

## O Desenvolvimento da População do *Aedes aegypti* Aplicado ao Modelo de Otimização no Controle da Dengue

Daniela Renata Cantane<sup>1</sup>, Ariane C. Cristino, Rogério A. Oliveira  
Helenice O. F. Silva, Fernando L. P. Santos  
Instituto de Biociências – Depto. de Bioestatística  
<sup>1</sup>e-mail: dcantane@ibb.unesp.br

Marco A. R. Fernandes<sup>2</sup>, Paulo E. M. Ribolla<sup>3</sup>, Jayme A. Souza Neto<sup>4</sup>  
<sup>2</sup>Depto. de Dermatologia e Radioterapia, <sup>3</sup>Depto. de Parasitologia  
<sup>4</sup>Depto. de Genética  
UNESP - Campus de Botucatu  
Distrito de Rubião Júnior, S/N  
CEP: 18618-970 - Botucatu / SP, Brasil

### RESUMO

A dengue é uma doença infecciosa preocupante da atualidade devido à crescente quantidade de casos nos últimos anos e a alta taxa de mortalidade. A picada da fêmea do mosquito do gênero *Aedes aegypti* é a responsável pela transmissão do vírus da dengue. Como ainda não existe vacina, o único método utilizado para proteção da população contra a doença é a utilização de controles químicos (inseticidas), físicos (remoção de criadouros), genéticos (transgenia) e biológicos (esterilização). Neste trabalho é apresentado um experimento para estimar as taxas relacionadas à dinâmica populacional dos mosquitos, cujos valores são utilizados no modelo matemático de otimização para o controle da dengue. A implementação das equações matemáticas visa simular a dinâmica da população do mosquito, com o objetivo reduzir a transmissão do vírus da dengue por meio de possíveis cenários de controle do número de mosquitos.

**PALAVRAS CHAVE.** Dengue, Taxas da população de mosquitos, *Aedes aegypti*.

**Área principal.** SA – PO na Área de Saúde.

### ABSTRACT

Nowadays the dengue fever is the most serious infectious disease because the number of cases increases each year as such as the mortality rate. The *Aedes aegypti* female mosquitoes are responsible for the transmission of the dengue virus. There is no vaccine for the population protection against the disease. Thus the only procedure available is some methods such as: chemical (insecticide), physical (removal of breeding), genetic (transgenesis) and biological controls (sterilization). This paper presents an experiment to estimate the rates relative to the population dynamics of the mosquito. Those estimates are used in the mathematical optimization model for studying the dengue control. The implementation of mathematical equations aims to simulate the dynamics of the mosquito population, with the objective to reduce the transmission of dengue virus by the number of possible mosquito control settings.

**KEYWORDS.** Dengue, Rates of the mosquito population, *Aedes aegypti*.

**Main area.** SA - OR in the Health Area.

## 1. Introdução

O aumento do número de casos da dengue é notícia enfática na mídia, pois é uma doença que atinge o homem, principalmente em países onde o clima é caracterizado como tropical e subtropical, ambiente este favorável ao desenvolvimento de mosquitos do gênero *Aedes*.

Em Bhatt *et al* (2013) um modelo de matemático para estimar o número de pessoas infectadas concluiu que cerca de 96 milhões de pessoas apresentaram sintomas claros da doença, mas pode ser que até 300 milhões de pessoas adquiriram a doença sem terem o diagnóstico confirmado por médicos. O total ficaria em aproximadamente 390 milhões de casos por ano, bem acima dos 100 milhões estimados pela World Health Organization (WHO) (2015).

O ciclo de vida do mosquito inicia-se com a eclosão dos ovos na água, originando as larvas, que se alimentam de detritos orgânicos, bactérias, fungos e protozoários presentes na água. A fase larvária dura, em boas condições, cerca de cinco a dez dias originando a pupa, cuja fase dura em média dois dias. Neste período as pupas não se alimentam, apenas respiram. Nesta fase, já consegue-se diferenciar machos e fêmeas pelo tamanho da pupa. Posteriormente, os mosquitos saem do casulo atingindo a fase adulta, com duração de 30 à 35 dias, se acasalam e iniciam um novo ciclo.

A transmissão da doença ocorre mediante três etapas: o vírus que causa a doença, o mosquito que transmite o vírus, chamado de vetor e uma pessoa susceptível. A dengue é transmitida pela picada da fêmea do mosquito *Aedes aegypti* ou *Aedes albopictus* infectado com o vírus da doença. As fêmeas adultas se alimentam de sangue, que é necessário para maturação e postura dos ovos.

O mosquito contrai o vírus quando pica uma pessoa infectada, passando a carregá-lo por um período de incubação de 8 à 12 dias, permitindo que o mosquito esteja apto a transmitir a doença. Nos seres humanos, o vírus permanece em incubação durante um período que pode durar de 3 à 15 dias e é nesta etapa que os sintomas da dengue podem ser percebidos.

Atualmente ainda não existem vacinas que consigam prevenir a doença com eficiência, pois a dengue possui quatro sorotipos antigenicamente distintos e recentemente foi noticiado um novo sorotipo. Portanto, uma mesma pessoa pode contrair cinco vezes a doença, visto que cada sorotipo apresenta imunidade cruzada. Assim, pessoas que vivem em áreas endêmicas podem ter mais de uma infecção da doença durante sua vida.

