

Dengue Transmission Dynamics Analysis and Simulation in Minas Gerais - Brazil

G.C. Silva, A.G. Utsumi and N.G. Sousa

Abstract - Dengue control is a challenging task due to the complexity of the factors that involve its spread. The use of mathematical models to investigate the spread of dengue allows us to understand its behavior and provide information for its eradication. In this work, the analysis and simulation of the dynamics of dengue transmission to the State of Minas Gerais-Brazil- was proposed. Mathematical models were simulated using free software Scilab®. In order to assess the impact on the epidemiological curve of the disease, the main methods of mosquito population control (insecticide, larvicide and mechanical control) were analyzed. The results obtained showed that mechanical control was the most efficient method, with 9.3% reduction of cases, as it acts directly in the breeding sites. It is noteworthy that insecticide and larvicide control also had a positive impact on the epidemiological curve, with a decrease of 7.9% and 6.3% of cases, respectively. This justifies the use of these techniques concurrently with mechanical control. The use of projections obtained by mathematical models can guide decision making regarding the adoption of public policies to reduce dengue cases.

Index Terms—Control Strategies, Mosquito Dynamics, Ross-Macdonald Model, SIR Model.

I. INTRODUÇÃO

A dengue é considerada um dos maiores problemas de saúde pública do mundo [1]. Somente em 2019 ocorreram 2,1 milhões de casos no Brasil, de modo que os surtos de dengue costumam acontecer nos períodos mais chuvosos do ano [2].

A transmissão do vírus se dá pela picada do mosquito fêmea do *Aedes aegypti*, que, sendo portadora do vírus, transmite a doença ao ser humano exposto [3]. As pessoas infectadas apresentam um quadro clínico que pode variar desde uma infecção assintomática, até evoluir a quadros mais graves de hemorragia e morte [4].

Dentre as estratégias para combater a dengue destacam a utilização de produtos químicos e o controle mecânico, eliminando os criadouros com água parada. No entanto, devido à dimensão espacial do Brasil e a escassez de recursos destinados ao controle da dengue é preciso otimizar as estratégias.

G.C. Silva, Chemical Engineering Department, Federal University of Triângulo Mineiro, Minas Gerais, Brazil (e-mail: gcarvalho.gsilva@gmail.com).

A.G. Utsumi, Environmental Engineering Department, Federal University of Triângulo Mineiro, Minas Gerais, Brazil (e-mail: alex.utsumi@uftm.edu.br).

N.G. Sousa, Chemical Engineering Department, Federal University of Triângulo Mineiro, Minas Gerais, Brazil (e-mail: nadia.sousa@uftm.edu.br).

A possibilidade de prever a dinâmica de propagação da dengue pode auxiliar na tomada de decisão dos órgãos responsáveis, contribuindo para a prevenção e mitigação da doença [5].

Nesse sentido, a dinâmica da dengue é influenciada por uma série de fatores: temperatura e chuva, as quais afetam o período de incubação do mosquito; aumento da população; falta de programas de vigilância epidemiológica; suscetibilidade da população; entre outros [6].

Historicamente, os modelos matemáticos estão sendo amplamente utilizados em epidemiologia como ferramenta na análise da propagação e controle de doenças infecciosas. O primeiro trabalho relacionado com a propagação de doenças infecciosas foi proposto por Daniel Bernoulli, ao estudar a varíola em 1760 [7]. Também podem ser citados os trabalhos Sir Ronald Ross e Kermack-McKendrick nos anos 1900, que estudaram a dinâmica de transmissão e controle de doenças infecciosas [8].

Desde então, a modelagem matemática epidemiológica tem auxiliado na compreensão da dinâmica de diversas doenças, tais como H1N1 [9], dengue [5], [10] hepatite B viral (HBV) [11] e COVID-19 [12], [13]. Esses modelos têm como base uma série de parâmetros responsáveis pelos mecanismos geradores da doença que possibilitam o entendimento de sua transmissão [3].

Este trabalho teve como objetivo a simulação e análise da dinâmica da dengue através dos modelos matemáticos do tipo SIR (Suscetível-Infetado-Recuperado) e de Ross-Macdonald. O estudo avaliou o comportamento da doença para a realidade do Estado de Minas Gerais-Brasil, o qual apresenta historicamente alta incidência da doença e escassez de estudos que utilizam modelos matemáticos. Além disso, foi estudada a mudança na curva epidemiológica quando medidas de controle do vetor, como inseticidas, larvicidas e controle mecânico, fossem implementadas.

II. MÉTODOS

O trabalho é desenvolvido através da modelagem e simulação da dinâmica de transmissão dengue correlacionando diferentes modelos, sendo a metodologia abordada de caráter teórico-computacional. Para a simulação dos modelos matemáticos desenvolvidos é utilizado o *software* livre Scilab® 6.0, aplicando o solucionador *Isoda* do pacote ODEPACK.

