

## IV Jornada de Matemática e Matemática aplicada UFSM

# Um modelo matemático compartimental para o estudo da mpox no Brasil

A compartmental mathematical model for the study of mpox in Brazil

Luciana Rossato Piovesan<sup>1</sup> , Daniela Buske<sup>1</sup> ,  
Antonio Marcos de Oliveira dos Santos<sup>1</sup> , Alexandre Sacco de Athayde<sup>II</sup> ,  
Glênio Aguiar Gonçalves<sup>1</sup> , Régis Sperotto de Quadros<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas, RS, Brasil

## RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo de um modelo epidemiológico do tipo SEIR para analisar os dados da mpox no Brasil. O modelo considerado é resolvido pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem e quatro estágios, e as curvas dos indivíduos infectados ao longo do tempo são estimadas. O modelo é validado com dados de um surto epidêmico que aconteceu em 1972 em Kosovo. Utilizando dados do surto do vírus mpox no Brasil em 2022, verificou-se que a simulação do modelo teve o mesmo comportamento do surto ocorrido em Kosovo.

**Palavras-chave:** Modelo epidemiológico; SEIR; Mpox; Vacina; Interdisciplinar

## ABSTRACT

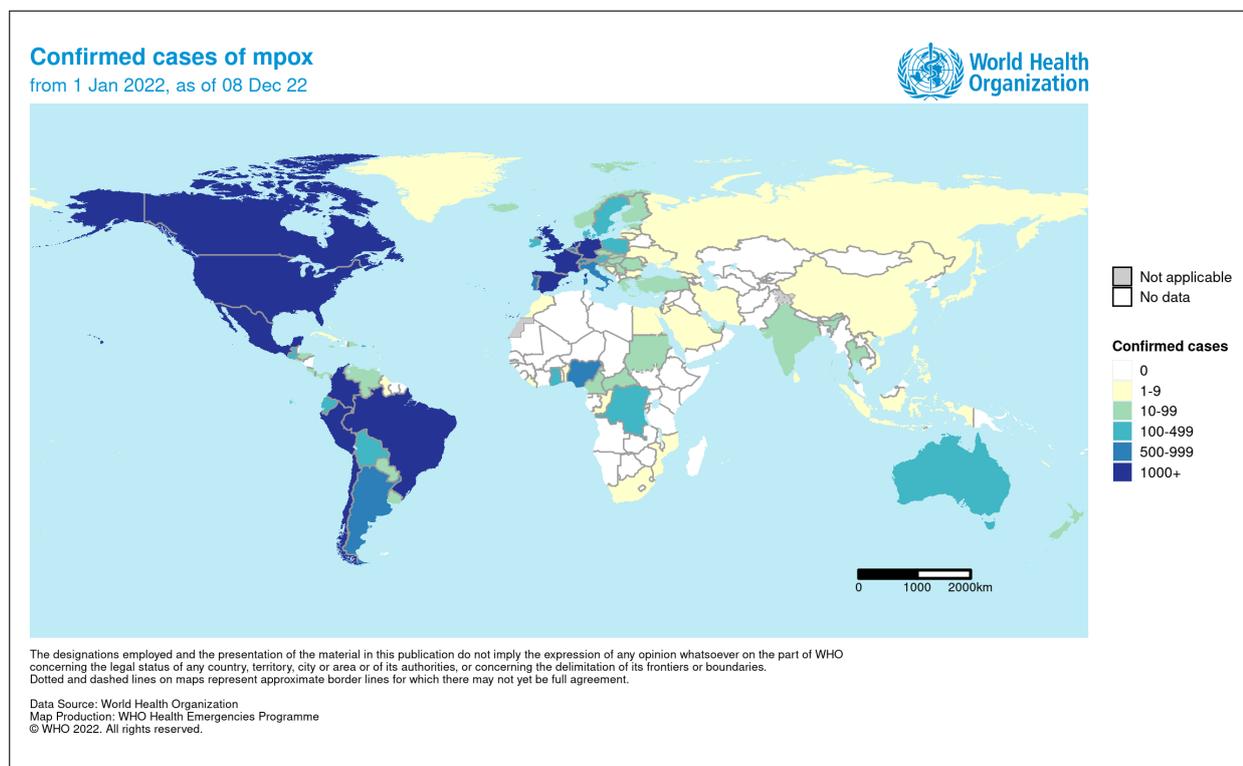
This work presents the study of a SEIR-type epidemiological model to analyze mpox data in Brazil. The model considered is solved by the fourth-order and four-stage Runge-Kutta method and the curves of infected individuals over time are estimated. The model is validated with data from an epidemic outbreak that occurred in 1972 in Kosovo. Using data from the mpox virus outbreak in Brazil in 2022, it was found that the model simulation had the same behavior as the outbreak that occurred in Kosovo.