Os principais meios de controle do mosquito são: controle mecânico, realizado por agentes de saúde e pela população em geral em suas residências; controle químico, no qual produtos larvicidas e adulticidas são empregados afim de causar a mortalidade dos mosquitos e controle biológico, que consiste em introduzir inimigos naturais no meio ambiente ou mosquitos machos estéreis (pela técnica de radiação gama) Thomé (2007).

Atualmente os métodos de controle são mais eficientes para combater o mosquito transmissor.

Esteva e Yang (2005) e Thomé (2007) propuseram um modelo matemático para analisar a aplicação de inseticida e introdução de machos estéreis, produzidos pela técnica de radiação gama, no controle do *Aedes aegypti*.

Para descrever a dinâmica da população os autores consideraram todo o ciclo de vida do mosquito: fase aquática (ovo, larva e pupa) e fase alada (mosquitos adultos). O objetivo deste trabalho é calcular estimativas das taxas do ciclo de vida do mosquito, que são utilizadas no modelo matemático para estudar a dinâmica populacional do mosquito transmissor da dengue Florentino (2014).

## 2. O Modelo Matemático

Para descrever o modelo matemático proposto por Esteva e Yang (2005) e Thomé (2007), considere os seguintes parâmetros:

$A(t)$  → População de Mosquitos na Fase Aquática (ovo, larva e pupa);

$I(t)$  → População de Mosquitos Fêmeas Imaturas (antes de acasalar);

$F(t)$  → População de Mosquitos Fêmeas Fertilizadas (depois de acasalar);

$U(t)$  → População de Mosquitos Fêmeas Não Fertilizadas (depois de acasalar);

$M(t)$  → População de Mosquitos Machos (machos naturais);

$S(t)$  → População de Mosquitos Machos Estéreis devido à técnica e Irradiação.

As taxas de mortalidade são:  $\mu_A$  (fase aquática),  $\mu_I$  (fêmea imatura),  $\mu_F$  (fêmea fertilizada),  $\mu_U$  (fêmea não fertilizada),  $\mu_M$  (macho natural) e  $\mu_S$  (macho estéril). As populações de mosquitos fêmeas imaturas  $I(t)$  e machos naturais  $M(t)$  são originadas da evolução da fase aquática para alada com uma taxa  $\gamma$  e proporção  $r$  e  $(1-r)$  respectivamente.  $\beta_S$  é a taxa de acasalamento entre machos estéreis e fêmeas imaturas e do cruzamento deste surge a população de fêmeas não fertilizadas  $U(t)$ . A taxa de encontro dos machos naturais com as fêmeas é  $\beta$  e do cruzamento destes surge a população de fêmeas fertilizadas  $F(t)$ . Esta população alimenta a fase aquática a uma taxa  $\phi \left(1 - \frac{A}{C}\right) F$ , em que  $\phi$  é a taxa de oviposição intrínseca e  $C$  é a capacidade do meio relacionada com o número de nutrientes, espaço, etc.

A população de machos estéreis é dada por  $S$  e a probabilidade de encontro entre fêmeas imaturas com machos naturais  $M$  torna-se igual a  $\frac{M}{(M+S)}$ . A taxa per capita com que

as fêmeas são fertilizadas é dada por  $\frac{\beta M}{(M+S)}$ . A probabilidade de encontro de machos estéreis

com fêmeas imaturas é dada por  $\frac{pS}{(M+S)}$ , onde  $p$  ( $0 < p < 1$ ) é a proporção com que os mosquitos estéreis são colocados nos locais adequados.

A taxa de acasalamento efetiva dos mosquitos estéreis é dada por  $q\beta$  com  $0 \leq q \leq 1$ . A taxa per capita com que as fêmeas imaturas cruzam com mosquitos estéreis  $S$  é dada por  $\frac{\beta_S S}{(M+S)}$ , onde  $\beta_S = pq\beta$ . Logo, temos o esquema do modelo com a inserção dos mosquitos estéreis.

A variável  $U$  que diz respeito a população de mosquitos fêmeas não fertilizadas não é representada no sistema dinâmico, pois as demais equações não dependem dessa variável. Thomé propôs um modelo matemático com utilização do controle químico e biológico, mostrado no sistema de Equações (1).

$$\begin{aligned}
 \frac{dA}{dt} &= \phi \left(1 - \frac{A}{C}\right) F - (\gamma + \mu_A) A \\
 \frac{dI}{dt} &= r\gamma A - \left[ \frac{\beta S}{M+S} - \frac{\beta_S S}{M+S} - (\mu_I - u_1) \right] I \\
 \frac{dF}{dt} &= \frac{\beta MI}{M+S} - (\mu_F + u_1) F \\
 \frac{dM}{dt} &= (1-r)\gamma A - (\mu_M + u_1) M \\
 \frac{dS}{dt} &= u_2 - (\mu_S + u_1) S
 \end{aligned} \tag{1}$$

