

**Análise da dinâmica de transmissão da COVID-19 em Minas Gerais: Modelagem e Simulação**

**Analysis of the transmission dynamics of COVID-19 in Minas Gerais: Modeling and Simulation**

**Análisis de la dinámica de transmisión de COVID-19 en Minas Gerais: Modelado y Simulación**

Recebido: 11/07/2020 | Revisado: 13/07/2020 | Aceito: 15/07/2020 | Publicado: 21/07/2020

**Nádia Guimarães Sousa**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3142-5875>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: [nadia.sousa@uftm.edu.br](mailto:nadia.sousa@uftm.edu.br)

**Anamaria de Oliveira Cardoso**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4518-075X>

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil

E-mail: [anamaria.cardoso@ict.ufvjm.edu.br](mailto:anamaria.cardoso@ict.ufvjm.edu.br)

**Renato Fleury Cardoso**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7724-1553>

Instituto Lucano, Brasil

E-mail: [renatofleuryc@gmail.com](mailto:renatofleuryc@gmail.com)

**Alex Garcez Utsumi**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8955-6050>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: [alex.garcez@uftm.edu.br](mailto:alex.garcez@uftm.edu.br)

**Resumo**

O entendimento da propagação e prevenção do novo coronavírus (SARS-CoV-2) tem se tornado um desafio para infectologistas, pesquisadores e gestores. O objetivo deste trabalho foi simular e analisar o modelo matemático do tipo SEIR (Suscetível-Exposto-Infectado-Recuperado) para dinâmica de transmissão da COVID-19 em Minas Gerais – Brasil. Adicionalmente, foi realizada a projeção da transmissão para 30 dias, bem como o impacto de diferentes taxas de isolamento social no achatamento da curva epidemiológica. Para a simulação do modelo matemático do tipo SEIR, foi utilizado o *software* Scilab®. Os

parâmetros foram adequados a partir dos dados reais disponibilizados pela Secretaria de Saúde do Estado (SES). Os resultados mostraram que o modelo representou de forma adequada os casos confirmados ( $R^2=0,994$ ) e óbitos ( $R^2=0,991$ ). A projeção do modelo indica que o pico da doença no estado ocorrerá próximo ao dia 20/08/2020. O cenário sem isolamento social estima 10.060 óbitos até o dia 04/12/2020. O modelo projeta uma redução de 987 vítimas com 50% de isolamento (9.073 óbitos); 1.991 vítimas com 70% de isolamento (8.069 óbitos) e 6.770 vítimas com *lockdown* (3.290 óbitos). Pode-se afirmar que as medidas de isolamento são eficazes no achatamento da curva de contaminação da COVID-19. Os modelos matemáticos podem contribuir na escolha das estratégias de intervenção e revelar aspectos importantes sobre a disseminação da doença.

**Palavras-chave:** COVID-19; Modelos epidemiológicos; Pandemia.

### **Abstract**

Understanding the spread and prevention of the new coronavirus (SARS-CoV-2) has become a challenge for infectologists, researchers and managers. This study aims to simulate and analyze the SEIR (Susceptible-Exposed-Infected-Recovered) mathematical model for COVID-19 transmission dynamics in Minas Gerais - Brazil. Additionally, the transmission was projected for 30 days, as well as the impact of different rates of social isolation on the flattening of the epidemiological curve. Scilab® software was used to implement a SEIR mathematical model. The parameters were adequate based on the real data provided by the State Health Secretariat (SES). The results showed that the model adequately represented confirmed cases ( $R^2=0.994$ ) and deaths ( $R^2=0.991$ ). The model projection indicates that the peak of the disease in the state of Minas Gerais will occur around 08/20/2020. The scenario without social isolation estimates 10,060 deaths until 12/04/2020. The model projects a reduction of 987 victims with 50% isolation (9,073 deaths); 1,991 victims with 70% isolation (8,069 deaths) and 6,770 victims with lockdown (3,290 deaths). It can be said that the isolation measures are effective in flattening the COVID-19 contamination curve. Mathematical models can contribute to the choice of intervention strategies and reveal important aspects about disease spreads.

**Keywords:** COVID-19, Epidemiological model; Pandemic.

## Resumen

Comprender la propagación y prevención del nuevo coronavirus (SARS-CoV-2) se ha convertido en un desafío para los infectólogos, investigadores y gerentes. El objetivo de este trabajo fue simular y analizar el modelo matemático SEIR (*Susceptible-Exposed-Infected-Recovered*) para la dinámica de transmisión COVID-19 en Minas Gerais - Brasil. Además, la transmisión se proyectó durante 30 días, así como el impacto de diferentes tasas de aislamiento social en el aplanamiento de la curva epidemiológica. Se utilizó para implementar un modelo matemático del tipo SEIR el software Scilab®. Los parámetros fueron adecuados basados en los datos reales proporcionados por la Secretaría de Salud del Estado (SES). Los resultados mostraron que el modelo representaba adecuadamente los casos confirmados ( $R^2=0,994$ ) y muertes ( $R^2=0,991$ ). La proyección del modelo indica que el pico de la enfermedad en el estado ocurrirá cerca del 20/08/2020 e sin aislamiento social estima 10.060 muertes hasta el 04/12/2020. El modelo proyecta una reducción de 987 víctimas con un 50% de aislamiento (9073 muertes); 1991 víctimas con 70% de aislamiento (8069 muertes) y 6770 víctimas con encierro total (lockdown) (3290 muertes). Se puede decir que las medidas de aislamiento son efectivas para aplanar la curva de contaminación COVID-19. Los modelos matemáticos pueden contribuir a la elección de estrategias de intervención y revelar aspectos importantes sobre la propagación de la enfermedad. Los modelos matemáticos pueden contribuir a la elección de estrategias de intervención y señalar puntos importantes sobre la propagación de la enfermedad.