**Keywords:** Epidemiological model; SEIR; Mpox; Vaccine; Interdisciplinary

## 1 INTRODUÇÃO

De uma forma geral, a varíola é uma doença virótica infecciosa. Já foi uma das doenças mais devastadoras da história humana antes de ser erradicada com sucesso em 1980, após uma campanha global de vacinação liderada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (Fenner et al., 1988). A transmissão da varíola ocorria de pessoa para pessoa, principalmente por meio de gotículas respiratórias. Os sintomas iniciais incluíam febre, mal-estar, dor de cabeça e, eventualmente, uma erupção cutânea característica, composta por lesões que evoluíam para pústulas. As complicações incluíam infecções secundárias, cegueira e, em casos mais graves, a morte.

Figura 1 – Distribuição de casos de mpox pelo mundo no ano de 2022



Fonte: OMS (World Health Organization, 2022)

A erradicação da varíola foi considerada um marco significativo na história da medicina, demonstrando o sucesso de campanhas de vacinação em larga escala e colaboração internacional. No entanto, no início de maio de 2022, casos de mpox<sup>1</sup> foram relatados no Reino Unido, Espanha e em outros lugares da Europa. O padrão de dispersão geográfica foi muito maior em comparação com o passado, em regiões fora

<sup>1</sup>MPOX, inicialmente chamada de varíola dos macacos ou *monkeypox*, é uma doença viral cujos sintomas se assemelham com os de casos de varíola relatados no passado (Pal et al., 2017).

das áreas tradicionalmente endêmicas, apresentando surtos mais localizados e com mais frequência em países com poucos recursos. Em 23 de julho de 2022, a OMS decretou emergência global de saúde pública (Centro de Operações de Emergências, 2023) devido ao alto índice de surtos que se expandiam por todo o mundo e não estavam restritos apenas às regiões endêmicas, como no passado. Segundo as autoridades de saúde, isso se dá devido à diminuição da vacinação e à dificuldade em rastrear pessoas infectadas. Na Figura 1 é possível observar a distribuição de casos de mpox pelo mundo no ano de 2022.

No dia 11 de maio de 2023, a OMS anunciou que a mpox deixou de ser considerada emergência de saúde global (Agência Brasil, 2023), mas isso não significa dizer que o vírus deixou de circular (World Health Organization, 2024). Os trabalhos devem continuar, pois ainda não se compreende o comportamento da doença, e apesar da queda nos números de casos, o vírus continua afetando comunidades em todas as regiões, inclusive na África.

Sabe-se que a forma mais segura para conter surtos de doenças causadas por agentes infecciosos é a vacinação de um percentual da população de tal maneira que se consiga atingir a imunidade de rebanho. Este fato já ficou provado historicamente, no entanto, vale ressaltar que até que uma vacina seja aprovada pelas autoridades de saúde e possa ser aplicada na população, inúmeros testes e várias fases de desenvolvimento são necessárias. Este processo pode levar meses, anos e até décadas, dependendo do agente causador. Vale ressaltar que o mundo tem visto o ressurgimento de muitas infecções virais. Além disso, as vacinas previamente desenvolvidas podem não prever todas as novas características das cepas que surgem através de mutações. O que aconteceu com a COVID-19 tem o mesmo aspecto do que acontece com a mpox, pois a vacina contra o vírus da varíola não tem a mesma eficácia para o vírus que causa a mpox. Por isso, a importância da epidemiologia matemática e do desenvolvimento de modelos matemáticos que representem adequadamente a disseminação de doenças, pois ao compreender um determinado surto é possível traçar estratégias seguras de controle.

Os modelos são validados com base nos dados de epidemias que ocorreram ao longo da história. Estes conjuntos de dados fornecem o comportamento da doença, e podem ser utilizados nas simulações dos modelos com o objetivo de compreender

melhor todo o processo de transmissão e propagação da doença, para que se possam propor medidas que levem a um decréscimo na transmissão e, com isso, mitigar novos surtos através de estratégias como a quarentena, até que se tenha um medicamento eficaz. Além disso, tais modelos também são usados para ajudar em programas de detecção, controle, planejamento, prevenção e terapia (Hethcote, 2000).

Uma revisão abrangente identificou os principais tipos de modelos utilizados para estudar a transmissão da mpox, incluindo modelos compartimentais, processos de ramificação, Monte Carlo (estocásticos), baseados em agentes e de redes (Molla et al., 2023). Entre esses, os modelos compartimentais e de processos de ramificação foram os mais empregados. A revisão destacou a necessidade de desenvolver estratégias de modelagem que considerem as características específicas do surto atual, predominantemente impulsionado pela transmissão de pessoa para pessoa em áreas urbanas (Molla et al., 2023).

Estudos específicos aplicaram modelos matemáticos para analisar a infectividade da mpox em diferentes regiões. Por exemplo, uma pesquisa comparou a dinâmica de infecção na América do Norte e na América do Sul, utilizando dados de casos entre junho de 2022 e fevereiro de 2023. A análise resultou em modelos matemáticos que estimaram o número de indivíduos infectados e a velocidade de contágio em ambas as regiões (Marín-Machuca et al., 2024).

