



Universidade do Estado de Mato Grosso

Campus Universitário de Sinop

Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas

Mestrado Profissional em Matemática em Rede

Nacional PROFMAT



Jocenir Aureliano de Azevedo

**UM MODELO MATEMÁTICO DISCRETO DO
TIPO SIR APLICADO À COVID-19 E
CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DA
MODELAGEM MATEMÁTICA NO ENSINO
MÉDIO**

Sinop - MT

Outubro de 2021

Jocenir Aureliano de Azevedo

UM MODELO MATEMÁTICO DISCRETO DO
TIPO SIR APLICADO À COVID-19 E
CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DA
MODELAGEM MATEMÁTICA NO ENSINO
MÉDIO

Dissertação de mestrado apresentada a Faculdade de Ciências Exatas da Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT, Campus Universitário de Sinop, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Matemática no Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional - PROFMAT.

Orientador: Prof. Dr. Raul Abreu de Assis

Co-orientadora: Profa. Dra. Luciana Mafalda Elias de Assis

Sinop - MT

Outubro de 2021

Walter Clayton de Oliveira CRB 1/2049

A994u AZEVEDO, Jocenir Aureliano de.
Um Modelo Matemático Discreto do Tipo Sir Aplicado à Covid-19 e Considerações Sobre o Uso da Modelagem Matemática no Ensino Médio / Jocenir Aureliano de Azevedo - Sinop, 2021.
85 f.; 30 cm. (ilustrações) Il. color. (sim)

Trabalho de Conclusão de Curso
(Dissertação/Mestrado) - Curso de Pós-graduação Stricto Sensu (Mestrado Profissional) Profmat, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Câmpus de Sinop, Universidade do Estado de Mato Grosso, 2021.
Orientador: Prof. Dr. Raul Abreu de Assis
Coorientador: Profa. Dra. Luciana Mafalda Elias de Assis

1. Modelagem Matemática. 2. Base Nacional Comum Curricular. 3. Simulações Numéricas. 4. Modelo Matemático Discreto. I. Jocenir Aureliano de Azevedo. II. Um Modelo Matemático Discreto do Tipo Sir Aplicado à Covid-19 e Considerações Sobre o Uso da Modelagem Matemática no Ensino Médio: .

CDU 517:37



ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
FACET – FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATEMÁTICA EM REDE NACIONAL- PROFMAT
UNEMAT - SINOP



JOCENIR AURELIANO DE AZEVEDO

UM MODELO MATEMÁTICO DISCRETO DO TIPO SIR APLICADO À COVID-19 E
CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DA MODELAGEM MATEMÁTICA NO ENSINO
MÉDIO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional – Profmat da Universidade do Estado de Mato Grosso/UNEMAT – Campus Universitário de Sinop, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Matemática.

Orientador: Prof. Dr. Raul Abreu Assis
Aprovado em 27/10/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raul Abreu Assis
UNEMAT – SINOP - MT

Prof. Dr. Érico Fernando de Oliveira Martins
UNEMAT – SINOP - MT

Prof. Dr. Marco Aurelio Granero Santo
IFSP - SÃO PAULO - SP

Sinop/MT
2021



Programa de Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional – PROFMAT/UNEMAT/Sinop/MT
Av. dos Ingás, 3001, CEP: 78.550-000, Sinop, MT
Tel/PABX: (66) 3511 2100. www.unemat.br – Email: profmat@unemat.br

UNEMAT
Universidade do Estado de Mato Grosso
Carlos Alberto Reyes Maldonado

*Aos meus pais, minha esposa e meus
filhos.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente Deus por sua indescritível presença em todos momentos, à minha esposa Ana Cláudia Borsa de Azevedo, por todo apoio e dedicação para com nossos filhos, que com paciência e compreensão zelou por nossa família quando me ausentei pela busca do objetivo de me qualificar profissionalmente.

Agradeço também ao meu orientador Raul Abreu de Assis que, sempre que necessário, de imediato se fez presente com suas colaborações apontando com precisão o caminho da pesquisa, compartilhando de forma generosa suas experiências acadêmicas. À minha co-orientadora Luciana Mafalda Elias de Assis que não mediu esforços e dedicação, tanto no apoio quanto na paciência e compreensão dos desafios que me surgiram para a construção dessa pesquisa.