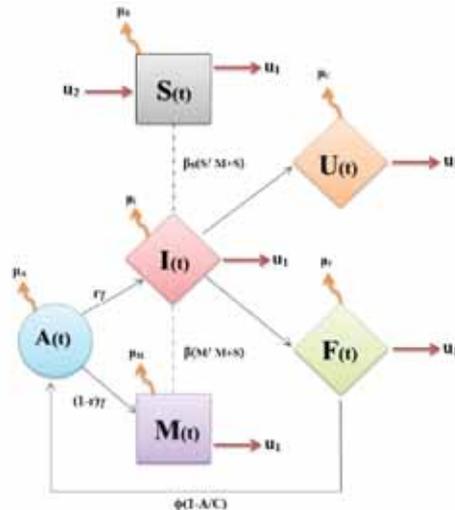
Visto isso, a Figura 1 ilustra a dinâmica da proposta do modelo.

Tem-se que  $u_1$  representa o controle químico e  $u_2$  representa o controle biológico,  $c_1$  representa o custo com inseticidas,  $c_2$  custo de mosquitos estéreis,  $c_3$  custo social e  $c_4$  custo da manutenção dos mosquitos estéreis no ambiente. Thomé (2010) propôs o índice de desempenho:

$$J[u_1, u_2] = \frac{1}{2} \int_0^T (c_1 u_1^2 + c_2 u_2^2 + c_3 F^2 - c_4 S^2) dt$$

O índice de desempenho  $J$  avalia o custo do controle dos mosquitos estéreis com relação ao uso de inseticida que, além dos danos causados ao ambiente e a saúde da população, pode desenvolver a resistência dos mosquitos.

O problema se resume então a determinação das variáveis  $u_1(t)$  e  $u_2(t)$ , afim de minimizar o custo da função  $J$ , minimizando o custo com inseticidas e mosquitos estéreis e, conseqüentemente, a quantidade de fêmeas fertilizadas e protegendo a quantidade dos mosquitos estéreis introduzidos no meio ambiente.



**Figura 1:** Diagrama da Dinâmica Populacional de mosquitos com controle químico e genético, representado por  $\mu_1$  e  $\mu_2$  respectivamente Bannwart (2013).

Tem-se que  $R$  é taxa básica de reprodução do mosquito, que essencialmente mede o valor máximo de reprodução de mosquitos fêmeas.  $R > 1$  representa colonização de mosquitos e é dado por  $R = \frac{\phi r \gamma \beta}{(\gamma + \mu_A)(\beta + \mu_I)\mu_F}$ .

As condições iniciais são dadas considerando o pior dos casos do ponto de vista da dengue. Logo, as condições de equilíbrio para o sistema (1) são:

$$\begin{aligned} A(0) = A_0 &= \frac{C(R-1)}{R} \\ I(0) = I_0 &= \frac{r\gamma A_0}{\mu_I + \beta} \\ F(0) = F_0 &= \frac{\gamma + \mu_A C A_0}{\phi(C - A_0)} \\ M(0) = M_0 &= \frac{(1-r)\gamma A_0}{\mu_M} \\ S(0) = S_0 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Para resolução do modelo matemático, que consiste em minimizar a função  $J$ , sujeito ao sistema de equações (1) e as condições iniciais (2), Thomé (2007) utilizou o Princípio Máximo de Pontryagin e Lyra (2014) utilizou algoritmo genético. Este trabalho propõe a estimação das taxas da dinâmica populacional do mosquito, em laboratório, para utilização na resolução deste modelo matemático de otimização.

### 3. Delineamento Experimental

O objetivo é a realização do experimento para estimar as taxas da dinâmica populacional do mosquito *Aedes aegypti*, transmissor da dengue. O experimento foi conduzido no insetário do Departamento de Parasitologia do IBB/ UNESP com os ovos disponibilizados pelo mesmo.

Os ovos foram contados, classificando viáveis e não viáveis, através de uma lupa para que fosse garantida a viabilidade dos mesmos, como mostra a Figura 2. Somente ovos em condições ideais foram considerados, excluindo-se os ovos não viáveis: ovos ressecados, quebrados, amassados etc. Para melhor precisão das estimativas das taxas, optou-se pela repetição independente de 10 bandejas enumeradas, contendo 100 ovos viáveis em cada uma delas.

A alocação dos ovos para as bandejas foi realizada de forma aleatória, como mostrado na Figura 2. Os ovos permanecem na água até o nascimento das larvas, mantidos em condições típicas de verão, em câmara com umidade em torno de 70 à 80 Pa (Pascal), temperatura entre 26°C e 27°C e luminosidade controladas, simulando dos períodos dia e noite. Para facilitar a contagem diária, as larvas foram transferidas para uma bandeja auxiliar devidamente enumeradas e contadas com auxílio de uma pipeta de Pasteur. As larvas são alimentadas com ração de peixes ornamentais até o final da fase larval.

