

CONIC SEMESP

22º Congresso Nacional de Iniciação Científica

TÍTULO: ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA COVID-19 EM BELO HORIZONTE BASEADA EM MODELO EPIDEMIOLÓGICO SIRV

CATEGORIA: CONCLUÍDO

ÁREA: CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

SUBÁREA: Computação e Informática

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS - IFMG

AUTOR(ES): MATHEUS SALIBA GAROFOLO

ORIENTADOR(ES): CARLOS ALEXANDRE SILVA, LILLIA DOS SANTOS BARSANTE SILVA

1. RESUMO

Neste trabalho foi utilizado o modelo epidemiológico SIRV (Suscetíveis – Infectados – Recuperados – Vacinados) para avaliar a evolução do número de novos infectados da COVID-19, com e sem a inserção da vacinação (primeira dose de reforço) na população de Belo Horizonte em Minas Gerais, Brasil. O sistema de equações diferenciais foi resolvido numericamente usando o método numérico de Runge-Kutta de 4ª ordem, sendo implementado em linguagem Octave. Na validação do modelo SIRV foram utilizados dados oficiais de novos infectados da COVID-19 divulgados pela Prefeitura Municipal da capital mineira, entre 05 de agosto de 2020 a 01 de abril de 2022. De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, o modelo SIRV apresentou um bom caráter preditivo para as novas infecções, mostrando a estabilidade e o controle livre da doença com a inserção da vacinação.

2. INTRODUÇÃO

Desde 11 de março de 2020, a COVID-19 (*Corona Virus Disease-19*) apresenta *status* de pandemia declarada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (WHO, 2022) e vem causando globalmente relevantes impactos econômicos e sociais. A doença é causada pelo coronavírus SARS-CoV-2, cuja gravidade é variável (ADLER, 2020). Desde então, o vírus encontra-se em constante mutação e apresenta variantes de elevada transmissibilidade, como a Alfa, a Beta, a Delta, a Ômicron, entre outras (OPAS, 2022a). A propagação da doença está sendo controlada pelas autoridades sanitárias e pela sociedade mundial através de um conjunto de fatores que dependendo da situação de risco podem atuar em conjunto ou isoladamente, como por exemplo, uso de máscaras, distanciamento social, *lockdown*, isolamento de indivíduos infectados, suspensão temporária de atividades escolares presenciais, vacinação, entre outras (CONASEMS, 2020).

Os primeiros casos de COVID-19 no mundo foram registrados no final de dezembro de 2019 na cidade de Wuhan, província de Hubei, República Popular da China (CRODA e GARCIA, 2020). A capital mineira, Belo Horizonte, datou seu primeiro

caso em 16 de março de 2020 (ANDRADE, NORONHA, *et al.*, 2020). Infelizmente, até o dia 05 de agosto de 2022 o mundo havia totalizado 579.092.623 casos notificados e 6.407.556 óbitos por COVID-19 (WHO, 2022). Na mesma data, o município de Belo Horizonte havia acumulado 438.570 casos notificados (aproximadamente 0,076% do valor mundial) e 8.062 óbitos (aproximadamente 0,126% do valor mundial) pela doença (PBH, 2022). Certamente estes números são superiores aos divulgados oficialmente, uma vez que existem casos subnotificados da doença (LI, PEI, *et al.*, 2020). Fatores como testes de diagnósticos restritos e casos assintomáticos acentuam as subnotificações da COVID-19 (PRADO, ANTUNES, *et al.*, 2020) e (DE OLIVEIRA e ARAÚJO, 2020).

A vacinação contra a COVID-19 iniciou no próprio ano de 2020 em diversos países como China, Rússia, Reino Unido, dentre outros. Belo Horizonte iniciou a vacinação em janeiro de 2021 e até o dia 05 de agosto de 2022 havia somatizado 1.783.507 vacinados com a primeira dose de reforço e 414.273 vacinados com a segunda dose de reforço. Atualmente existe mais de uma dezena de imunizantes com eficácia distinta contra a COVID-19 aprovados no mundo, como os da Pfizer/BioNTech, AstraZeneca, Moderna, Janssen, CoronaVac, dentre outros (OPAS, 2022b). A vacinação tem-se mostrado essencial para prevenir óbitos, casos graves da doença e para conter a pandemia (BUTANTAN). Segundo, (IYER, JONES, *et al.*, 2020) e (LI, PEI, *et al.*, 2020) os níveis de anticorpos reduzem entre 60 e 90 dias a partir da infecção inicial da COVID-19, ou seja, o indivíduo uma vez infectado adquire imunidade temporária para a doença.

