

MODELO (SIR + ASI) DA DENGUE

DENGUE MODEL (SIR + ASI)

MODELO (SIR + ASI) DE DENGUE

 <https://doi.org/10.56238/arev8n1-116>

Data de submissão: 22/12/2025

Data de publicação: 22/01/2026

Silvana Martins Ferreira

Mestra em Modelagem Matemática e Computacional

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

E-mail: silvanaufrrj@hotmail.com

RESUMO

A modelagem é uma etapa fundamental no processo de investigação sobre a Dengue, pois permite uma melhor compreensão e análise da situação gerada pela proliferação do mosquito Aedes Aegypti e os casos de contaminação provocados. Ela possibilita a identificação do problema, ainda que na teoria, a simulação de diferentes circunstâncias e a tomada de decisões mais fundamentadas. Faremos um estudo sobre a dengue, através das Equações Diferenciais Ordinárias não Lineares envolvendo a disseminação entre os mosquitos e o homem. Diante dos desafios de controle do vetor e de um quadro grave e preocupante em relação às arboviroses, delineado pela expansão destes vírus em todo o mundo, torna-se imprescindível a adoção de estratégias específicas. Na premissa de que com maiores investimentos e com métodos adequados, possa haver uma maior sustentabilidade às ações estabelecidas pelas redes de vigilância. Por este motivo, o nosso objetivo será propor um estudo inicial, porém relevante, pois propõe a implementação de um modelo mais simplificado sobre a dengue, possibilitando o avanço posterior para outros modelos mais complexos. Os modelos apresentados são resolvidos numericamente e seus algoritmos foram escritos no Octave.

Palavras-chave: Modelo Básico da Dengue. Modelo SIR + ASI. Modelagem da Dengue SIR+ASI.

ABSTRACT

Modeling is a fundamental step in the investigation process of Dengue, as it allows for a better understanding and analysis of the situation caused by the proliferation of the Aedes Aegypti mosquito and the resulting cases of infection. It enables the identification of the problem, even if theoretically, the simulation of different circumstances, and more informed decision-making. We will conduct a study on dengue through Nonlinear Ordinary Differential Equations involving the spread between mosquitoes and humans. Given the challenges of vector control and a serious and concerning scenario regarding arboviruses, driven by the expansion of these viruses worldwide, it becomes essential to adopt specific strategies. On the premise that with greater investments and appropriate methods, there can be greater sustainability of the actions established by surveillance networks. For this reason, our goal will be to propose an initial, yet relevant, study, as it suggests the implementation of a more simplified model of dengue, allowing for later advancement to more complex models. The models presented are solved numerically, and their algorithms were written in Octave.

Keywords: Basic Dengue Model. SIR + ASI Model. Dengue Modeling SIR+ASI.

RESUMEN

La modelización es una etapa fundamental en el proceso de investigación sobre el Dengue, ya que permite una mejor comprensión y análisis de la situación generada por la proliferación del mosquito Aedes Aegypti y los casos de contagio provocados. Permite la identificación del problema, aunque sea en teoría, la simulación de diferentes circunstancias y la toma de decisiones más fundamentadas. Haremos un estudio sobre el dengue, a través de las Ecuaciones Diferenciales Ordinarias no Lineales que involucran la diseminación entre los mosquitos y el hombre. Ante los desafíos de control del vector y un panorama grave y preocupante en relación con las arbovirosis, delineado por la expansión de estos virus en todo el mundo, se vuelve imprescindible la adopción de estrategias específicas. Bajo la premisa de que, con mayores inversiones y con métodos adecuados, pueda haber una mayor sostenibilidad de las acciones establecidas por las redes de vigilancia. Por este motivo, nuestro objetivo será proponer un estudio inicial, pero relevante, ya que propone la implementación de un modelo más simplificado sobre el dengue, posibilitando el avance posterior hacia otros modelos más complejos. Los modelos presentados se resuelven numéricamente y sus algoritmos fueron escritos en Octave.

Palabras clave: Modelo Básico del Dengue. Modelo SIR + ASI. Modelado del Dengue SIR+ASI.

1 INTRODUÇÃO

Os modelos matemáticos de acordo com Quadros (2013), são desenvolvidos através do estudo de equações que descrevem a interação entre a população de uma região e o ambiente em que ela vive, resultando numa análise detalhada a respeito da doença. Tais modelos estão sendo utilizados para analisar a forma de evolução e investigar o comportamento dos seus agentes transmissores. Portanto a modelagem busca conter a disseminação de doenças. Com isso, mais eficazes serão os métodos para impedir sua transmissão.

O Aedes Aegypti transmite algumas arboviroses como a dengue, zika, chikungunya e febre-amarela. Ele é originário da África, mas atualmente, está presente em todos os continentes. Viana e Ignotti (2013) ressaltam o fato de o mosquito estar presente principalmente nas regiões tropicais e subtropicais do planeta. É exatamente nessas regiões em que a temperatura e a pluviosidade oferecem condições favoráveis para a sua proliferação. A variabilidade climática pode favorecer o processo de reprodução, desenvolvimento e sobrevivência dessa população.

Para evitar a sua proliferação, é preciso que sejam adotadas medidas permanentes de controle do vetor, durante todo o ano, a partir de ações preventivas de eliminação de criadouros. Segundo Zara (2016), a disseminação do mosquito vem provocando um cenário preocupante de saúde global dos seres humanos, devido ao grande número de infecções, hospitalizações e mortes. Diante desse cenário, torna-se fundamental o desenvolvimento de estratégias que reduzam a dispersão dessas doenças e o surgimento de epidemias.

Entre as estratégias, o controle da população de mosquitos citada por Yeap et al. (2011), apresenta-se como a melhor opção, principalmente quando não existem vacinas seguras e eficazes. Apesar das estratégias tradicionais usadas para o controle dos mosquitos de acordo com Zara et al. (2016), a população de vetores como mencionado por Ross et al. (2019), tem se tornado resistente.

Diversas tecnologias, segundo Zara et al. (2016), têm sido desenvolvidas como alternativas de controle, utilizando-se de diferentes mecanismos de ação, tais como medidas sociais, monitoramento seletivo da infestação, dispersão de inseticidas, novos agentes de controle químico e biológico e procedimentos moleculares para controle populacional dos mosquitos, inclusive considerando-se combinações entre técnicas.

Após a fêmea picar uma pessoa infectada, como citado por Scott et al. (1993), o vírus se aloja nas glândulas salivares deste inseto, ali se multiplicando. Assim, o mosquito infectado, é capaz de transmitir a doença até o fim de sua vida, ou seja, por cerca de um mês. A fêmea consegue fazer ingestões múltiplas de sangue, durante um único ciclo gonadotrófico, o que amplia a sua capacidade de se infectar e de transmitir os vírus. Adaptações como destaca Dye (1992) permitiram que se

tornassem abundantes nas cidades e fossem facilmente levados para outras áreas pelos meios de transporte, o que aumentou sua competência vetorial, ou seja, a sua habilidade em tornar-se infectado por um vírus, replicá-lo e transmiti-lo.

Por meio da modelagem, é possível criar uma visão clara e organizada da situação vivenciada pela população suscetível ao vírus, o que facilita a compreensão e a análise das informações. Ela possibilita a identificação do problema, ainda que na teoria, a simulação de diferentes circunstâncias e a tomada de decisões mais fundamentadas.

O modelo que será apresentado neste artigo utiliza um Sistema de Equações Diferenciais Ordinárias não Lineares para descrever a dinâmica da propagação. A partir disso, somos capazes de estimar o número de casos por período e avaliar estratégias de controle. Para isso, estudaremos o modelo básico (SIR + ASI) da Epidemiologia. Na premissa de que com maiores investimentos e com métodos adequados, possa haver uma maior sustentabilidade às ações estabelecidas pelas redes de vigilância. Além disso, buscamos criar um material de estudo inicial para futuros pesquisadores.