Na próxima etapa, as pupas foram contadas novamente todos os dias, com objetivo de verificar o número de mortalidade. E foram transferidas para recipientes com água e acondicionadas em gaiolas com suas respectivas numerações das bandejas de origem, demonstrado na Figura 2. Na fase adulta, todos os mosquitos são alimentados com solução de água e sacarose com concentração de 10%, embebida em algodão envolto por gaze que foram colocados em Erlenmeyer de 50 ml *Ad libitum*, mostrado na Figura 2.



**Figura 2:** Contagem dos ovos, colocação nas bandejas, posteriormente nas gaiolas e algodão com sacarose para alimentação.

Cada gaiola possui fêmeas adultas da espécie *Aedes aegypti* que foram alimentadas com sangue, necessário para maturação dos ovos. O processo de alimentação ocorreu a cada sete dias, período biológico de maturação dos ovos para oviposição. Foram utilizados camundongos anestesiados e colocados em cima da mesma permanecendo por 15 minutos, como ilustra a Figura 3. A membrana semipermeável da gaiola permite que as fêmeas dos mosquitos se alimentem do sangue dos animais imobilizados.



**Figura 3:** Camundongo anestesiado para alimentação dos mosquitos fêmeas.

Para oviposição, utilizou-se papel filtro umedecido em água e colocado em copinhos de plástico contendo água, garantindo que o papel continuasse úmido. Em volta do copo foi colocado um papel preto para garantir "escuridão", condição que as fêmeas do mosquito buscam para colocação de seus ovos, como mostra a Figura 4.



**Figura 4:** Papel filtro em copinhos para colocação dos ovos.

O experimento teve duração de seis semanas para coleta dos dados, totalizando três alimentações. Portanto, foram utilizados 10 camundongos para execução do experimento completo. O experimento foi submetido e aprovado pela Comissão de Ética no Uso de Animais (CEUA) com certificação correspondente ao protocolo nº 624-CEUA.

Após a coleta diária dos dados referentes aos ciclos de vida do mosquito da dengue, foram calculadas estimativas pontuais e estimativas intervalares para as taxas de nascimentos das larvas, pupas e adultos. Quando os mosquitos passam de uma fase para outra, existe um certo número de mosquitos que morrem e não passam para a próxima fase. As porcentagens de mosquitos machos e fêmeas também foram estimadas. Para o cálculo das estimativas das taxas, utilizou-se a quantidade máxima observada de mosquitos vivos em cada fase: larvas, pupas e alada, devido a transformação "tardia" de alguns mosquitos de uns 2 ou 3 dias. A taxa de oviposição foi calculada como a taxa média de oviposição diária.

#### 4. Mosquitos Estéreis

Esta parte do experimento tem o objetivo de estimar taxas relacionadas com a esterilidade dos mosquitos machos presentes no modelo matemático. A esterilização dos mosquitos foi baseada na técnica utilizada no CENA Silveira (2012) e para irradiação dos mosquitos utilizamos o Serviço de Radioterapia do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina de Botucatu (FMB), como mostrado na Figura 5.

A esterilização foi realizada em fonte de cobalto-60 no acelerador linear Alcyon, onde foram irradiadas amostras contendo aproximadamente 140 pupas de mosquitos machos, separados manualmente na fase de pupa em dois recipientes plástico cilíndricos com tampas perfuradas, permitindo passagem de ar e contendo cerca de 250 mL de água. Cada recipiente alocou cerca de 70 pupas, sendo que o primeiro recipiente recebeu uma dose de 30 Gy e o segundo 40 Gy.

Para realização do procedimento utilizou-se um campo de 30x30 (cm), onde é possível alocar até 4 recipientes com mosquitos *Aedes aegypti* na fase de pupas. A profundidade de alcance da dose é de até 2 cm, altura correspondente ao nível de água nos recipientes plásticos, garantindo que toda região receba a dose desejada. Source Skin Distance (SSD), em português conhecida como distância fonte pele, que nesse caso é a distância até o recipiente, é de 80 cm.

O percentual de dose profunda (PDP) é uma grandeza que caracteriza a distribuição de dose no eixo central através da normalização da dose em uma profundidade de referência, que é a profundidade correspondente ao valor de dose máxima, sendo que essa profundidade varia de acordo com a energia utilizada, sendo a PDP de 94,70%. A taxa de dose emitida por uma fonte apresenta decaimento ao longo do tempo, para o  $^{60}\text{Co}$  o decaimento é calculado através de uma equação já estabelecida, sendo o rendimento para a irradiação foi de 86, 71% (cGy/min) no dia da realização da radiação.

A bandeja nas máquinas de teleterapia, serve como suporte para os colimadores, sendo estes dispositivos que limitam o tamanho do campo de incidência dos raios X através da absorção de parte da radiação, direcionando e suavizando o feixe, localizado entre a fonte de radiação e o paciente. Como o material de que é feita a bandeja (normalmente lucite, um tipo de plástico semelhante ao acrílico) também absorve a radiação, a presença desta deve ser levada em conta no cálculo da dose, conhecido como fator bandeja e é determinado para cada aparelho. O fator bandeja faz a compensação da atenuação da radiação, sendo o quociente entre a taxa de dose para uma determinada abertura de feixe e profundidade com a presença da bandeja, e a taxa de dose obtida nas mesmas condições sem sua presença, sendo também estabelecida por uma equação determinada, cujo valor para o experimento foi 1,00.