**Palabras-clave:** COVID-19; Modelo de la epidemia; Pandemia.

## 1. Introdução

A Síndrome Respiratória Aguda Grave 2 (SARS-CoV-2 / COVID-19) foi identificada em Wuhan na China em dezembro de 2019. Em 30 de janeiro de 2020, havia mais de 7.700 casos confirmados na China e 90 casos registrados em outros países. Novos e numerosos casos foram surgindo rapidamente em países asiáticos, seguindo para Europa e demais continentes, o que levou a Organização Mundial de Saúde (OMS) decretar pandemia em 11 de março de 2020 (Almeida, 2020; Aquino et al., 2020; Duczmal et al., 2020).

Quando comparada a outros tipos de doenças causadas por outros tipos de coronavírus existentes, a COVID-19 apresenta baixa letalidade. Entretanto, sua alta transmissibilidade tem ocasionado um maior número absoluto de mortes em relação as epidemias do SARS-CoV e o MERS-CoV. Isso ocorre devido ao grande número de infectados, provocando um colapso no

sistema de saúde. Desse modo, a falta de leitos e a necessidade de respiradores ocasiona um aumento exponencial no número de mortes (Aquino et al., 2020).

Os modelos matemáticos são ferramentas utilizadas para prever o comportamento de sistemas reais a partir da obtenção de equações que regem a dinâmica do sistema. O primeiro modelo matemático relacionado com a propagação de doenças infecciosas foi proposto por Daniel Bernoulli, ao estudar a varíola em 1760 (Barbosa et al., 2016). Desde então, a modelagem matemática epidemiológica tem auxiliado na compreensão da dinâmica de diversas doenças, tais como H1N1 (Kim et al., 2017), dengue (Yang & Ferreira, 2008) e hepatite B viral (HBV) (Goyal et al., 2019). Assim, a criação do modelo permite avaliar diferentes cenários futuros, norteando a adoção das melhores estratégias de combate às doenças.

Os estudos epidemiológicos que dividem a população em compartimentos (ou classes) são chamados de modelos compartimentais. Os modelos compartimentais do tipo SIR (Suscetível-Infetado-Recuperado) representam uma das formas mais simples de descrever o comportamento de doenças infecciosas, sendo amplamente aplicados em pesquisas da COVID-19 (Abou-Ismael, 2020). Geralmente, esses modelos são implementados por meio de equações diferenciais, as quais permitem analisar a evolução das classes com o passar do tempo.

Variações dos modelos do tipo SIR são desenvolvidas buscando melhorar a predição da evolução da doença a partir da inserção de novos compartimentos ou subcompartimentos. Modelos do tipo SEIR (Suscetível-Exposto-Infetado-Recuperado), ao adicionar o grupo exposto, se mostram mais realistas que os modelos do tipo SIR, uma vez que os indivíduos expostos não se tornam imediatamente infectados (Abou-Ismael, 2020). Por esse motivo, modelos do tipo SEIR vem sendo implementados para a COVID-19 com diferentes objetivos: avaliação do distanciamento social vertical (Duczmal et al., 2020); combinações de períodos de quarentena (Ibarra-Vega, 2020); eficácia do uso de máscaras (Eikenberry et al., 2020); entre outros.

No Brasil, o primeiro caso do novo coronavírus foi confirmado em 26 de fevereiro e, desde então, a infecção se alastrou por todos os Estados. Devido às particularidades de cada município, diferentes estratégias de quarentena foram adotadas. Em Minas Gerais, medidas de isolamento social foram adotadas no começo da pandemia, sendo que a taxa média de isolamento na capital ficou entre 30 e 50% nos primeiros meses (Duczmal et al., 2020). No entanto, diversos municípios mineiros tornaram mais brandas as restrições de isolamento com o passar do tempo. Embora medidas de higiene pessoal e distanciamento tenham sido

adotadas para diminuir a transmissão da COVID-19, ainda são escassos os estudos que analisam as consequências a partir de diferentes taxas de isolamento social em Minas Gerais.

Partindo desse pressuposto, o presente trabalho tem como objetivo simular e analisar o modelo matemático do tipo SEIR para dinâmica de transmissão da COVID-19 em Minas Gerais – Brasil. Os parâmetros do modelo matemático são estimados utilizando os dados reais fornecidos pela Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais (SES). Além disso, alguns cenários são simulados para avaliar o avanço da doença (projeção para 30 dias) e o impacto no achatamento da curva epidemiológica através da adoção de medidas de distanciamento, avaliando diferentes taxas de isolamento social.

