

IV Jornada de Matematica e Matematica aplicada UFSM

Impacto da vacinação na transmissão da dengue: um modelo epidemiológico

Impact of vaccination on dengue transmission: an epidemiological model

Daniela Buske¹ , Luciana Rossato Piovesan¹ , Letiane Ludwig Mielke¹ ,
Alexandre Sacco de Athayde¹ , Régis Sperotto de Quadros¹ ,
Glênio Aguiar Gonçalves¹ , Angelita dos Reis Gomes¹ 

¹Universidade Federal de Pelotas, RS, Brasil

RESUMO

Este estudo analisa o impacto da vacinação na transmissão da dengue utilizando um modelo epidemiológico do tipo SIR (Suscetível-Infectado-Recuperado). O modelo considera interações entre populações humanas e vetores, e estratégias de controle como vacinação e manejo populacional dos mosquitos. Os resultados mostram uma redução substancial nos casos de dengue com a vacinação, reforçando a importância desta como ferramenta essencial para saúde pública. Dados recentes e simulações detalhadas sustentam as conclusões, destacando o papel dos modelos matemáticos no desenvolvimento de políticas efetivas.

Palavras-chave: Vacinação contra dengue; Modelo SIR; Epidemiologia da dengue; Cobertura vacinal; Dinâmica de transmissão da dengue

ABSTRACT

This study analyzes the impact of vaccination on dengue transmission using an epidemiological model of the SIR (Susceptible-Infected-Recovered) type. The model considers interactions between humans and vectors, and control strategies such as vaccination and mosquito population management. The results show a substantial reduction in dengue cases with vaccination, reinforcing its importance as an essential tool for public health. Recent data and simulations developed supported the conclusions, highlighting the role of mathematical models in the development of effective policies.

Keywords: Dengue vaccination; SIR model; Dengue epidemiology; Vaccination coverage; Dengue transmission dynamics

1 INTRODUÇÃO

A dengue, causada por quatro sorotipos do vírus da dengue (DENV-1 a DENV-4), é uma das arboviroses mais críticas globalmente, afetando milhões de pessoas anualmente e impondo uma carga significativa aos sistemas de saúde pública, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (WHO, 2023). O aumento da incidência da dengue está intimamente ligado à urbanização, mudanças climáticas e viagens internacionais, que expandiram a distribuição geográfica do *Aedes aegypti*, o principal vetor da doença (Lowe *et al.*, 2021).

A vacinação é considerada uma estratégia fundamental para reduzir a carga da dengue, especialmente em áreas endêmicas. Avanços recentes no desenvolvimento de vacinas, como a Dengvaxia e a Qdenga, têm demonstrado potencial para reduzir significativamente a transmissão da doença (Wilder-Smith *et al.*, 2019). No entanto, a eficácia dessas vacinas varia dependendo do status sorológico dos indivíduos e dos níveis de cobertura vacinal, e preocupações sobre o aumento dependente de anticorpos (ADE) continuam sendo um desafio significativo (Ferguson *et al.*, 2016), (Shim, 2017), (Tang *et al.*, 2018), (Knipl e Moghadas, 2015).

Estudos destacam a necessidade de considerar fatores como sazonalidade, proteção cruzada e interações entre sorotipos no desenvolvimento e implementação de vacinas (Coudeville e Garnett, 2012), (Lourenço e Recker, 2016). Os benefícios potenciais e riscos de vacinas imperfeitas contra dengue foram explorados, enfatizando a importância de entender a eficácia da vacina e suas implicações para o controle da doença (Rodriguez-Barraquer *et al.*, 2014).

A implementação de estratégias integradas, incluindo vacinação, é vista como crucial para reduzir a carga da doença e abordar as disparidades de saúde nas regiões afetadas, como o Brasil (Thisyakorn *et al.*, 2022). Estratégias de vacinação ótimas, considerando fatores como taxas de vacinação, probabilidades de transmissão e custo-efetividade, são essenciais para controlar a transmissão da dengue e reduzir a proporção de casos de dengue (Ndii *et al.*, 2020), (Suwantika *et al.*, 2021), (Farrington, 2003), (Giesecke, 2017). Modelos matemáticos têm emergido como ferramentas valiosas para entender a dinâmica de transmissão da dengue e avaliar o impacto de diferentes estratégias de intervenção (Reich *et al.*, 2013).

