

Modelo SEIR com Parâmetros Fuzzy Aplicado à Mpox: Uma Abordagem para Incertezas Epidemiológicas

Antonio Marcos de Oliveira dos Santos¹, Matheus Jatkoske Lazo¹, Daniela Buske²

¹Instituto de Matemática, Estatística e Física – Universidade Federal do Rio Grande
Av. Itália – Km 8 – Carreiros – 96.203-900 – Rio Grande – RS – Brasil

²Instituto de Física e Matemática – Universidade Federal de Pelotas (UFPeI)
Capão do Leão – 96.160-000 – Pelotas – RS – Brasil

marcosmatematico22@gmail.com, matheusjlazo@gmail.com, danielabuske@gmail.com

Abstract. *The current decade has been marked by the spread of several infectious agents on a global scale, with the world facing epidemic and pandemic scenarios that create great concern among the population. Currently, mpox is one of the diseases generating significant concern for health authorities, due to its spread in previously non-endemic regions [Amer et al. 2023]. This study presents an analysis of the SEIR model with fuzzy parameters, aiming to evaluate the impact of uncertainty on the dynamics of disease dissemination. As an application, a case study is conducted on the mpox epidemic in Brazil.*

Keywords. *Fuzzy Parameters; Modelagem Epidemiológica; Mpox; Epidemiological Uncertainty, SEIR model.*

Resumo. *A presente década tem sido marcada pela disseminação de diversos agentes infecciosos em escala global, com o mundo enfrentando cenários epidêmicos e pandêmicos que geram grande preocupação na população. Atualmente, a mpox é uma das doenças que mais têm preocupado as autoridades de saúde, devido à sua propagação em regiões anteriormente não endêmicas [Amer et al. 2023]. Este trabalho apresenta uma análise do modelo SEIR com parâmetros fuzzy, visando examinar o impacto da incerteza na dinâmica da disseminação da doença. Como aplicação, realiza-se um estudo de caso referente à epidemia de mpox no Brasil.*

Palavras-chave. *Parâmetros Fuzzy; Modelagem Epidemiológica; Mpox; Incerteza Epidemiológica, Modelo SEIR.*

1. Introdução

A mpox é uma doença endêmica em países da África Central e Ocidental, causada pelo vírus *Monkeypox*, do gênero *Orthopoxvirus* e família *Poxviridae* (que fazem parte o vírus da varíola, o vírus usado na vacina contra a varíola, e o vírus da varíola bovina), e foi identificado pela primeira vez no ano de 1958 em macacos (vale lembrar que apesar do nome, esses primatas não são hospedeiros do vírus) [WHO 2022]. A mpox geralmente se apresenta de forma leve.

A mpox, também conhecida como varíola dos macacos, é uma doença viral cujos sintomas se assemelham com os de casos de varíola relatados no passado. Apesar de ter sido considerada erradicada, o surgimento de novos surtos de infecção pelo vírus mpox em diversas partes do mundo foi motivo de alerta [Fenner et al. 1988, G1 2024].

Este vírus foi documentado pela primeira vez em humanos na década de 1970 e surtos foram relatados em muitos países, com a maioria dos casos restritos a áreas endêmicas. A epidemia de varíola foi uma das mais aterrorizantes doenças já documentadas, pois causou inúmeras mortes por todo o mundo. O controle dessa doença só foi possível devido à rígida quarentena de pessoas infectadas (e pessoas com contatos com infectados) e vacinação em massa realizada após a descoberta da vacina [Fenner et al. 1988].

No início de maio de 2022, casos de mpox 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, apresentando surtos mais localizados e com mais frequência em países com poucos recursos. Em 23 de julho de 2022, a Organização Mundial da Saúde (OMS) decretou emergência global de saúde pública devido ao alto índice de surtos que se expandiam por todo o mundo e não estavam restritos apenas a regiões endêmicas, como no passado. Segundo as autoridades de saúde, isso se deve à diminuição da vacinação e à dificuldade em rastrear pessoas infectadas [WHO 2024].