A. Área de Estudo

O Estado de Minas Gerais possui 21.411.923 habitantes e um total de 853 municípios [14]. Segundo dados da Secretaria

de Estado de Saúde de Minas Gerais, entre as 28 Unidades Regionais de Saúde (URS), apenas duas apresentavam incidência acumulada de casos prováveis de dengue abaixo de 100, entre janeiro e novembro de 2020 (Fig. 1A). A alta incidência (> 500) constatada em 11 URS revela a gravidade do problema da dengue em Minas Gerais. Ao analisar os casos prováveis de dengue por município no mesmo período, 203 apresentaram alta incidência (Fig. 1B).

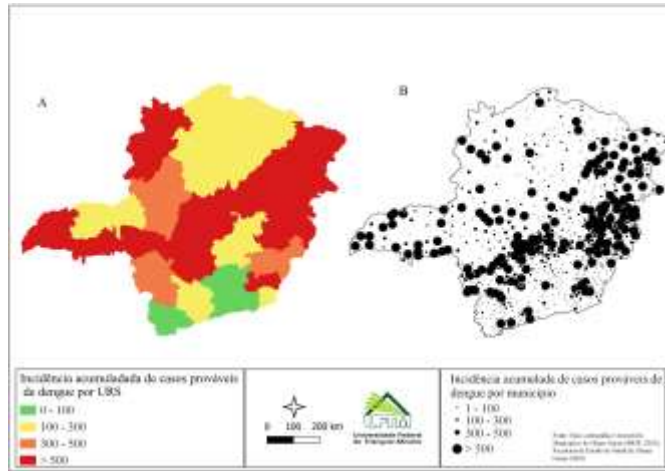


Fig. 1. Incidência acumulada de casos prováveis de dengue por URS (A) e por municípios(B) em Minas Gerais.

B. Modelo Suscetível-Infetado-Recuperado (SIR)

O modelo SIR é constituído apenas pela população humana, sendo dividida em três categorias: suscetíveis (H_S), infecciosos (H_I) e recuperados (H_R), de acordo com o estudo de [15]. O esquema compartimental é representado pela Fig. 2.

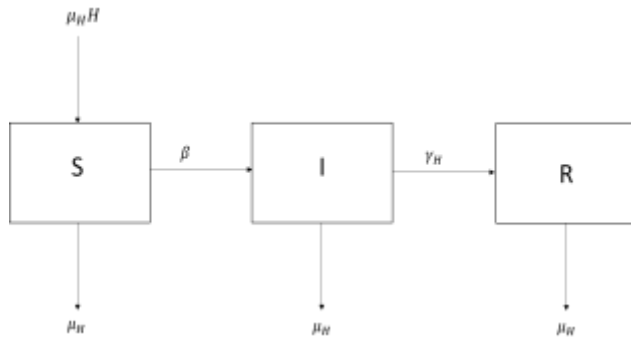


Fig. 2. Esquema de interação do modelo SIR.

Foi considerado que a mortalidade por doença induzida na população humana pode ser desprezada e este se mantém constante. Além disso, inicialmente, tem-se 3.990 pessoas infectadas [17], $H - 3.990$ pessoas suscetíveis, nenhum recuperado e nenhum caso de dengue hemorrágica. O modelo matemático está representado pelas equações de 1 a 3 e os parâmetros estão detalhados na Tabela I.

$$\frac{dH_S}{dt} = \mu_H H - \beta \frac{H_I}{H} H_S - \mu_H H_S \tag{1}$$

$$\frac{dH_I}{dt} = \beta \frac{H_I}{H} H_S - \gamma_H H_I - \mu_H H_I \tag{2}$$

$$\frac{dH_R}{dt} = \gamma_H H_I - \mu_H H_R \tag{3}$$

sendo que H é a população total de humanos.