Os modelos matemáticos, especialmente o modelo SIR, desempenham um papel crucial na epidemiologia, incluindo o estudo de arbovírus. Introduzido inicialmente por Kermack e McKendrick em uma série de três artigos entre 1927 e 1933, o modelo SIR tornou-se fundamental para compreender os padrões epidemiológicos e o controle de doenças (Milunovic e Krstić, 2022), (Scherer e McLean, 2002). Esse modelo, juntamente com suas variações como os modelos SIS e SIRS, fornece uma estrutura organizada para analisar doenças infecciosas e sua disseminação dentro das populações (Kwon, 2023).

Este estudo utiliza um modelo SIR para simular o impacto da vacinação na transmissão da dengue, considerando parâmetros como eficácia vacinal, cobertura populacional e estratégias de controle vetorial. Os resultados apresentados fornecem evidências para orientar políticas de saúde pública e destacam a importância de estratégias integradas para combater a dengue em um contexto global de urbanização acelerada e mudanças climáticas.

2 MODELO MATEMÁTICO PARA O ESTUDO DA DENGUE

O modelo matemático SIR utilizado leva em conta duas estratégias de controle: o controle dos mosquitos e a vacinação dos humanos, e é baseado nos estudos apresentados por (Rodrigues, 2012), (Amorim, 2020) e (Kurauchi, 2020). O sistema de equações diferenciais ordinárias não linear é dado por:

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

Nesse modelo, a população humana total $N_h(t)$ é dividida em quatro classes: suscetíveis, infecciosos, recuperados e vacinados; onde $S_h(t)$ representa os humanos suscetíveis, $I_h(t)$ representa os humanos infecciosos, $R_h(t)$ representa os humanos

recuperados e $V(t)$ representa a população de vacinados.

Ainda, considera-se que o total da população humana $N_h(t)$ é constante, ou seja, $N_h(t) = N_h$ e $N_h = S_h + I_h + R_h + V$ a qualquer momento t ; que a população é homogênea, ou seja, cada indivíduo interage com outro no mesmo nível e todos os indivíduos tem a mesma chance de contrair a doença; não há imigração e emigração; humanos nascem suscetíveis.

Neste trabalho considera-se uma estratégia de vacinação contínua onde uma fração ν_h da população suscetível é vacinada. Considera-se um fator σ como a taxa de infecção de vacinados, uma vez que a vacinação pode reduzir mas não eliminar completamente a suscetibilidade à infecção (Rodrigues *et al.*, 2014), porém, uma vez efetiva, o indivíduo torna-se imune permanentemente. Quando $\sigma = 0$ a vacina é perfeitamente eficaz, quando $\sigma = 1$, a vacina não tem efeito algum. O nível de eficácia da vacina é dado pelo valor $1 - \sigma$.

Além das variáveis anteriores, o sistema apresenta outras que estão diretamente relacionadas as fêmeas dos mosquitos *Aedes aegypti*: A_m é a população de mosquitos na fase aquática (incluindo ovos, pupas e larvas), S_m é a população de mosquitos suscetíveis, I_m é a população de mosquitos infectados.

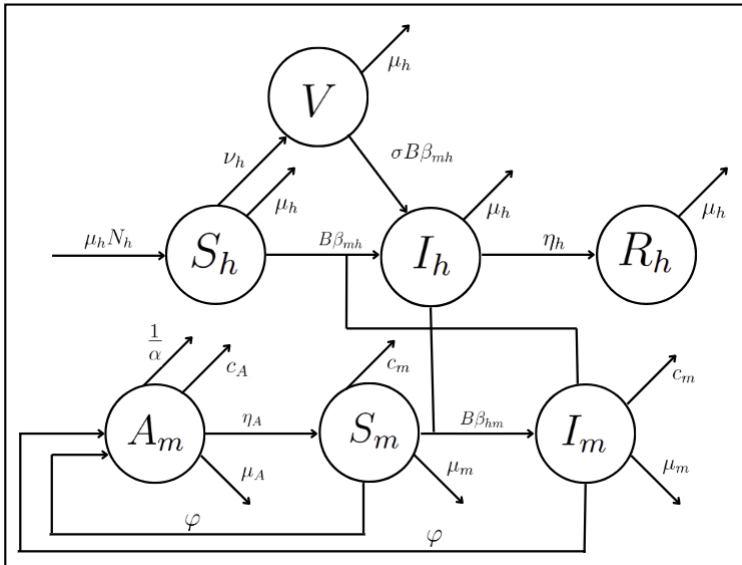
Aqui considera-se que a população de mosquitos não se recupera pois o tempo de vida dele é curto; que cada mosquito tem a mesma probabilidade de picar qualquer humano; que a população de mosquitos da fase aquática é suscetível e que não há transmissão vertical, isto é, um mosquito infectado não pode transmitir a doença aos seus ovos.