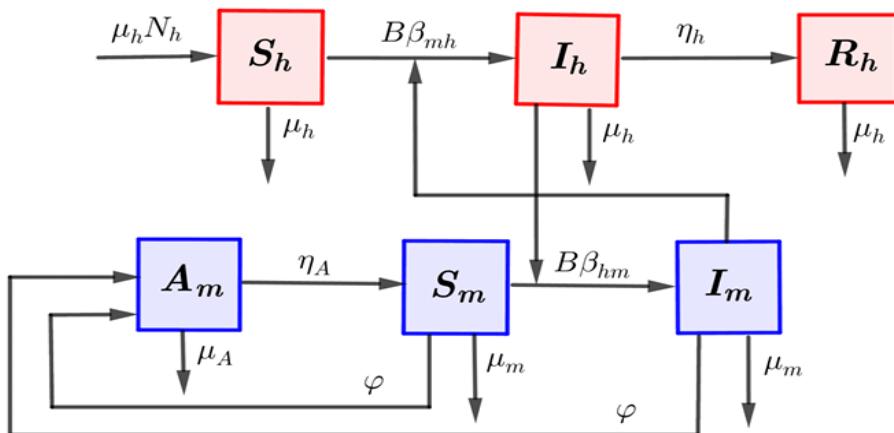
Por este motivo, estamos propondo um modelo básico, que se torna importante para o aprendizado. Apesar da proposta de implementação de um formato mais simplificado sobre a dengue, isso pode ser capaz de possibilitar e facilitar o avanço para o aprendizado de outros modelos mais complexos, que já estão em desenvolvimento na atualidade.

2 MODELO (SIR + ASI) SEM CONTROLE DOS MOSQUITOS

Segundo Amorim (2020) para iniciarmos o estudo deste modelo, precisamos partir do pressuposto que não existe transmissão vertical, isto é, um mosquito infectado não pode transmitir a doença aos seus ovos. Além disso, a quantidade de pessoas que nascem e entram no grupo dos suscetíveis humanos é exatamente idêntica a quantidade de pessoas que morrem de forma natural. Com isso, a população humana total é constante e homogênea, o que significa que os indivíduos de um compartimento estão homogeneousmente misturados com os outros indivíduos. As migrações de suscetíveis não são consideradas durante o período em estudo. Os vetores têm uma probabilidade igual de morder qualquer hospedeiro. Presume-se neste modelo que humanos e mosquitos nascem suscetíveis.

O modelo SIR é composto por humanos suscetíveis (S_h), infectados (I_h) e recuperados (R_h). O somatório desses indivíduos é representado por N_h . O modelo ASI é formado por mosquitos em sua fase aquática (A_m) na forma de ovos, pupas ou larvas, mosquitos suscetíveis (S_m) e mosquitos infectados (I_m). O diagrama do modelo completo (SIR +ASI) está representado na (Figura 1).

Figura 1. Diagrama do modelo SIR+ASI sem controle dos mosquitos



Fonte: (AMORIM, 2020)

Considere a taxa de morte natural μ_h , que ao ser multiplicada ao somatório de indivíduos N_h , representa a quantidade de pessoas que morreram ($\mu_h \cdot N_h$). Para não termos nenhuma perda de indivíduos neste modelo, consideramos que a taxa de nascimentos também corresponderá a ($\mu_h \cdot N_h$). Em relação ao modelo de mosquitos, temos que μ_m representa o percentual de mosquitos adultos mortos de forma natural e μ_A , a taxa de mosquitos mortos na fase aquática.

Além disso, tomamos B como a média diária de mordidas do mosquito. Quanto à probabilidade de transmissão por picada, assumimos β_{mh} , ou seja, (beta mh) como a taxa de contaminação de mosquitos para humanos e β_{hm} , ou seja, (beta hm) como taxa de infecção de humanos para mosquitos.

A quantidade diária de ovos será representada como a letra grega (φ). A taxa de recuperação para humanos (η_h) determinará a quantidade de infectados que conseguirão se recuperar. Já a taxa (η_A) está sendo utilizada para a taxa diária de maturação das larvas para o mosquito adulto.

O Sistema de Equações (1) representa o modelo (SIR + ASI) sem controle dos mosquitos, onde k simboliza o número de larvas por humano, além de m que representa o número de mosquitos fêmeas por humano, já que são elas as responsáveis pela disseminação da doença.

$$\begin{cases} \frac{dS_h}{dt} = \mu_h N_h - \left(B\beta_{mh} \frac{I_m}{N_h} + \mu_h \right) S_h \\ \frac{dI_h}{dt} = B\beta_{mh} \frac{I_m}{N_h} S_h - (\eta_h + \mu_h) I_h \\ \frac{dR_h}{dt} = \eta_h I_h - \mu_h R_h \\ \frac{dA_m}{dt} = \varphi \left(1 - \frac{A_m}{kN_h} \right) (S_m + I_m) - (\eta_A + \mu_A) A_m \\ \frac{dS_m}{dt} = \eta_A A_m - \left(B\beta_{hm} \frac{I_h}{N_h} + \mu_m \right) S_m \\ \frac{dI_m}{dt} = B\beta_{hm} \frac{I_h}{N_h} S_m - \mu_m I_m \end{cases} \quad (1)$$

2.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS SEM CONTROLE

Vamos considerar assim como Amorim (2020), uma população $N_h = 480\ 000$, onde inicialmente, $S_h = 479\ 990$ e $I_h = 10$ e não existem indivíduos recuperados a princípio.

Tomemos a quantidade de mosquitos na fase aquática como $A_m = k \cdot 480\ 000$. Usamos na simulação $k = 3$, o que significa que existem três larvas para cada uma das 480 000 pessoas.

Além da quantidade inicial $S_m = m \cdot 480\ 000$, onde $m = 6$, ou seja, existem seis fêmeas do mosquito para cada indivíduo.

Não existe nenhum mosquito infectado inicialmente. Com isso a população de mosquitos N_m é igual a S_m .

A taxa de morte natural de humanos $\mu_h = 0,000039$, de mosquitos na fase aquática $\mu_A = 0,25$ e de mosquitos na fase adulta $\mu_m = 0,1$.

O percentual de recuperação de humanos ($\eta_h = 1/3$), a taxa de maturação das larvas ($\eta_A = 0,08$), as taxas de contaminação β_{hm} e β_{mh} são consideradas iguais a 0,375.

A média de mordidas do mosquito $B = 0,8$ e a quantidade de ovos (φ) em cada depósito igual a 6.

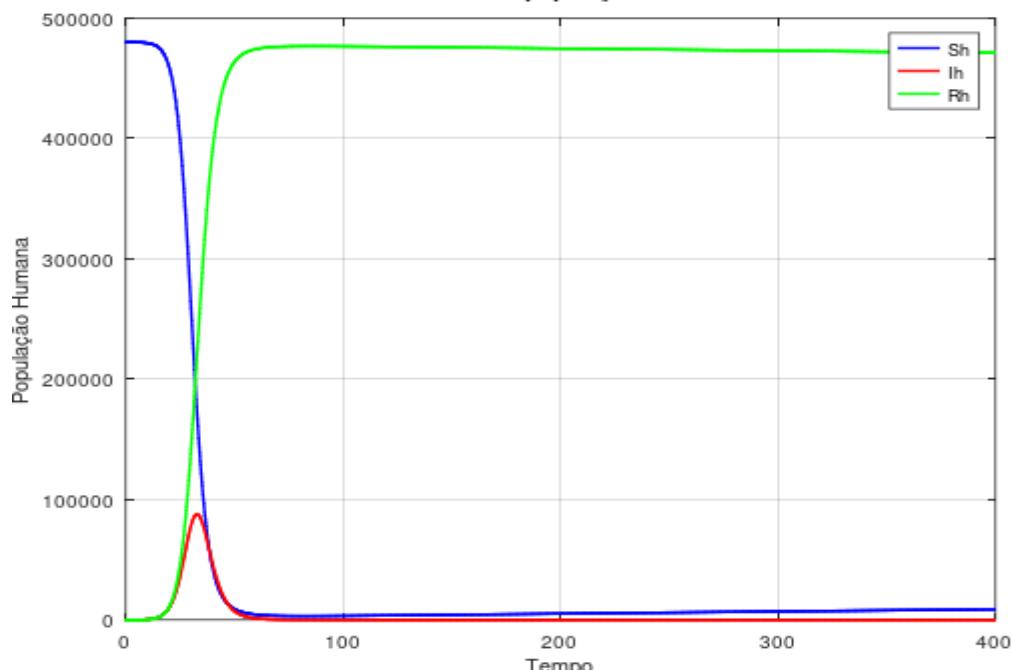
Na (Figura 2) temos o gráfico referente aos humanos e na (Figura 3) o gráfico do desenvolvimento dos mosquitos.