TABELA I
PARÂMETROS DO MODELO

Símbolo	Descrição	Valor	Referência
H	População total de Minas Gerais	21.119.536 habitantes	[14]
v_{I0}	Proporção inicial de mosquitos infectados na população vetor	0,001	Assumido
γ_H	Taxa de recuperação de pessoas infectadas	$\frac{1}{3}$ dias ⁻¹	Assumido
β_{aHmin}	Coefficiente de transmissão mínimo mosquito-para-humano	0,038 dias ⁻¹	Estimado pelo modelo
β_{H0}	Coefficiente de transmissão inicial mosquito-para-humano	0,050 dias ⁻¹	Estimado pelo modelo
τ_{RM}	Coefficiente de decaimento do contato humano-mosquito	0,800 mês ⁻¹	Estimado pelo modelo
t_{0RM}	Tempo em que se inicia a taxa de decaimento – Modelo Ross-Macdonald	3,100 meses	Estimado pelo modelo
μ_H	Taxa de mortalidade da população humana	1/76 anos ⁻¹	Assumido
μ_V	Taxa de mortalidade dos mosquitos	0,058 dias ⁻¹	[15]
β_{aVmin}	Coefficiente de transmissão mínimo humano-para-mosquito	0,200 dias ⁻¹	Estimado pelo modelo
β_{V0}	Coefficiente de transmissão inicial humano para mosquito	0,380 dias ⁻¹	Estimado pelo modelo
β_{min}	Coefficiente de transmissão mínimo	0,197 dias ⁻¹	Estimado pelo modelo
β_0	Coefficiente de transmissão inicial	0,399 dias ⁻¹	Estimado pelo modelo
τ_{SIR}	Coefficiente de decaimento da taxa de transmissão	0,095 mês ⁻¹	Estimado pelo modelo
t_{0SIR}	Tempo em que se inicia a taxa de decaimento – Modelo SIR	1 mês	Estimado pelo modelo
μ'_V	Taxa de mortalidade do mosquito com inseticida	0,065 dias ⁻¹	[10]
\emptyset	Taxa per capita de oviposição	0,740 dias ⁻¹	Assumido
CL	Quantidade de criadouros	2000	Assumido
p	Fração de dengue hemorrágica	0,0022	[15]
f	Taxa da população de mosquitos que são fêmeas em idade de oviposição	0,400	Assumido
σ_e	Taxa de transição da fase ovo para larva	$\frac{1}{3,3}$ dias ⁻¹	[10]
μ_e	Taxa de mortalidade natural do ovo	$\frac{1}{100}$ dias ⁻¹	[10]
σ_l	Taxa de transição da fase larva para pupa	$\frac{1}{8}$ dias ⁻¹	[10]
μ_l	Taxa de mortalidade natural da larva	$\frac{1}{2}$ dias ⁻¹	[10]
μ'_l	Taxa de mortalidade da larva com larvicida	$\frac{1}{1,8}$ dias ⁻¹	[10]
σ_p	Taxa de transição da pupa para mosquito adulto	$\frac{1}{3,1}$ dias ⁻¹	[10]
μ_p	Taxa de mortalidade natural da pupa	$\frac{1}{60}$ dias ⁻¹	[10]
μ'_p	Taxa de mortalidade da pupa com o larvicida	$\frac{1}{55}$ dias ⁻¹	[10]

A previsão do número de casos de dengue hemorrágica (H_C) no período estudado é calculada pela equação 4.

$$\frac{dH_C}{dt} = \beta p \frac{H_I}{H} H_S \tag{4}$$

A reprodutividade basal (R_0) é calcula por: $R_0 = \frac{\beta}{\mu_H + \gamma_H}$ [15]. A taxa de transmissão é calculada pela equação 5 (modificado de [16]). A utilização da equação 5, foi feita com o intuito de representar a sazonalidade da doença, ou seja, o decaimento da taxa de transmissão em períodos mais frios e o aumento em períodos mais quentes e chuvosos.

$$\beta = \begin{cases} \beta_0, & t < t_{0SIR} \\ \beta_{min} + (\beta_0 - \beta_{min})e^{(-r_{SIR}(t-t_{0SIR}))}, & t \geq t_{0SIR} \end{cases} \quad (5)$$

C. Modelo de Ross-Macdonald

A construção do modelo foi feita dividindo a população humana em três categorias: suscetíveis (H_s), infecciosos (H_I) e recuperados (H_R) e a população de mosquitos em duas categorias: suscetíveis (V_s) e infecciosos (V_I) [15]. O esquema compartimental é representado pela Fig. 3.

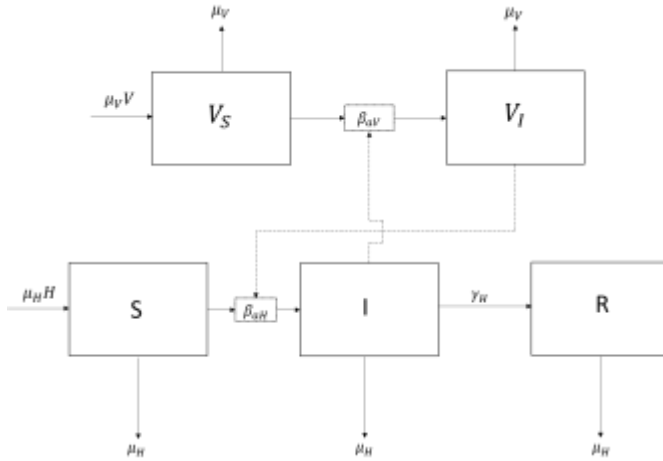


Fig. 3. Esquema de interação do modelo Ross-Macdonald.