## 2. Métodos

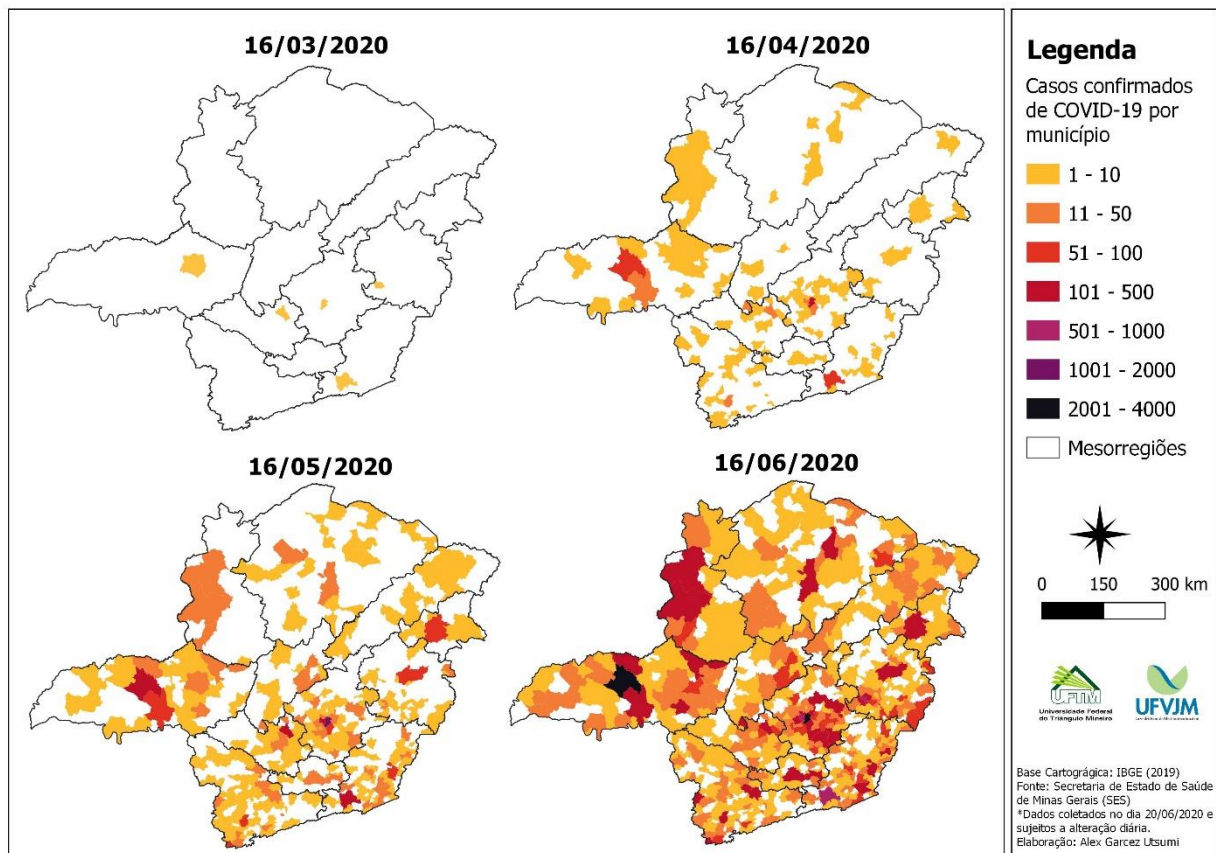
Este trabalho possui natureza teórico-computacional e utilizou o *software* livre, Scilab® (solucionador *lsoda* do pacote ODEPACK) para realizar as simulações computacionais do modelo matemático da dinâmica de transmissão da COVID-19. O modelo estudado é do tipo SEIR (Suscetível-Exposto-Infectedo-Recuperado), sendo considerado também a dinâmica de mortes devido a infecção do vírus.

### 2.1 Área de estudo

O Estado de Minas Gerais está localizado na região sudeste do Brasil, ocupando uma extensão territorial de 586.521,123 km<sup>2</sup> (IBGE, 2020). Segundo dados do IBGE (2019), Minas Gerais possui 21.168.791 habitantes, distribuídos em 853 municípios. O primeiro caso confirmado de COVID-19 no estado foi em 4 de março de 2020, na cidade de Ipatinga. No dia 12 de março de 2020, o governo estadual publicou o Decreto 113, o qual declarou Situação de Emergência em Saúde Pública, em razão do surto de doença respiratória.

O avanço do número de casos confirmados de COVID-19 ao longo dos meses pode ser observado a partir da Figura 1. Segundo SES (2020), no dia 16 de março de 2020 havia oito casos confirmados da doença, atingindo seis municípios. Nesse dia, foi realizada a primeira internação em decorrência da COVID-19 em Minas Gerais.

**Figura 1:** Distribuição dos casos confirmados da COVID-19 por municípios em Minas Gerais.



Fonte: Autores (2020).