No dia 11 de maio de 2023 a OMS anunciou que a mpox deixou de ser considerada emergência de saúde global, mas não significa dizer que o vírus deixou de circular. No entanto, em agosto de 2024, o surgimento de uma nova variante, o clado 1b, levou a OMS a declarar novamente a mpox como uma emergência de saúde pública de interesse internacional, em razão do aumento significativo no número de casos. O continente africano permanece como a região mais afetada, com pelo menos 13 países registrando casos confirmados da doença em 2024. O número de infecções aumentou cerca de 160%, e o de mortes, 19%, em comparação com o mesmo período do ano anterior. Até o momento, já foram contabilizados mais de 14 mil casos e 524 óbitos [RTP 2024].

Durante o surto global de mpox em 2022, que atingiu mais de 70 países, menos de 1% das pessoas infectadas morreram. Entretanto, a nova variante do vírus, vinda da República Democrática do Congo (RDC), aparenta ter uma taxa de letalidade de aproximadamente 3% a 4% [RTP 2024, Ndembu et al. 2025]. A maioria dos casos ocorreu na RDC, que concentrou quase 96% das infecções e mortes, totalizando mais de 16 mil casos e mais de 500 óbitos notificados. Segundo o Centro Africano para Controle e Prevenção de Doenças (CDC África), 70% dos casos notificados na RDC ocorreram em crianças menores de 15 anos, com 85% das mortes registradas. Nessa região, os subclados 1a e 1b são prevalentes. A grande preocupação das autoridades de saúde decorre do fato de a região enfrentar surtos simultâneos de outras doenças, como cólera e sarampo [AP 2024].

A modelagem epidemiológica é uma ferramenta essencial para compreender o comportamento, a dinâmica e a disseminação de doenças infecciosas, contribuindo de forma significativa para a tomada de decisões em saúde pública [Waldman and Rosa 1998]. A validação desses modelos é realizada a partir de dados históricos de epidemias, os quais oferecem subsídios relevantes sobre o padrão de propagação das doenças. Tais dados podem ser incorporados a modelos matemáticos com o objetivo de avaliar e propor estratégias de mitigação, como quarentena e distanciamento social, especialmente em contextos onde ainda não há disponibilidade de medicamentos ou vacinas eficazes.

Do ponto de vista matemático, esses modelos podem ser tratados por meio de

métodos clássicos, sem a necessidade de introduzir novos conceitos matemáticos para representar a evolução da incerteza. No entanto, dependendo do foco da análise, até mesmo a incerteza associada a aspectos demográficos pode ser abordada utilizando a metodologia de fuzziness ambiental. Para isso, é necessário transferir a incerteza das variáveis de estado para os parâmetros do modelo, desde que tal procedimento seja conceitualmente e matematicamente justificável [Bassanezi and de Barros 2010].

Diante deste contexto, neste documento apresentamos um estudo da mpox através de um modelo epidemiológico SEIR com parâmetros fuzzy, a fim de apresentar um panorama da epidemia baseado na incerteza dos parâmetros. Essa abordagem mostrou-se uma ferramenta robusta para analisar a propagação de doenças como evidenciado nas referências [Leandro et al. 2024, Sherine et al. 2022, Mpeshe 2022, Msmali et al. 2023, Li et al. 2021, Sweatha and Devi 2023].

Este documento está organizado em várias seções, nas quais são detalhados o modelo desenvolvido e sua aplicação à epidemia de mpox por meio de parâmetros fuzzy. Na Seção 2, apresentamos uma breve revisão das funções que serão utilizadas nas simulações. A Seção 3 é dedicada à análise matemática do modelo SEIR com parâmetros fuzzy, incluindo o estudo da estabilidade dos pontos de equilíbrio. A Seção 4 aplica o modelo desenvolvido para examinar a dinâmica da epidemia. Na seção 5 apresentamos a simulação numérica para o modelo. Por fim, na seção 6 apresentamos os resultados e discussão.

2. Preliminares

Nesta seção, apresentamos uma introdução a algumas definições importantes no estudo da teoria da lógica fuzzy. Todas as definições aqui expostas estão baseadas na obra de Bassanezi [Bassanezi and de Barros 2010].