Fator de campo é a proporção de correção de um campo equivalente de 10x10 (cm) quando utilizamos um campo de tamanho diferente do padrão de dosimetria, assim o fator de campo foi 1,1090 para o campo de 30x30 (cm) utilizado, a Figura 6 mostra o alinhamento do campo durante o procedimento.

O tempo de irradiação é estabelecido de acordo com a dose requerida, como as doses foram 30 e 40 Gy, os tempos foram 32,57 e 43,55 minutos respectivamente.

O custo para esterilização dos mosquitos é baseado na tabela do Serviço Único de Saúde SUS (2008), referente ao número de campos ou procedimento. Para o experimento, utilizou-se 1 campo, o custo é de R\$30,00 para um tempo de 5 minutos de exposição, baseado nos tempos utilizados o custo estimado é aproximadamente R\$263,50. Sendo que durante o procedimento os recipientes foram colocados juntos e o equipamento programado para o tempo da dose de 30 Gy e, posteriormente, o outro recipiente permaneceu para receber uma dose de 40 Gy.

Para o experimento alocamos cerca de 70 pupas em aproximadamente 200 mL de água, sendo que o tamanho de cada pupa é em média 2,0 mm, considerando o movimento de cada pupa nessa quantidade de água estimamos que poderiam existir cerca de 200 pupas e para o mesmo tamanho de campo alocar até 4 recipientes.

Com as informações disponíveis, pode-se estimar o custo por mosquito para torná-lo estéril em R\$0,25 para a dose de 30 Gy e R\$0,33 para 40 Gy para cada mosquito, considerando 800 pupas distribuídas em 4 recipientes cada um contendo 200 pupas.

Após a irradiação conforme a dose (30 e 40 Gy), os mosquitos machos estéreis foram alocados em gaiolas, em alguns casos somente com mosquitos fêmeas e nos demais casos juntamente com machos naturais. A seguir são apresentados experimentos realizados, sendo que os quatro primeiros são relativos à dose de 30 Gy e os quatro últimos, à dose 40 Gy :

Caso 1: Um macho estéril e uma fêmea; Caso 2: Um macho estéril, uma fêmea e um macho natural; Caso 3: Um macho estéril, dez fêmeas e dez machos naturais; Caso 4: Dez machos estéreis, uma fêmea e um macho natural; Caso 5: Um macho estéril e uma fêmea; Caso 6: Um macho estéril, uma fêmea e um macho natural; Caso 7: Um estéril, dez fêmeas e dez machos naturais; Caso 8: Dez machos estéreis, uma fêmea e um macho natural;

As gaiolas que contém somente machos estéreis com fêmeas (Casos 1 e 5) tem o objetivo de aferir se realmente houve esterilização, as gaiolas com variação na proporção de estéreis, naturais e fêmeas, tem objetivo de aferir a “preferência” das fêmeas em relação ao estéril e o natural, ou seja, a eficiência do controle utilizando mosquitos estéreis.

Adicionalmente, foram avaliadas duas gaiolas contendo somente mosquitos estéreis para aferir a taxa de mortalidade dos mesmos para as duas doses (30 e 40 Gy). Dado que os machos cruzam com as fêmeas já nos primeiros dias de vida, o período experimental foi de 12 dias.



**Figura 5:** Preparação para irradiação de machos de *Aedes aegypti* em fase de pupa.



**Figura 6:** Alinhamento do campo para irradiação das pupas.

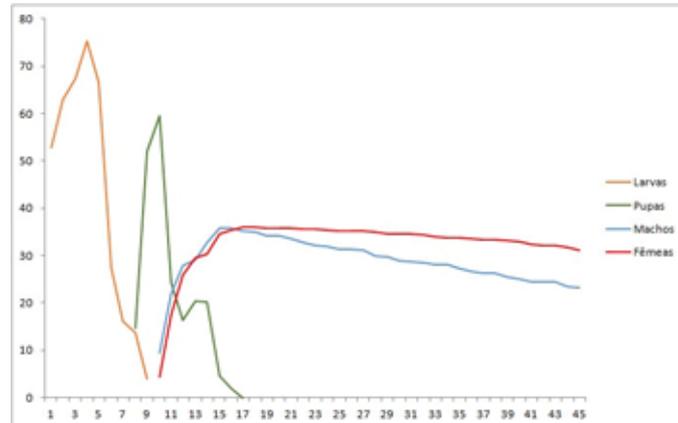
## 5. Resultados

Com o experimento realizado conforme as descrições nas Seções 3 e 4, as estimativas pontuais e os intervalos de confiança (IC) de 95% dos parâmetros de interesse foram calculadas utilizando os dados experimentais, como apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Estimativa Pontuais e IC 95% dos Parâmetros das Taxas do Modelo Matemático