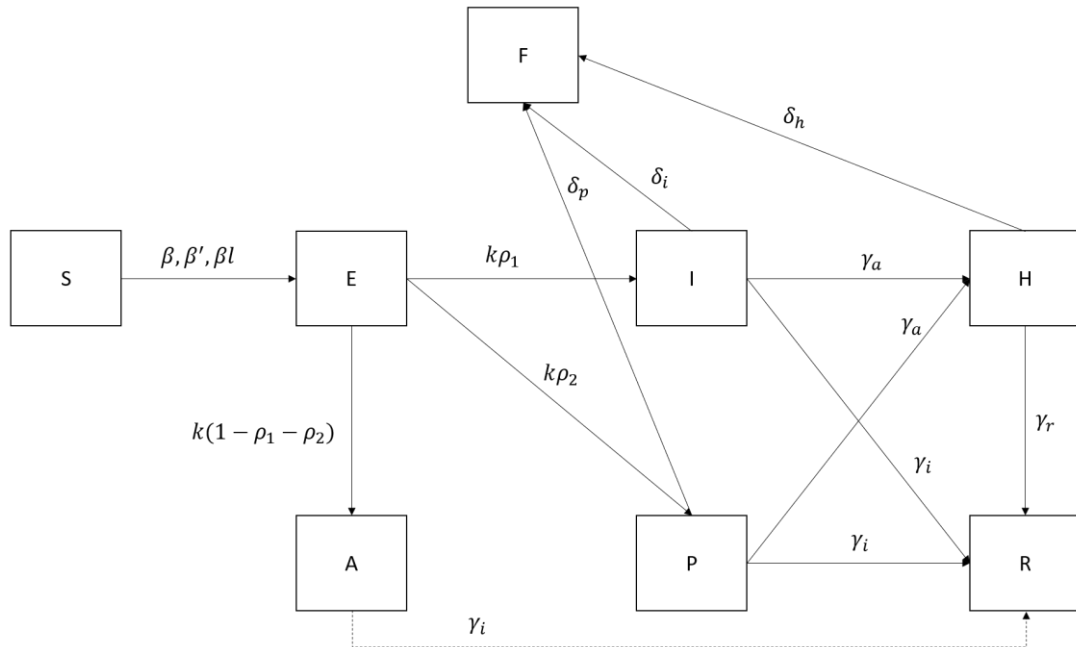
Em 16 de junho de 2020, o número de casos confirmados da COVID-19 atingiu 23.347, o que representa um aumento de 421% em relação ao mês anterior. Nessa data, constatou-se que 585 municípios já haviam sido atingidos pela doença, de modo que Belo Horizonte, Uberlândia e Juiz de Fora apresentavam o maior número de casos confirmados, respectivamente. Até o dia 16 de junho, foram confirmados 537 óbitos relacionados com a COVID-19 em todo o Estado.

## 2.2 Modelagem matemática

A Figura 2 representa o diagrama de blocos com as oito classes epidemiológicas de indivíduos, representando o progresso da doença: suscetíveis (*S*), expostos (*E*), infectados

sintomáticos (*I*), super-disseminadores (*P*), infectados assintomáticos (*A*), hospitalizados (*H*), recuperados (*R*) e óbitos (*F*).

**Figura 2:** Diagrama de blocos para as oito classes epidemiológicas do modelo matemático.



Fonte: Adaptado de Ndairou et al. (2020).

O modelo matemático utilizado no presente estudo foi adaptado de Ndairou et al. (2020), sendo representado pelas Equações de (1) – (8). A adaptação no modelo foi realizada pela consideração da taxa de recuperação para a classe assintomática, linha pontilhada da Figura 2. Assim, foi acrescentado o termo  $\gamma_i A$  às Equações (5) e (7). Outra modificação realizada no modelo de Ndairou et al. (2020) foi a consideração do coeficiente de transmissão variando com o tempo (Equação (9)).

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{I}{N} S - l\beta \frac{H}{N} S - \beta' \frac{P}{N} S \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta \frac{I}{N} S + l\beta \frac{H}{N} S + \beta' \frac{P}{N} S - kE \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = k\rho_1 E - (\gamma_a + \gamma_i)I - \delta_i I \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dt} = k\rho_2 E - (\gamma_a + \gamma_i)P - \delta_p P \quad (4)$$

$$\frac{dA}{dt} = k(1 - \rho_1 - \rho_2)E - \gamma_i A \quad (5)$$

$$\frac{dH}{dt} = \gamma_a(I + P) - \gamma_r H - \delta_h H \quad (6)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma_i(I + P + A) + \gamma_r H \quad (7)$$

$$\frac{dF}{dt} = \delta_i I + \delta_p P + \delta_h H \quad (8)$$

em que  $N$  é a população total local,  $\beta'$  é o coeficiente de transmissão relativo aos super-disseminadores,  $l$  é a transmissibilidade relativa dos pacientes hospitalizados,  $k$  é a taxa de infectados que se tornam infectados (sintomáticos, super-disseminadores e assintomáticos),  $\rho_1$  é a taxa de indivíduos expostos que se tornam infectados sintomáticos (classe I),  $\rho_2$  é a taxa de indivíduos expostos que se tornam super-disseminadores,  $\gamma_a$  é a taxa média de indivíduos sintomáticos e super-disseminadores que se tornam hospitalizados,  $\gamma_i$  é a taxa média de recuperação dos indivíduos não hospitalizados,  $\gamma_r$  é a taxa média de recuperação dos indivíduos hospitalizados e  $\delta_i$ ,  $\delta_p$  e  $\delta_h$  são taxa de mortalidade dos indivíduos infectados, super-disseminadores e hospitalizados, respectivamente.

Sabe-se que o coeficiente de transmissão humano a humano ( $\beta$ ) varia ao longo do tempo devido a diminuição do contato, à medida que os indivíduos da classe exposta passam para classe infectada. Portanto, de acordo com Eikenberry et al. (2020), o  $\beta(t)$  é definido pela Equação (9).

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_0, & t < t_0 \\ \beta_{min} + (\beta_0 - \beta_{min})e^{(-r(t-t_0))}, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (9)$$

em que  $\beta_{min}$  é o coeficiente de transmissão mínimo,  $r$  é o coeficiente de decaimento do contato humano a humano e  $t_0$  é o tempo em que se inicia a taxa de decaimento.