2.1. Conjunto Fuzzy

Definição: Seja X um conjunto universo, e \tilde{A} um conjunto fuzzy em X . O conjunto fuzzy \tilde{A} é representado como um conjunto de pares:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\} \quad (1)$$

2.2. Função de Pertinência

Definição: Seja X um conjunto universo, uma função de pertinência associada a um conjunto fuzzy \tilde{A} é:

$$\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0, 1] \quad (2)$$

2.3. Número Fuzzy Triangular

Definição: A função de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ do número fuzzy triangular $\tilde{A} = (l, m, n)$ é dada por:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < l \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x < m \\ \frac{n-x}{n-m}, & m \leq x \leq n \\ 0, & x > u \end{cases} \quad (3)$$

2.4. Método Numérico

Definição: Seja a inclinação $f(t_n, y_n)$, o método de Euler explícito é definido por:

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot f(t_n, y_n) \quad (4)$$

Neste trabalho, propomos a utilização de números fuzzy triangulares, pois eles representam de forma adequada a realidade epidemiológica. Essa abordagem possibilita considerar uma estimativa central — fundamentada em dados reais e na literatura — bem como limites inferior e superior que expressam a incerteza associada aos períodos de incubação e recuperação da doença, conforme indicado pelos órgãos competentes. Dessa forma, favorece-se uma interpretação intuitiva e consistente para epidemiologistas [Piyatilake and Perera 2020].

3. Modelo SEIR com Parâmetros Fuzzy

Nesta seção, analisamos um modelo SEIR com parâmetros fuzzy, buscando representar incertezas nos processos de transmissão e recuperação. A Figura 1 ilustra o diagrama do fluxo de transmissão da doença.

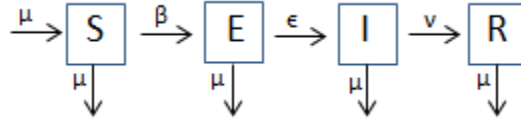


Figura 1. Fluxograma para o modelo SEIR

3.1. Modelo SEIR Clássico

Neste trabalho, apresentamos o modelo SEIR normalizado, formulado por meio de um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDOs). A análise de estabilidade associada a esse sistema segue a abordagem proposta por [Santos 2023].

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = \mu - \beta si - \mu s \\ \frac{de}{dt} = \beta si - \epsilon e - \mu e = \beta si - e(\mu + \epsilon) \\ \frac{di}{dt} = \epsilon e - \nu i - \mu i = \epsilon e - i(\mu + \nu) \\ \frac{dr}{dt} = \nu i - \mu r \end{cases} \quad (5)$$

onde tem-se que $s \in [0, 1]$, $e \in [0, 1]$, $i \in [0, 1]$, $r \in [0, 1]$ e $s(t) + e(t) + i(t) + r(t) = 1$.

Os parâmetros para o modelo (5) são:

- $s(t)$ é o número de indivíduos suscetíveis no tempo t ;
- $e(t)$ é o número de indivíduos expostos no tempo t ;
- $i(t)$ é o número de indivíduos infecciosos no tempo t ;
- $r(t)$ é o número de indivíduos recuperados no tempo t ;
- β é a taxa de contato ou taxa de transmissão;
- ν é a taxa de recuperação;
- ϵ é a taxa de incubação;
- μ taxa de natalidade e mortalidade.

3.2. Modelo com Parâmetros Fuzzy

O sistema (5) foi reformulado com a incorporação de parâmetros fuzzy, os quais são representados por números fuzzy triangulares. Assim, os parâmetros crisp foram substituídos por seus equivalentes fuzzy, resultando em um Sistema de Equações Diferenciais Fuzzy (FDEs), descrito da seguinte forma:

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = \tilde{\mu} - \tilde{\beta}si - \tilde{\mu}s \\ \frac{de}{dt} = \tilde{\beta}si - \tilde{\epsilon}e - \tilde{\mu}e = \tilde{\beta}si - e(\tilde{\mu} + \tilde{\epsilon}) \\ \frac{di}{dt} = \tilde{\epsilon}e - \tilde{\nu}i - \tilde{\mu}i = \tilde{\epsilon}e - i(\tilde{\mu} + \tilde{\nu}) \\ \frac{dr}{dt} = \tilde{\nu}i - \tilde{\mu}r \end{cases} \quad (6)$$

Os parâmetros para o modelo (6) são:

- $\tilde{\beta}$ é taxa fuzzy de transmissão;
- $\tilde{\nu}$ é a taxa fuzzy de recuperação;
- $\tilde{\epsilon}$ é a taxa fuzzy de incubação;
- $\tilde{\mu}$ é a taxa fuzzy de natalidade e mortalidade.