Diversos modelos epidemiológicos têm sido utilizados para modelar a inserção de medidas de controle visando mitigar a COVID-19. Por exemplo, o efeito da mídia na conscientização pública sobre o controle da doença é abordado em (AJBAR, ALQAHTANI e BOUMAZA, 2021) por meio de um modelo epidemiológico SIR (Susceptível-Infetado-Recuperado). (PEDERSEN e MENEGHINI, 2020) e (ZHOU e GUO, 2022) consideraram separadamente os indivíduos infectados pela COVID-19 que ficaram isolados em um modelo epidemiológico SIQR (Susceptível-Infetado-Quarentena-Recuperado). (DAS, UPADHYAY, *et al.*, 2021) consideraram a vacinação e intervenções não farmacêuticas como uso de máscaras, distanciamento

social, dentre outras em um modelo epidemiológico variante do SEIR (Susceptível-Exposto-Infetado-Recuperado). O efeito do *lockdown* é estudado em um modelo epidemiológico variante do SIR em (BABA, YUSUF, *et al.*, 2021). Neste trabalho iremos avaliar a propagação da doença em Belo Horizonte-MG por meio do modelo epidemiológico SIRV (Suscetíveis – Infetados – Recuperados – Vacinados) com e sem vacinação, utilizando o método numérico Runge-Kutta de 4ª ordem (RK4).

A organização deste trabalho está definida da seguinte forma. A introdução ao tema, bem como uma breve revisão bibliográfica é exposta na seção 2. As seções 3 e 4 abordam respectivamente os objetivos e a metodologia do trabalho. Na seção 5 é apresentado o modelo SIRV utilizado na pesquisa e a modelagem matemática de seus respectivos compartimentos. A aplicação do método numérico RK4 ao modelo SIRV e a análise dos dados gerados estão presentes na seção 6. Por fim, a conclusão e considerações finais são postas na seção 7.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

Estudar a evolução dos dados oficiais da COVID-19 divulgados pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte-MG por meio de um modelo epidemiológico com e sem vacinação.

3.2. Específicos

- Catalogar os dados oficiais de novos casos de infectados, recuperados, vacinados e o número médio de transmissão por infectado da COVID-19 divulgados no site da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte-MG;
- Encontrar na literatura um modelo epidemiológico não complexo (com poucos parâmetros epidemiológicos) que incorpore a vacinação;
- Implementar o modelo compartimental utilizando o método numérico de Runge-Kutta de 4ª ordem na linguagem Octave;
- Validar o modelo compartimental com dados oficiais de Belo Horizonte-MG.

4. METODOLOGIA

Realizamos o levantamento dos dados quantitativos que representam o número de novos casos de infectados, o número de novos casos de recuperados, o número de novos casos de vacinados e o número médio de transmissão por infectado entre 05 de agosto de 2020 e 01 de abril de 2022, publicados em fonte oficial do governo municipal de Belo Horizonte (PBH, 2022). Estes dados não foram atualizados nos finais de semana e feriados, sendo estas informações acrescentadas no dia útil seguinte, juntamente com os novos casos registrados do dia. Foram estimados, via interpolação linear, os dados que apresentavam valores menores que o do dia anterior, como nos dias 27 de novembro de 2020, 03 de dezembro 2020, 04 de fevereiro de 2021 e 18 de março de 2021 (indivíduos infectados e indivíduos recuperados); nos dias 09 de dezembro de 2020 e 17 de novembro de 2021 (indivíduos recuperados). A partir dessas informações, adotamos o sistema de média móvel a cada 7 dias para avaliar os dados no intervalo de estudo, totalizando 409 dados.