Além disso, um modelo matemático foi proposto para compreender e controlar a dinâmica de transmissão da mpox nos Estados Unidos em (Islam et al., 2024). O estudo utilizou um modelo de crescimento logístico modificado, incorporando intervenções não farmacêuticas para reduzir as transmissões humano-humano e animal-humano. Os resultados sugerem que medidas preventivas desempenham um papel crucial no controle da propagação da doença e podem ser eficazes em futuros surtos epidêmicos.

No contexto brasileiro, neste trabalho é feito um estudo de um modelo epidemiológico do tipo SEIR (Suscetível-Exposto-Infectado-Recuperado) para analisar os dados da mpox no país. O modelo utilizado é resolvido pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem e quatro estágios, a fim de estimar as curvas dos indivíduos infectados ao longo do tempo (Fenner et al., 1988) (Santos, 2023). O modelo é validado com dados de um surto epidêmico que aconteceu em 1972 em Kosovo (Cori

et al., 2013). Os dados do surto do vírus mpox no Brasil foram coletados diretamente na página do Ministério da Saúde e verificou-se que, em cenários distintos, a simulação do modelo teve o mesmo comportamento do surto ocorrido em Kosovo.

Esses estudos evidenciam a relevância e a eficácia dos modelos matemáticos na compreensão da propagação da mpox, fornecendo subsídios valiosos para a formulação de políticas de saúde pública e estratégias de intervenção.

## 2 MODELO MATEMÁTICO PARA O ESTUDO DA VARÍOLA

O modelo matemático utilizado neste trabalho foi desenvolvido por (Fenner et al., 1988) e é descrito pelo sistema de equações diferenciais ordinárias dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = \chi_1(1 - \varepsilon_1)C_i - \beta(\varphi + \rho - \varphi\rho)SI \\ \frac{dI}{dt} = \alpha(1 - \theta)E_n - \gamma I \\ \frac{dE_n}{dt} = \beta\varphi(1 - \rho)SI - \alpha E_n \\ \frac{dQ}{dt} = \alpha(1 - \varepsilon_2)E_i + \alpha\theta E_n - \chi_2 Q \\ \frac{dE_i}{dt} = \beta\varphi\rho SI - (\chi_1\varepsilon_2 + \alpha(1 - \varepsilon_2))E_i \\ \frac{dU}{dt} = \gamma I + \chi_2 Q \\ \frac{dC_i}{dt} = \beta\rho(1 - \varphi)SI - \chi_1 C_i \\ \frac{dV}{dt} = \chi_1(\varepsilon_2 E_i + \varepsilon_1 C_i) \end{array} \right. \quad (1)$$

Neste modelo, se considera a população constante, ou seja,  $S(t) + I(t) + E_n(t) + Q(t) + E_i(t) + U(t) + C_i(t) + V(t) = N$  onde:  $t$  representa o tempo;  $N$  representa o tamanho da população;  $S(t)$  é o número de indivíduos suscetíveis no tempo  $t$ ;  $I(t)$  é o número de indivíduos infecciosos no tempo  $t$ ;  $E_n(t)$  representa os indivíduos latentes não rastreados no tempo  $t$ ;  $Q(t)$  representa os indivíduos em quarentena no tempo  $t$ ;  $E_i(t)$  representa os indivíduos latentes rastreados no tempo  $t$ ;  $U(t)$  representa os indivíduos mortos e recuperados no tempo  $t$ ;  $C_i(t)$  representa os indivíduos não infectados rastreados no tempo  $t$ ;  $V(t)$  representa os indivíduos protegidos pela vacina no tempo  $t$ ;  $\alpha$  é taxa média na qual os indivíduos latentes se tornam infecciosos;  $\beta$  é a taxa de ocorrência de contatos potencialmente infectados;  $\gamma$

é a taxa na qual a proporção de indivíduos infecciosos na comunidade se recuperam ou morrem;  $\chi_1$  é a taxa de contatos rastreados vacinados com sucesso e liberados na comunidade;  $\chi_2$  é taxa de casos infecciosos não vacinados e que se recuperam ou morrem;  $\varepsilon_1$  é a proporção de vacinados não infectados;  $\varepsilon_2$  é a proporção de vacinados infectados;  $\rho$  é a proporção de contatos encontrados por meio de rastreamento de contato;  $\theta$  é a taxa diária na qual os indivíduos infecciosos entram em quarentena;  $\varphi$  é a proporção de contatos infectados;  $\beta$  é a taxa de ocorrência de contatos potencialmente infectados.