A estabilidade do modelo (6) é analisada de maneira análoga à abordagem descrita em [Mpeshe 2022]. Deste modo, neste estudo, restringimo-nos à apresentação do número básico de reprodução, R_0 , parâmetro fundamental na quantificação do impacto da epidemia sobre a população. Assim para o modelo (6) o \tilde{R}_0 tem a seguinte representação:

$$\tilde{R}_0 = \frac{\tilde{\beta}\tilde{\epsilon}}{(\tilde{\epsilon} + \tilde{\mu})(\tilde{\nu} + \tilde{\mu})} \quad (7)$$

A estrutura da equação (7) [Mpeshe 2022, Msmali et al. 2023] é dada por:

$$\begin{cases} R_0^{[min]} = \frac{\beta_{min}\epsilon_{min}}{(\epsilon_{min} + \mu_{max})(\nu_{min} + \mu_{max})} \\ R_0^{[max]} = \frac{\beta_{max}\epsilon_{max}}{(\epsilon_{max} + \mu_{min})(\nu_{max} + \mu_{min})} \end{cases} \quad (8)$$

Se:

- $R_0^{[max]} < 1$, o sistema é globalmente estável. Ou seja, a doença desaparece em qualquer cenário compatível com os parâmetros fuzzy;
- $R_0^{[min]} > 1$, o sistema é instável. Ou seja, todos os cenários fuzzy são instáveis. Assim acontecerá a epidemia;
- $R_0^{[min]} < 1 < R_0^{[max]}$, tem-se um comportamento incerto. Ou seja, o modelo indica zonas de incerteza na estabilidade, o que pode ser interpretado como um risco fuzzy de epidemia.

Com base na análise apresentada, a próxima seção descreve os resultados numéricos, com o objetivo de avaliar o impacto da incerteza na transmissibilidade sobre a previsão do pico e da duração da epidemia.

4. Simulação Numérica

O método de Euler explícito (4) foi implementado computacionalmente para resolver o modelo (6) por meio de diferenças finitas, para avaliar o comportamento da epidemia de mpox, utilizando um passo de tempo $dt = 0.1$ dias. Para obter os resultados numéricos, utilizamos as condições iniciais $S(0) = 1 - I(0)$, $E(0) = 0.005$, $I(0) = 0.0005$ e $R(0) = 0.0$.

Na Figura 2 apresentamos a solução do modelo (6), considerando a incerteza apenas na taxa fuzzy de transmissão, $\tilde{\beta} = (1.0, 1.5, 1.9)$. Essa incerteza é representada pela região sombreada, na qual é possível observar o impacto da variação de β na dinâmica de disseminação da doença na população. Esse resultado é particularmente relevante, dado que o valor exato da taxa de infecção é desconhecido, principalmente devido ao elevado número de subnotificações nos dados disponíveis. Dessa forma, a solução obtida fornece uma estimativa mais realista da propagação da doença, permitindo que as autoridades de saúde tenham acesso a um cenário mais próximo da realidade, o que contribui para a formulação de medidas de contenção mais eficazes.