O significado dos demais parâmetros do sistema 1 são dados por: $\mu_h N_h$ é a taxa de recrutamento da população humana, $\mu_h S_h$, $\mu_h I_h$, $\mu_h R_h$ e $\mu_h V$ são as taxas de mortalidade natural para humanos suscetíveis, infectados, recuperados e vacinados, respectivamente, $\mu_m S_m$ e $\mu_m I_m$ são as taxas de mortalidade natural para mosquitos na fase adulta suscetíveis e infectados, $\mu_A A_m$ é a taxa de mortalidade natural para mosquitos na fase aquática, B é a média de picadas do mosquito (por dia), β_{mh} é a probabilidade de transmissão (por picada) de mosquitos infectados para humanos, β_{hm} é a probabilidade de transmissão (por picada) de humanos infectados pra mosquitos, φ é o número de ovos em cada depósito per capita (por dia), $\eta_h I_h$ é a taxa de recuperação da população humana, $\eta_A A_m$ é a taxa de maturação das larvas para o

adulto (por dia), k é o número de larvas por humano, m é o número de mosquitos fêmeas por humano, c_A é a proporção de larvicida, c_m é a proporção de aduicida, α é a proporção de controle mecânico e ν_h é a taxa de vacinação.

Na Figura 1 encontra-se a representação do modelo compartimental utilizado neste trabalho.

Figura 1 – Diagrama representando o modelo compartimental utilizado



Fonte: Elaborado pelos autores

3 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Nesta seção são apresentados os resultados do modelo (1), considerando o controle na população de humanos através da vacinação. Os demais controles serão mantidos constantes neste trabalho.

Foram utilizados os dados de um surto que aconteceu no arquipélago de Cabo Verde em setembro de 2009, e descrito em Rodrigues *et al.* (2014). Os dados da população humana estão relacionados com Cabo Verde. Segundo os autores (Rodrigues *et al.*, 2014), devido à baixa vigilância e o fato de ser o primeiro surto de Dengue no país, não foi possível coletar dados detalhados do mosquito. No entanto, as autoridades locais confirmam que os insetos responsáveis pela dengue vieram provavelmente do Brasil, transportados por meio de transporte aéreo que realizam ligações frequentes entre Cabo Verde e o Brasil. Assim, com relação ao *Aedes aegypti* os dados considerados são relativos ao Brasil (Thome *et al.*, 2010).

Para as simulações, foram adotados os seguintes valores para os parâmetros (Rodrigues *et al.*, 2014) (Amorim, 2020): $N_h = 480.000$, $N_m = 6 \times 480.000$, $\mu_h = \frac{1}{71 \times 365}$, $\mu_A = \frac{1}{4}$, $\mu_m = \frac{1}{10}$, $\eta_h = \frac{1}{3}$, $\eta_A = 0,08$, $\beta_{hm} = 0,375$, $\beta_{mh} = 0,375$, $B = 0,8$, $\varphi = 6$, $k = 3$, $m = 6$. Além disso, os valores para o controle do vetor foram mantidos constantes: $\alpha = 0,99$ e $c_A = c_m = 1 - \alpha$.

As condições iniciais consideradas no modelo foram: $S_h(0) = N_h - 10$, $I_h(0) = 10$, $R_h(0) = 0$, $A_m(0) = N_h \times k$, $S_m(0) = N_h \times m$, $I_m(0) = 0$, $V(0) = 0$.