### 3 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

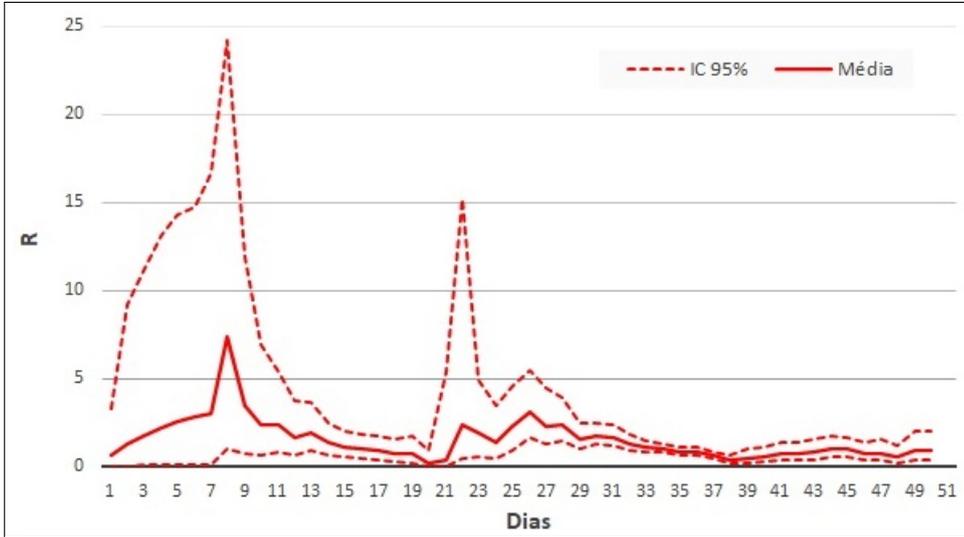
Em 1972, na província de Kosovo, um viajante que retornou de uma região endêmica adoeceu com sintomas de fadiga, tremores e febre, achando que seria devido à viagem, sem apresentar erupções na pele. Poucos dias após seu retorno, 11 pessoas que tiveram contato com ele contraíram a doença. Após um grande esforço, que foi desde a quarentena dos infectados e de pessoas que tiveram contato, até a vacinação em massa de cerca de 95% da população, o surto foi contido. A epidemia de varíola em Kosovo afetou 123 pessoas e causou 26 mortes. A epidemia de varíola foi declarada erradicada em todo o mundo em maio de 1980 (Fenner et al., 1988).

O surto de varíola em Kosovo foi modelado usando o sistema (1), cujo conjunto de equações diferenciais adequadamente parametrizadas foram resolvidas pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem com um passo de tempo de 0,1 dias. Nas simulações, foram consideradas uma população de 2,2 milhões de pessoas, 50% de suscetíveis, 10% de letalidade e número de reprodução médio  $R_0 = 10,8$  (Fenner et al., 1988). Os demais parâmetros utilizados nas simulações foram:  $\chi_1 = 0.06 \text{ dias}^{-1}$  (Franz, 1997),  $\chi_2 = 0.04 \text{ dias}^{-1}$  (Fenner et al., 1988),  $\varepsilon_1 = 0.975$  (Mack et al., 1972), (Mack, 1972),  $\varepsilon_2 = 0.30$  (Mack et al., 1972), (Mack, 1972), (Fenner et al., 1988),  $\rho = 0.975$  (Fenner et al., 1988) e  $\theta = 0.95$  (Fenner et al., 1988).

Nas simulações realizadas, utilizou-se, além do  $R_0$  médio (Fenner et al., 1988), o número de reprodução variável com o tempo  $R_t$  durante o surto de Kosovo. As curvas ilustradas na Figura 2 foram geradas na plataforma EpiEstim (Cori et al., 2013), que é uma ferramenta para estimar o número de reprodução variável no tempo durante epidemias. São apresentados a média e o índice de confiança de 95%. A Figura 2

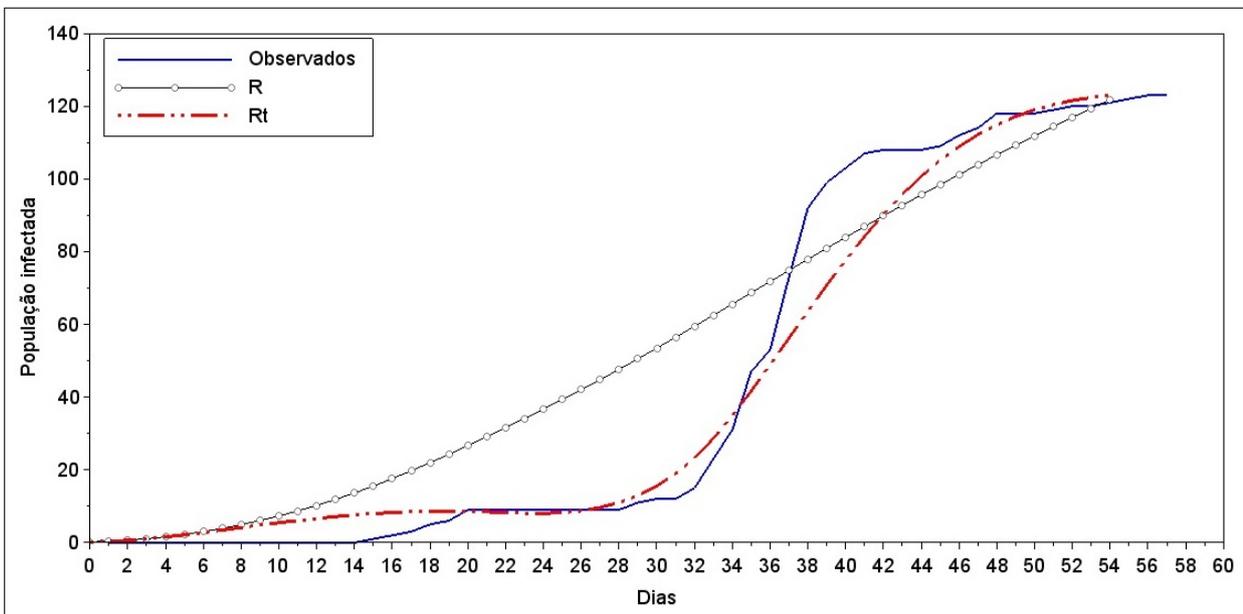
ilustra o atraso potencialmente longo entre o primeiro caso e o momento em que é razoável começar a estimar o  $R$  do vírus (Cori et al., 2013) (Thompson et al., 2019).

