Euler

### 2.5 Autômatos Celulares (AC)

Os Autômatos Celulares foram introduzidos nos anos 50 pelo matemático Von Neumann *et al.* (1966). O AC é uma malha composta por várias células e a sua vizinhança é normalmente considerada como sendo ela própria e todas as células imediatamente adjacentes (Massahud, 2011), como representado na Figura 1.

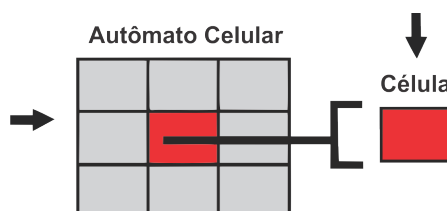


Figura 1: Representação de Autômato Celular.

O objetivo dessa ferramenta é verificar, em intervalos de tempo, o valor de uma variável em uma célula, sendo afetada pelo valor das células vizinhas em uma etapa anterior. Deste modo, é possível observar comportamentos globais através de interações simples.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Modelo Matemático proposto

O modelo exposto é composto por um sistema de equações diferenciais ordinárias que descreve a dinâmica populacional do mosquito e é solucionado através do método de Euler. O mesmo objetiva simular a interação das seguintes populações de indivíduos: Ovo ( $O$ ), Mosquito ( $M$ ), Mosquito Infectado ( $M_I$ ), Mosquito Geneticamente Modificado ( $M_B$ ), Pessoa Suscetível ( $P_S$ ) e Pessoa Infectada ( $P_I$ ), conforme Figura 2.

A elaboração desse modelo é inspirada nos modelos SIR e MBI.

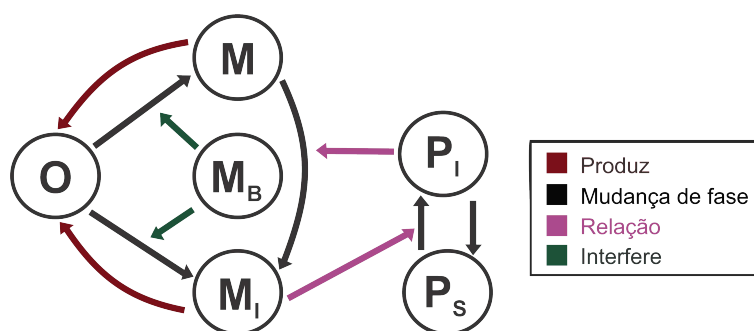


Figura 2: Relação entre as populações

Para descrever o modelo matemático proposto são considerados os parâmetros da Tabela 1:

Parâmetros	Descrição	Valores
$\frac{M}{2}$	População de mosquitos fêmeas	
$Tr_i$	Entrada da célula	
$Tr_o$	Saída da célula	
$\omega_M = (\frac{M}{M_I + M_B + M})$	Proporção de Mosquitos Saudáveis	
$\omega_{P_S} = (\frac{P_S}{P_I + P_S})$	Proporção de Pessoas Suscetíveis	
$\omega_{P_I} = (\frac{P_I}{P_I + P_S})$	Proporção de Pessoas Infectadas	
$\alpha$	Nascimento de ovos	3.0
$\gamma_O$	Morte dos ovos	0.0587
$\gamma_M$	Morte dos mosquitos	0.022
$\gamma_{M_I}$	Morte dos mosquitos infectados	0.022
$\gamma_{M_B}$	Morte dos mosquitos geneticamente modificados	0.242
$\beta_{M\_M_I}$	Transição de ovo para mosquito	0.094
$\beta_{M\_M_I}$	Transição de mosquito para mosquito infectado	0.25
$\beta_{P_S\_P_I}$	Transição de Pessoa suscetível para infectada	0.1018
$\beta_{P_I\_P_S}$	Transição de Pessoa infectada para suscetível	0.999
$\rho_M$	Ovos saudáveis postos por mosquitos infectados	0.60
$\rho_{M_I}$	Ovos não saudáveis postos por mosquitos infectados	0.40

Tabela 1: Parâmetros das equações.

### 3.2 Dinâmica do ovo

O ciclo de vida do *Aedes aegypti* se inicia após a deposição dos ovos pela fêmea e as fases larva e pupa encontram-se implícitas na Equação 1, representando o estágio aquático.