O modelo epidemiológico utilizado nas simulações foi o SIRV (Suscetíveis – Infectados – Recuperados – Vacinados) (LINGE e LANGTANGEN, 2018). O modelo apresenta apenas três parâmetros epidemiológicos (taxa de infecção, taxa de recuperação e taxa temporária de imunidade) e um único parâmetro de controle (taxa de vacinação); ou seja, um número pequeno de parâmetros para se estimar, reduzindo assim erros paramétricos. O método numérico de equações diferenciais utilizado para resolver computacionalmente o modelo SIRV foi o Runge-Kutta de 4ª ordem (RK4) (CAMPOS, 2007), sendo implementado na linguagem Octave.

O número de reprodução basal R_0 do modelo SIRV foi calculado pela matriz de próxima geração (VAN DEN DRIESSCHE e WATMOUGH, 2002). A taxa de infecção da doença β e a taxa de vacinação p da população assumiram valores diários variáveis. A primeira taxa, foi obtida isolando β na equação (3), em que o valor do R_0 foi estimado como o valor do número médio de transmissão por infectado R_t ($R_0 \approx R_t$) e a taxa de recuperação γ foi constante. A segunda taxa, foi dada pela razão

do número de novos vacinados com a primeira dose de reforço pelo número total da população de Belo Horizonte. Supomos 100% de eficácia da vacinação, uma vez que os dados oficiais não discriminam o imunizante e sua respectiva eficiência em cada fase de vacinação da população.

5. DESENVOLVIMENTO

O modelo epidemiológico SIRV apresenta uma estrutura simples e classifica a população em quatro compartimentos que refletem o estado dos indivíduos em relação ao desenvolvimento de uma doença por unidade de tempo, sendo eles: Suscetíveis $S(t)$: indivíduos que estão suscetíveis a contrair a doença; Infectados $I(t)$: indivíduos que contraíram a doença e podem transmiti-la à indivíduos suscetíveis; Recuperados $R(t)$: indivíduos que se infectaram e se recuperaram, adquirindo imunidade temporária à doença, além dos indivíduos que vieram a óbito; e Vacinados $V(t)$: indivíduos suscetíveis que foram vacinados contra a doença.

O número de indivíduos em cada compartimento é um número não negativo e o número total da população é uma constante N igual à soma dos quatro compartimentos. Desta forma, a região do espaço de estados do modelo SIRV com sentido biológico para é dada por:

$$\Psi = \{(S, I, R, V) \in \mathbb{R}_+^4 \mid S \geq 0; I \geq 0; R \geq 0; V \geq 0; \text{ e } N(t) = S(t) + I(t) + R(t) + V(t)\}.$$

O conjunto de equações diferenciais que representa o modelo SIRV sem dinâmica vital e com imunidade temporária é dado por:

$$\begin{aligned} dS(t)/dt &= -\beta S(t)I(t) + \nu R(t) - pS(t), \\ dI(t)/dt &= \beta S(t)I(t) - \gamma I(t), \\ dR(t)/dt &= \gamma I(t) - \nu R(t), \\ dV(t)/dt &= pS(t), \end{aligned} \tag{1}$$

em que β representa a taxa de infecção por COVID-19 por unidade de tempo, ν

representa a taxa de imunidade temporária da doença por unidade de tempo, p representa a taxa de vacinação contra a doença por unidade de tempo e γ representa a taxa de recuperação da doença por unidade de tempo.