Após 32 dias houve a ocorrência de um pico indicando um valor máximo para os infectados, porém quando o modelo alcançou 50 dias, a população de humanos já estava completamente recuperada.

No caso dos mosquitos, a infecção atingiu o seu maior valor após 37 dias, o que representou um atraso em relação aos humanos.

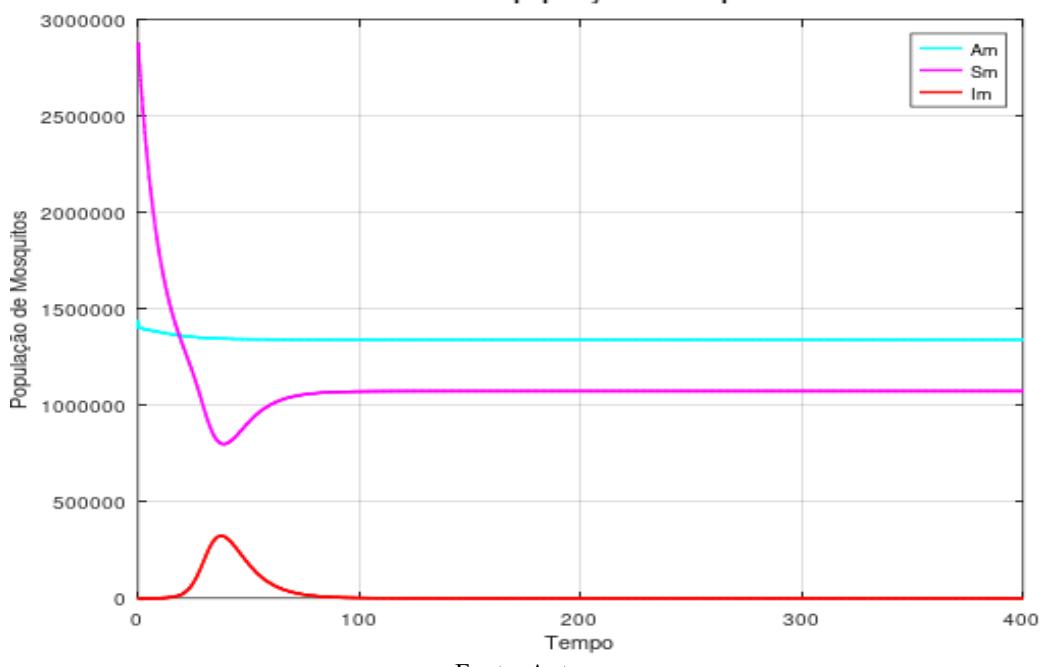
Já os suscetíveis do grupo dos mosquitos atingiam a menor quantidade, até se estabilizar após uns 70 dias. Os mosquitos na fase aquática logo se estabilizaram.

Figura 2. Gráfico da População Humana sem controle



Fonte: Autora

Figura 3. Gráfico da População de Mosquitos sem controle



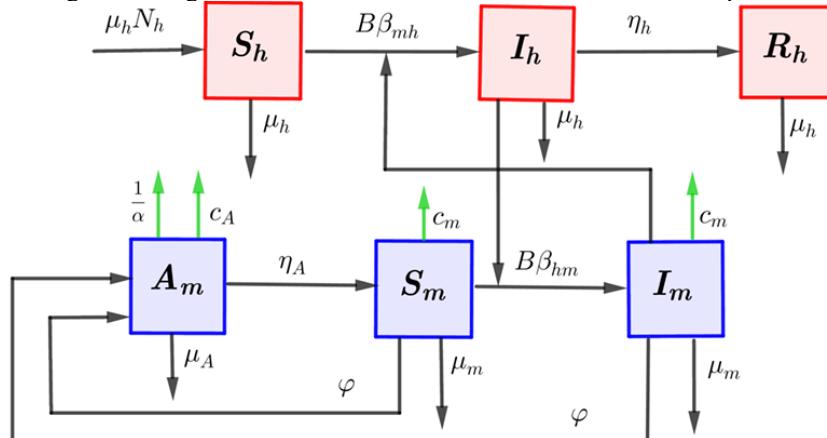
Fonte: Autora

3 MODELO (SIR + ASI) COM CONTROLE DOS MOSQUITOS

Para adaptarmos o modelo estudado anteriormente, serão introduzidas três constantes de

controle dos mosquitos. O objetivo será o de diminuir o valor máximo de humanos infectados resultantes da simulação numérica da (Figura 2). A primeira constante c_A representa a proporção de larvicida que será utilizada no combate à forma aquática do mosquito. A segunda c_m simboliza a proporção de adulticida que será empregada no controle da forma adulta do mosquito. A terceira proporção α (alpha) corresponde ao controle mecânico que será empregado a fim de extinguir com os prováveis criadouros. A (Figura 4) apresenta o diagrama compartmental deste modelo.

Figura 4. Diagrama do modelo SIR+ASI com controle dos mosquitos



Fonte: (AMORIM, 2020)

O Sistema de Equações (2) representa o modelo (SIR + ASI) com controle dos mosquitos. Observe que as três constantes de controle c_A , c_m e α foram adicionadas ao Sistema (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_h}{dt} = \mu_h N_h - \left(B\beta_{mh} \frac{I_m}{N_h} + \mu_h \right) S_h \\ \frac{dI_h}{dt} = B\beta_{mh} \frac{I_m}{N_h} S_h - (\eta_h + \mu_h) I_h \\ \frac{dR_h}{dt} = \eta_h I_h - \mu_h R_h \\ \frac{dA_m}{dt} = \varphi \left(1 - \frac{A_m}{\alpha k N_h} \right) (S_m + I_m) - (\eta_A + \mu_A + c_A) A_m \\ \frac{dS_m}{dt} = \eta_A A_m - \left(B\beta_{hm} \frac{I_h}{N_h} + \mu_m + c_m \right) S_m \\ \frac{dI_m}{dt} = B\beta_{hm} \frac{I_h}{N_h} S_m - (\mu_m + c_m) I_m \end{array} \right. \quad (2)$$

3.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS COM CONTROLE

Partindo da situação apresentada anteriormente, onde tínhamos um modelo sem nenhum tipo de controle de mosquitos, avançaremos para um modelo com três possibilidades de intervenção. Imagine que por algum motivo não tenhamos disponível larvicidas e muito menos adulticidas, com isso faremos um controle inicial muito eficaz de ordem mecânica.

Com isso, podemos considerar $c_A = c_m = 0$ e $\alpha = 1$. Esse suposto controle mecânico possui uma eficácia de 100%. Os gráficos de humanos e mosquitos obtidos serão iguais aos apresentados na (Figura 2) e na (Figura 3), respectivamente. Portanto, quando escolhemos estes valores para as constantes, retornamos ao modelo sem controle.

Neste modelo com controle não é admitido que α seja nulo, ou seja, alguma providência mecânica deverá ser executada para a eliminação dos focos de mosquitos.

Se tomássemos valores equivalentes a 100% para essas constantes ($c_A = c_m = 1$) e um valor correspondente a 1% para α , como por exemplo 0,01, teríamos o desaparecimento da população infectada de humanos e também a de mosquitos, restariam apenas elementos suscetíveis nos dois grupos.