Figura 2 – Número de reprodução da varíola variável no tempo em Kosovo - fevereiro a abril de 1972



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 3 – Comparação dos casos acumulados de varíola em Kosovo usando  $R_0$  médio e o  $R_t$



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

No gráfico da Figura 3, em azul, apresenta-se o número de casos acumulados, considerando o modelo proposto 1 e os dados observados durante o surto ocorrido em Kosovo (Fenner et al., 1988). Para efeitos de comparação, na primeira simulação,

representada pela curva cinza, são exibidos os casos acumulados da doença considerando o valor médio de  $R_0$ , apresentado por (Fenner et al., 1988), onde  $R_0 = \beta/\gamma$ . Na segunda simulação, ilustrada pela curva vermelha, são apresentados os casos acumulados levando-se em conta o número de reprodução variável no tempo (ilustrado na Figura 2) e o sistema 1 foi resolvido considerando o  $R_t$  correspondente a cada dia. Observa-se que, utilizando o valor médio de  $R_0$ , o modelo não reproduz o aumento abrupto do número de casos após 30 dias do início do surto.

#### 4 ESTUDO DE CASO: MPOX NO BRASIL

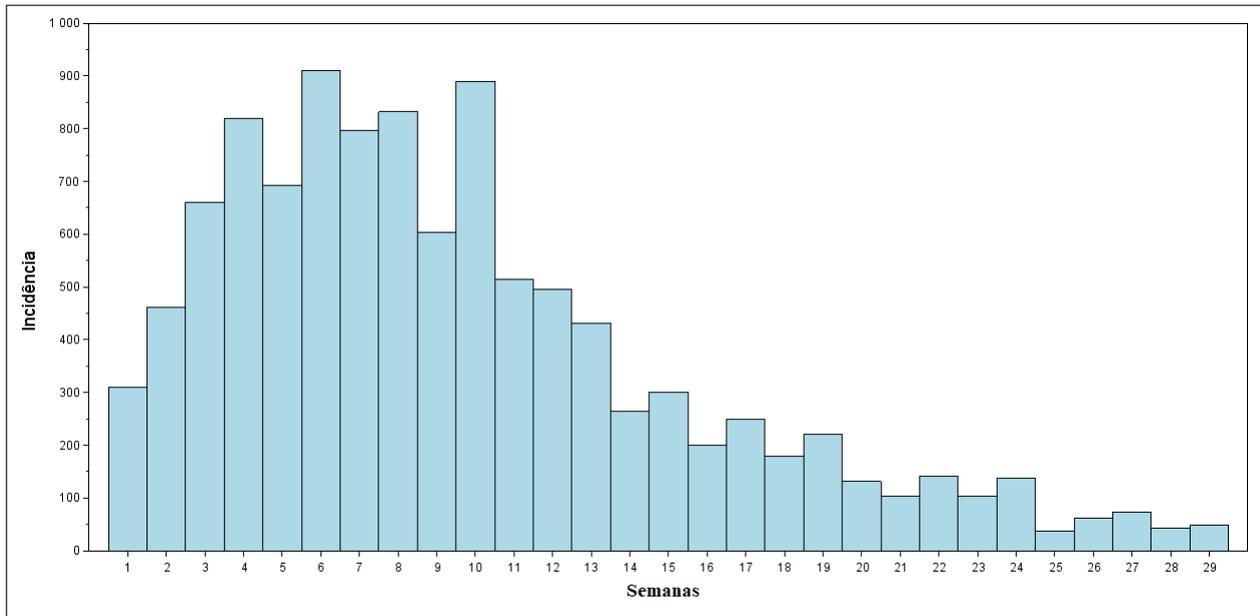
No dia 23 de julho de 2022, a OMS declarou o surto de mpox como emergência de saúde pública, isso devido aos mais de 16 mil casos notificados em 75 países. O surto de mpox matou 140 pessoas em 111 países, e em maio de 2023 a OMS declarou o fim da emergência de saúde (Agência Brasil, 2023) (Organização Pan-Americana da Saúde, 2023).