Aos professores e profissionais que atuam no programa de pós-graduação do PROFMAT-Sinop, que contribuíram direta ou indiretamente. Aos colegas e amigos acadêmicos da turma, em que a parceria e partilha de experiências nos estudos foi fundamental no período da qualificação.

Pelo apoio financeiro agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES por conceder bolsas institucionais ao programa de pós-graduação do PROFMAT, no qual o auxílio me foi de grande ajuda nas despesas necessárias.

“O ser humano é o pico da evolução nesse planeta desde o nível mais inferior de criaturas até como você chegou, você verá que elas as criaturas tornam-se cada vez menos acessíveis às influencias ao seu redor ... elas não migram para outro lugar elas não tem a capacidade O *Corona* não tem a capacidade de se mover, é você que está proporcionando o transporte dele gratuito, os seres humanos as criaturas mais móveis do planeta estão fornecendo o transporte, nossa mobilidade, se não a tornarmos um pouco mais consciente a natureza controlará”. - Sadhguru

Resumo

O fenômeno do contágio pelo coronavírus, causador da COVID-19, é modelado matematicamente. Em particular, são utilizados dados relativos ao número de casos no Estado de Mato Grosso, Brasil, para elaborar simulações e previsões sobre tal fenômeno. Os parâmetros do modelo foram estimados tanto através de dados na literatura científica quanto através do método de ajuste por mínimos quadrados. Dentre as simulações, destacam-se aquelas que estimam o impacto da adesão, ou não, da população às medidas de distanciamento social e uso de máscaras. Um dos resultados mostra que se 70% da população aderisse a ambas medidas, teríamos a extinção do contágio em poucos meses. Cabe ressaltar que nossa pesquisa teve caráter exploratório e tais resultados, apesar de servirem de indicativos, não têm caráter conclusivo. Finalmente, observamos que a matemática utilizada para elaboração do modelo foi restrita ao uso de equações de diferenças e planilhas eletrônicas de forma que tal modelo possa inspirar o uso da Modelagem Matemática como técnica de apoio ao ensino de Matemática no Ensino Médio.

Palavras chave: Modelagem Matemática, Base Nacional Comum Curricular, Simulações Numéricas, Modelo Matemático Discreto.

Abstract

The phenomenon of contagion by the coronavirus, which causes COVID-19, is mathematically modeled. In particular, data relating to the number of cases in the State of Mato Grosso, Brazil, are used to develop simulations and define the phenomenon. The model parameters were estimated both from data in the scientific literature and using the squared parameter adjustment method. Among the simulations, those that estimate the impact of the population's adherence or not to measures of social distancing and the use of masks stand out. One of the results shows that if 70% of the population adhered to both measures, we would have the contagion extinction in a few months. It is noteworthy that our research is exploratory in nature and such results, despite being indicative, are not conclusive. Finally, we observed that the mathematics used to prepare the model was restricted to the use of difference equations and electronic spreadsheets so that such model can inspire the use of Mathematical Modeling as a support technique for teaching Mathematics in High School.

Keywords: Mathematical Modeling, National Curricular Base, Numerical Simulations, Discrete Mathematical Model.

Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de figuras	xiv
1 Introdução	1
2 A importância do tema COVID-19 como pesquisa científica e para estudantes do Ensino Médio	4
2.1 Propostas da BNCC no Ensino Médio com Modelagem Matemática	6
3 O Modelo SIR, Dados, Estimativas de Parâmetros e as Comparações dos Resultados Obtidos	11
3.1 Descrição do Modelo SIR	13
3.2 Significado dos Parâmetros Presentes no Modelo	17
3.2.1 Parâmetro r : fração de recuperação semanal dos indivíduos infectados	17
3.2.2 Parâmetro a : taxa de perda da imunização natural	18
3.2.3 Parâmetro μ : mortalidade dos indivíduos infectados	19
3.2.4 Parâmetro p : coeficiente de contágio	22
3.3 Consulta dos Dados e Simulações Numéricas	23
3.3.1 Obtenção dos dados da COVID-19	23
3.3.2 Inserção dos dados e equações do Modelo	28
3.3.3 Ajuste por mínimos quadrados	31
3.3.4 Coeficiente de determinação R^2	36