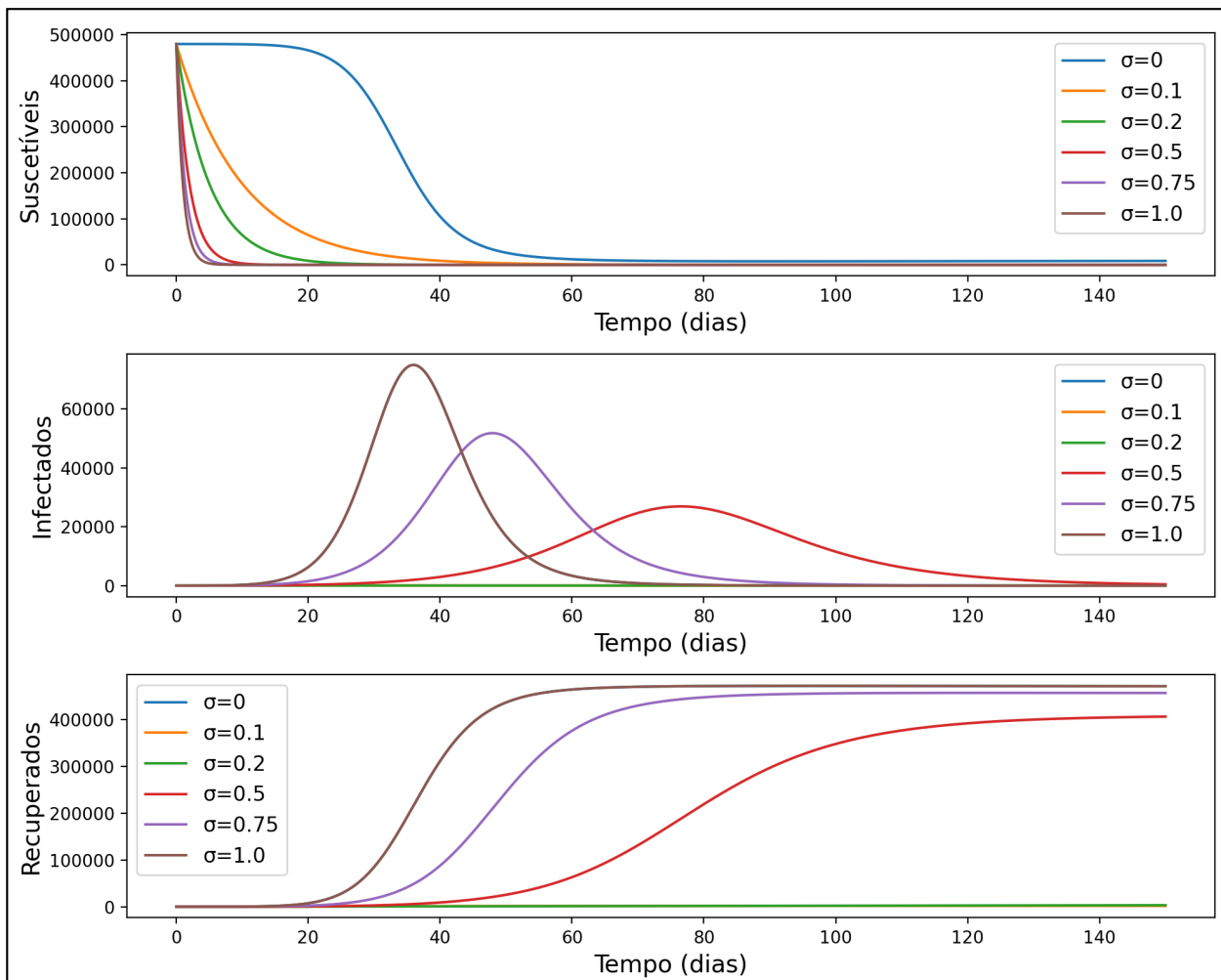
As simulações foram realizadas para um período de 365 dias, mas para uma melhor análise, somente as janelas de interesse são apresentadas. O sistema de equações diferenciais é resolvido numericamente pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem, com o algoritmo implementado em linguagem Python.

Inicialmente, consideramos que uma fração de 75% da população humana foi vacinada ($\nu_h = 0,75$) e variamos a eficácia da vacina sendo: 100% de eficácia ($\sigma = 0$); 90% de eficácia ($\sigma = 0,10$); 75% de eficácia ($\sigma = 0,25$); 50% de eficácia ($\sigma = 0,50$); 25% de eficácia ($\sigma = 0,75$) e, finalmente 0% de eficácia ($\sigma = 1$).

A Figura 2 apresenta as dinâmicas da população humana sob os diferentes níveis de eficácia da vacina. Observa-se que, com uma fração de 75% da população vacinada, o número de infectados decresce rapidamente com o aumento da eficácia da vacina. Também podemos observar o adiamento do pico de infectados com o aumento da eficácia. Este resultado nos leva a conclusão de que quanto mais alta for a eficácia da vacina, menos o vírus se espalhará. Estudos mostram que o nível aceitável de eficácia de uma vacina da dengue, contra os 4 sorotipos, deve ser de pelo menos 80% e a duração da proteção de 3 a 5 anos (DeRoeck *et al.*, 2003).

Num segundo momento, consideramos que a vacina possui uma eficácia de 80% ($\sigma = 0,2$) (Kallás *et al.*, 2024). Em cada simulação foram inseridas diferentes porcentagens de população humana vacinada, a saber: Sem vacinação ($\nu_h = 0$); 5% de vacinados ($\nu_h = 0,05$); 10% de vacinados ($\nu_h = 0,1$); 20% de vacinados ($\nu_h = 0,2$); 50% de vacinados ($\nu_h = 0,5$) e 100% de vacinados ($\nu_h = 1$).