Segundo o Ministério da Saúde, o Brasil teve seu primeiro caso de mpox confirmado no dia 09 de junho de 2022 e o caso foi registrado no estado de São Paulo pelo laboratório de referência Adolfo Lutz, após análise metagenômica (Ministério da Saúde, 2022). A partir desta data, inúmeros casos foram registrados em diversas áreas do país. Apesar da maioria dos casos não ser grave a situação do surto causou preocupação nas autoridades de saúde pública.

Para entender o comportamento do surto de mpox no Brasil, foi feito um estudo dos casos confirmados de mpox até a data de 31/01/2023 (Período de estudo: junho de 2022 a janeiro de 2023). Até o final de janeiro de 2023, foram registrados 10.745 casos, com uma média de 13 casos diários (dados do site do Ministério da Saúde). Ainda, segundo notícia veiculada no jornal G1, no início de março de 2023, mais de 50 mil casos suspeitos para a mpox haviam sido notificados, dos quais 20% foram confirmados, 8% classificados como prováveis ou suspeitos e 72% descartados (G1, 2023). O gráfico de incidência é apresentado na Figura 4.

Através dos dados apresentados na Figura 4, verifica-se que a curva de casos acumulados confirmados teve sua maior frequência registrada no período de julho a agosto de 2022. Após agosto, os casos acumulados seguiram em queda, mantendo uma incidência de casos pequena no final de janeiro de 2023.

Figura 4 – Casos diários de mpox no Brasil de junho de 2022 até o final de janeiro de 2023



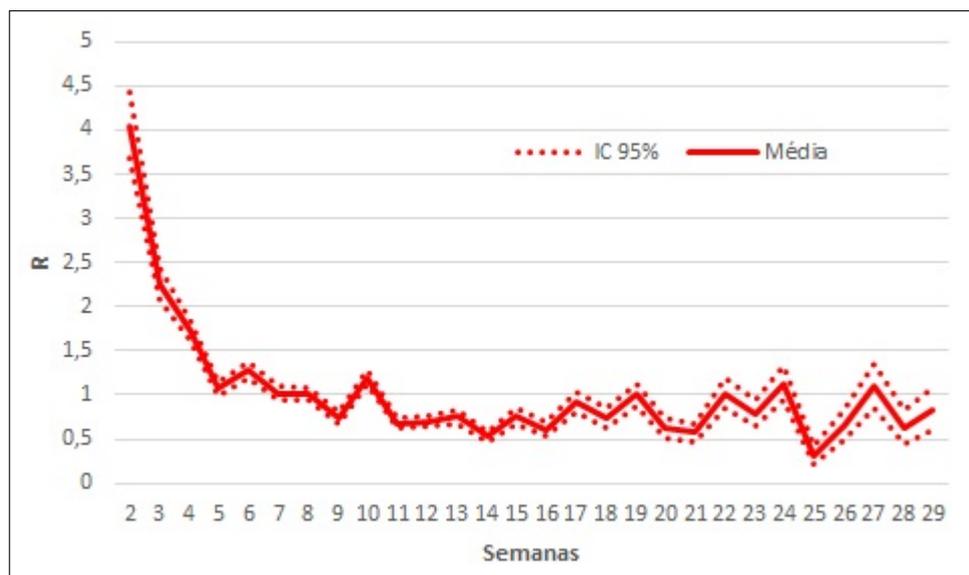
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O sistema de equações diferenciais ordinárias (1) foi usado para modelar o surto de mpox que aconteceu no Brasil em 2022. Considerou-se uma população de 215 milhões (estimativa do IBGE para o ano de 2022) e letalidade de 0,1%. Utilizou-se um  $R_0$  médio nas simulações de 1,6. O dado de  $R_t$  semanal também foi testado (pois a divulgação dos dados no país não ocorreu de forma contínua em todos os dias da semana), conforme apresentado na Figura 5 (Santos, 2023).

Os parâmetros foram ajustados de tal maneira que o modelo possa representar o que aconteceu na realidade. Como no Brasil, no final de janeiro de 2023, ainda não havia medidas de imposição de quarentena e vacinação para os casos de mpox, usou-se inicialmente o valor zero para os parâmetros  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\theta$ . A proporção de contatos encontrados por meio do rastreamento de contatos utilizada foi  $\rho = 0,02$ , a proporção de contatos infectados foi definida como  $\varphi = 0,05$ , o período de latência como  $\alpha = 0,0685$ , o período infeccioso  $\gamma = 0,116$  e a taxa de ocorrência de contatos potencialmente infectados é representada por  $\beta$  que pode ser calculada através da expressão  $\beta = (R_0 \times \gamma) / (\varphi \times N)$ .