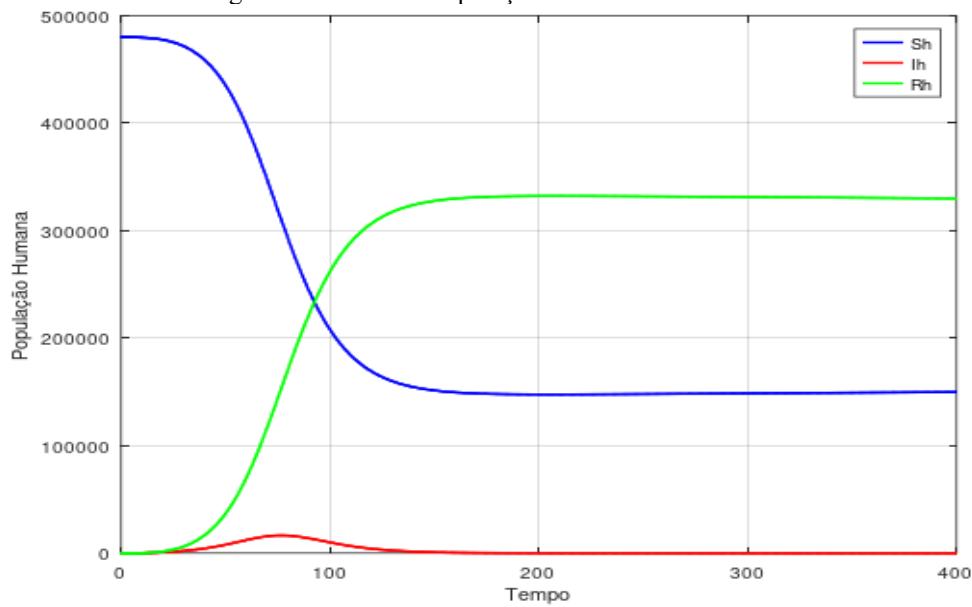
A aplicação de inseticidas em grande quantidade poderia causar problemas sérios, já que esses produtos químicos comprometeriam a saúde da população. As intervenções descritas serão consideradas mais eficazes, se mesmo quando forem administradas em menor quantidade, produzirem efeitos satisfatórios. O efeito que esperamos é que sejam capazes de reduzir o valor máximo atingido pelo grupo dos infectados.

Agora, vamos assumir que $c_A = 0,25$, $c_m = 0,05$ e $\alpha = 0,75$. Neste caso, o larvicida terá uma aplicação de 25%, o adulticida de 5% e 75% de controle mecânico. Podemos observar que houve uma redução na quantidade de humanos infectados na (Figura 5).

Porém apesar da utilização de 25% de larvicida na (Figura 6), continuamos tendo uma quantidade grande e estabilizada de mosquitos na forma aquática, enquanto os mosquitos adultos infectados, que só receberam 5% de adulticida, foram exterminados. A aplicação do adulticida teve uma maior eficácia, pois o seu efeito foi maior em menor proporção.

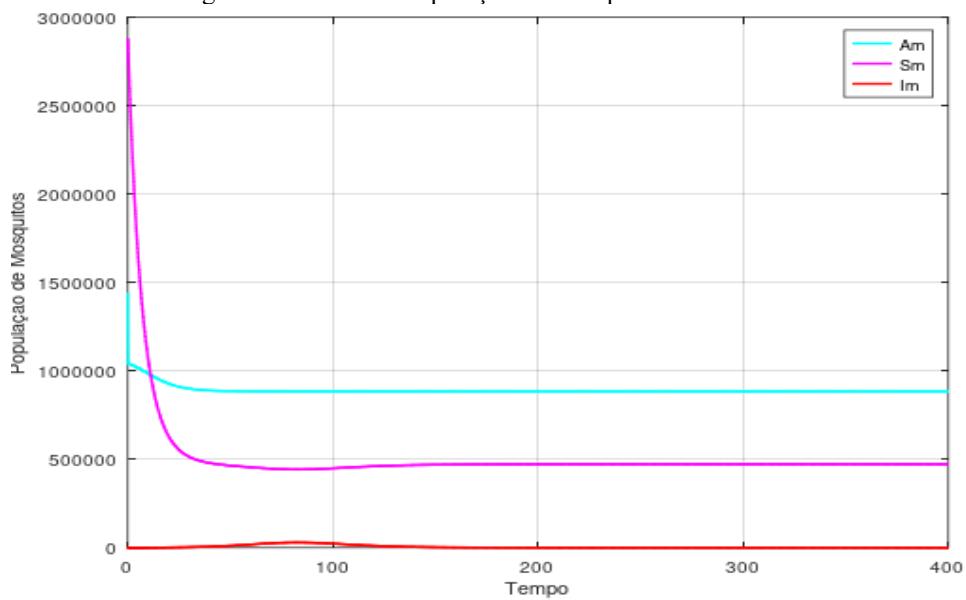
(O tempo considerado nos gráficos são expressos em dias).

Figura 5. Gráfico da População Humana com controle



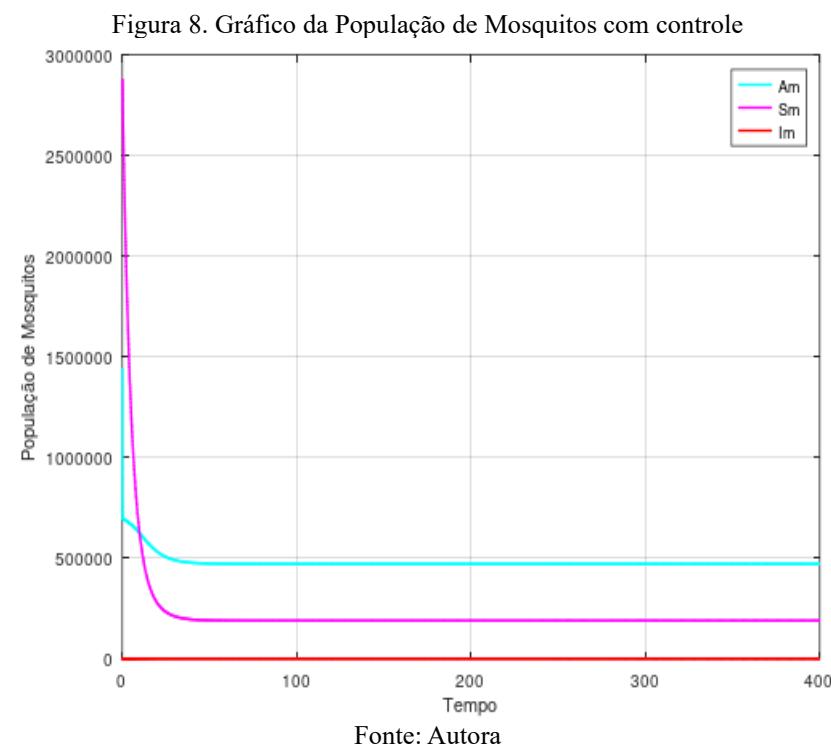
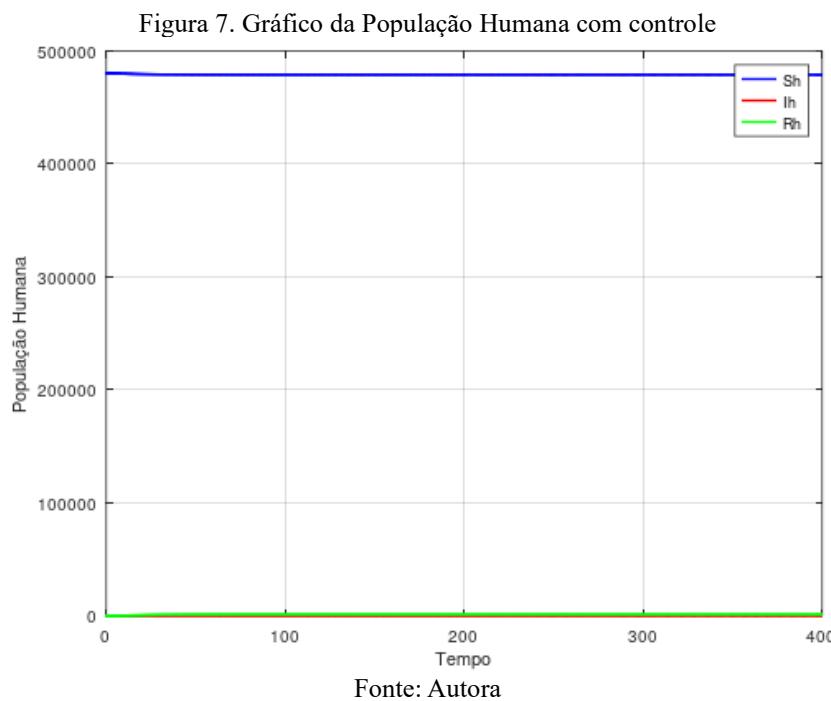
Fonte: Autora