Figura 2 – População de humanos suscetíveis/infectados/recuperados considerando diferentes valores para a eficácia da vacina, considerando uma fração de 75% de vacinados

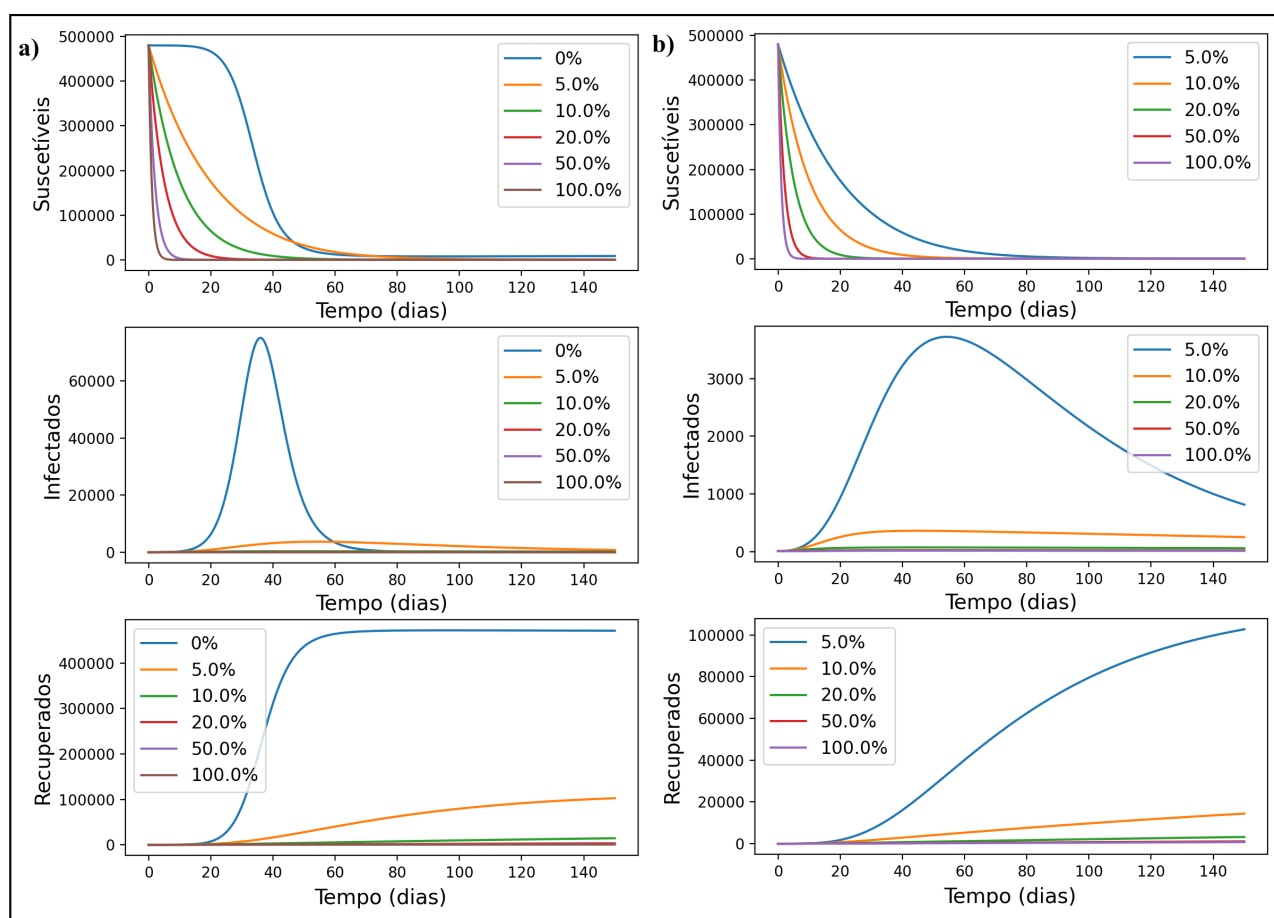


Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 3 apresenta as dinâmicas da população humana sob diferentes níveis de cobertura vacinal. Observa-se que, sem vacinação (Figura 3a com 0% de vacinação), o número de infectados atinge um pico elevado, enquanto a inclusão progressiva de estratégias vacinais reduz substancialmente tanto o número de indivíduos infectados quanto o tempo necessário para o controle da epidemia. Para uma visualização melhor, na Figura 3b retirou-se o caso sem vacinação, o que demonstra claramente que com apenas 5% de vacinados, há uma redução significativa no pico de infectados, baixando de quase 80 mil para aproximadamente 4 mil casos. Por outro lado, a cobertura de 100% elimina completamente a transmissão após o período inicial.