3.3.5	Número de óbitos	39
3.4	Utilização dos Métodos Para Estimar Parâmetros e Analisar os Resultados	39
3.5	Relação entre o Parâmetro p e o Número de Infectados	53
3.5.1	Parâmetro p variável	53
3.5.2	Escolha do parâmetro p adequado	61
3.6	Simulações e Resultados	62
3.6.1	Medidas de prevenção para a redução de contágio, distanciamento social e uso de máscaras	63
3.6.2	Comparação dos resultados para a adesão às medidas de biossegurança	72
4	Considerações Finais	80
	Considerações finais	80
4.1	Conclusões	80
4.2	Recomendações	81
	Referências bibliográficas	85

Lista de Figuras

3.1	Esquema do capítulo, com as principais relações entre etapas descritas nas seções.	12
3.2	Esquema compartimental para o Modelo SIR ilustrando como os indivíduos migram de um compartimento para outro.	17
3.3	Esquema em compartimentos para representar a transição para obtenção da taxa de mortalidade, isto é, o número total de mortes durante o período de infecção distribuído em três semanas I_0 , I_1 e I_2 . Para cada semana de infecção, consideramos a mortalidade μI_i e o número de indivíduos que se recuperam $\frac{1}{3}I_i$, onde $i = 0, 1, 2$	20
3.4	Representação gráfica da Equação 3.6 para a solução, com a utilização do <i>software</i> Geogebra.	22
3.5	Inserção dos dados em uma planilha.	24
3.6	Agrupamento dos dados semanais, onde foram consideradas as datas do fim da semana.	25
3.7	Agrupamento dos dados semanais, onde foram consideradas as datas do fim da semana e os casos acumulados das últimas três semanas.	26
3.8	Representação dos Parâmetros e valores iniciais para a simulação em uma planilha eletrônica onde estão nas células $B2$, $B4$ e $B5$ respectivamente, correspondem aos parâmetros μ (Eq. 3.2), a (Eq. 3.3) e r (Eq. 3.7). A célula $B6$ corresponde ao número aproximado de habitantes do Estado de Mato Grosso, nas células $B7$ e $F2$ os valores são iguais, as células $B8$ e $G2$ correspondem a quantidade de recuperados no instante inicial $t = 0$, e para a célula $B3$ queremos atribuir o valor que melhor se ajusta aos dados.	29
3.9	Inserção dos dados para simulação.	30
3.10	Exibição das fórmulas inseridas na planilha.	31

3.11	Resultados para a simulação, em que o ajuste para a célula <i>B3</i> (ver Figura 3.8) que corresponde ao valor do parâmetro, sendo obtido $p \approx 0,000000179027300$, fornece a melhor aproximação da curva I_t dos valores da amostra.	32
3.12	Inserção do comando para <i>Erro</i> e <i>Erro Quadrado</i>	33
3.13	Inserção do comando para a obtenção da soma dos “ <i>Erros Quadrados</i> ”.	33
3.14	Seleção da ferramenta <i>Solver</i>	34
3.15	Valores adicionais que melhoram o ajuste da ferramenta <i>Solver</i>	35
3.16	Seleção dos comandos da ferramenta <i>Solver</i>	35
3.17	Seleção dos comandos da ferramenta <i>RQUAD</i>	38
3.18	Seleção dos intervalos para uso da ferramenta <i>RQUAD</i>	38
3.19	Representação das inserções da fórmula para a obtenção do número de óbitos em que $\mu = B2$, $p = B3$, $S_1 = M2$ e $I_1 = N2$ em que o número de óbitos para semana $t = 1$ dado por $= B2 * B3 * N2 * M2$ inserido na célula <i>P2</i> . A soma dos valores da coluna <i>P</i> fornece o número de óbitos da primeira semana para a simulação.	40
3.20	Representação gráfica da tabela 3.11 em que os y_t (dados do Painel COVID) são os valores da coluna <i>D</i> e I_t os valores obtidos da coluna <i>F</i> . Ajustados com a melhor aproximação pela ferramenta <i>Solver</i>	41
3.21	Simulação com alterações para o período inicial considerando a exclusão dos valores iniciais onde na coluna <i>D</i> estão os dados do Painel COVID (y_t) e na coluna <i>F</i> os valores simulados I_t para o período de 03/03/2020 à 02/06/2020 . Ajustados por mínimos quadrados com a melhor aproximação, o processo utilizou a ferramenta <i>Solver</i> como célula objetivo <i>I16</i>	43
3.22	Representação gráfica para a simulação do novo período, considerando a Fig. 3.21, em que (y_t) são os valores da coluna <i>D</i> . Consideramos I_t no período de 03/03/2020 à 02/06/2020, cujos valores obtidos estão presentes na coluna <i>F</i> . Ajustados com a melhor aproximação pela ferramenta <i>Solver</i>	43
3.23	Representação gráfica para todo o período (03/03/2020 à 25/05/2021), que representa a simulação do parâmetro $p \approx 2,325 \cdot 10^{-7}$ em que os dados do Painel COVID (y_t) são os pontos azuis e I_t a curva cinza.	47
3.24	Representação da planilha para inserção dos novos parâmetros.	48
3.25	Representação das equações nas células em que mudam os parâmetros.	49