Foi considerado que os mosquitos não se recuperam da infecção, a mortalidade por doença induzida em mosquitos e na população humana pode ser desprezada e a população humana e de mosquitos se mantém constante. Além disso, inicialmente, tem-se 3.990 pessoas infectadas [17], $H - 3.990$ pessoas suscetíveis, nenhum recuperado e nenhum caso de dengue hemorrágica. No caso dos vetores, tem-se $V_I(0) = 0,001$ e $V_S(0) = 1 - V_I(0)$. O modelo é formado pelas equações de 6 a 10 e os parâmetros estão detalhados na Tabela I.

$$\frac{dH_s}{dt} = \mu_H H - \beta_{aH} \frac{V_I}{V} H_s - \mu_H H_s \quad (6)$$

$$\frac{dH_I}{dt} = \beta_{aH} \frac{V_I}{V} H_s - \gamma_H H_I - \mu_H H_I \quad (7)$$

$$\frac{dH_R}{dt} = \gamma_H H_I - \mu_H H_R \quad (8)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \mu_V V - \beta_{aV} \frac{H_I}{H} V_s - \mu_V V_s \quad (9)$$

$$\frac{dV_I}{dt} = \beta_{aV} \frac{H_I}{H} V_s - \mu_V V_I \quad (10)$$

sendo que: $v_s = \frac{V_s}{V}$ e $v_I = \frac{V_I}{V}$, em que V é a população total de mosquitos.

Foi avaliado o impacto causado na população humana infectada quando se utiliza três controles da população de mosquitos: mecânico, larvicida e inseticida. O estudo do controle da doença foi feito em escala piloto, com um número de 2.000 criadouros para entender o efeito de cada um dos controles na população de mosquitos e no impacto do número de infectados pela doença. Como o controle é aplicado na fase de ovo (E), larva (L) e pupa (P), ou seja, no mosquito em desenvolvimento, foram adicionadas ao modelo de Ross-Macdonald as equações de 11 a 13. As equações 9 e 10 foram substituídas pelas equações 14 e 15 (modificado de [10]). Foi considerado inicialmente somente os mosquitos adultos, ou seja, $E(0) = L(0) = P(0) = 0$.

$$\frac{dE}{dt} = \phi \left[1 - \frac{E(V_s + V_I)}{CL} \right] f - (\sigma_e + \mu_e)E \quad (11)$$

$$\frac{dL}{dt} = \sigma_e E - (\sigma_l + \mu_l + \mu'_l)L \quad (12)$$

$$\frac{dP}{dt} = \sigma_l L - (\sigma_p + \mu_p + \mu'_p)P \quad (13)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \sigma_p P - \beta_{aV} \frac{H_I}{H} V_s - (\mu_V + \mu'_V)V_s \quad (14)$$

$$\frac{dV_I}{dt} = \beta_{aV} \frac{H_I}{H} V_s - (\mu_V + \mu'_V)V_I \quad (15)$$

Os efeitos da aplicação do controle na curva epidemiológica foram avaliados de forma separada, sendo aplicados na 27ª semana epidemiológica de 2020. A duração do efeito do larvicida foi de 50 dias, do inseticida foi de 10 dias e o controle mecânico retirando criadouros com água parada sendo que, uma vez retirado o criadouro, este não voltará a ter efeito na população de mosquitos [10].

A previsão do número de casos de dengue hemorrágica (H_C) no período estudado é calculada pela equação 16.

$$\frac{dH_C}{dt} = \beta_{aH} p \frac{V_I}{V} H_s \quad (16)$$

A reprodutividade basal (R_0) é calculada por: $R_0 = \frac{\beta_{aH}\beta_{aV}}{\mu_V(\mu_H + \gamma_H)}$ [15]. As taxas de transmissão mosquito-para-humano e humano-para-mosquito pelas equações 17 e 18, respectivamente (modificado de [16]).

$$\beta_{aH} = \begin{cases} \beta_{H0}, & t < t_{0RM} \\ \beta_{aHmin} + (\beta_{H0} - \beta_{aHmin})e^{(-r_{RM}(t-t_{0RM}))}, & t \geq t_{0RM} \end{cases} \quad (17)$$

$$\beta_{aV} = \begin{cases} \beta_{V0}, & t < t_{0RM} \\ \beta_{aVmin} + (\beta_{V0} - \beta_{aVmin})e^{(-r_{RM}(t-t_{0RM}))}, & t \geq t_{0RM} \end{cases} \quad (18)$$

Para adequação dos parâmetros dos modelos matemáticos foi utilizado o número de casos de dengue para o estado de Minas Gerais-Brasil, obtido pelos Boletins Epidemiológicos do Estado para o ano de 2020 [17]. A Secretaria de Saúde

começou a divulgar os dados confirmados a partir da 22ª semana epidemiológica. Portanto o período avaliado neste trabalho foi de junho/2020 a dezembro/2020. Os parâmetros utilizados para a simulação dos modelos estão dispostos na Tabela I.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a adequação dos parâmetros dos modelos aos dados reais, foi utilizado o número de casos de dengue acumulados. Os resultados estão dispostos na Fig. 4.