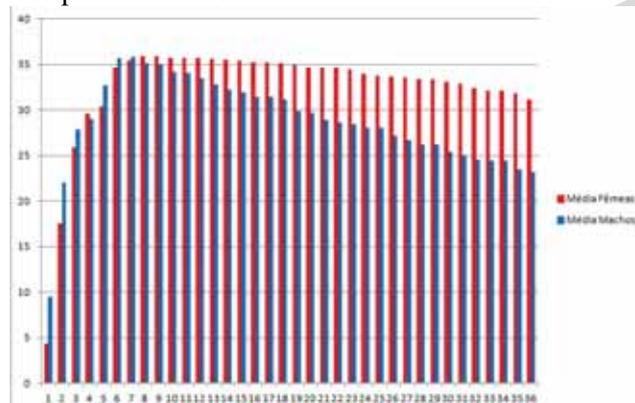
<b>Resultados do Experimento</b>			
<b>Parâmetros</b>		<b>Estimativa</b>	<b>Limites do IC 95%</b>
Nascimento (%)		92,90	76,98 100,00
Pupa (%)		84,00	61,28 100,00
Adultos (%)	Machos	52,17	21,21 83,13
	Fêmeas	47,83	16,87 78,79
Transf. da fase aquática para adulta (%)		10,15	0,00 28,87
$\mu_A$ (%)		7,10	0,00 23,02
$\mu_F$ (%)		2,90	0,00 13,30
$\mu_I$ (%)		2,90	0,00 13,30
$\mu_M$ (%)		1,62	0,00 9,44
Ovipoosição		56	47 65

Na Figura 7, observa-se o gráfico do comportamento do *Aedes aegypti* em cada fase de seu ciclo de vida, considerando a quantidade de mosquitos vivos observados num período de 45 dias de experimento.

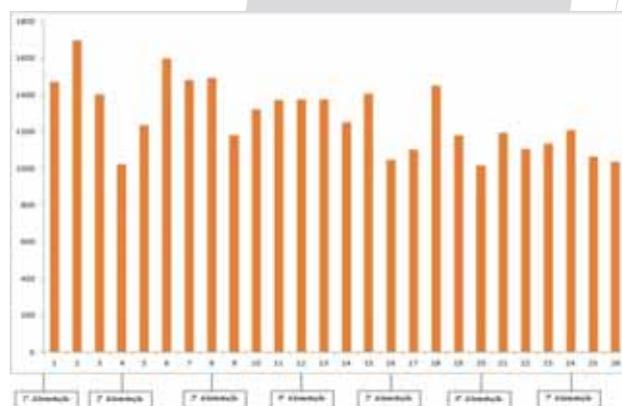


**Figura 7:** Quantidade de Mosquitos Vivos Observados

A Figura 8 mostra o comportamento da população de mosquitos na fase alada, separados por sexo. Observa-se que o número de machos é semelhante ao número de fêmeas e nota-se uma tendência dos machos viverem um período de tempo mais curto. Os machos também possuem um número de nascimentos levemente superior ao das fêmeas nos primeiros dias, pois quando as fêmeas eclodem os machos já estão a sua espera para que ocorra a copulação. A vivência do macho na fase alada é curta, pois sua função resume-se a realizar somente a copulação nos primeiros dias da fêmea.



**Figura 8:** Quantidade Média de machos e fêmeas na fase alada.



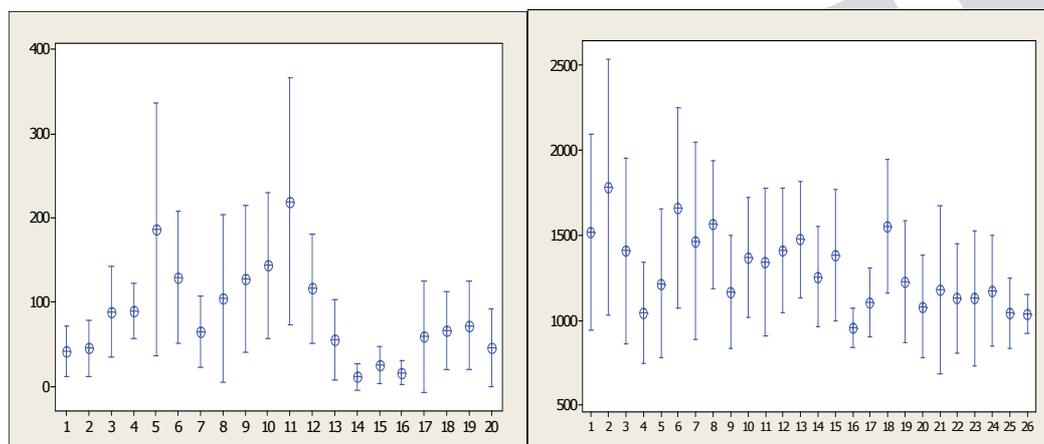
**Figura 9:** Comportamento de oviposição por dia.

Em um experimento distinto foi realizado uma alimentação a cada 7 dias, logo a Figura 10 permite uma avaliação sobre a delonga nos períodos de alimentação. O primeiro gráfico mostra a alimentação realizada a cada 7 dias e o segundo a cada 3 dias, onde podemos concluir que para um período de alimentações mais próximos, a colocação de ovos possui uma quantidade de ovos muito superiores, ou seja, quanto mais alimentações, mais sangue e uma maior maturação de ovos, resultando em aumento da quantidade da população.