Neste trabalho foi omitido o detalhamento dos pontos de equilíbrio do modelo (1) e suas respectivas estabilidades. Como as equações que descrevem as variações dos compartimentos não depende da população de vacinados, podemos reescrever o modelo (1) usando apenas as três primeiras equações. Desta forma, o número de reprodução basal do modelo foi calculado analiticamente pelo raio espectral (maior autovalor em módulo) da matriz de próxima geração $G = \mathcal{P}\mathcal{Z}^{-1}$, em que \mathcal{P} e \mathcal{Z} são as matrizes jacobianas das funções de novas infecções \mathcal{P} e de transição \mathcal{Z} dos compartimentos $x = (S, I, R)$, avaliadas no ponto de equilíbrio livre de infecção da doença $(S, I, R) = (1, 0, 0)$:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{P}(x) &= \begin{bmatrix} 0 \\ \beta SI \\ 0 \end{bmatrix}, & \mathcal{Z}(x) &= \begin{bmatrix} \beta SI - \nu R + pS \\ \gamma I \\ -\gamma I + \nu R \end{bmatrix}, & \mathcal{P} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 \mathcal{Z} &= \begin{bmatrix} p & \beta & -\nu \\ 0 & \gamma & 0 \\ 0 & -\gamma & \nu \end{bmatrix}, & \mathcal{Z}^{-1} &= \begin{bmatrix} 1/p & (1-\beta/\gamma)/p & 1/p \\ 0 & 1/\gamma & 0 \\ 0 & 1/\nu & 1/\nu \end{bmatrix}, & G &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta/\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Desta forma, o número de reprodução basal do modelo é dado por:

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \tag{2}$$

Se $R_0 > 1$, ocorre um crescimento do número de novos infectados e se $R_0 < 1$, a doença tende a desaparecer.

Com a inserção da vacinação p o novo número de reprodução é dado por (CHAUHAN, MISRA e DHAR, 2014):

$$R_v = R_0(1 - p) \quad (3)$$

6. RESULTADOS

Foram considerados para as condições iniciais do modelo os valores referentes à fração de novos indivíduos infectados, recuperados, vacinados e suscetíveis do primeiro dia do horizonte de estudo. Adotamos $N = 2521564$ (PBH, 2022), $\gamma = 0,3$ dia⁻¹ (BATISTELA, RAMOS, *et al.*, 2021) e $\nu = 1/90$ dia⁻¹ (IYER, JONES, *et al.*, 2020).

A figura 1 ilustra a evolução da média móvel a cada 7 dias do número médio de transmissão da COVID-19 em Belo Horizonte. No período analisado, o valor máximo de R_t foi de aproximadamente 1,247 no dia 148 (dato referente a 19 de março de 2021) e o valor mínimo de R_t foi de aproximadamente 0,747 no dia 389 (dato referente a 04 de março de 2022). As medidas de controle implantadas pelos gestores municipais impactaram positivamente no valor de R_t , uma vez que este valor permaneceu abaixo de 1, em aproximadamente 60% dos dias do estudo.

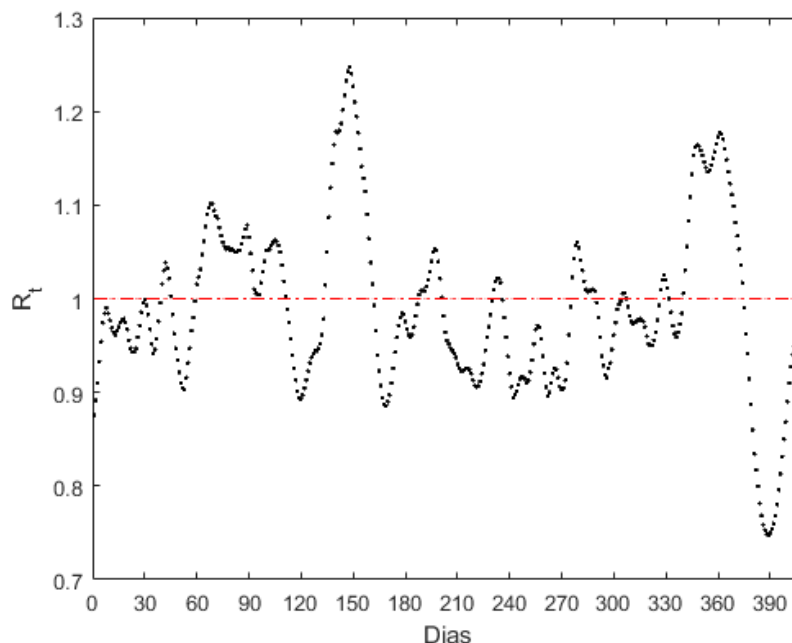


Figura 1: Média móvel de 7 dias do número médio de transmissão da COVID-19 no horizonte de estudo.