No estágio Ovo, primeiramente é acrescido o termo que representa o nascimento da população ( $agua * \alpha * [M + M_I]$ ). Neste termo encontra-se o produto da taxa de nascimento dos ovos ( $\alpha$ ) pela probabilidade encontro de indivíduos capazes de gerar ovos ( $[M + M_I]$ ). Além disso, a oviposição é realizada onde há água, parâmetro binário ( $agua$ ). Por conseguinte, são subtraídos os ovos que não sobreviveram ( $\gamma_O O$ ) e os que conseguiram chegar a fase mosquito ( $\beta_{O\_M} O$ ).

$$\frac{dO}{dt} = agua\alpha[M + M_I] - \gamma_O O - \beta_{O\_M} O \tag{1}$$

### 3.3 Dinâmica do Mosquito

A Equação 2, descreve a variação de mosquitos em relação ao tempo. Para essa dinâmica, é considerado o número de ovos saudáveis ( $\beta_{O\_M}O\omega_M$ ) e os infectados ( $\beta_{O\_M}O\omega_{M_i}\rho_M$ ) que eclodiram e chegaram à fase adulta. Em relação à diminuição dessa população, é considerada a mortalidade dos mosquitos ( $\gamma_M M$ ), bem como a parcela dos mesmos que serão infectados ( $\beta_{M\_M_I} \frac{M}{2} \omega_{P_I}$ ), já acrescida no estágio de Mosquito Infectado. Além disso, deve ser considerada a migração espacial de indivíduos nesse estágio, tanto de saída ( $Tr_o M$ ) quanto de entrada ( $Tr_i M$ ) na célula atual.

$$\frac{dM}{dt} = \beta_{O\_M}O\omega_M + \beta_{O\_M}O\omega_{M_i}\rho_M - \gamma_M M - \beta_{M\_M_I} \frac{M}{2} \omega_{P_I} + (Tr_i M) - (Tr_o M) \quad (2)$$

### 3.4 Dinâmica do Mosquito Infectado

O dinâmica do mosquito infectado, representada pela Equação 3 se assemelha ao estágio do mosquito normal. No entanto, os termos e as taxas da equação são exclusivamente dessa população. Além disso, a equação possui um único termo para representar a quantidade de mosquitos que já nascem infectados ( $\beta_{O\_M}O\omega_{M_i}\rho_{M_i}$ ), já que existe uma taxa de ovos não saudáveis postos por mosquitos infectados ( $\rho_{M_i}$ ).

$$\frac{dM_i}{dt} = \beta_{O\_M}O\omega_{M_i}\rho_{M_i} - \gamma_{M_i} M_i + \beta_{M\_M_I} \frac{M}{2} \omega_{P_I} + (Tr_i M_i) - (Tr_o M_i) \quad (3)$$

### 3.5 Dinâmica do Mosquito Genéticamente Modificado

A Equação 4, refere-se ao mosquito genéticamente modificado. Esta é composta de 3 termos: o produto da taxa de morte pela quantidade de MGM ( $\gamma_{M_B} M_B$ ), calculando assim a população que irá morrer. Já os outros dois são responsáveis pela dispersão do mesmo ao decorrer do tempo ( $(Tr_i M_B)$  e  $(Tr_o M_B)$ ), como evidenciado na Dinâmica do Mosquito.

A implantação do mosquito geneticamente modificado é uma tentativa de propor e mostrar uma solução da propagação do *Aedes aegypti*. Portanto, a utilização do mesmo no desenvolvimento do projeto influenciará nas equações do Mosquito e do Mosquito Infectado pois ocasionará a redução dessas populações onde ele for inserido. Desta forma, torna-se possível analisar por meio de simulações quais serão os locais e quantidades estratégicas para inserí-los.

$$\frac{dM_B}{dt} = -\gamma_{M_B} M_B + (Tr_i M_B) - (Tr_o M_B) \quad (4)$$

### 3.6 Interação do mosquito com as pessoas

As populações de mosquitos se relacionam com a população de pessoas ao decorrer do tempo. Essas, por sinal, podem assumir diferentes estados. Uma pessoa suscetível torna-se infectada ao ser picada pelo mosquito infectado, assim como, um mosquito torna-se infectado ao picar uma pessoa infectada. Contudo, diferente dos mosquitos, as pessoas podem retornar para o estado de suscetível.