Pode-se notar que os modelos se adequaram aos dados de dengue para o estado de Minas Gerais, podendo ser utilizados para realizar previsões com relação ao avanço da doença. O modelo Ross-Macdonald e Ross-Macdonald modificado apresentaram coeficientes de determinação mais altos: $R^2 = 0,986$ e $R^2 = 0,972$, respectivamente. Já o modelo SIR apresentou um $R^2 = 0,939$. Pode-se notar que os modelos apresentaram coeficientes de determinação elevados, o que demonstra que podem ser utilizados para estudos posteriores, avaliando o impacto de medidas na curva epidemiológica da dengue em Minas Gerais. Esses resultados estão de acordo com o trabalho de [15] que estudaram a dinâmica da dengue na Tailândia.

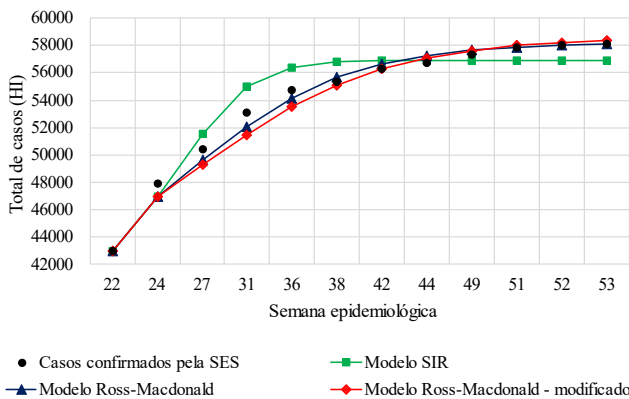


Fig. 4. Comportamento dos modelos ajustados ao número de casos de dengue acumulados para Minas Gerais-Brasil.

Após essa adequação, foi realizada a predição do comportamento da população humana baseado no modelo validado anteriormente. A Fig. 5 mostra o comportamento da população humana suscetível, infectada e recuperada para os modelos estudados. O comportamento foi semelhante, como o esperado, tendo um crescimento no número de indivíduos infectados, assim como dos indivíduos recuperados que vão se curando da doença e uma diminuição do número de indivíduos suscetíveis, visto que estes vão sendo infectados ao longo do tempo.

A forma mais eficiente de reduzir os casos de dengue é através do controle da população de mosquitos suscetíveis e infectados. Assim, foi realizado o estudo utilizando meios de controle para o modelo de Ross Macdonald modificado. O impacto desse efeito na população de mosquitos está apresentado na Fig. 6, na qual a população de mosquitos infectados foi dividida pela população total de mosquitos para

obter-se um número entre 0 e 1, independente da população total de mosquitos.

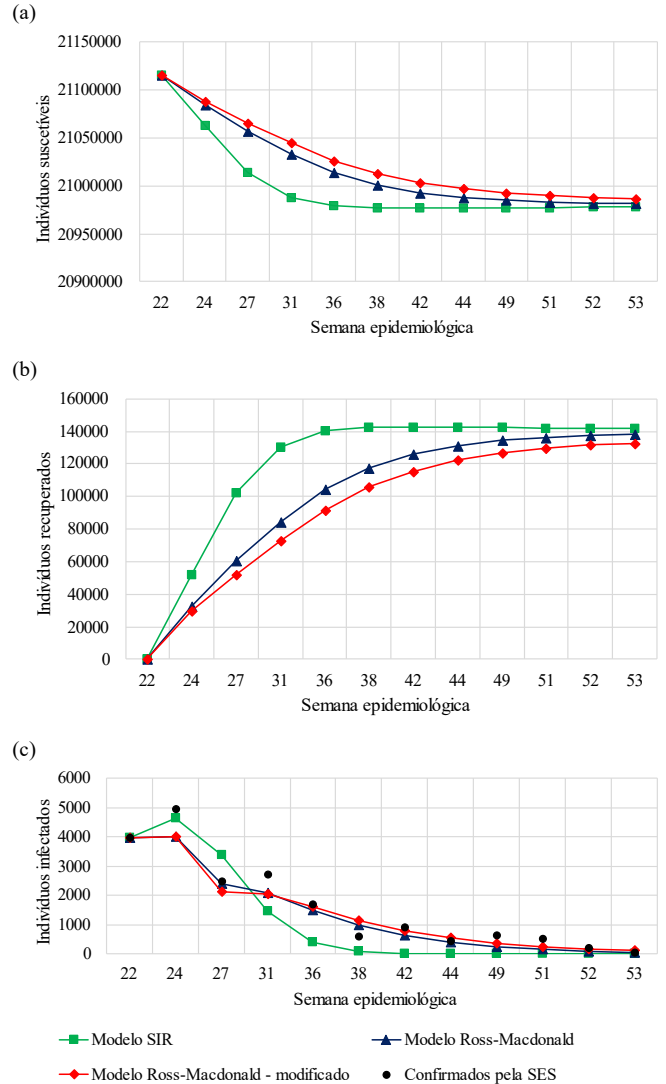


Fig. 5. Comportamento do número de indivíduos por semana epidemiológica: a. suscetíveis; b. recuperados; c. infectados.