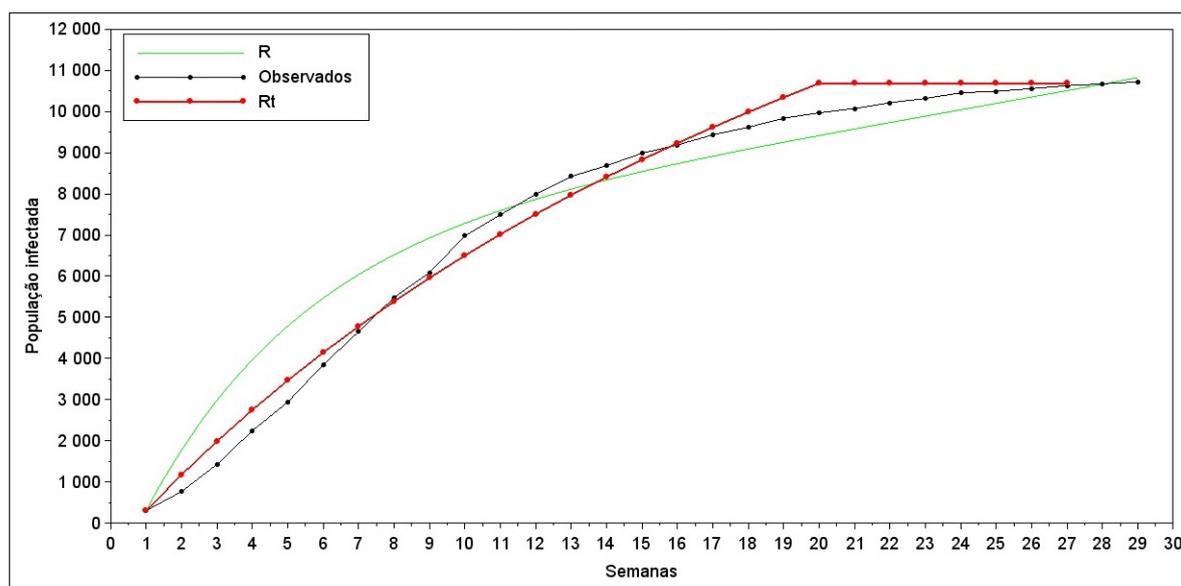
Na Figura 6, é possível perceber a evolução de casos no Brasil desde o primeiro dia de notificação, em junho de 2022, até a data de 31/01/2023. Percebe-se que a curva dos dados simulados tem a mesma tendência da curva que representa os dados reais.

Figura 5 – Número de reprodução da varíola no surto de mpox no Brasil em 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 6 – Simulação dos casos de mpox no Brasil até 31/01/2023



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a eficácia do modelo SEIR na análise do surto de mpox no Brasil, iniciado em 2022. A comparação entre dados reais e simulados, utilizando diferentes abordagens para o número de reprodução, revelou que o modelo é uma ferramenta robusta para representar a dinâmica da epidemia, mesmo em cenários complexos.

A pesquisa não apenas alcançou seus objetivos, mas também destacou o potencial da modelagem matemática como suporte essencial para políticas públicas de saúde, permitindo estratégias mais rápidas e eficazes de contenção e mitigação de surtos. Embora os parâmetros de quarentena e vacinação não tenham sido considerados, o próximo passo será integrar esses fatores, ampliando ainda mais a aplicabilidade do modelo.

Este trabalho reafirma o papel crucial da matemática aplicada no enfrentamento de desafios de saúde global, oferecendo subsídios para intervenções futuras e consolidando a importância da interdisciplinaridade em respostas a crises sanitárias.

## **AGRADECIMENTOS**

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

## **REFERÊNCIAS**

- Agência Brasil (2023). *OMS declara fim da emergência em saúde por mpox*. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2023-05/oms-declara-fim-da-emergencia-em-saude-por-mpox>.
- Centro de Operações de Emergências (2023). Boletim epidemiológico de mpox nº 20 (COE). <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/variola-dos-macacos/boletim-epidemiologico-de-monkeypox-no-20-coe/view>.
- Cori, A., Ferguson, N. M., Fraser, C., & Cauchemez, S. (2013). A new framework and software to estimate time-varying reproduction numbers during epidemics. *American Journal of Epidemiology*, 178(9):1505–1512.
- Fenner, F., Henderson, D. A., Arita, I., Jezek, Z., & Ladnyi, I. (1988). *Smallpox and its Eradication*. World Health Organization.

Franz, D. R. (1997). Reconhecimento clínico e manejo de pacientes expostos a agentes de guerra biológica. *The Journal of Infectious Diseases*, 278(5):399–411.