Além disso, é perceptível que a população de recuperados em cenários sem vacinação é mais elevada, indicando uma alta carga de morbidade e, potencialmente, de complicações associadas à dengue. Esse resultado mostra que, para vacinas com alta eficácia, mesmo uma baixa cobertura vacinal leva a reduções significativas de infectados. Porém, coberturas vacinais acima de 50% levam a erradicação rápida da doença, ressaltando a importância de alcançar altos níveis de cobertura vacinal para proteger a população e minimizar impactos na saúde pública.

Figura 3 – População de humanos suscetíveis/infectados/recuperados considerando diferentes porcentagens de vacinados e 80% de eficácia da vacina.



Fonte: Elaborado pelos autores

4 CONCLUSÃO

Diante do aumento global de doenças transmitidas por mosquitos, como a dengue, este estudo reforça a relevância de estratégias baseadas em vacinação para mitigar a propagação da doença. Por meio da análise de um modelo epidemiológico

SIR compartimental, foi possível avaliar os impactos de diferentes níveis de cobertura e eficácia vacinal na redução do número de casos e no controle da epidemia.

Os resultados apresentados demonstram que a vacinação desempenha um papel crucial na mitigação da transmissão da dengue. As simulações realizadas com o modelo SIR indicam que, em cenários com 75% de cobertura vacinal, a redução do número de casos infectados é proporcional ao aumento da eficácia da vacina, com os melhores resultados observados em níveis de eficácia acima de 80%. Esse achado é consistente com estudos prévios que reforçam a importância de altas taxas de cobertura vacinal para alcançar uma redução significativa na transmissão de arboviroses em populações vulneráveis (Brady *et al.*, 2015) (Shepard *et al.*, 2016).

A observação de que mesmo níveis moderados de eficácia (50% a 75%) resultam em reduções substanciais no pico epidêmico destaca a viabilidade de estratégias vacinais mesmo em contextos de recursos limitados. Além disso, o adiamento do pico de casos, observado em simulações com alta eficácia vacinal, reflete o potencial das vacinas para aliviar a pressão sobre sistemas de saúde durante surtos (Lourengo e Recker, 2016). A eliminação da transmissão, simulada com 100% de cobertura, reforça o papel transformador de campanhas de vacinação universal, alinhando-se às metas propostas pela Organização Mundial da Saúde para o controle de doenças transmitidas por vetores (WHO, 2023).

Apesar da relevância dos resultados, o modelo SIR apresenta simplificações que devem ser consideradas. Ele assume uma população homogênea e ignora variáveis socioeconômicas e ambientais que influenciam diretamente a transmissão da dengue. Estudos indicam que fatores como sazonalidade, urbanização e mudanças climáticas afetam significativamente a densidade vetorial e a dinâmica de transmissão, sugerindo que a integração de parâmetros climáticos e espaciais pode aumentar a precisão dos modelos (Lowe *et al.*, 2021) (Messina *et al.*, 2019). Por exemplo, a distribuição heterogênea do vetor *Aedes aegypti* em áreas urbanas e periurbanas implica em diferentes níveis de risco, os quais não foram capturados no modelo utilizado.

Além disso, o modelo não aborda as complexas interações entre os quatro sorotipos do vírus da dengue. A imunidade cruzada e o aumento dependente de anticorpos (ADE) são fatores críticos na dinâmica epidemiológica da dengue, podendo influenciar a eficácia vacinal em populações com diferentes histórias de exposição ao

vírus (Reich *et al.*, 2013) (Wilder-Smith *et al.*, 2019). A inclusão desses elementos em futuros modelos epidemiológicos permitiria uma análise mais realista e informaria estratégias vacinais mais eficazes.

Outro ponto relevante é o impacto da cobertura vacinal em cenários de baixa adesão ou hesitação vacinal, problemas amplamente documentados em programas de imunização em larga escala (Shepard *et al.*, 2016). Políticas públicas devem focar não apenas no aumento da cobertura, mas também na educação da população sobre os benefícios da vacinação, buscando superar barreiras culturais e logísticas.

Por fim, os resultados sugerem que a vacinação isolada não é suficiente para eliminar a dengue em contextos endêmicos. Estratégias integradas, incluindo manejo ambiental, controle vetorial e educação comunitária, devem ser priorizadas para amplificar os efeitos positivos das vacinas. Estudos recentes enfatizam que a combinação de múltiplas abordagens pode reduzir ainda mais a carga da doença e minimizar os impactos de epidemias futuras (Brady *et al.*, 2015) (WHO, 2023).