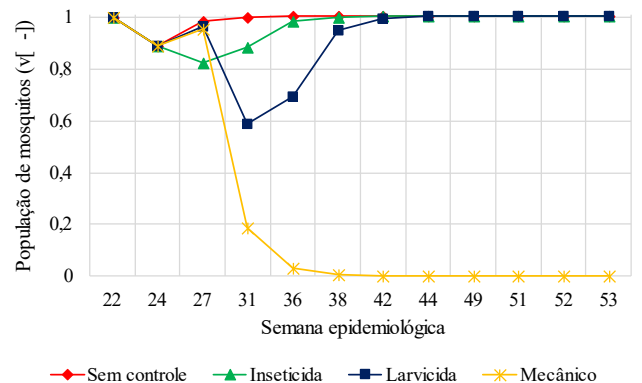


Fig. 6. Comportamento da população de mosquitos.

Pelos resultados apresentados na Fig. 6, nota-se que o controle mecânico é o mais eficiente, visto que é o único capaz de reduzir toda a população de mosquitos, já que atua

diretamente no controle do vetor, ou seja, nos criadouros. Tal resultado vai de acordo com informativo divulgado pela [18], no qual afirma que o controle mecânico é o mais eficiente, por isso o foco em controle de águas paradas e possíveis criadouros dos mosquitos são os principais pontos levantados em políticas públicas de controle a dengue. Esses resultados também estão de acordo com os estudos de [10] que avaliaram qual o impacto do uso de diferentes mecanismos de controle no número de casos de dengue.

O controle com larvicida é uma ação secundária sendo indicado para locais em que o controle mecânico é inviável, pois a aplicação incorreta pode gerar resistência nos mosquitos, causar danos ambientais e causar efeitos adversos em humanos. Já o controle com inseticida, apesar de também ser eficiente, deve ser evitado, visto que pode causar grandes impactos ambientais que ainda não são muito bem estudados e conhecidos [4], [19].

O impacto do controle na curva epidemiológica é mostrado na Fig. 7. Neste caso, pode-se notar que com a aplicação do controle houve uma redução no número de casos de dengue. O maior impacto na curva epidemiológica foi para o controle mecânico, uma redução de 9,3% (5.402 casos), como o esperado e já apresentado anteriormente. Para o larvicida a redução foi de 6,3% (3.682 casos) e para o inseticida foi de 7,9% (4.603 casos). Vale ressaltar a importância dessa redução, visto que o controle atua na reprodução dos mosquitos, afetando diretamente o ciclo de transmissão da doença.

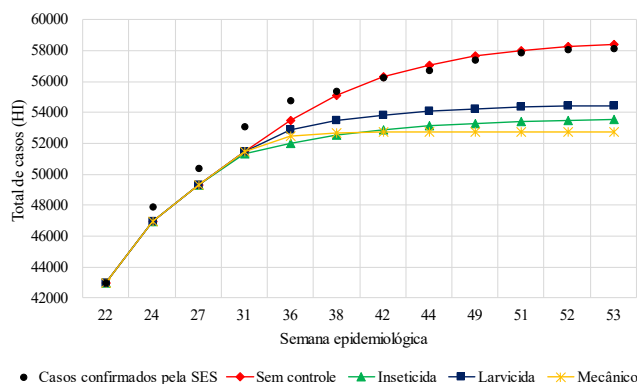


Fig. 7. Comportamento do número total de casos de dengue, para o modelo de Ross-Macdonald modificado, sem e com controle do vetor.

Foi realizada uma estimativa do número de casos de dengue hemorrágica no período avaliado (junho/2020 a dezembro/2020), apresentados na Fig. 8. Para o modelo Ross-Macdonald o número de casos de dengue hemorrágica foi de aproximadamente 298 casos e para o modelo SIR foi de 306 casos. Isso significa que aproximadamente 0,5% dos casos de dengue registrado no estado, neste período, foram hemorrágica.

[20] realizaram um estudo sobre a prevalência da dengue comum e da dengue hemorrágica no Brasil entre 2011 e 2015, nesse período 3,45% do número total de casos no país foi de DHF (*Dengue Hemorrhagic Fever*) e a região sudeste foi a que apresentou maior número, sendo 4,54% do total de casos confirmados. Mesmo sendo fora do período analisado por este

trabalho, é possível ter uma visão geral dos valores calculados pelo modelo e os valores reais, encontrados na literatura.