3.26	Representação gráfica dos parâmetros para três períodos ajustados por mínimos quadrados sendo $p_1 = 2,534 \cdot 10^{-7}$ para o período de 03/03/2020 à 23/06/2020, $p_2 = 1,235 \cdot 10^{-7}$ para 30/06/2020 à 10/11/2020 e $p_3 = 2,291 \cdot 10^{-7}$ para 17/11/2020 à 25/05/2021 em que os dados do Painel COVID (y_t) são os pontos azuis D e I_t a curva cinza para o período total de 03/03/2020 à 25/05/2021.	52
3.27	Ilustração da obtenção dos valores do parâmetro p em uma planilha eletrônica, em parte do período.	54
3.28	Ilustração das fórmulas para obtenção dos valores do parâmetro p em uma planilha eletrônica, em parte do período.	55
3.29	Inserção dos dados para simulação com a média móvel dos parâmetros	56
3.30	Representação das fórmulas inseridas nas coluna M e N para simulação com a média móvel dos parâmetros	56
3.31	Representação gráfica do ajuste de \bar{p} médio das últimas três semanas onde I_t representa os valores simulados e Dados do painel COVID (y_t) representa a amostra comparada	59
3.32	Representação da inserção das fórmulas para p variando semanalmente.	60
3.33	Representação gráfica do ajuste de p semanal onde I_t representa os valores simulados e Dados do painel COVID (y_t) representa a amostra comparada.	60
3.34	Representação gráfica dos parâmetros p e \bar{p} no qual podem ser comparados os valores em relação ao tempo.	62
3.35	Representação em diagrama dos possíveis contatos para um indivíduo infectado.	65
3.36	Ilustração para inserção dos dados, são inseridas as células $B9$ maior p estimado, $B10$ número de óbitos para o parâmetro p da célula $B9$, $B11$ p obtido por ajuste de mínimos quadrados e $B12$ número de óbitos correspondente ao parâmetro p da célula $B11$	69
3.37	Valores inseridos na planilha eletrônica de acordo com cada interação Infectado-Suscetível, em que cada célula representa a chance de infecção sobre o risco real: $C47$ para ambos com máscara, $C48$ apenas suscetível com máscara, $C49$ ambos sem máscaras, $C50$ apenas infectado com máscara. Para a relação do distanciamento social, foram utilizados os valores referentes às células $C54$, $C55$, $C56$ e $C57$ de forma análoga à adesão ao uso de máscaras.	69

3.38	Valores inseridos na planilha de acordo com cada interação Infectado-Suscetível onde, na célula $A17$, é inserido o valor percentual.	70
3.39	Inserção da fórmula para o impacto de $c_1 : B20$ e $c_2 : B28$ sobre o parâmetro $p_{max} : B3$, onde obtemos $p : B20 * B28 * B3$	71
3.40	Valores inseridos na planilha de acordo com cada interação Infectado-Suscetível, onde $A17$ e $A19$ representam Infectados que aderem ou não ao uso de máscaras e $B17$ e $B19$ representam Suscetíveis que aderem ou não ao uso de máscaras para ambos com máscara. De forma análoga, as células $A25$, $A27$, $B25$ e $B27$ representam a adesão ou não ao distanciamento social.	71
3.41	Calibração para p_{MQ} (período inicial): comparação entre o cenário em que não são adotadas medidas de biossegurança com 26,01% da população utilizando máscaras faciais e aderindo ao distanciamento/isolamento social.	73
3.42	Comparação de p inicial entre o cenário em que não são adotadas medidas de biossegurança com 26,01% da população utilizando máscaras faciais e aderindo ao distanciamento social. Os pontos cinzas representam os valores sem a adesão ao uso de máscaras (p_1) e a linha amarela cinza os valores obtidos por $(c_1 c_2 p_1)$	74
3.43	Ilustração gráfica do impacto para $p \approx 1,52309011 \cdot 10^{-7}$ com 50% de adesão às medidas de biossegurança (utilizando máscaras faciais).	75
3.44	Comparação com 70% e 100% da população utilizando máscaras faciais.	76
3.45	Comparação entre os diferentes cenários simulados em que foram contabilizados os óbitos.	77
3.46	Gráfico que ilustra a redução percentual no parâmetro p de acordo com a adesão social às medidas de controle de biossegurança.	78
3.47	Comparação entre o cenários que leva em consideração o número máximo de infectados para o período em que em algum instante t é atingido o valor máximo.	79