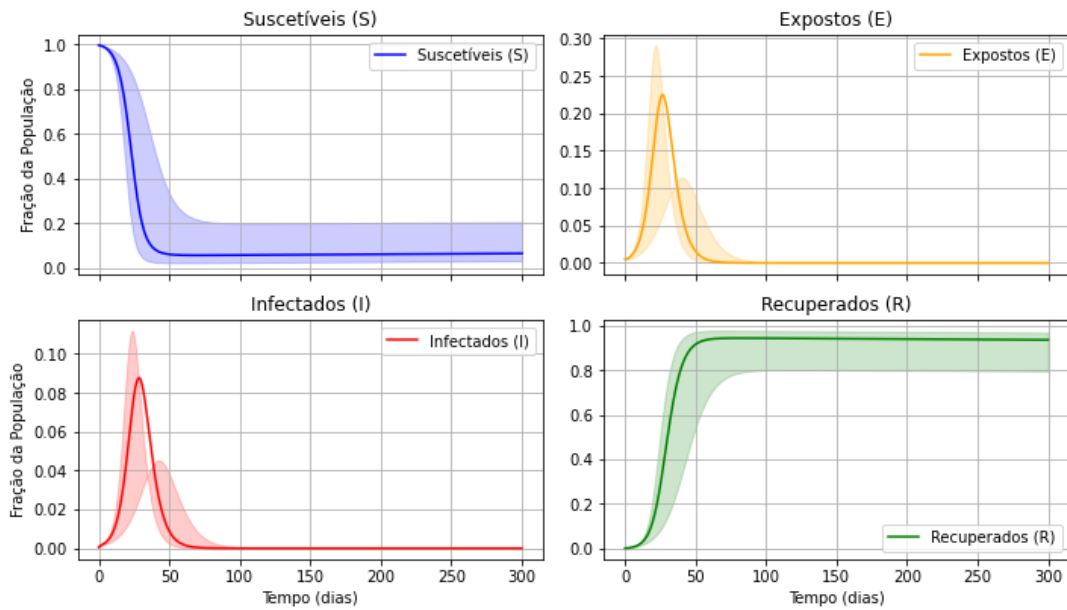


Figura 2. Solução do modelo (6) com incerteza na taxa de transmissão

Diante dessa perspectiva, na Figura 3 apresentamos o cenário em que a incerteza é aplicada a todos os parâmetros do modelo $\tilde{\beta} = (1.2, 1.5, 1.9)$, $\tilde{\epsilon} = (0.1, 0.2, 0.3)$, $\tilde{\nu} = (0.4, 0.5, 0.6)$, $\tilde{\mu} = (1/80 \cdot 365, (1/70 \cdot 365, (1/60 \cdot 365))$. Dessa forma, conseguimos obter uma solução mais realista, considerando que todos os parâmetros estão sujeitos a algum grau de incerteza. Tal fato é evidenciado pela forma como os parâmetros relacionados à mpox são divulgados pelos órgãos responsáveis [Miura et al. 2022, Organization 2022].

Na Figura 4, apresentamos um estudo de caso sobre a disseminação da mpox no Brasil, no período de maio de 2022 a março de 2025. Os valores mínimos, médios e máximos dos parâmetros fuzzy foram estimados a partir de [Fenner et al. 1988, Miura et al. 2022, WHO 2022]. A taxa de incubação mínima ϵ , foi calculada em função do período mínimo para a manifestação da doença no paciente, enquanto a taxa de