Em conclusão, este trabalho contribui significativamente para a compreensão do impacto da vacinação na transmissão da dengue, fornecendo uma base para o planejamento de intervenções em saúde pública. Estudos futuros devem buscar incorporar maior complexidade nos modelos, abordando variáveis ambientais, heterogeneidade populacional e dinâmicas sorotipo-específicas, de forma a gerar cenários mais representativos e aplicáveis a contextos reais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES e CNPq para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

Amorim, M. P. (2020). *Modelos Matemáticos e Computacionais da Dengue via Equações Diferenciais Ordinárias com Estratégias de Controle*. [Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense]. Repositório Institucional UNESP.

- Brady, O. J., Gething, P. W., Bhatt, S., Messina, J. P., Brownstein, J. S., Hoen, A. G., Moyes, C. L., Farlow, A. W., Scott, T. W., & Hay, S. I. (2015). Refining the global spatial limits of dengue virus transmission by evidence-based consensus. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 9(8):e0003657.
- Coudeville, L. & Garnett, G. (2012). Transmission dynamics of the four dengue serotypes in southern vietnam and the potential impact of vaccination. *Plos One*, 7(12).
- DeRoeck, D., Deen, J., & J, D. C. (2003). Policymakers' views on dengue fever/dengue haemorrhagic fever and the need for dengue vaccines in four southeast asian countries. *Vaccine*, 22(1):121–9.
- Farrington, C. P. (2003). On vaccine efficacy and reproduction numbers. *Mathematical Biosciences*, 185(1):89–109.
- Giesecke, J. (2017). *Modern Infectious Disease Epidemiology*. CRC/Press.
- Kallás, E. G., Cintra, M. A., Moreira, J. A., Patiño, E. G., Braga, P. E., Tenório, J. C., & Infante, V. (2024). Live, attenuated, tetravalent butantan–dengue vaccine in children and adults. *The New England Journal of Medicine*, 390(5):397–408.
- Knipl, D. & Moghadas, S. (2015). The potential impact of vaccination on the dynamics of dengue infections. *Bulletin of Mathematical Biology*, 77(12):2212–2230.
- Kurauchi, M. L. (2020). *Modelagem do efeito de uma vacina contra a dengue na redução da evolução da resistência contra o antibiótico devido uso inadequado em casos de dengue*. [Tese de Doutorado, Programa de Patologia da Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo]. Repositório da Produção USP.
- Kwon, S. (2023). Nonequilibrium phase transitions in metapopulation models of infectious diseases on heterogeneous networks. *Journal of Physics a Mathematical and Theoretical*, 56(37).
- Lourenço, J. & Recker, M. (2016). Dengue serotype immune-interactions and their consequences for vaccine impact predictions. *Epidemics*, 16:40–48.

- Lowe, R., S. Lee, K. O., Brady, O., Bastos, L., Carrasco-Escobar, G., Catão, R. C., Colón-González, F., Barcellos, C., Carvalho, M. S., Blangiardo, M., Rue, H., & Gasparrini, A. (2021). Combined effects of hydrometeorological hazards and urbanisation on dengue risk in brazil: a spatiotemporal modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 5(4):e209–e219.
- Messina, J. P., Brady, O. J., Golding, N., Kraemer, M. U. G., Wint, G. R. W., Ray, S. E., Pigott, D. M., Shearer, F. M., Johnson, K., & Earl, L. (2019). The current and future global distribution and population at risk of dengue. *Nature Microbiology*, 4(9):1508–1515.
- Milunovic, M. & Krstić, M. (2022). Long time behavior of an two diffusion stochastic sir epidemic model with nonlinear incidence and treatment. *Filomat*, 36(8):2829–2846.
- Ndii, M., Mage, A., Messakh, J., & Djahi, B. (2020). Optimal vaccination strategy for dengue transmission in kupang city, indonesia. *Heliyon*, 6(11):e05345.
- Reich, N., Shrestha, S., King, A., Rohani, P., Lessler, J., Kalayanarooj, S., Yoon, I.-K., Gibbons, R. V., Burke, D. S., & Cummings, D. (2013). Interactions between serotypes of dengue highlight epidemiological impact of cross-immunity. *Journal of the Royal Society Interface*, 10(86):20130414.
- Rodrigues, H. S. (2012). *Optimal control and numerical optimization applied to epidemiological models*. [Tese de Doutorado, Programa Doutoral em Matemática e Aplicações, Universidade de Aveiro e Universidade de Minho]. arXiv.
- Rodrigues, H. S., Monteiro, M. T. T., & Torres, M. D. F. (2014). Vaccination models and optimal control strategies to dengue. *Mathematical Biosciences*, 247:1–12.
- Rodriguez-Barraquer, I., y Teran-Romero, L. M., Schwartz, I., Burke, D., & Cummings, D. (2014). Potential opportunities and perils of imperfect dengue vaccines. *Vaccine*, 32(4):514–520.
- Scherer, A. & McLean, A. (2002). Mathematical models of vaccination. *British Medical Bulletin*, 62(1):187–199.