### 3.7 Dinâmica da Pessoa Suscetível

A Equação 5 corresponde à dinâmica da população de pessoas suscetíveis. É importante frisar que estar suscetível representa o estado inicial do indivíduo, dessa forma, o termo ( $-\beta_{P_S\_P_I} P_S \omega_{M_I}$ ) descreve o encontro de mosquitos infectados com pessoas suscetíveis, ou seja, a taxa de transição do estado suscetível para infectado. Devido à grande quantidade de doenças transmitidas

pelo vetor, foi considerado que pessoas infectadas ao se recuperarem, tornam-se novamente suscetíveis. Assim, é acrescida à equação, a parcela de população infectada que se tornou suscetível, ou seja, recuperada. ( $\beta_{P_I-P_S}P_I$ ).

$$\frac{dP_S}{dt} = -\beta_{P_S-P_I}P_S\omega_{M_I} + \beta_{P_I-P_S}P_I \quad (5)$$

### 3.8 Dinâmica da Pessoa Infectada

Conforme descrito pela Equação 6, esta fase é caracterizada por retratar um indivíduo com uma das doenças transmitidas pelo *Aedes aegypti*. Na dinâmica de pessoa infectada é acrescido o termo que indica a taxa de transição do estado suscetível para infectado ( $\beta_{P_S-P_I}P_S\omega_{M_I}$ ) e será subtraído o termo que determina a quantidade de pessoas infectadas que se recuperaram da doença, ou seja, são novamente suscetíveis ( $\beta_{P_I-P_S}P_I$ ).

$$\frac{dP_I}{dt} = \beta_{P_S-P_I}P_S\omega_{M_I} - \beta_{P_I-P_S}P_I \quad (6)$$

### 3.9 Simulação Computacional

A implementação computacional do presente projeto foi realizada em um computador com sistema operacional Windows 10, processador Intel core i5, 6GB de memória RAM e com disco rígido de 750 GB.

Para programação, foi adotada a linguagem JAVA e o software NetBeans. Já a visualização da dispersão foi possível através de gráficos. Esses foram gerados pelo software Gnuplot a partir dos arquivos de saída obtidos pelo programa desenvolvido. Ambas ferramentas foram escolhidas por serem gratuitas e multiplataforma.

## 4 RESULTADOS

Com objetivo de simular e validar o modelo computacional criado, diferentes cenários de testes foram utilizados. Estes cenários permitem analisar a dispersão do vetor e demonstram a influência de alguns parâmetros como a água, a presença de mosquitos infectados, pessoas infectadas e mosquito geneticamente modificado em uma determinada região.

### 4.1 Condição 1

As fêmeas do vetor chegam a depositar entre 150 a 200 ovos (Silva et al., 2008), assim, a Figura 3 descreve um cenário com a presença de 800 mosquitos, divididos igualmente em quatro células vizinhas. A partir dessa condição, simulações com diferentes cenários foram realizadas, como mostra a Figura 4.

Na Figura 4 (a), é apresentada a simulação em uma região com água e sem MGM, no decorrer de 30 dias. Nesse cenário é possível verificar, além do aumento da população de mosquitos, a sua dispersão. Já na Figura 4 (b), que apresenta a influência do MGM em uma região com água, ou seja, onde há eclosão de ovos, verificou-se que, apesar do crescimento da população de mosquitos e de sua dispersão, a presença do *Aedes* geneticamente modificado auxilia na redução do vetor, quando comparado à Figura 4 (a).

### 4.2 Condição 2

A segunda condição inicial, parte do princípio de uma região sem mosquitos infectados, evidenciada pela Figura 5.

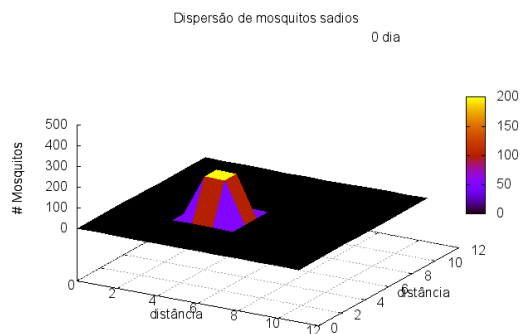
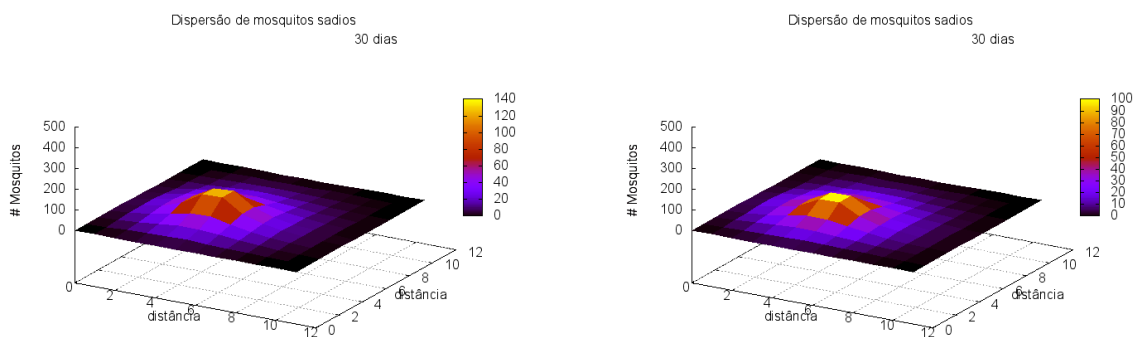