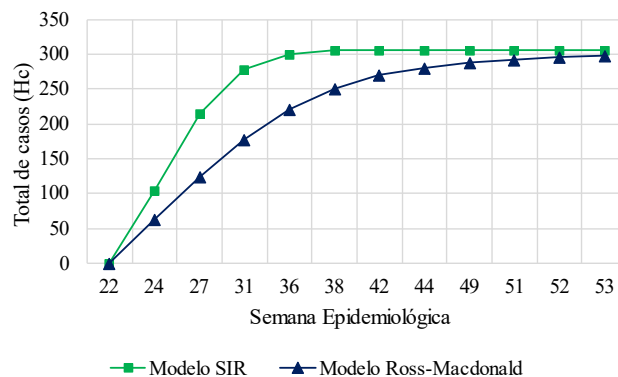


Fig. 8. Número de casos dengue hemorrágica acumulados para Minas Gerais, modelos de Ross-Macdonald e SIR.

A reprodutibilidade basal (R_0) foi calculada conforme a progressão da simulação de cada modelo. O valor encontrado variou de 1,02 a 0,70, sendo que os maiores valores foram alcançados no início do período avaliado. Em períodos em que $R_0 < 1$ (meses finais do ano) cada indivíduo infectado gera menos que um indivíduo com dengue durante seu período infeccioso e a doença se comporta gerando menor número de casos. Em casos que $R_0 > 1$ cada indivíduo com dengue gera mais que um indivíduo infectado durante seu período infeccioso. Neste caso, a doença pode vir a causar uma epidemia com o aumento de casos. Tal fato ocorre no início do ano, visto que chuvas abundantes, umidade e calor típicos do verão aumentam a reprodução do mosquito [15], [21].

IV. CONCLUSÕES

O estudo apresentado visou avaliar, utilizando três modelos matemáticos distintos, a evolução da dinâmica de transmissão da dengue para o estado de Minas Gerais. Encontrar um modelo que descreva fielmente o comportamento da doença é difícil, porém é possível obter uma aproximação confiável quando os fatores que afetam sua dinâmica são bem representados.

Pela análise dos resultados simulados, pode-se afirmar que estes se adaptaram bem aos dados reais e refletem a realidade, pois apresentaram coeficientes de determinação elevados - Ross-Macdonald ($R^2 = 0,986$), Ross-Macdonald modificado ($R^2 = 0,972$) e SIR ($R^2 = 0,939$). A vantagem de se utilizar os modelos de Ross-Macdonald é que as medidas de controle da população de mosquito impactam diretamente na quantidade de casos confirmados, e devem ser alvo prioritário de políticas sanitárias.

Os modelos matemáticos, como proposto por este trabalho, podem contribuir para revelar aspectos importantes sobre a disseminação da dengue numa determinada população. Isso tem como finalidade estabelecer um programa de controle do vetor, cuidados médicos, conscientização da população e nortear medidas a serem adotadas para a sua contenção.

Visando representar a realidade de forma mais aproximada, estudos futuros poderiam avaliar a utilização dos métodos de controle de forma concomitante e seu impacto na curva epidemiológica. Além disso, sugere-se considerar na

modelagem matemática da população humana a classe exposta (modelo SEIR – Suscetível-Exposto-Infetado-Recuperado) e a classe de óbitos pela doença.