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, modelos matemáticos em epidemiologia são uma importante ferramenta na análise da propagação e controle de doenças infecciosas como é o caso da COVID-19. Neste contexto, são consultados os dados existentes da COVID-19 para serem comparados a um Modelo matemático discreto epidemiológico em que o indivíduo pode pertencer a três diferentes classes: Suscetível, Infectado e Recuperado (SIR). O Modelo matemático proposto neste trabalho é analisado com a finalidade de se obter resultados quanto à eficácia de medidas de prevenção para a redução de contágio da doença, levando-se em conta o distanciamento social e o uso de máscaras faciais. Um outro aspecto relevante para a realização do estudo e análise do Modelo proposto associa-se ao uso da Modelagem Matemática contextualizada ao Ensino Básico.

A Modelagem Matemática, há muito tempo faz parte do cotidiano escolar do Ensino Básico a fim de tornar o ensino e a aprendizagem de Matemática mais significativa para os estudantes. Tendo em vista que o conhecimento Matemático é necessário para todos os alunos da Educação Básica seja por sua grande aplicação na sociedade contemporânea, seja pelas suas potencialidades na formação de cidadãos críticos, cientes de suas responsabilidades sociais (BRASIL, Ministério da Educação, 2018, p. 265).

Acreditamos que abordar um tema de tamanha relevância para a saúde pública, possibilitará elucidar aos jovens estudantes do Ensino Médio, como se dá o aumento ou declínio da transmissão e mortalidade causadas pela COVID-19 por meio da utilização dos conteúdos modelados matematicamente e que possam auxiliar na compreensão do atual cenário epidemiológico.

Dessa forma, almeja-se que os estudantes e professores, através do acesso ao

Modelo proposto e aos resultados obtidos, reflitam sobre a importância da adoção de medidas restritivas ao combate da doença.

Além disso, da forma como é apresentado, possibilitará a adequação às metodologias e objetos de conhecimentos propostos na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) que possam relacionar as diferentes experiências do estudante com a compreensão da realidade e desenvolver, assim, a habilidade de associar situações da vida cotidiana aos conteúdos estudados, de modo que os conceitos matemáticos passem a ter significado e relevância para o estudante.

Para esta pesquisa, no Capítulo 2 apresentamos uma justificativa da importância em abordar o tema da COVID-19 utilizando os dados disponibilizados pela SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso (2021) que estão presentes em um painel interativo, permite a consulta dos números epidemiológicos da COVID-19. Também são discutidas as propostas da BNCC e as implicações na Modelagem Matemática como estratégia para o ensino de Matemática.

Além disso, no Capítulo 3, é feita a descrição de como adequar os dados da COVID-19 ao Modelo proposto. O Modelo possui um enfoque pedagógico, com intuito de torná-lo viável de ser utilizado no Ensino Médio com problematizações que necessitam da utilização de conceitos matemáticos acessíveis aos estudantes, que simulem possíveis situações de transmissão da COVID-19.

Com a ênfase nos detalhes para inserção e utilização dos dados e equações em uma planilha eletrônica, busca-se favorecer a compreensão e utilização da Matemática e dos métodos envolvidos na pesquisa, tornando viável uma eventual adequação da modelagem apresentada aos conteúdos presentes na matriz curricular do Ensino Médio, em consonância com os objetos de aprendizagem das habilidades propostas pela BNCC.

A pesquisa conta com a proposta de um Modelo Matemático discreto epidemiológico, com base em um sistema compartimental em que são definidas as três classes de indivíduos, que caracterizam o modelo como Suscetível, Infectado e Recuperado (SIR), sendo conhecido também como “equações de recursão”, visto que cada termo do Modelo é obtido a partir do termo anterior, indicando a existência de uma relação entre os termos.