Figura 3: Região com 800 mosquitos (pré-simulação).



(a) Região com água e sem MGM, após 30 dias de simulação. (b) Região com água e sem MGM, após 30 dias de simulação.

Figura 4: Dispersão dos Mosquitos saúdáveis após 30 dias

Já na Figura 6 (a), nota-se, após 10 dias, a dispersão da população de mosquitos infectados, isso ocorre em consequência da presença de pessoas infectadas na região, já que, o ciclo de transmissão das doenças começa quando o mosquito pica uma pessoa infectada (Gemaque *et al.*).

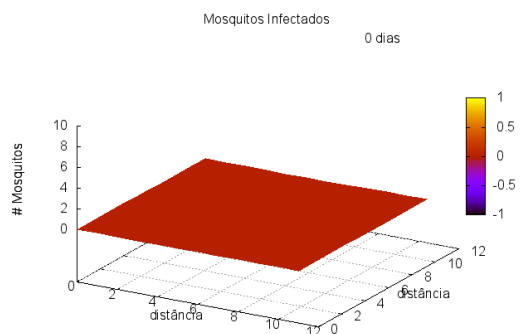


Figura 5: Região sem mosquitos infectados e com pessoas infectadas(pré-simulação).



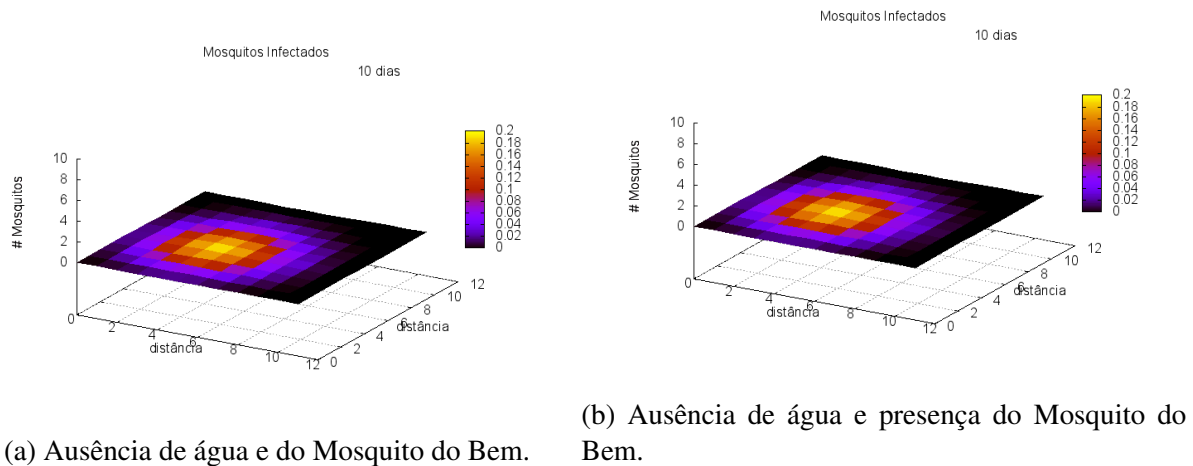


Figura 6: Dispersão dos Mosquitos infectados após 10 dias

Além do surgimento e dispersão do mosquito infectado devido a presença de pessoas infectadas na região, nota-se na Figura 6 (a) que, devido a ausência de água na região, não há um grande aumento da população de *Aedes* infectado.

Já na Figura 6 (b), percebe-se que não houve nenhuma alteração no cenário em relação ao apresentado na Figura 6 (a). Isto ocorre em razão de o MGM interferir na eclosão dos ovos após realizar a cópula com a fêmea do *Aedes aegypti*, e, não havendo água na região, não seria relevante a intervenção do MGM.