REFERÊNCIAS

- [1] E. M. S. Costa, E. A. Costa, R. V. da Cunha, "Desafios da prevenção e controle da dengue na fronteira Brasil/Bolívia: representações sociais de gestores e profissionais da saúde," *Physis: Revista de Saúde Coletiva*, vol. 28, no. 1, pp. 1–21, Out. 2018. DOI: 10.1590/S0103-73312018280415
- [2] Fiocruz, "Estudo investiga ressurgimento da dengue após epidemia de zika." 2021. [Online]. Available: <https://portal.fiocruz.br/noticia/estudo-investiga-ressurgimento-da-dengue-apos-epidemia-de-zika>. Acessado em: Out. 2021.
- [3] J. D. Murray "Mathematical biology. I. An introduction", 3ed, vol. 17. Springer, 2002, pp.315-394.
- [4] Fiocruz, "Pesquisa mostra os efeitos da resistência a inseticidas no mosquito da dengue," 2012. [Online]. Available: <https://portal.fiocruz.br/noticia/pesquisa-mostra-os-efeitos-da-resistencia-inseticidas-no-mosquito-da-dengue>. Acessado em: Out. 2021.
- [5] T. Silva, J. Montalvão, "Inversion of the SIR-SI System for Estimation of Human-Vector Contact Rate and Prediction of Dengue Cases," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 9, pp. 1482-1490, Set. 2019
- [6] W. J. McBride, H. Biefeldt-Ohmann, "Dengue viral infections; pathogenesis and epidemiology," *Microbes Infect*, vol. 2, pp. 1041–50, Ago. 2000.
- [7] R. S. Barbosa, A. S. S. Soares, D. A. Coelho, D. A. Santos, "Software de simulações dos modelos Sir e Seir como ferramenta de gerenciamento ambiental de doenças epidemiológicas," *Scientia Cum Industria*, vol. 4, no. 2, pp. 114–118, 2016. DOI: 10.18226/23185279.v4iss2p114
- [8] E. Iboi, O.O. Sharomi, C. Ngonghala, A. B. Gumel, "Mathematical Modeling and Analysis of COVID-19 pandemic in Nigeria," *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol.7, no.6 pp. 7192–7220, Jul. 2020.
- [9] S. Kim, J. Lee, E. Jung, "Mathematical model of transmission dynamics and optimal control strategies for 2009 A/H1N1 influenza in the Republic of Korea," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 412, no. 7, pp. 74–85, Jan. 2017. DOI: 10.1016/j.jtbi.2016.09.025
- [10] H. M. Yang, C. P. Ferreira, "Assessing the effects of vector control on dengue transmission," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 198, pp. 401–413, 2008.
- [11] A. Goyal, L. E. Liao, A. S. Perelson, "Within-host mathematical models of hepatitis B virus infection: Past, present, and future," *Current Opinion in Systems Biology*, vol. 18, pp. 27–35, 2019. DOI: 10.1016/j.coisb.2019.10.003
- [12] N. G. Sousa, A. O. Cardoso, R. F. Cardoso, A. G. Utsumi, "Análise da dinâmica de transmissão da COVID-19 em Minas Gerais: Modelagem e Simulação," *Research, Society and Development*, vol. 9, no. 8, pp. 1–17, 2020.
- [13] A. O. Cardoso, N. G. Sousa, R. F. Cardoso, A. G. Utsumi, "Análises de estratégias de isolamento social para o enfrentamento da pandemia COVID-19 em Minas Gerais/Brasil," *Holos*, vol. 5, pp. 1–19, 2020.
- [14] IBGE. População. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>. Acesso em 28 jan.2021.
- [15] A. Pandey, A. Mubayi, J. Medlock, "Comparing vector–host and SIR models for dengue transmission," *Mathematical Biosciences*, vol. 246, pp. 252–259, 2013.
- [16] S. E. Eikenberry, M. Mancuso, E. Iboi, T. Phan, K. Eikenberry, Y. Kuang, E. Kostelich, A. B. Gumel, "To mask or not to mask: Modeling the potential for face mask use by the general public to curtail the COVID-19 pandemic," *Infectious Disease Modelling*, vol. 5, pp. 293–308, Abr. 2020. DOI: 10.1016/j.idm.2020.04.001
- [17] SES, Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais, " Boletim Epidemiológico de Monitoramento dos casos de Dengue, Chikungunya e Zika," 2020. [Online]. Available: <http://www.saude.mg.gov.br>. Acessado em: Out. 2021.
- [18] UFPel, Universidade Federal de Pelotas, "Gestor, veja aqui o passo a passo para combater o Aedes Aegypti," 2017. [Online]. Available: <https://dms.ufpel.edu.br/aedes/>. Acessado em: Jan.2021.
- [19] I. A. Braga, D. Valle, "Aedes aegypti: inseticidas, mecanismos de ação e resistência," *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, vol. 16, no. 4, pp. 279-293, Dez. 2007.
- [20] T.C. Correia, V. O. Flausino, L. L. Figueiredo, T. V. S. Ferreira, T. V. Rabelo, T. D. F. Coelho, A. C. Castro e Abreu, K. A. Prince, "Prevalência de dengue clássica e dengue hemorrágica no Brasil, entre 2011 e 2015," *Revista Eletrônica Acervo Saúde*, vol. 22, pp.1-8, Abr. 2019.
- [21] I. Ghosh, P. K. Tiwarib, J. Chattopadhyay, "Effect of active case finding on dengue control: Implications from a mathematical model," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 464, no. 7, pp. 50-62, Mar. 2019.



Gustavo Carvalho Silva has a degree in Chemical Engineering from the Federal University of Triângulo Mineiro (2021). Undertook scientific initiation in the area of modeling and simulation of dengue transmission. He currently works as a Process Engineering intern at Mosaic.



Alex Garcez Utsumi holds a degree in Environmental Engineering and a master's degree in Cartographic Sciences from São Paulo State University "Júlio de Mesquita Filho", Presidente Prudente campus. Doctor in Agronomy from the Faculty of Agrarian and Veterinary Sciences - UNESP, Jaboticabal. He is currently a Professor at the Federal University of Triângulo Mineiro - UFTM, linked to the Department of Environmental Engineering. His research interests include Geographic Information Systems, Cartography and Remote Sensing.



Nádia Guimarães Sousa has a degree in Chemical Engineering from the Federal University of Uberlândia (2008). Master's degree in Chemical Engineering from the Federal University of Uberlândia (2010) with an emphasis on fault propagation and a PhD in Chemical Engineering from the same institution (2015) with an emphasis on fault-tolerant control by control allocation. Her research interests include Modeling, Simulation, Optimization and Control of Chemical Processes. She is currently a professor at the Federal University of Triângulo Mineiro, in the Chemical Engineering course.