Para a formulação do modelo matemático, foram adotadas algumas hipóteses simplificadoras: a evolução da classe assintomática foi somente para classe recuperada, ou seja, não houve óbitos de indivíduos infectados assintomáticos, a população total local ( $N$ ) é constante e considerou-se que todos indivíduos infectados (sintomáticos, super-



disseminadores e hospitalizados) foram testados, portanto o número de casos confirmados é calculado por:  $N_c = I + P + H$ .

Os parâmetros utilizados para a simulação do modelo (Tabela 1) foram estimados para o período de 04/03/2020 a 04/07/2020, baseado nos dados reais obtidos no site da Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais (SES, 2020). A métrica estatística utilizada para verificar a adequação do modelo foi pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). A partir do modelo matemático, foram simulados diferentes cenários para analisar alguns aspectos específicos do avanço da pandemia. Inicialmente, foi realizada a projeção para os 30 dias futuros (até 04 de agosto de 2020). Para a avaliação deste cenário foi considerado que a taxa de isolamento social estava em torno de 50%. Optou-se por realizar essa projeção, para um período menor, com o intuito de reduzir as incertezas devido à dinâmica dos dados ao longo do tempo. Adicionalmente, fez-se a projeção da doença para o período de um ano, visando identificar a data do pico da pandemia. Por fim, foram analisadas diferentes taxas de isolamento social, com o objetivo de verificar o impacto no número de casos e óbitos até o dia 04/12/2020.

**Tabela 1:** Parâmetros para simulação do modelo matemático.

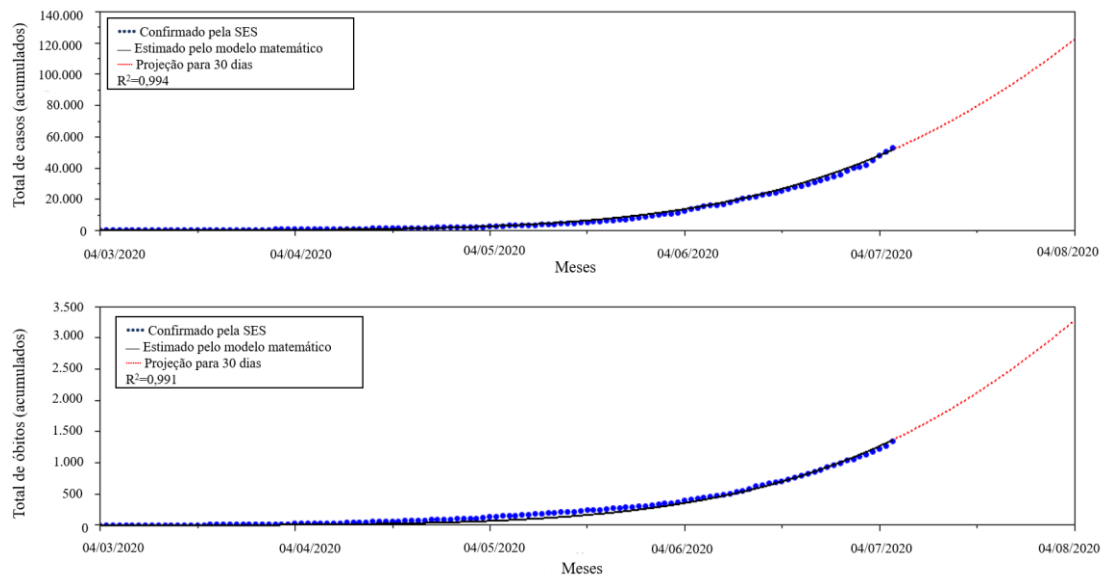
$\beta_0 = 1,20 \text{ dia}^{-1}$	$\rho_2 = 1,0 \cdot 10^{-3}$	$\delta_p = 0,1 \text{ dia}^{-1}$
$l = 0,75$	$\gamma_a = 0,14 \text{ dia}^{-1}$	$\delta_h = 0,13 \text{ dia}^{-1}$
$\beta' = 6,0 \text{ dia}^{-1}$	$\gamma_i = 0,40 \text{ dia}^{-1}$	$t_0 = 37 \text{ dias}$
$k = 0,50 \text{ dia}^{-1}$	$\gamma_r = 0,43 \text{ dia}^{-1}$	$\beta_{min} = 0,15 \text{ dia}^{-1}$
$\rho_1 = 0,48$	$\delta_i = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ dia}^{-1}$	$r = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ dia}^{-1}$

Fonte: Autores.

### 3. Resultados e Discussão

A partir da Figura 3 é possível comparar os dados reais acumulados da COVID-19 em Minas Gerais com os dados estimados pelo modelo matemático. Nota-se que o modelo proposto representou de forma adequada os casos confirmados e óbitos durante os quatro primeiros meses da pandemia. Os valores obtidos do coeficiente de determinação foram elevados, sendo  $R^2=0,994$  para o número de casos e  $R^2=0,991$  para os óbitos.