Figura 6. Gráfico da População de Mosquitos com controle



Fonte: Autora

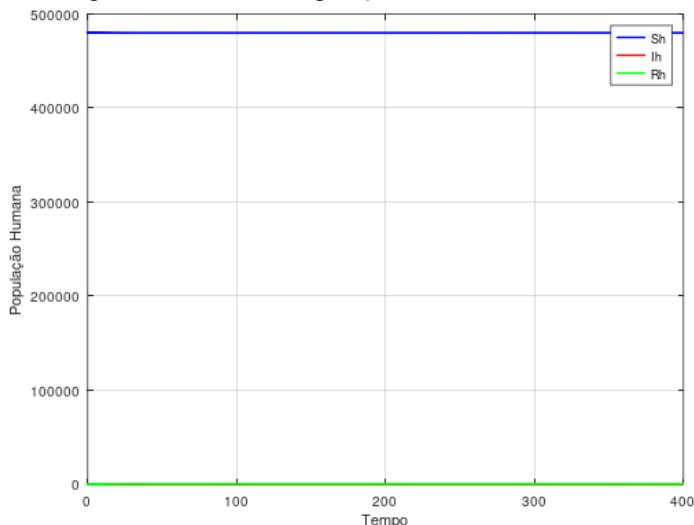
Tomando $c_A = 0,5$, $c_m = 0,1$ e $\alpha = 0,5$, teremos uma implementação de 50% de larvicida, 10% de adulticida e 50% de controle mecânico. Com isso, conseguimos fazer com que os humanos infectados desapareçam na (Figura 7). Só que apesar de aumentarmos o larvicida na (Figura 8), continuamos tendo uma quantidade enorme de mosquitos na forma aquática. Comprovamos novamente a eficácia do adulticida, pois conseguimos fazer com que os mosquitos infectados desaparecessem.



Vamos utilizar na próxima simulação: $c_A = 0,75$, $c_m = 0,15$ e $\alpha = 0,25$. Teremos então 75% de larvicida, 15% de adulticida e 25 % de controle mecânico. Novamente conseguimos transferir os indivíduos do grupo dos infectados para o dos suscetíveis, como pode ser visto na (Figura 9). Tivemos de aumentar o larvicida para tentar reduzir a quantidade de mosquitos na forma aquática que ainda

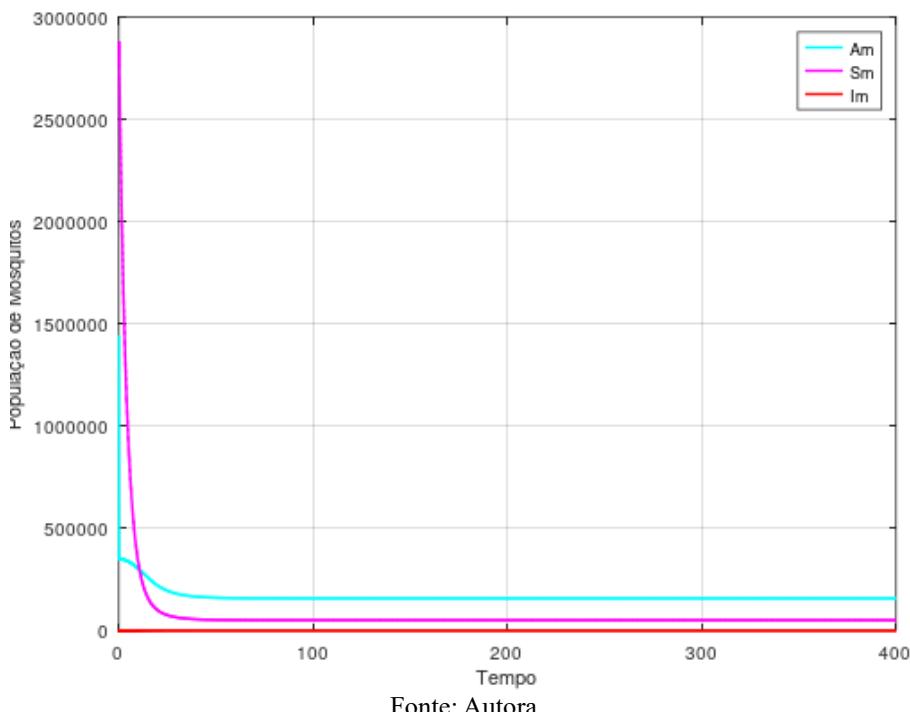
não foi extinta. Com 15% de adulticida, conseguimos extinguir com os mosquitos infectados na (Figura 10).

Figura 9. Gráfico da População Humana com controle



Fonte: Autora

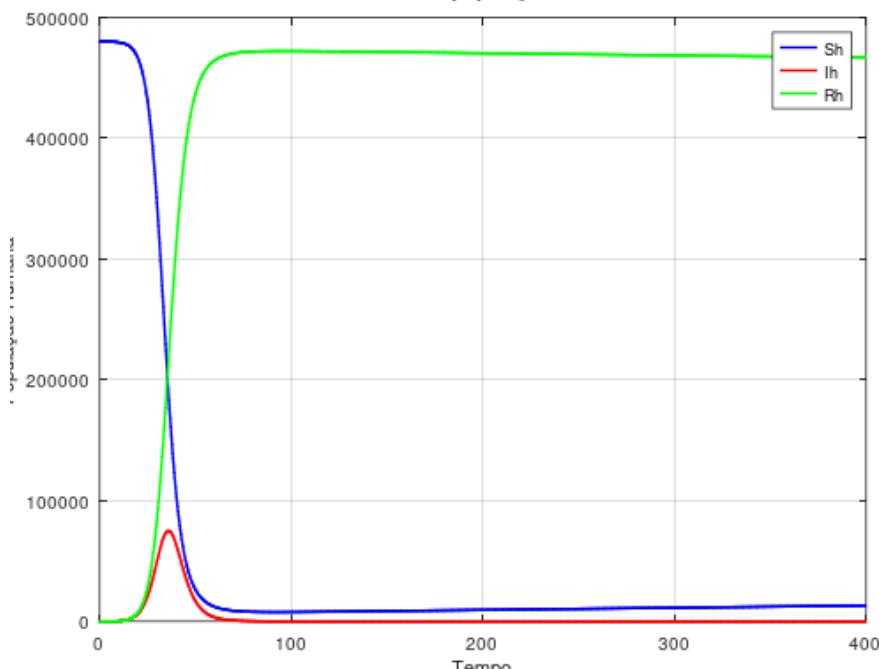
Figura 10. Gráfico da População de Mosquitos com controle