São feitas as interpretações das equações e dos parâmetros que representam as taxas de recuperação, mortalidade, perda de imunidade e proporção para os novos casos do Modelo. Os dados de transmissão e mortalidade da COVID-19 são tabulados com o auxílio

de ferramentas computacionais. Também é utilizado o método matemático de ajustes por mínimos quadrados para as simulações. Estas, por sua vez, fornecem estimativas para o parâmetro que representa a proporção de novos casos. O ajuste é contextualizado pelas comparações das simulações ao histórico dos casos de COVID-19 no Estado de Mato Grosso.

Das estimativas são adotados parâmetros, que possam servir de base para novas simulações que consideram comparações de diferentes cenários, que relacionam o grau da contaminação por COVID-19 à adesão de medidas de biossegurança. São descritas equações que fornecem alguns métodos de quantificação do impacto direto sobre os parâmetros em que são simulados diferentes cenários, conforme a adesão às medidas de biossegurança, para finalmente, apresentar uma discussão dos resultados obtidos.

Diante do que é apresentado, este trabalho é então encerrado com as nossas considerações finais.

Capítulo 2

A importância do tema COVID-19 como pesquisa científica e para estudantes do Ensino Médio

Neste capítulo justificamos a importância do tema COVID-19 no contexto da pesquisa científica e também no contexto educacional, visto que a propagação da COVID-19 interfere diretamente no contexto social e pessoal dos estudantes.

Desde o final do ano de 2019, quando detectada pela primeira vez na Ásia, a população mundial vem enfrentando a pandemia causada pelo vírus popularmente conhecido como *coronavírus* e denominado SARS-COV-2 *Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2*, sendo a doença associada, denominada COVID-19 (GORBALENYA et al., 2020). Este tema, devido à sua complexidade, nos motivou a desenvolver um estudo envolvendo Modelagem Matemática por meio de um Modelo matemático discreto do tipo SIR que esteja diretamente relacionado à propagação da doença.

Dentre as muitas informações disponíveis atualmente sobre a COVID-19, bem como os dados, consideraremos para o âmbito desta pesquisa, informações e dados fornecidos pela Secretaria de Estado de Saúde do Estado de Mato Grosso, com um painel informativo que fornece dados com a quantidade de casos confirmados por data de notificação.

As informações do Painel COVID são atualizadas pelo sistema dos hospitais do Estado e pelo sistema Indica SUS, que trata das Vigilâncias Municipais. Este painel, quando disponível online para a população em geral, pode ser acessado na página da

Secretaria de Saúde (SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso, 2021). Dessa ferramenta eletrônica foram consultados e tabulados os valores referentes ao avanço da Pandemia no Estado do Mato Grosso, o que viabilizou o acesso ao quantitativo de casos confirmados e óbitos para o período considerado nessa pesquisa.

Essa atividade de consulta de dados, por sua vez, já se caracteriza como uma contextualização Matemática, pois utiliza-se de habilidades da Competência 1 proposta na BNCC e tem como pressuposto favorecer a interpretação da realidade pelos estudantes. Pois ao utilizarem diferentes campos da Matemática podem fazer julgamentos bem fundamentados, contribuindo para a formação científica geral dos estudantes BRASIL, Ministério da Educação (2018).

A ação desenvolvida na consulta de dados, adesão de medidas de biossegurança e outros assuntos abordados nessa pesquisa, tem relação com outro fator importante e que nos dias atuais, sendo amplamente discutido, o desafio de se utilizar informações verídicas para a compreensão de como se dá determinado fenômeno. Tendo em vista o que a distorção dos fatos e a forma como a desinformação se espalha, RIPOLL e Matos (2017) afirma que

Esse tráfego de informações por meio de novas formas de acesso e produção de conteúdo, porém, tem possibilitado o consumo e disseminação de informações falsas, distorcidas, manipuladas, servindo às mais diversas finalidades pessoais e institucionais. A popularização de termos como “*fake news*”, “pós-verdade” e “desinformação” tem trazido à tona uma recente preocupação com a veracidade e a confiabilidade das informações disseminadas na web, as quais acabam formando opiniões e construindo pretensos conhecimentos, baseados em informações falsas ou imprecisas (RIPOLL e Matos, 2017, p. 2336).