A dinâmica da população de novos casos de infectados do modelo SIRV com e sem vacinação se ajustou bem aos dados oficiais da COVID-19 no horizonte de estudo conforme a figura 2. Com a inserção da vacinação, verifica-se que o número de novas infecções diminuiu drasticamente. Adicionalmente, ao controle vacinal, verificou-se que o valor de R_t permaneceu menor que 1 entre o dia 375 (dato referente a 14 de fevereiro de 2022) e o dia 409 (dato referente a 01 de abril de 2022), o que impactou na estabilidade do modelo no ponto de equilíbrio livre da doença. Este fato é corroborado por (SHIM, TARIQ, *et al.*, 2020), que afirma que número de novos infectados tende a decrescer quando o valor de R_t ficar abaixo de 1 por um período de aproximadamente 7 dias, deixando a população livre da doença.

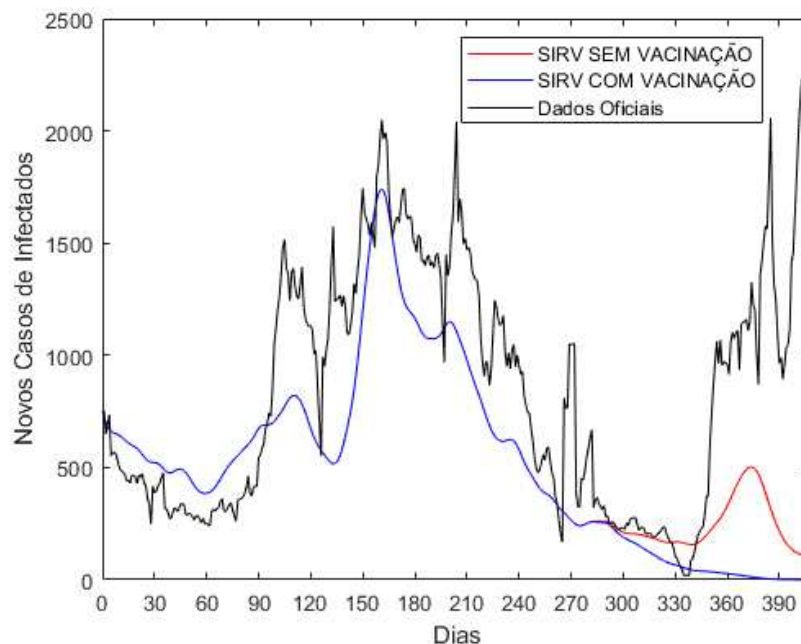


Figura 2: Evolução do número de novos casos de infectados da COVID-19 pelo SIRV com e sem a vacinação no horizonte de estudo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando o modelo epidemiológico SIRV simples, com e sem vacinação, no período analisado, foi possível descrever o padrão de evolução da curva de infecção da COVID-19 em Belo Horizonte. Com a inserção da vacinação, o número de novos casos converge para zero, deixando a população livre da doença. Acreditamos que este fato não foi vivenciado pela população, uma vez que o modelo adotado

considerou imunidade permanente à doença, a todo indivíduo vacinado, porém, na prática nenhum imunizante apresenta 100% de eficiência, tendo em vista as novas variantes que surgem do vírus. Trabalhos futuros deverão reformular e dar mais complexidade ao modelo SIRV, como a inserção de uma fração de indivíduos vacinados que poderão se reinfetar, além de indivíduos infectados em quarentena e mortes pela doença.

8. FONTES CONSULTADAS

ADLER, S. E. Why coronaviruses hit older adults hardest. **American Association of Retired Persons**, 2020. Disponível em: <<https://www.aarp.org/health/conditions-treatments/info-2020/coronavirus-severe-seniors.html>>. Acesso em: 05 de maio de 2022.

AJBAR, A.; ALQAHTANI, R. T.; BOUMAZA, M. Dynamics of an SIR-based COVID-19 model with linear incidence rate, nonlinear removal rate, and public awareness. **Frontiers in Physics**, v. 9, p. 1-13, Maio 2021.

ANDRADE, M. V. et al. Os primeiros 80 dias da pandemia da COVID-19 em Belo Horizonte: da contenção à flexibilização. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 30, 2020. p. 701-737.