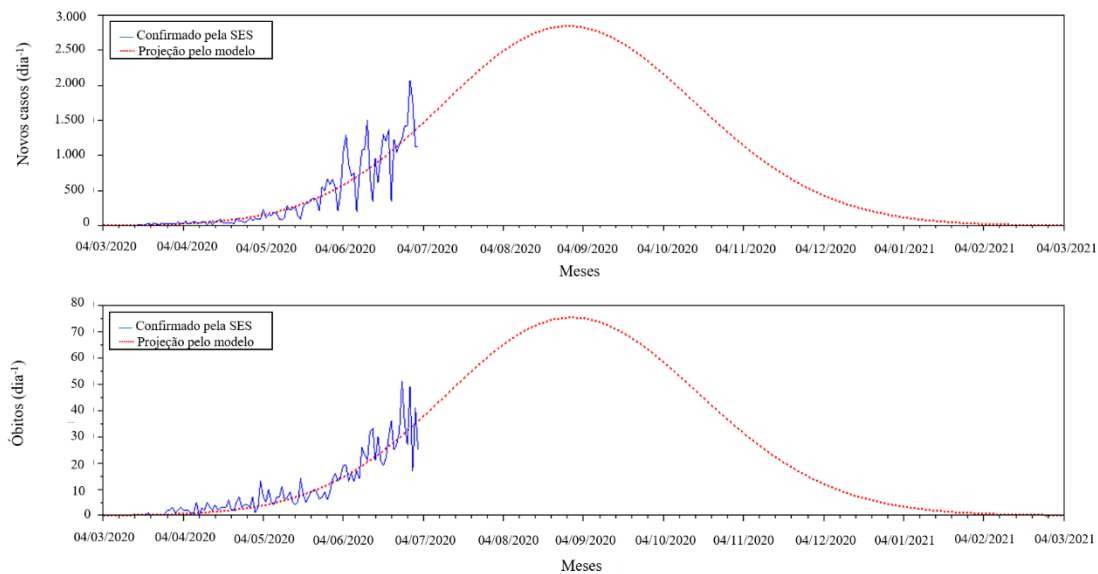
**Figura 3:** Projeção do modelo matemático para o número total de casos e óbitos da COVID-19 em MG para 30 dias.



Fonte: Autores (2020).

A partir da projeção do modelo para 30 dias (curva em vermelho pontilhada da Figura 3) obteve-se uma estimativa de aproximadamente 128.692 casos da doença e 3.459 óbitos em todo o Estado até o dia 04/08/2020. Caso a tendência do avanço da COVID-19 se mantenha, o número de casos da doença e também de óbitos poderá dobrar em um período de um mês. Com a finalidade de prever pico da pandemia no Estado, o modelo também foi projetado para 1 ano de pandemia (Figura 4).

**Figura 4:** Projeção do modelo matemático para o número diário de casos e óbitos da COVID-19 em MG para 1 ano.



Fonte: Autores (2020).

É possível observar que as curvas estimadas na Figura 4 seguiram a tendência dos dados confirmados pela SES. De acordo com a projeção do modelo matemático, o pico ocorrerá no mês de agosto, próximo ao dia 20/08/2020, com cerca de 2.843 novos casos/dia e 75 óbitos/dia. Tais resultados são similares aos dados projetados pela SES (2020), o qual estimou 2.200 novos casos e 52 óbitos diários, por meio do Boletim Epidemiológico 10. No entanto, a projeção para o pico da doença no boletim será em 14/07/2020, aproximadamente um mês antes do encontrado pela simulação do modelo. Vale ressaltar que, a projeção seguiu a tendência dos dados do período analisado, o que pode mudar com o tempo, dependendo das ações implementadas para a contenção da pandemia.

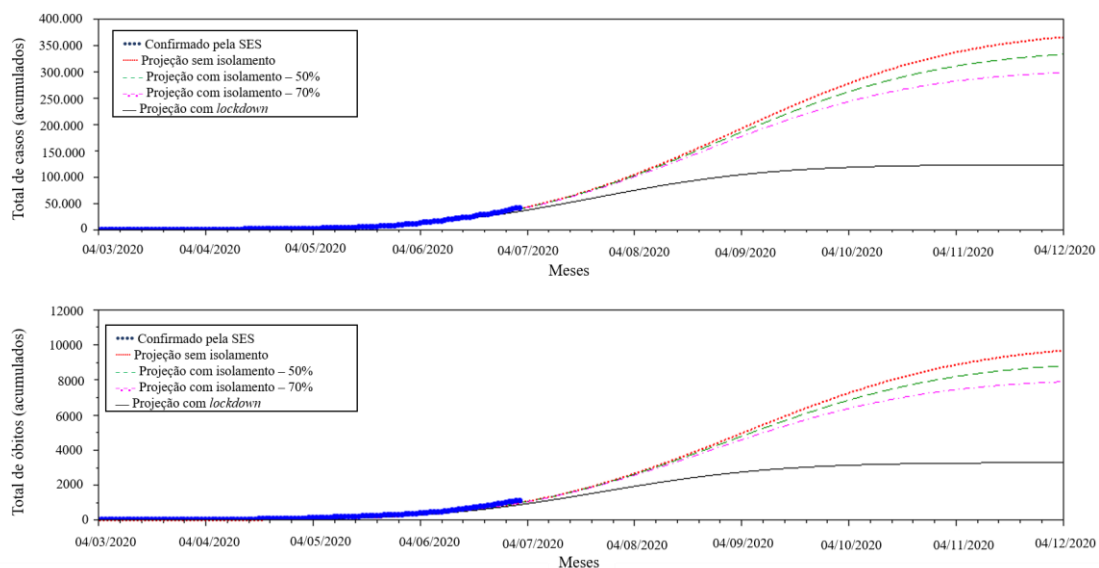
Apesar das duas projeções apresentarem valores aproximados, observa-se que o modelo proposto nesse estudo estima um aumento de 29,23% no número de casos e 44,23% no número de óbitos, em relação à projeção da SES. A discrepância nos valores pode ser explicada, principalmente, pela diferença na taxa de letalidade estimada por cada estudo, de modo que a SES projeta uma taxa de 2,48% enquanto o presente estudo projeta 2,65%.