A Tabela 2 mostra a quantidade de mosquitos distribuídos nas gaiolas, considerando as cotas de mosquitos de cada experimento. Devido a dificuldade em se calcular diretamente a taxa de encontro entre machos naturais e fêmeas e/ou machos estéreis e fêmeas, será calculada a taxa de nascimento gerados em cada experimento. Com intuito de confirmar a esterilização dos machos, alguns mosquitos selecionados aleatoriamente foram condicionados com fêmeas e notou-se que não houve nenhum nascimento. Para as demais gaiolas, pode-se notar que existe certa preferência da fêmea por machos irradiados, evidenciando um aumento na chance de encontros entre machos estéreis e fêmeas. Cada mosquito macho pode copular com até 10 fêmeas, logo as fêmeas podem escolher os machos que preferem para a cópula.

**Tabela 2:** Distribuição das Cotas de Mosquitos Estéreis em experimento

Dosagem Radiação	Experimento							
	30Gy				40Gy			
Mosquitos	1	2	3	4	5	6	7	8
Fêmeas	5	5	5	20	5	5	5	20
Machos Naturais	0	5	50	2	0	5	50	2
Machos Estéreis	5	5	5	20	5	5	5	20



**Figura 10:** Comportamento de oviposição por dia para diferentes intervalos de alimentação (7 e 3 dias, respectivamente) com IC 95% .

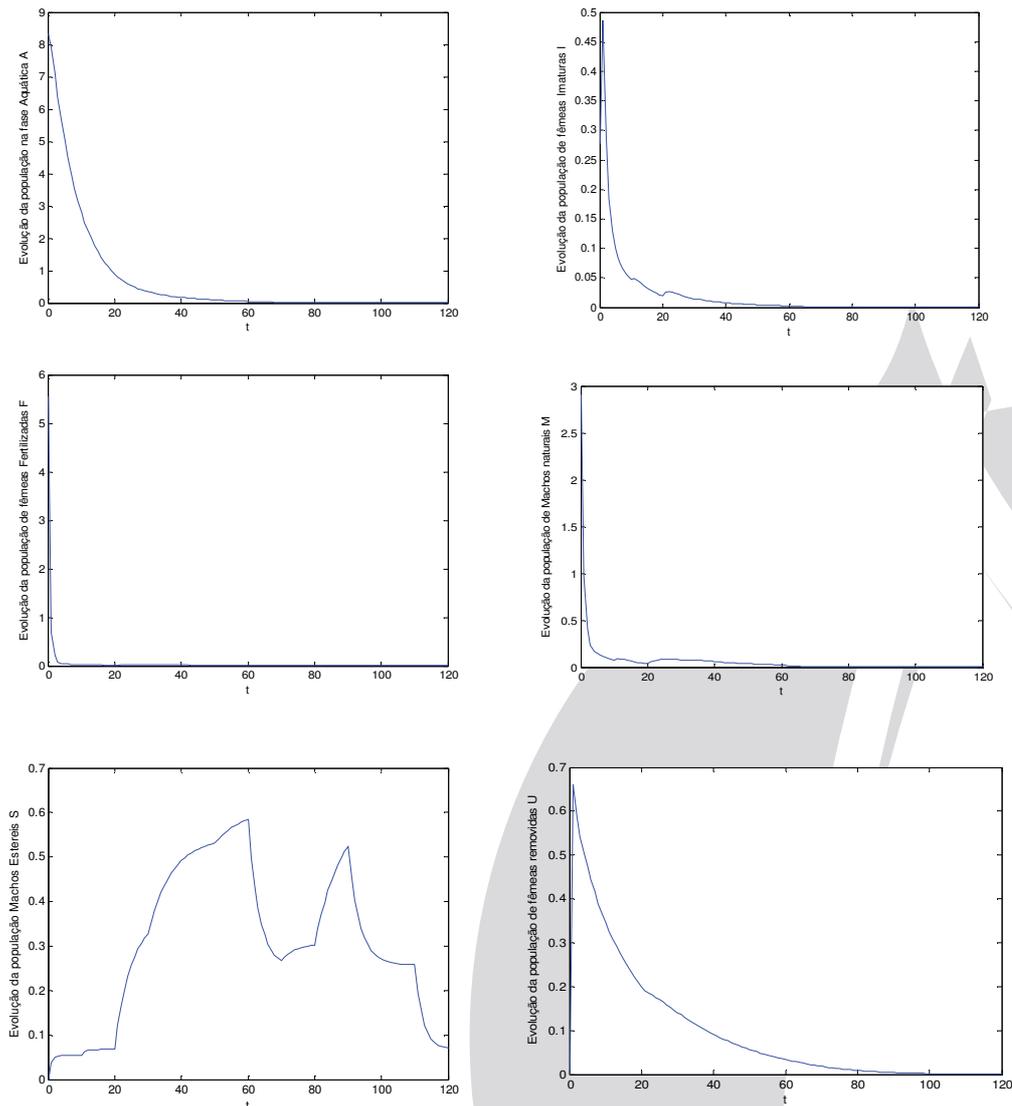
**Tabela 3:** Estimativas da proporção de nascimentos em cada experimento.