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nos últimos anos, a incidência de novas doenças transmitidas pelo *Aedes aegypti* despertaram ainda mais a atenção dos órgãos de saúde e dos principais afetados por elas, a população. Contudo, é reconhecível que a Dengue, Zika, Chikungunya e Febre Amarela, são doenças cujo espalhamento depende de fatores ecológicos, humanos e climáticos, o que torna o controle do vetor transmissor algo complexo.

Dessa forma, o presente estudo utilizou da modelagem matemática e computacional para simular a dispersão do *Aedes aegypti* e de doenças por ele transmitidas. Por meio do modelo, torna-se possível prever a propagação de mosquitos e doenças em diferentes cenários, que se alteram de acordo com a modificação de alguns parâmetros, sendo eles: água, populações de mosquitos e pessoas.

As simulações realizadas apresentaram resultados conforme o esperado, mostrando, não só a influência de cada população no crescimento, diminuição e na dispersão das populações de mosquitos, mas também, a eficiência do MGM. Em vista disso, é almejado que, a formulação matemática, para modelar o fenômeno, possa contribuir para o avanço de estudos que abordam esse mesmo problema.

Ademais, é necessário realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, para identificar a importância e a influência de um parâmetro sobre o resultado final das equações, e do modelo como um todo. Além disso, é imprescindível aplicar o modelo à realidade. De forma que, dado valores e resultados de uma situação real, seja possível observar se o modelo consegue obter resultados aproximados utilizando os mesmos dados. Para mais, como a migração do *Aedes aegypti* não depende somente da entrada, mas também de fatores aleatórios, é importante adotar um modelo não determinístico pra representar essa realidade. Dessa forma, o modelo

poderá auxiliar os agentes de Saúde no tratamento de epidemias, pois através dele, será possível realizar simulações que possibilitam a definição da melhor forma de ação preventiva, através das análises e avaliações dos cenários gerados e dos resultados, antes que medidas custosas sejam tomadas.

## REFERÊNCIAS

- Barata E.A., da Costa A.I.P., Chiaravalloti Neto F., Glasser C.M., Barata J.M.S., e Natal D. População de *aedes aegypti* (L.) em área endêmica de dengue, sudeste do Brasil. *Revista de Saude publica*, 35:237–242, 2001.
- Barsante L., Cardoso R., e Acebal J. Otimização multiobjetivo no controle de gastos com inseticidas e machos estéreis no combate da dengue. Em *Proceeding of the XLIII Brazilian Symposium of Operational Research*. 2011.
- da Saude. Fundacao Nacional de Saude B.M. *Dengue instruções para pessoal de combate ao vetor: manual de normas técnicas*. Brasília. Ministerio da Saude, 2001.
- da Silva M.G.N.M., Rodrigues M.A.B., e de Araujo R.E. Sistema de aquisição e processamento de imagens de ovitrampas para o combate a dengue. *Rev. Bras. Eng. Biom*, 28(4), ????
- Gemaque A.O., Wyse A.P.P., e Chamilco G.I. Modelo matemático da transmissão de dengue. ????
- Kermack W.O. e McKendrick A.G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the royal society of london. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character*, 115(772):700–721, 1927.
- Leite B.S. *Estratégias de controle de Aedes aegypti (L., 1762)(Diptera: Culicidae): principais perspectivas para o manejo de epidemias de arboviroses*. B.S. thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.
- Massahud R.T. Modelo de propagação de dengue usando autômatos celulares. 2011.
- Silva J.S., Scopel I., et al. A dengue no Brasil e as políticas de combate ao *aedes aegypti*: da tentativa de erradicação às políticas de controle-the dengue fever in Brazil and combat dengue fever to the *aedes aegypti*: Of the try eradication to control policies. *Hygeia*, 4(6), 2008.
- TERRA M.R., DA SILVA R.S., PEREIRA M.G.N., e LIMA A.F. *Aedes aegypti* e as arboviroses emergentes no Brasil. *REVISTA UNINGÁ REVIEW*, 30(3), 2018.
- Von Neumann J., Burks A.W., et al. Theory of self-reproducing automata. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(1):3–14, 1966.
- Wallace H. e Moreno C. *Mosquitos geneticamente modificados: preocupações atuais*. TWN, Third World Network, 2014.
- YAMASHITA W., TAKAHASHI L., e Chapiro G. Estudos de modelos dispersivos do mosquito *aedes aegypti*. 2014.
- Zara A.L.d.S.A., Santos S.M.d., Fernandes-Oliveira E.S., Carvalho R.G., e Coelho G.E. Estratégias de controle do *aedes aegypti*: uma revisão. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, 25:391–404, 2016.