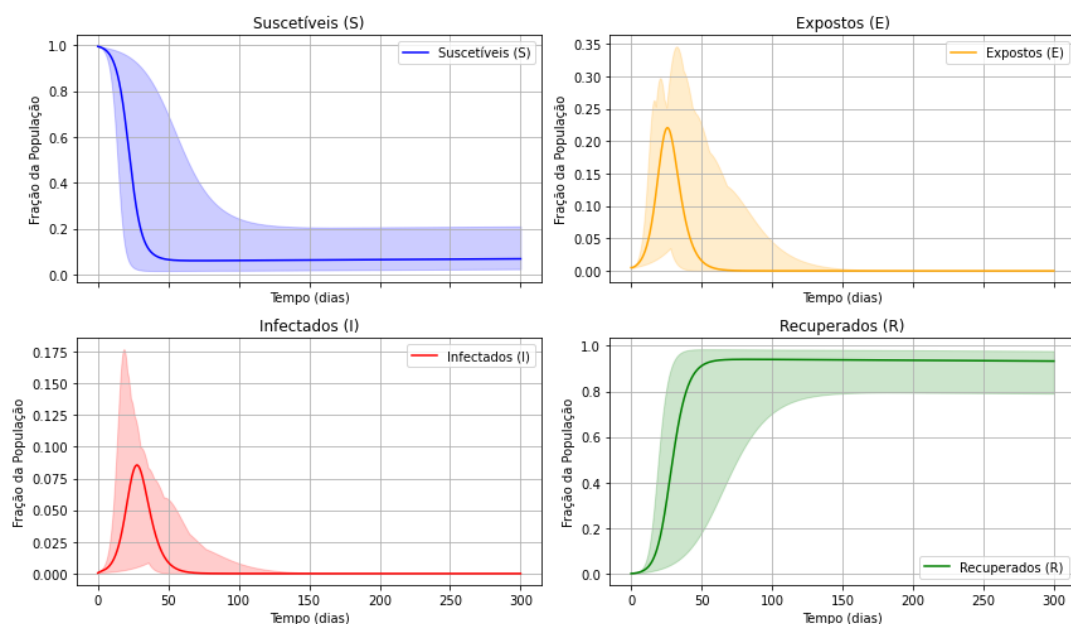


Figura 3. Solução do modelo (6) com incerteza em todos os parâmetros do modelo

incubação máxima ν foi estimada em função do período máximo de manifestação. A taxa de recuperação foi obtida de forma análoga à taxa de incubação. Já a taxa de transmissão $\tilde{\beta}$ foi estimada a partir do número básico de reprodução \tilde{R}_0 , conforme a Eq. 8. O valor de \tilde{R}_0 foi obtido a partir dos dados de casos diários por meio do aplicativo EpiEstim, desenvolvido pelo Imperial College London [Cori 2021]. A taxa média, por sua vez, foi determinada pela média aritmética entre os valores mínimo e máximo, estando descrita na Tabela 1. A figura ilustra o comportamento da doença considerando a incerteza nos parâmetros fuzzy. Os casos reais são representados pelos pontos pretos, e é possível observar que a curva correspondente aos dados reais está contida dentro da faixa de incerteza gerada pelos parâmetros fuzzy.

Esse resultado é relevante, pois demonstra que o modelo, incorporando incertezas, consegue capturar adequadamente a dinâmica da doença. Isso permite a formulação de estratégias de contenção mais eficazes, com o objetivo de evitar que a epidemia atinja picos mais elevados ou se prolongue por mais tempo na população. Os dados populacionais utilizados nesta simulação foram obtidos em [WHO 2023], enquanto as informações sobre o número de casos foram extraídas da planilha disponibilizada em [WHO 2025].

Tabela 1. Parâmetros adotados na simulação da mpox para o modelo (6).

Parâmetro	Descrição	Valor	Fonte
β	Taxa de Transmissão	0.120	Estimado
ϵ	Taxa de Incubação	0.116	[Mack 1972, Miura et al. 2022]
ν	Taxa de Recuperação	0.0456	[Mack 1972, Organization 2022]
μ	Taxa de Natalidade/Mortalidade	$1/70 \cdot 365$	Estimado