BABA, I. A. et al. Mathematical model to assess the imposition of lockdown during COVID-19 pandemic. **Results in Physics**, v. 20, p. 1-7, 2021.

BATISTELA, C. M. et al. Vaccination and social distance to prevent COVID-19. **Ifac-papersonline**, 15, n. 54, 2021. 151-156.

BUTANTAN. Quais são as diferenças entre as vacinas contra Covid-19 que estão sendo aplicadas no Brasil? Disponível em: <<https://butantan.gov.br/covid/butantan-tira-duvida/tira-duvida-noticias/quais-sao-as-diferencas-entre-as-vacinas-contracovid-19-que-estao-sendo-aplicadas-no-brasil>>. Acesso em: 05 de agosto de 2022.

CAMPOS, F. F. **Algoritmos Numéricos**. 2ª. ed. [S.I.]: LTC, 2007.

CHAUHAN, S.; MISRA, O. P.; DHAR, J. Stability analysis of SIR model with vaccination. **American journal of computational and applied mathematics**, 4, 2014. 17-23.

CONASEMS. **Guia Orientador para o enfrentamento da pandemia Covid-19 na Rede de Atenção à Saúde**. Conselho Nacional de Secretários da Saúde. Brasília, p. 1-254. 2020.

CRODA, J. H. R.; GARCIA, L. P. Resposta imediata da Vigilância em Saúde à epidemia da COVID-19. **Epidemiol. Serv. Saúde**, Brasília, v. 29, n. 1, 2020.

DAS, P. et al. Mathematical model of COVID-19 with comorbidity and controlling using non-pharmaceutical interventions and vaccination. **Nonlinear Dynamics**, v. 106, n. 2, p. 1213-1227, 2021.

DE OLIVEIRA, T. M.; ARAÚJO, A. C. O. Consequências da subnotificação dos casos de COVID-19 para a saúde pública no Brasil. **InterAmerican Journal of Medicine and Health**, 3, 2020.

IYER, A. S. et al. Persistence and decay of human antibody responses to the receptor binding domain of SARS-CoV-2 spike protein in COVID-19 patients. **Science immunology**, v. 5, n. 52, 2020.

LI, R. et al. Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV-2). **Science**, 368, n. 6490, 2020. 489-493.

LINGE, S.; LANGTANGEN, H. P. **Programming for Computations-MATLAB/OCTAVE: A Gentle Introduction to Numerical Simulations with Matlab/octave**. [S.l.]: Springer, 2018.

OPAS. Organização Pan-Americana da Saúde. **Folha informativa sobre COVID-19**, 2022a. Disponível em: <<https://www.paho.org/pt/covid19>>. Acesso em: 05 Agosto 2022.

OPAS. Organização Pan-Americana da Saúde. **Vacinas contra a COVID-19**, 2022b. Disponível em: <<https://www.paho.org/pt/vacinas-contracovid-19>>. Acesso em: 05 Agosto 2022.

PBH. Prefeitura de Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/saude/coronavirus>>. Acesso em: 05 de agosto de 2022.

PEDERSEN, M. G.; MENEGHINI, M. Quantifying undetected COVID-19 cases and effects of containment measures in Italy: Predicting phase 2 dynamics. **Preprint**, p. 1-7, 2020.

PRADO, M. F. et al. Análise da subnotificação de COVID-19 no Brasil. **Revista Brasileira de Terapia Intensiva**, v. 32, Abril 2020. p. 224-228.

SHIM, E. et al. Transmission potential and severity of COVID-19 in South Korea. **International Journal of Infectious Diseases**, 93, 2020. 339-344.

VAN DEN DRIESSCHE, P.; WATMOUGH, J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. **Mathematical biosciences**, 180, 2002. 29-48.

WHO. World Health Organization, 2022. Disponível em: <<https://www.who.int>>. Acesso em: 5 de junho de 2022.

ZHOU, Y.; GUO, M. Isolation in the control of epidemic. **Mathematical Biosciences and Engineering**, v. 19, n. 11, p. 10846-10863, 2022.