Diante deste cenário, o papel do educador torna-se importante, para de algum modo, propor aos estudantes a busca pela compreensão de temas pertinentes à COVID-19. Atentando-se aos dados, para que se busque o entendimento e a informação, de forma acessível e colaborativa para uma melhor resposta aos acontecimentos e enfrentamentos dos problemas apresentados, faz-se necessário contextualizar algumas situações desse tema.

Nesse sentido, é proposto no Capítulo 3 um Modelo matemático discreto do tipo SIR em que são apresentados os parâmetros e funcionalidades, de forma que possibilite a utilização da Matemática na descrição do fenômeno da pandemia, em que por situações

hipotéticas são feitas as simulações, para que se favoreça o uso da Modelagem Matemática na construção do conhecimento.

O Modelo, conforme apresentado nesta pesquisa, não tem caráter de inovação científica, mas sim, tem por objetivo levantar discussões de situações que possam ser utilizadas no contexto escolar do Ensino Médio, de forma que se faça a inter-relação dos conceitos matemáticos propostos no ensino básico com o ponto de vista científico.

Considerando que no Ensino Médio queremos garantir que os estudantes tenham uma efetiva aprendizagem e permanência em seus estudos, faz-se necessário conscientizá-los de que medidas de controle de doenças infecciosas podem ser úteis, tanto no presente quanto para as futuras gerações, em atendimento as demandas e aspirações futuras (BRASIL, Ministério da Educação, 2018).

Nota-se a necessidade de uma proposta de ensino, que de acordo com a BNCC, os estudantes sejam protagonistas de seu próprio processo de escolarização, garantindo serem interlocutores legítimos sobre currículo, ensino e aprendizagem (BRASIL, Ministério da Educação, 2018, p.463). Ainda pela BNCC, a vinculação aos desafios da realidade e explicitação dos contextos de produção e circulação dos conhecimentos, favorecem a atribuição de sentido às aprendizagens (BRASIL, Ministério da Educação, 2018, p.465).

Dessa maneira, a Matemática tem um papel fundamental na descrição de modelos, que possam ampliar a compreensão dos estudantes, criando uma atmosfera de motivação dos estudos envolvendo o tema COVID-19, considerando que a Modelagem Matemática torna-se indispensável para que o aluno possa compreender as possibilidades de cenários futuros e enfrentamento de novas doenças.

2.1 Propostas da BNCC no Ensino Médio com Modelagem Matemática

Esta pesquisa visa explorar e utilizar um Modelo Matemático que apresente aspectos formativos, que faça uso de simulações como pretexto didático e não como uma inovação científica. Buscamos assim discernir qual o modelo apropriado. Da definição trazida por (BIEMBENGUT e HEIN, 2003), um conjunto de símbolos e relações matemáticas que procura traduzir, de alguma forma, um fenômeno em questão ou problema de situação real, denomina-se “modelo matemático”.

Dos modelos apresentados por BASSANEZI (2002), classificados como *Modelo Objeto* e *Modelo Teórico*, o que caracteriza essa pesquisa é o *Modelo Objeto*. Pois, o Modelo epidemiológico apresentado considera homogêneo o grupo de infectados, as representações utilizam-se de esquemas compartimentais, que ora simbolizam o fenômeno, ora conceituam algumas fórmulas. Com essas características o Modelo fornece ferramentas matemáticas que possibilitam uma abordagem do tema no contexto do Ensino Médio, pois está ligado a conteúdos que utilizam-se em partes de conceitos básicos e que possibilitam a construção do conhecimento acerca do tema abordado.

Mesmo que um Modelo matemático apresente limitações de caráter científico, torna-se importante oportunizar aos estudantes temas que forneçam um significado à aprendizagem conectando-a a situações da vida real, de modo que, a virtude de tais modelos está na aquisição de experiência e no fornecimento de ideias para a formulação de modelos mais adequados à realidade estudada (BASSANEZI, 2002, p. 20).