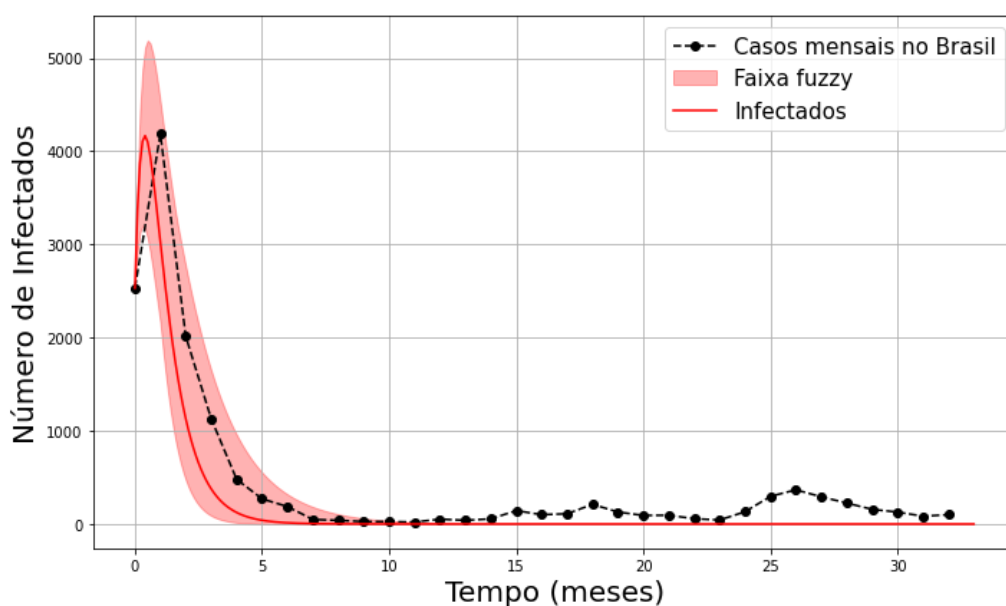


Figura 4. Solução do modelo (6) com incerteza nos parâmetros $\tilde{\beta} = (0.05, 0.120, 0.170)$, $\tilde{\epsilon} = (0.08, 0.116, 0.216)$ e $\tilde{\nu} = (0.0400, 0.0456, 0.0970)$.

5. Resultados e Discussão

Nesta análise, é possível observar que a faixa fuzzy captura com eficiência o período de difusão da doença. No entanto, nos resultados do estudo de caso, nota-se que, após a doença atingir o equilíbrio, surgem novos casos. Esse comportamento pode ser justificado pelo aparecimento de pequenos surtos localizados, causados tanto pelo surgimento de novas variantes do vírus quanto pelo deslocamento de indivíduos para regiões afetadas.

6. Conclusão

Neste trabalho, apresentamos uma análise do modelo SEIR com parâmetros fuzzy, com o objetivo de investigar o comportamento da mpox sob condições de incerteza. Inicialmente, foi realizado um estudo sobre o cenário atual da mpox, seguido por uma breve introdução à teoria dos conjuntos fuzzy. Em seguida, aplicamos a incerteza aos parâmetros do modelo SEIR e resolvemos o sistema numericamente por meio do método de Euler explícito, obtendo as curvas correspondentes às populações suscetível, exposta, infecciosa e recuperada.

Posteriormente, conduzimos um estudo de caso que gerou a curva dos infectados mensais por mpox no Brasil. Os resultados obtidos demonstram a eficácia da abordagem fuzzy, por proporcionarem uma representação mais realista da disseminação da doença, uma vez que consideram a incerteza inerente aos parâmetros do modelo.

Diante do exposto, conclui-se que a utilização dessa metodologia pode constituir uma ferramenta útil e eficiente para autoridades de saúde pública na formulação de estratégias de controle frente a possíveis surtos epidêmicos e pandêmicos. É um tema que abre um leque de opções para área acadêmica, firmando assim o compromisso de continuar estudando e aperfeiçoando a pesquisa.