Fonte: Autora

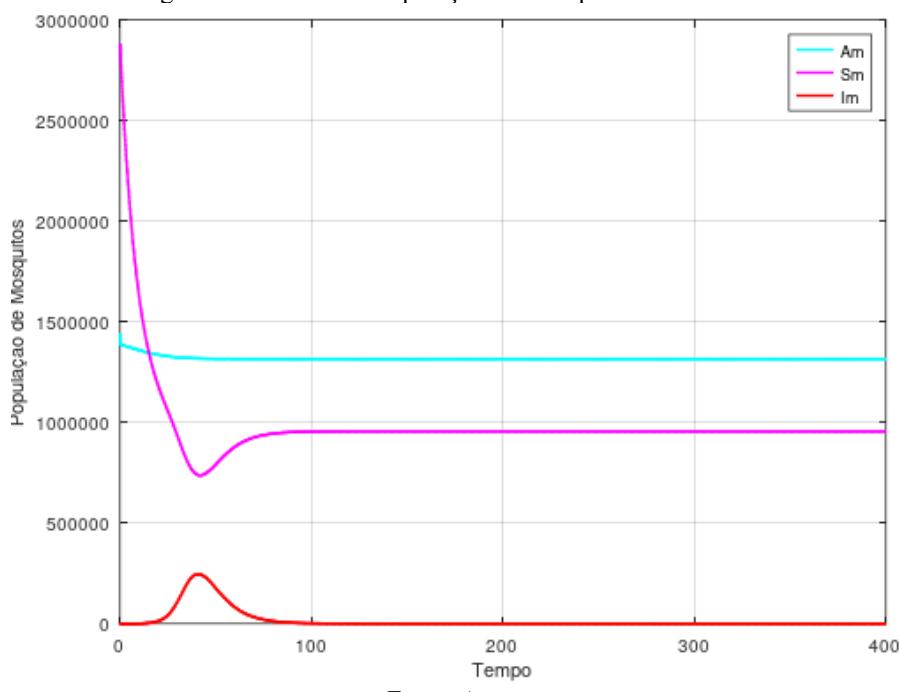
Considere que $c_A = c_m = 0,01$ e $\alpha = 0,99$. Estamos prestes a aplicar um larvicida e um adulticida na quantidade de 1% e um controle mecânico de 99%. Isso fará com que os humanos infectados na (Figura 11) voltem a crescer e atinjam um valor máximo preocupante. Enquanto os mosquitos infectados ressurgem para contaminar outros humanos suscetíveis na (Figura 12).

Figura 11. Gráfico da População Humana com controle



Fonte: Autora

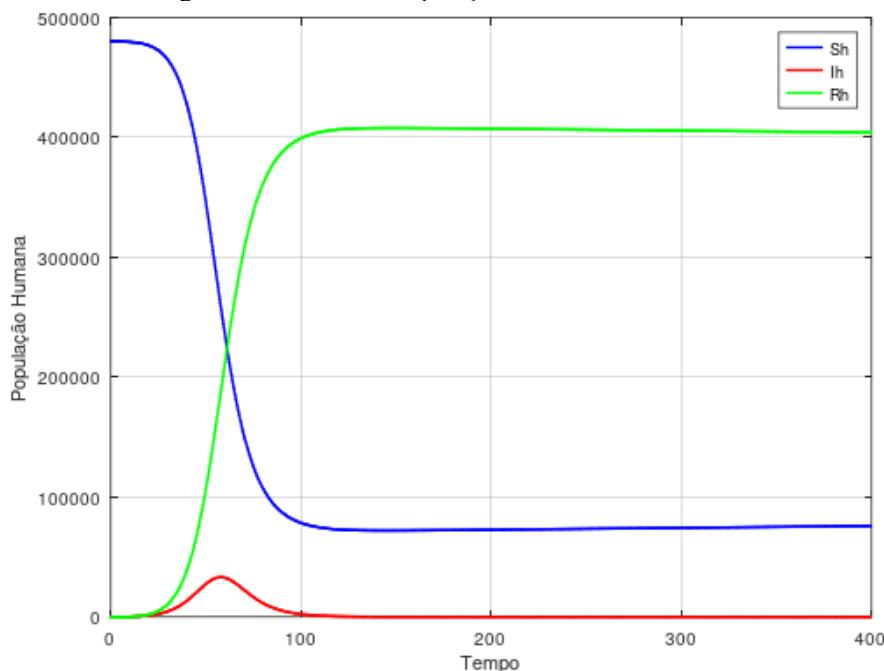
Figura 12. Gráfico da População de Mosquitos com controle



Fonte: Autora

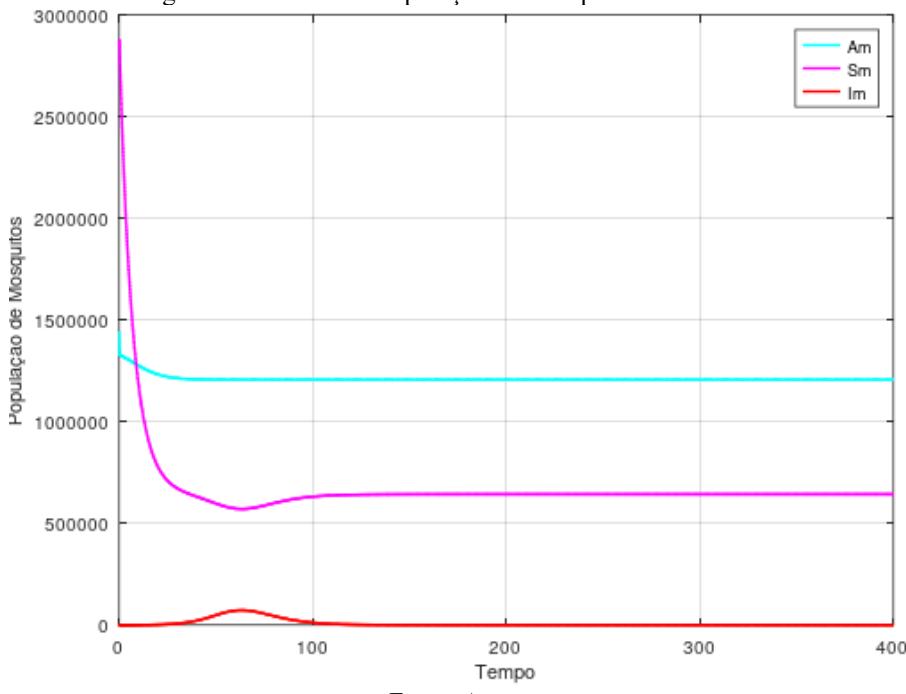
Vamos simular que $c_A = c_m = 0,05$, e $\alpha = 0,95$. Esta alteração significa que 5% de larvicida e adulticida serão utilizados, além de ser realizado um controle mecânico de 95%. Nesse caso, houve uma redução expressiva na quantidade de humanos e de mosquitos infectados nas (Figura 13) e (Figura 14).

Figura 13. Gráfico da População Humana com controle



Fonte: Autora

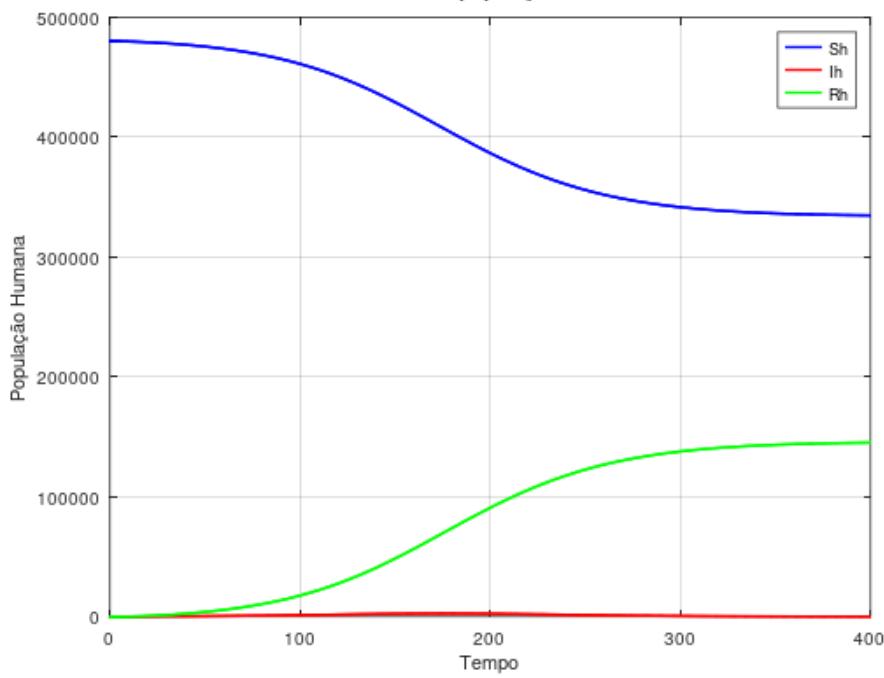
Figura 14. Gráfico da População de Mosquitos com controle