É importante destacar que, o Boletim Epidemiológico 10 (SES) afirma que a taxa de letalidade da COVID-19 no Brasil é de 4,6%. Uma das justificativas para a discrepância entre as taxas de letalidade nacional e estadual pode ser adoção precoce de medidas de isolamento em Minas Gerais. Todavia, outra hipótese pode estar relacionada com a subnotificação da

doença no estado. Nesse sentido, Alves et al. (2020) apontam indícios sobre a subnotificação dos casos de COVID-19 em Minas Gerais, como a alta porcentagem de notificações indefinidas (89% em 6 de maio) e o elevado número de óbitos por Síndrome Respiratória Aguda Grave, em comparação com 2019. Além disso, os autores ressaltaram a baixa cobertura de testes no Estado, sendo três vezes inferior à média nacional.

Segundo Zhu et al. (2020), medidas de distanciamento afetam diretamente na taxa de transmissão da COVID-19, impactando no achatamento curva epidemiológica. A Figura 5 mostra a estimativa do modelo matemático proposto no presente estudo para a evolução do número de casos e de óbitos em Minas Gerais, quando adotadas diferentes medidas de distanciamento como isolamento social. É importante salientar que, essas projeções foram obtidas mantendo fixos os parâmetros do modelo para todo o período analisado (até 04 de dezembro).

**Figura 5:** Estimativa do número total de casos e óbitos para diferentes taxas de isolamento social.



Fonte: Autores (2020).

Como o esperado, quanto maior a taxa de isolamento, menor o número de casos e óbitos acumulados. Avaliando os valores obtidos pelas simulações, têm-se, aproximadamente, um total de 379.973 casos estimados para o cenário sem isolamento até o dia 04/12/2020. Ao adotar o cenário com 50% de taxa de isolamento, foi projetada uma diminuição de 9,8% no número de pessoas contaminadas, totalizando 342.681 casos. Com 70% de isolamento social, estima-se que haja 19,8% de redução (304.753 casos) em comparação com a projeção sem

isolamento. Já quando foi simulado o *lockdown*, ou seja, com total isolamento social, são esperados 124.248 casos da doença, o que representa uma queda de 67,3%.

Ao analisar os óbitos, nota-se que o cenário sem isolamento estima 10.060 óbitos em Minas Gerais até o fim do ano de 2020. Seguindo a mesma tendência observada para o número de casos, o modelo projeta uma redução de 987 vítimas com 50% de isolamento (9.073 óbitos); 1.991 vítimas com 70% de isolamento (8.069 óbitos) e 6.770 vítimas com *lockdown* (3.290 óbitos). De modo similar, a SES (2020) estimou 3.496 óbitos até o início de dezembro de 2020. No entanto, não foram fornecidos dados sobre a taxa de isolamento social para essa projeção, tampouco o número total de casos.

Comparando o cenário sem isolamento com os demais cenários, a taxa de redução no número total de casos e de óbitos fica entre 9,8% a 67,3%. Esses valores estão de acordo com a recente revisão sistemática do Instituto Cochrane, com base em 29 estudos de modelagem da pandemia, evidenciou que as medidas de isolamento social reduzem em 44% a 81% o número de pessoas com a doença e em 31% a 63% o número de óbitos (Nussbaumer-Streit et al., 2020).

Entretanto, manter altas taxas de isolamento por um longo período, não seria viável devido ao impacto causado na economia. Portanto, torna-se necessário estimar um tempo de bloqueio, de modo que a taxa de disseminação da infecção esteja sob controle, bem como a possibilidade do país recuperar a economia. A introdução de vários níveis de bloqueio pode ser uma saída, mas requer planejamento e adequação da evolução da doença (Lalwani et al., 2020). Ademais, a implementação das medidas de isolamento social deve ser feita de forma gradual respeitando as características socioeconômicas, culturais e os sistemas de saúde de cada município. Nesse sentido, Aquino et al. (2020) recomendam que sejam combinados diferentes tipos de intervenções para que haja uma significativa redução na taxa de transmissão do vírus.

#### **4. Conclusões**

O estudo apresentado visou estimar, utilizando um modelo matemático, a evolução da dinâmica de transmissão da COVID-19 para o estado de Minas Gerais. Pela análise dos resultados numéricos, pode-se afirmar que estes se adaptaram bem aos dados reais e refletem a realidade do Estado.

As previsões realizadas pelas simulações mostraram que as medidas de distanciamento social são eficazes no achatamento da curva de contaminação, impactando diretamente no

número total de infectados e óbitos. Esses estudos são úteis para avaliar as respostas associadas a diferentes taxas de distanciamento, onde, quando e por qual período deve ser implementadas. Assim, os resultados obtidos pela simulação do modelo podem ser utilizados para maximizar as estratégias de intervenção.

Os modelos matemáticos, como proposto por este trabalho, podem contribuir para revelar aspectos importantes sobre a disseminação do vírus numa determinada população e nortear medidas a serem adotadas para a sua contenção. Entretanto, os dados reais são dinâmicos, mudando com o transcorrer da pandemia. Logo, os resultados previstos pelo modelo, devem ser atualizados com frequência para reduzir as incertezas na previsão.