Experimento	Porcentagem de Nascimentos	Limites do IC 95 %		
30 Gy	Caso 1	0	0	0
	Caso 2	10	7,55	12,45
	Caso 3	4	2,44	5,56
	Caso 4	38	35,45	40,55
	Caso 5	0	0	0
40 Gy	Caso 6	10	7,13	12,87
	Caso 7	17	14,06	19,94
	Caso 8	31	27,38	34,62

A Tabela 3 mostra que houve certa preferência das fêmeas, baseando-se na quantidade de ovos eclodidos para cada experimento em diferentes doses de radiação. Se houver copulação com um macho natural o ovo irá eclodir originando larva, se a fêmea copulou com um macho estéril não haverá nascimento de larvas. A Tabela 4 mostra as taxas obtidas experimentalmente, que é o propósito deste trabalho.

**Tabela 4:** Taxas obtidas experimentalmente.

$\phi$	$\mu_A$	$\mu_I$	$\mu_F$	$\mu_U$	$\mu_M$	$\mu_{S30}$	$\mu_{S40}$	$\gamma$	$r$
56	0.0519	0.00502	0.00502	0	0.0156	0	0	0.081	0.499



**Figura 11:** Comportamento da população de mosquitos obtido com as taxas experimentais e o modelo de otimização

A Figura 11 mostra o comportamento da população de mosquitos em cada uma das fases consideradas utilizando as taxas obtidas experimentalmente e aplicadas no modelo de otimização.

## 6. Conclusão

O objetivo do estudo foi obter as estimativas das taxas utilizadas no sistema de equações do modelo matemático proposto experimentalmente. A população dos mosquitos foi conduzida sob condições ótimas, simulando condições ambientais favoráveis ao seu crescimento. Foram coletados diariamente os dados do ciclo de vida do mosquito e todas as estimativas das taxas utilizadas no sistema de equações do modelo matemático foram calculadas. Pode-se notar que, se não houver algum controle contra a proliferação do mosquito da dengue, a população pode aumentar assustadoramente em pouco tempo, culminando com um grande surto da doença. Os dados experimentais fornecem estimativas das taxas do ciclo de vida quando os mosquitos estão em condições ótimas na natureza. Portanto, as estimativas utilizadas no modelo matemático (1)-(2) permitem dimensionar a quantidade de mosquitos presentes na natureza em condições ótimas.

## Agradecimentos

Agradecemos à FAPESP, CNPq, CAPES e FUNDUNESP.

## Referências

- Bannwart, B.F.** (2013). Otimização Multiobjetivo no Controle da Dengue. Dissertação de Mestrado, Biometria-UNESP Botucatu.
- Esteva, L.; Yang, H. M.** (2005). Mathematical Model to Assess the control of *Aedes aegypti* Mosquitoes by Sterile Technique, *Mathematical Biosciences*, 198, 132-147.
- Florentino, H O.; Bannwart, B. F. ; Cantane, D. R. ; Santos, F. L. P.** (2014). Multiobjective genetic algorithm applied to dengue control. *Mathematical biosciences*, v. 258, p. 77-84.
- Lyra, L. G.**. Algoritmo Genético Aplicado ao Controle do Mosquito Transmissor da Dengue. Dissertação de Mestrado, Biometria-UNESP Botucatu, 2014.
- Bhatt ,S.; Gething, P. W.; Brady, O. J.; Messina, J. P.; Farlow, A. W.; Moyes, C. L.; Drake, J. M.; Brownstein, J. S.; Hoen, A. G.; Sankoh, O.; Myers, M. F.; George, D. B.; Jaenisch T.; Wint, G. R. W.; Simmons, C. P.; Scott, T. W.; Farrar, J. J.; Hay, S. I.** (2013). The global distribution and burden of dengue. *Revista Nature*, edição online impressa em 07 Abril 2013. (<http://www.nature.com/nature/journal/vaop/ncurrent/full/nature12060.htmlaccess>).
- Serviço Único de Saúde (SUS)**, ([http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/sas/2008/prt0346\\_23\\_06\\_2008.html](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/sas/2008/prt0346_23_06_2008.html)), 2008.
- Silveira, E.**: A Transformação dos Insetos:Um Mosquito Transgênico e Outro Irradiado. *Revista Pesquisa Fapesp*, edição impressa 199, Setembro, 2012. ([http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2012/09/068-071\\_mosquitos\\_199.pdf?e6dff5](http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2012/09/068-071_mosquitos_199.pdf?e6dff5))
- Thomé, R. C. A.** Controle Ótimo Aplicado na Estratégia de Combate ao *Aedes aegypti* Utilizando Inseticida e Mosquitos Estéreis. Tese de Doutorado, UNICAMP, 2007.
- Thomé, R. C. A.; Yang, H. M.; Esteva, L.** (2010) Optimal control of *Aedes aegypti* mosquitos by sterile insect technique. *Mathematical Biosciences* n° 223, pg 12-23.
- World Health Organization (WHO)**. Dengue and severe dengue. n° 117, Fevereiro 2015. (<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs117/en/>).