G1 (2023). *Cidade de SP começa a vacinar nesta quarta-feira contra mpox adultos com mais risco de desenvolver a doença.* <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2023/03/22/cidade-de-sp-comeca-a-vacinar-nesta-quarta-feira-contram-pox-adultos-com-mais-risco-de-desenvolver-a-doenca.ghtml>.

Hethcote, H. W. (2000). The mathematics of infectious diseases. *Mathematical Biosciences*, 42(4):599–653.

Islam, M. A. I., Mubassir, M., Paul, A. K., & Shanta, S. S. (2024). A mathematical model for understanding and controlling monkeypox transmission dynamics in the usa and its implications for future epidemic management. *Decoding Infection and Transmission*, 2:10031.

Mack, T. M. (1972). Smallpox in europe, 1950–1971. *The Journal of Infectious Diseases*, 125(2):161–169.

Mack, T. M., Thomas, D. B., Ali, A., & Khan, M. M. (1972). Epidemiology of smallpox in west pakistan: I. acquired immunity and the distribution of disease. *American Journal of Epidemiology*, 95(2):157–168.

Marín-Machuca, O., Ortiz-Guizado, J. I., Alvarado-Zambrano, F. A., Candela-Díaz, J. E., Chinchay-Barragán, C. E., Alvarado-Zambrano, R. A., Apaza-Urbina, M. A., Marín-Sánchez, U., Rueda, M. P. R., & Castillo-Peña, A. (2024). Comparación estadística de la infección por la viruela del mono (mpox) entre norteamérica y sudamérica. *Biotempo*, 21(1):11–21.

Ministério da Saúde (2022). *Brasil confirma primeiro caso de monkeypox.* <https://www.gov.br/saude/pt-br/canais-de-atendimento/sala-de-imprensa/notas-a-imprensa/2022/brasil-confirma-primeiro-caso-de-monkeypox>.

Molla, J., Sekkak, I., Ortiz, A. M., Moyles, I., & Nasri, B. (2023). Mathematical modeling of mpox: A scoping review. *One Health*, 16:100540.

Organização Pan-Americana da Saúde (2023). *Organização Mundial da Saúde declara fim da Emergência de Saúde Pública de Importância Internacional*.

Pal, M., Mengstie, F., & Kandi, V. (2017). Epidemiology, diagnosis, and control of monkeypox disease: A comprehensive review. *American Journal of Infectious Diseases and Microbiology*, 5(2):94–99.

Santos, A. M. O. (2023). Aplicação de um modelo matemático seir com quarentena e vacinação para o estudo da mpox no brasil. [Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Universidade Federal de Pelotas]. Repositório Institucional da Universidade Federal de Pelotas (Guaiaca).

Thompson, R. N., Stockwin, J. E., van Gaalen, R. D., Polonsky, J. A., Kamvar, Z. N., Demarsh, P. A., Dahlqwisst, E., Li, S., Miguel, E., Jombart, T., Lessler, J., Cauchemez, S., & Cori, A. (2019). Improved inference of time-varying reproduction numbers during infectious disease outbreaks. *Epidemics*, 29:100356.

World Health Organization (2022). *Multi-country outbreak of mpox*.

World Health Organization (2024). *Surveillance, case investigation and contact tracing for mpox (monkeypox): Interim guidance, 20 March 2024*. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-MPX-Surveillance-2024.1>.

## **Contribuições dos autores**

### **1 – Luciana Rossato Piovesan**

Doutora em Engenharia Mecânica; Professora Adjunta da UFPel

<https://orcid.org/0000-0001-6704-7522> • [lurpiovesan@gmail.com](mailto:lurpiovesan@gmail.com)

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

### **2 – Daniela Buske (Corresponding Author)**

Doutora em Engenharia Mecânica; Professora Titular da UFPel

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

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

### **3 – Antonio Marcos de Oliveira dos Santos**

Mestre em Modelagem Matemática

<https://orcid.org/0009-0004-3658-1887> • [marcosmatematico22@gmail.com](mailto:marcosmatematico22@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](mailto:alexandre.athayde@ufpel.edu.br)

Contribuição: Conceitualização; Metodologia; Validação; Revisão e edição

### **5 – Glênio Aguiar Gonçalves**

Doutor em Engenharia Mecânica, Professor Associado da UFPel

<https://orcid.org/0000-0001-7321-3742> • [gleniogoncalves@yahoo.com.br](mailto:gleniogoncalves@yahoo.com.br)

Contribuição: Conceitualização; Validação; Revisão e edição

### **6 – Régis Sperotto de Quadros**

Doutor em Matemática Aplicada, Professor Associado da UFPel

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

Contribuição: Implementação Computacional; Validação; Revisão e edição

## **Como citar este artigo**

Piovesan, L. R., Buske, D., Santos, A. M. de O. dos, Athayde, A. S. de, Gonçalves, G. A., & Quadros, R. S. de. (2025). Um modelo matemático compartimental para o estudo da mpox no Brasil. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 47, esp. 1, e90628. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X90628>.