- Shepard, D. S., Undurraga, E. A., Halasa, Y. A., & Stanaway, J. D. (2016). The global economic burden of dengue: A systematic analysis. *The Lancet Infectious Diseases*, 16(8):935–941.
- Shim, E. (2017). Cost-effectiveness of dengue vaccination in yucatán, mexico using a dynamic dengue transmission model. *Plos One*, 12(4):e0175020.
- Suwantika, A., Supadmi, W., Ali, M., & Abdulah, R. (2021). Cost-effectiveness and budget impact analyses of dengue vaccination in indonesia. *Plos Neglected Tropical Diseases*, 15(8).
- Tang, B., Xi, H., Xiao, Y., Ruan, S., & Wu, J. (2018). A conceptual model for optimizing vaccine coverage to reduce vector-borne infections in the presence of antibody-dependent enhancement. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 15(13):1–19.
- Thisyakorn, U., Saokaew, S., Gallagher, E., Kastner, R., Sruamsiri, R., Oliver, L., & Hanley, R. (2022). Epidemiology and costs of dengue in thailand: a systematic literature review. *Plos Neglected Tropical Diseases*, 16(12):e0010966.
- Thome, R. C., Yang, H. M., & Esteva, L. (2010). Optimal control of aedes aegypti mosquitoes by the sterile technique and insecticide. *Mathematical Biosciences*, 223:12–23.
- WHO (2023). *Dengue and severe dengue*.
- Wilder-Smith, A., Ooi, E. E., Horstick, O., & Wills, B. (2019). Dengue. *The Lancet*, 393(10169):350–363.

Contribuições de autoria

1 – Daniela Buske (Corresponding Author)

Doutora em Engenharia Mecânica; Professora titular da UFPel

<https://orcid.org/0000-0002-4573-9787> • daniela.buske@ufpel.edu.br

Contribuição: Conceitualização; Metodologia; Implementação Computacional; Validação; Redação e Revisão

2 – Luciana Rossato Piovesan

Doutora em Engenharia Mecânica; Professora Adjunta da UFPel

<https://orcid.org/0000-0001-6704-7522> • lurpiovesan@gmail.com

Contribuição: Conceitualização; Metodologia; Implementação Computacional; Validação; Redação e Revisão

3 – Letiane Ludwig Mielke

Mestre em Modelagem Matemática

<https://orcid.org/0000-0002-7761-7354> • letiane.mielke@gmail.com

Contribuição: Conceitualização; Metodologia; Implementação Computacional; Validação; Redação e Revisão

4 – Alexandre Sacco de Athayde

Doutor em Engenharia Mecânica; Professor Adjunto da UFPel

<https://orcid.org/0000-0003-2874-3685> • alexandre.athayde@ufpel.edu.br

Contribuição: Conceitualização; Metodologia; Validação; Revisão e edição

5 – Régis Sperotto de Quadros

Doutor em Matemática Aplicada, Professor Associado da UFPel

<https://orcid.org/0000-0002-9720-8013> • regis.quadros@ufpel.edu.br

Contribuição: Implementação Computacional; Validação; Revisão e edição

6 – Glênio Aguiar Gonçalves

Doutor em Engenharia Mecânica, Professor Associado da UFPel

<https://orcid.org/0000-0001-7321-3742> • gleniogoncalves@yahoo.com.br

Contribuição: Conceitualização; Validação; Revisão e edição

7 – Angelita dos Reis Gomes

Doutora em Ciências Veterinárias, Micologista da UFPel

<https://orcid.org/0000-0001-5325-044X> • angelitagomes@gmail.com

Contribuição: Conceitualização; Validação; Revisão e edição

Como citar este artigo

Buske, D., Piovesan, L. R., Mielke, L. L., Athayde, A. S. de, Quadros, R. S. de, Gonçalves, G. A., & Gomes, A. dos R. (2025). Impacto da vacinação na transmissão da dengue: um modelo epidemiológico. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 47, esp. 1, e90552. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X90552>.