Fonte: Autora

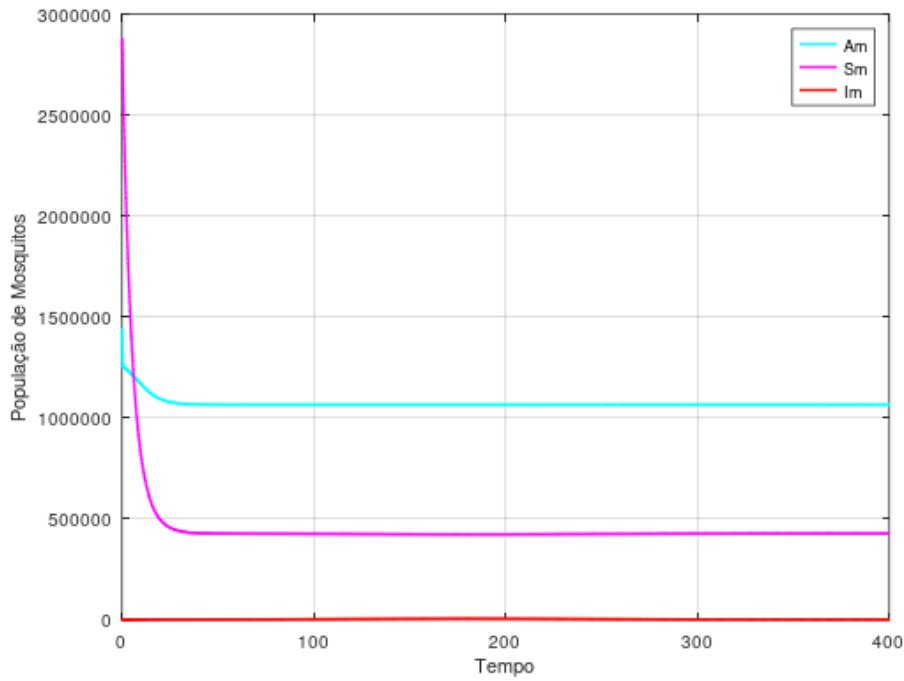
Agora, tomemos $c_A = c_m = 0,1$, e $\alpha = 0,9$. Serão aplicados 10% de controle e 90% de medidas para combater criadouros. Os humanos infectados desapareceram na (Figura 15) e os mosquitos infectados também, como pode ser visto na (Figura 16).

Figura 15. Gráfico da População Humana com controle



Fonte: Autora

Figura 16. Gráfico da População de Mosquitos com controle



Fonte: Autora

4 MODELO (SIR + ASI) COM CONTROLE DOS HUMANOS

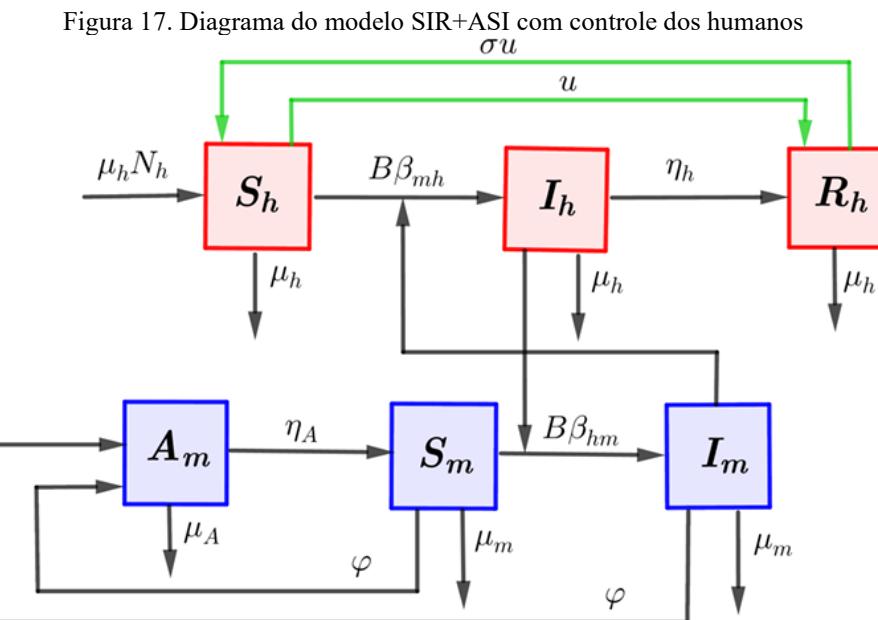
O controle no grupo dos humanos pode ser feito com a introdução de uma vacina. A vacinação foi uma estratégia importantíssima para prevenir a Dengue. O nosso objetivo continuará sendo a diminuição do número de infectados, buscando erradicar a doença.

Observe o diagrama compartmental do modelo na (Figura 17), com a introdução de uma taxa de vacinação (u) que será aplicada nos suscetíveis, fazendo com que ingressem no grupo dos recuperados. Essa possibilidade de transferência faz com que o modelo SIR passe a ser considerado como SIRV. Só que não introduzimos uma categoria para os vacinados, portanto eles são incluídos no grupo dos recuperados.

Além disso, foi aplicada uma taxa de eficácia da vacina (σu) para analisar o percentual de indivíduos que deixam ou não o grupo dos recuperados do modelo SIR e retornam para o dos suscetíveis. Caso haja regresso, o modelo SIR pode ser entendido como um modelo SIRS.

No caso de uma vacina eficaz no modelo SIRV, só teremos que variar a taxa de vacinação. Com isso, podemos perceber que à medida que (u) aumenta, também aumentam os indivíduos no grupo dos recuperados e diminuem os infectados. Já no modelo SIRS, tendo uma vacina ineficaz, por mais que a taxa de vacinação seja aumentada, teremos uma progressiva diminuição dos recuperados e um aumento dos infectados.

A análise da eficácia da vacina é feita a partir do valor de (σu). Se assumir o valor zero, a vacina será perfeitamente eficaz. Nesse caso, não há retorno de indivíduos recuperados para o grupo de suscetíveis. Em contrapartida, se ($\sigma u=1$), verificamos a ineficácia da vacina.



Fonte: Autora

O Sistema de Equações (3) representa o modelo (SIR + ASI) com a introdução de uma vacina.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_h}{dt} = \mu_h N_h - \left(B\beta_{mh} \frac{I_m}{N_h} + \mu_h + u \right) S_h + \sigma u R_h \\ \frac{dI_h}{dt} = B\beta_{mh} \frac{I_m}{N_h} S_h - (\eta_h + \mu_h) I_h \\ \frac{dR_h}{dt} = \eta_h I_h + u S_h - (\sigma u + \mu_h) R_h \\ \frac{dA_m}{dt} = \varphi \left(1 - \frac{A_m}{kN_h} \right) (S_m + I_m) - (\eta_A + \mu_A) A_m \\ \frac{dS_m}{dt} = \eta_A A_m - \left(B\beta_{hm} \frac{I_h}{N_h} + \mu_m \right) S_m \\ \frac{dI_m}{dt} = B\beta_{hm} \frac{I_h}{N_h} S_m - \mu_m I_m \end{array} \right. \quad (3)$$

4.1 TRABALHOS FUTUROS

Valores intermediários para a taxa de eficácia podem ser testados, utilizando-se de diferentes porcentagens de vacinados. Nesse caso, precisamos enfatizar que o modelo além de SIRV será SIRS, o que significa que haverá um crescimento proporcional de infectados e diminuição de recuperados. Deixaremos a construção do gráfico do modelo (SIR + ASI) com controle na população humana, como possibilidade para inserção em trabalhos futuros.