Por fim, por ser uma doença nova, este estudo tem suas limitações, principalmente em se tratando da dinâmica de transmissão, ainda pouco conhecida. Partindo desse pressuposto, sugere-se ainda, a avaliação da transmissibilidade dos indivíduos assintomáticos, questão ainda controversa até mesmo para os epidemiologistas. Outro ponto a ser estudado é a implementação nas subclasses do modelo matemático de parâmetros relacionados a idade, sexo, comorbidade, quantidade de leitos e efeito do uso de máscaras. Além disso, recomenda-se avaliar projeções para períodos de isolamento social intercalados com abertura gradual do comércio, com o intuito de nortear os estados a adotarem medidas para desacelerar a disseminação da infecção e diminuir os impactos negativos na economia.

## Referências

Abou-Ismaïl, A. (2020). Compartmental Models of the COVID-19 Pandemic for Physicians and Physician-Scientists. *SN Comprehensive Clinical Medicine*. <https://doi.org/10.1007/s42399-020-00330-z>

Almeida, I. M. (2020). Proteção da saúde dos trabalhadores da saúde em tempos de COVID-19 e respostas à pandemia. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, 45, e17. <https://doi.org/10.1590/scielopreprints.140>

Alves, C. R. L., Alvim, C. G., Machado, E., Giatti, L., Barreto, S. M., & Tupinambás, U. (2020). *Por que ainda não é o momento para flexibilizar o isolamento social em Minas Gerais? Nove argumentos com embasamento científico*. Universidade Federal de Minas Gerais. <https://www.sinter-mg.org.br/wp-content/uploads/>

Aquino, E. M. L., Silveira, I. H., Pescarini, J. M., Aquino, R., & Souza-Filho, J. A. (2020). Medidas de distanciamento social no controle da pandemia de COVID-19: potenciais impactos e desafios no Brasil. *Ciência & Saúde Coletiva*, 25(supl 1), 2423–2446. <https://doi.org/10.1590/1413-81232020256.1.10502020>

Barbosa, R. S., Soares, A. S. S., Coelho, D. A., & Santos, D. A. (2016). Software de simulações dos modelos Sir e Seir como ferramenta de gerenciamento ambiental de doenças epidemiológicas. *Scientia Cum Industria*, 4(2), 114–118. <https://doi.org/10.18226/23185279.v4iss2p114>

COES. (2020). *Boletim epidemiológico*. Centro de operações de emergência em Saúde Pública. <http://coronavirus.saude.mg.gov.br/boletim>

Duczmal, L. H., Almeida, A. C. L., Duczmal, D. B., Alves, C. R. L., Magalhães, F. C. O., Lima, M. S., Silva, I. R., & Takahashi, R. H. C. (2020). Vertical social distancing policy is ineffective to contain the COVID-19 pandemic. *Cadernos de Saúde Pública*, 36(5), e00084420. <https://doi.org/10.1590/0102-311x00084420>

Eikenberry, S. E., Mancuso, M., Iboi, E., Phan, T., Eikenberry, K., Kuang, Y., Kostelich, E., & Gumel, A. B. (2020). To mask or not to mask: Modeling the potential for face mask use by the general public to curtail the COVID-19 pandemic. *Infectious Disease Modelling*, 5, 293–308. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.04.001>

Goyal, A., Liao, L. E., & Perelson, A. S. (2019). Within-host mathematical models of hepatitis B virus infection: Past, present, and future. *Current Opinion in Systems Biology*, 18, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.coisb.2019.10.003>

Ibarra-Vega, D. (2020). Lockdown, one, two, none, or smart. Modeling containing covid-19 infection. A conceptual model. *Science of The Total Environment*, 730, 138917. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138917>

IBGE. (2019). *População estimada*. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais.

IBGE. (2020). *Área da unidade territorial: Área territorial brasileira*. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg.html>

Kim, S., Lee, J., & Jung, E. (2017). Mathematical model of transmission dynamics and optimal control strategies for 2009 A/H1N1 influenza in the Republic of Korea. *Journal of Theoretical Biology*, 412, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2016.09.025>

Lalwani, S., Sahni, G., Mewara, B., & Kumar, R. (2020). Predicting optimal lockdown period with parametric approach using three-phase maturation SIRD model for COVID-19 pandemic. *Chaos, Solitons & Fractals*, 138, 109939. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109939>

Ndairou, F., Area, I., Nieto, J. J., & Torres, D. F. M. (2020). Mathematical modeling of COVID-19 transmission dynamics with a case study of Wuhan. *Chaos, Solitons & Fractals*, 135, 109846. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109846>

Nussbaumer-Streit, B., Mayr, V., Dobrescu, A. I., Chapman, A., Persad, E., Klerings, I., Wagner, G., Siebert, U., Christof, C., Zachariah, C., & Gartlehner, G. (2020). Quarantine alone or in combination with other public health measures to control COVID-19: a rapid review. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD013574>

SES. (2020). *Painel de Monitoramento dos Casos*. <http://coronavirus.saude.mg.gov.br/painel>

Yang, H. M., & Ferreira, C. P. (2008). Assessing the effects of vector control on dengue transmission. *Applied Mathematics and Computation*, 198(1), 401–413. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.08.046>

Zhu, W., Li, X., Wu, Y., Xu, C., Li, L., Yang, J., & Fang, S. (2020). Community quarantine strategy against coronavirus disease 2019 in Anhui: An evaluation based on trauma center patients. *International Journal of Infectious Diseases*, 96, 417–421. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.04.016>



**Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Nádia Guimarães Sousa – 25%

Anamaria de Oliveira Cardoso – 25%

Renato Fleury Cardoso – 25%

Alex Garcez Utsumi – 25%