Referências

- Amer, F., Khalil, H. E. S., Elahmady, M., ElBadawy, N. E., Zahran, W. A., Abdelnasser, M., Morales, A. J. R., Wegdan, A. A., and Tash, R. M. . E. (2023). Mpox: Risks and approaches to prevention. *Journal of Infection and Public Health*, 23(16):901–910.
- AP (2024). Who declares mpox outbreaks in africa a global health emergency as a new form of the virus spreads. Disponível em <https://encurtador.com.br/UiFse>. Acessado em 03 de junho de 2025.
- Bassanezi, R. C. and de Barros, L. C. (2010). *Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática*. Campinas-SP.
- Cori, A. (2021). Epiestim: a demonstration. Disponível em <https://shiny.dide.imperial.ac.uk/epiestim/>. Acessado em 03 de junho de 2025.
- Fenner, F., Henderson, D. A., Arita, I., JeZek, Z., and Ladnyi, I. (1988). *Smallpox and its Eradication*. World Health Organization, Genebra.
- G1 (2024). Mpox: veja em mapas a distribuição de casos e mortes pelo mundo. Disponível em <https://encurtador.com.br/kb2w0>. Acessado em 03 de junho de 2025.
- Leandro, A. S., de Oliveira, F., Lopes, R. D., Rivas, A. V., Martins, C. A., Silva, I., Villela, D. A. M., Teixeira, M. G., Xavier, S. C. C., and de Freitas, R. M. (2024). The fuzzy system ensembles entomological, epidemiological, demographic and environmental data to unravel the dengue transmission risk in an endemic city. *BMC Public Health*, 24(2587):1–14.
- Li, C., Huang, J., and Zhao, H. (2021). A fuzzy susceptible-exposed-infected-recovered model based on the confidence index. *International Journal of Fuzzy Systems*, 23(4):907–917.
- Mack, T. M. (1972). Smallpox in europe, 1950–1971. *The Journal of Infectious Diseases*, 125(2):161–169.
- Miura, F., Ewijk, C. E. V., Backer, J. A., Xiridou, M., Franz, E., de Coul, E. O., Brandwagt, D., Cleef, B. V., Rijckevorsel, G. V., Swaan, C., den Hof, S. V., and Wallinga, J. (2022). Estimated incubation period for monkeypox cases confirmed in the netherlands, may 2022. *Euro Surveill*, 27(24):1–14.
- Mpeshe, S. C. (2022). Fuzzy seir epidemic model of amoebiasis infection in human. *Hindawi-Advances in Fuzzy Systems*, 2022(5292830):1–10.
- Msmali, A. H., Dayan, F., Rafiq, M., Ahmed, N., Ahmadini, A. A. H., and Hamali, H. H. (2023). A nonstandard computational investigation of seir model with fuzzy transmission, recovery and death rates. *CMC-Computers, Materials Continua*, 77(2):2251–2269.
- Ndembi, M. N., Morenike, O. F., M. D, A. K., Mercy, K., Tessema, S., Mbala-Kingebeni, M. P., Ngandu, M. C., Ngongo, M. N., Kaseya, M. J., Salim, S., and Karim, M. B. A. (2025). Evolving epidemiology of mpox in africa in 2024. *The new england journal of medicine*, 392(7):666–676.

- Organization, W. H. (2022). Monkeypox. Disponível em <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/monkeypox>. Acessado em 03 de junho de 2025.
- Piyatilake, I. T. S. and Perera, S. S. N. (2020). Fuzzy multidimensional model to cluster dengue risk in sri lanka. *BioMed Research International*, 2020(11):1–16.
- RTP (2024). Mpox. fabricante dinamarquês da vacina quer aprovação para adolescentes. Disponível em <https://encurtador.com.br/0ex8M>. Acessado em 03 de junho de 2025.
- Santos, A. M. d. O. (2023). Aplicação de um modelo matemático seir com quarentena e vacinação para o estudo da mpox no brasil. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- Sherine, V. R., Chellamani, P., Ismail, R., Avinash, N., and Xavier, G. B. A. (2022). Estimating the spread of generalized compartmental model of monkeypox virus using a fuzzy fractional laplace transform method. *Symmetry*, 14(2545):1–20.
- Sweatha, S. and Devi, S. S. (2023). Fuzzy seir modeling and analysis of covid-19 spread and control. *Contemporary Mathematics*, 5(2024):608–627.
- Waldman, E. A. and Rosa, T. E. C. (1998). *Vigilância em Saúde Pública. Série Saúde e Cidadania*. Editora Fundação Peirópolis Ltda, São Paulo.
- WHO (2022). Multi-country monkeypox outbreak in non-endemic countries. Disponível em https://www.who.int/emergencies/disease-outbreak-news/item/2022-DON385?utm_.com. Acessado em 03 de junho de 2025.
- WHO (2023). World health organization: Data. Disponível em <https://data.who.int/countries/>. Acessado em 08 de julho de 2025.
- WHO (2024). Surto de mpox. Disponível em <https://www.who.int/emergencies/situations/mpox-outbreak>. Acessado em 03 de junho de 2025.
- WHO (2025). Global mpox trends. Disponível em https://worldhealthorg.shinyapps.io/mpx_global/#26_Case_definitions. Acessado em 03 de junho de 2025.