5 RESULTADOS

Iniciamos nossas simulações apresentando o modelo (SIR + ASI) sem controle, onde tínhamos um crescimento máximo de pessoas infectadas e de mosquitos adultos infectados. Observamos que a situação apresentada precisava de uma intervenção. Apesar de existirem outras formas de intervenção para este modelo, decidimos pela aplicação resultante do controle de mosquitos e de humanos.

Comprovamos que os resultados obtidos por Amorim (2020) são fidedignos. Observamos que a utilização do adulticida é o controle mais eficaz, pois mesmo em doses menores do produto, conseguimos diminuir ou extinguir com a quantidade de humanos e mosquitos infectados. Enquanto o larvicida mesmo em doses maiores que o adulticida, não foi capaz de extinguir com os mosquitos da forma aquática.

Ao utilizarmos 25% de larvicida, 5% de adulticida e 75% de controle mecânico diminuímos drasticamente a quantidade de pessoas infectadas até desaparecerem, já os mosquitos adultos logo desapareceram. Enquanto os mosquitos na fase aquática mantinham-se estáveis e em grande quantidade. Com isso, resolvemos aumentar a dose de larvicida para 50%, 10% de adulticida e 50%

de controle mecânico. Verificamos que as pessoas e os mosquitos infectados desapareceram, já os mosquitos aquáticos diminuíram um pouco, porém continuaram em grande quantidade e estáveis. Quando aumentamos ainda mais a proporção de larvicida para 75%, 15% de adulticida e 25% de controle mecânico, as pessoas e os mosquitos infectados continuaram desaparecidos e os mosquitos imaturos sofreram redução, mas não deixaram de existir.

Na tentativa de igualar os controles a 1%, ficando o mecânico responsável por 99%, pioramos a situação, pois as pessoas e os mosquitos infectados voltaram a crescer e atingir um valor máximo significativo. Já os mosquitos aquáticos se estabilizaram em uma quantidade maior. Conseguimos reverter a situação quando atribuímos 5% aos controles larvicida e adulticida e 95% ao controle mecânico. Com isso, as pessoas e mosquitos infectados começaram a desaparecer. Só que os mosquitos imaturos se mantiveram estabilizados e em grande quantidade. Ao aumentarmos os controles para 10% e o mecânico para 90%, as pessoas e os mosquitos infectados continuaram desaparecidos, porém os aquáticos continuaram persistentes e em grande quantidade.

A partir das simulações realizadas podemos concluir que se aplicarmos no mínimo 5% de cada controle, é possível obter uma redução expressiva no número de humanos e mosquitos infectados. Portanto, com os valores dos controles em 5%, isto é, ($c_A = c_m = 1 - \alpha = 0,5$) alcançamos uma diminuição nos dois grupos.

Já com a introdução de uma vacina agindo no controle de humanos, percebemos que sua eficácia é de suma importância, já que representará um modelo do tipo SIRV. Em contrapartida, a sua ineficácia faz com que o modelo SIRS apareça e isso significa um retrocesso, pois por mais que a taxa de vacinação esteja próxima de 100%, teremos um retorno dos recuperados para o grupo dos suscetíveis, gerando um crescimento de infectados. O que não é o indicado. Portanto, a vacina precisa ser realmente eficaz.

6 PREJUÍZOS COM O USO DE ADULTICIDAS

O uso dessas substâncias químicas utilizadas para eliminar mosquitos adultos pode ser um tema frequente de debates e discussões, pois a eficácia e a sustentabilidade desses produtos são questionáveis. Pode ser arriscado optar por utilizar somente os adulticidas e não buscar por outras formas de controle. Pudemos perceber que os adulticidas tiveram ótimos resultados, porém se a sua utilização no combate aos mosquitos, oferecer algum tipo de comprometimento, acreditamos que deverão ser substituídos, apesar de sua eficácia.

Não podemos esquecer da importância do controle mecânico que também é decisivo no combate aos vetores em seus criadouros. Não podemos deixar de destacar a importância desse tipo

de controle, quando conseguimos reduzir ou extinguir a quantidade de pessoas ou mosquitos infectados.

Além dos problemas relacionados à saúde dos seres humanos, os adulticidas também podem ser considerados como um perigo para a natureza. Eles contaminam o solo, o ar, a água etc. Os adulticidas podem fazer com que vegetações e animais morram ou fiquem doentes por conta desses venenos. Os inseticidas também podem acabar infectando os consumidores por outro meio além da alimentação. O uso de produtos tóxicos no Brasil é um problema ambiental e de saúde pública.

7 CONCLUSÃO

Tivemos a pretensão de buscar na literatura um modelo básico sobre a Dengue, com apenas seis equações, porém com um grau de complexidade maior do que o do modelo SIR. Encontramos um desafio ainda maior que foi construir um algoritmo para o Octave que representasse os gráficos de humanos e mosquitos separadamente. A inserção das equações com exatidão, também se tornou um grande desafio e uma possibilidade para o aprendizado. Os erros no código poderiam fazer com que os gráficos fossem implementados erroneamente.

O importante é reconhecermos uma oportunidade de aprimorar os nossos conhecimentos. O estudo desses modelos básicos pode ser um primeiro passo para a compreensão dos modelos mais complexos. Este modelo foi representado por Sistemas de Equações Diferenciais Ordinárias não Lineares, que ao serem transformadas em Equações de Diferenças, passam a envolver apenas as operações básicas. Essa conversão permite inúmeras adaptações. Este conteúdo poderá ser abordado tanto na Educação Básica quanto no Ensino Superior.

O nosso objetivo é que tenhamos leitores pesquisadores, pois assumimos esta missão de propor intervenções aos problemas da atualidade, enquanto aprendemos. Aprender significa utilizarmos os nossos erros para buscarmos os acertos. A oportunidade de realizar simulações nos permite observar se estamos no caminho certo ou errado. É uma forma de aplicação de um problema real, dentro dos limites de uma sala de aula sem paredes. Portanto, a nossa proposta também é direcionada aos profissionais da Educação, que poderão utilizar este material em suas aulas.

Além disso, reforçamos que a utilização desses inseticidas só deve ser feita com a máxima prudência e que possamos cobrar isso das autoridades. Desejamos que novas formas de controle sejam aplicadas, reduzindo a contaminação dos seres vivos, pois estamos trilhando um caminho de descobertas. Quantos de nós imaginamos que a Matemática seria tão importante na previsão da evolução de uma doença? A modelagem matemática assume uma grande missão, a de resolver as problemáticas causadas pelos agentes infectantes.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e ao meu orientador do PPGMMC, Carlos Andrés Reyna Vera Tudela.

REFERÊNCIAS

Amorim, Magna Pereira. Modelos Matemáticos e Computacionais da Dengue via Equações Diferenciais Ordinárias com Estratégias de Controle. Universidade Federal Fluminense, 2020.

Dye, C. The Analysis of Parasite Transmission by Bloodsucking Insects. Annual Review of Entomology, v.37, n.1, p. 1–19, 1992.

QUADROS, Alessandra.Sena. Modelos epidemiológicos para propagação de informação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

ROSS, P. A. et al. Loss of cytoplasmic incompatibility in wolbachia-infected aedes aegypti under field conditions. Plos Neglected Tropical Diseases, v. 13, n. 4, 2019.

Scott TW, Clark GG, Lorenz LH, Amerasinghe PH, Reiter P, Edman JD. Detection of multiple blood feeding in Aedes aegypti (Diptera: Culicidae) during a single gonotrophic cycle using a histologic technique. J Med Entomol, v. 30, n.9, p.4–9, jan 1993.

Viana D. V, Ignotti E. “A Ocorrência Da Dengue e Variações Meteorológicas no Brasil: Revisão Sistemática.” Revista brasileira de epidemiologia, v.16, n..2, p.240–256, 2013.

YEAP, H. L. et al. Dynamics of the “popcorn” wolbachia infection in outbred aedes aegypti informs prospects for mosquito vector control. Genetics, v. 187, p. 583–595, 2011.

Zara, A. L.S. A. et al. “Estratégias de Controle Do Aedes Aegypti: Uma Revisão.” Epidemiologia e serviços de saúde, v. 25, n.2, p. 391–404, 2016.