Tendo em vista que existem *Modelos Teóricos*, que podem ser vinculados a uma teoria geral existente, e nesse será sempre construído em torno de um *Modelo Objeto* com um código de interpretações (BASSANEZI, 2002, p.20), a virtude dessa pesquisa está em se caracterizar apenas como um *Modelo Objeto*, e por considerar que:

Modelagem Matemática é um processo dinâmico utilizado para a obtenção e validação de modelos matemáticos. É uma forma de abstração e generalização com a finalidade de previsão e tendências. A modelagem consiste, essencialmente, na arte de transformar situações da realidade em problemas matemáticos cujas soluções devem ser interpretadas na linguagem usual. (BASSANEZI, 2002, p. 24)

O Modelo proposto tem o intuito de tornar-se factível de ser aplicado em situações de ensino-aprendizagem, com o propósito de estimular professores de Matemática e alunos a desenvolverem suas próprias habilidades como a modelagem (BASSANEZI, 2002, p.25). Assim, o indivíduo por meio desse processo que conecta a teoria e a prática, busca meios para agir, compreender e transformar a realidade que o cerca. Ao inserirmos essa temática voltada para o ensino e a aprendizagem, de acordo com BASSANEZI (2002), o fenômeno modelado deve servir como base ou ferramenta motivacional para o aprendizado de conteúdos matemáticos, cuja importância primordial, consiste em seguir etapas em que o conteúdo matemático é sistematizado e aplicado.

Embora seja possível descrever e modelar matematicamente um fenômeno, ainda

assim, seremos direcionados para um caminho desconhecido, porém, teremos vantagens e possibilidades de investigação. Para destacar o quão proveitoso pode ser a Modelagem Matemática para novas descobertas, BASSANEZI (2002) afirma que:

As vantagens do emprego da modelagem em termos de pesquisa podem ser constatadas nos avanços obtidos em vários campos como a Física, a Química, a Biologia e a Astrofísica entre outros. A modelagem pressupõe multidisciplinaridade. E, nesse sentido, vai ao encontro das novas tendências que apontam para a remoção de fronteiras entre as diversas áreas de pesquisa (BASSANEZI, 2002, p. 16).

Assim, quando se procura refletir sobre uma porção da realidade, é possível motivar os estudantes a elaborar estudos que correlacionam dados obtidos de situações reais com *Modelos Matemáticos*, construindo uma abordagem metodológica mais acessível, que possa ao mesmo tempo desenvolver habilidades que permitam a compreensão da situação (BIEMBENGUT e HEIN, 2003).

Para estes autores, nos diversos níveis de ensino, a Matemática no âmbito de ensino e aprendizagem é indispensável, pois trata-se de uma área que se conecta com outras áreas do conhecimento, sendo fundamental para o desenvolvimento cognitivo e para os processos criativos dos estudantes. Para BURAK (2005), o ensino da Matemática tem como um de seus objetivos, desenvolver no estudante competências e habilidades que são indispensáveis à sua formação. O autor destaca também um outro aspecto importante do ensino da Matemática enfatizando que:

[...] no seu papel instrumental, torna-se importante para a compreensão de outras áreas do conhecimento, na vida profissional e na vida cidadã. Nessa perspectiva, a Matemática como uma linguagem, com seus símbolos e seus códigos, permite a matematização de situações que podem revelar aspectos até então desconhecidos de um campo de conhecimento e enfatizar sua importância de se constituir como um instrumento formal de expressão e comunicação para diversas ciências. (BURAK, 2005, p. 6).

Nesse sentido, a consolidação dos conhecimentos desenvolvidos no uso de Modelos, podem ampliar os saberes, fornecendo assim um leque de recursos para resolver problemas mais complexos, que exijam maior reflexão e abstração. Também tem o propósito de construir uma visão mais integrada da Matemática, da Matemática com outras áreas do conhecimento e da aplicação da Matemática à realidade.

Dessa forma, as aprendizagens essenciais definidas na Base Nacional Comum

Curricular (BNCC), que trata-se um documento fundamentado nas Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica (DCN), é aplicada exclusivamente à educação escolar e busca se orientar pelos princípios éticos, políticos e estéticos que têm como objetivos a formação humana integral e a construção de uma sociedade justa, democrática e inclusiva.

A BNCC estabelece normas que definem um conjunto de aprendizagens consideradas essenciais que os alunos desenvolvam ao longo da Educação Básica, a fim de assegurar aos estudantes o desenvolvimento de dez competências gerais, que corroboram no âmbito pedagógico, os direitos de aprendizagem e desenvolvimento para cada aluno.

Na BNCC, competência é definida como:

A mobilização de conhecimentos (conceitos e procedimentos), habilidades (práticas, cognitivas e socioemocionais), atitudes e valores para resolver demandas complexas da vida cotidiana, do pleno exercício da cidadania e do mundo do trabalho. (BRASIL, Ministério da Educação, 2018, p. 8).

Sobre as competências gerais da Educação Básica, estas se inter-relacionam em três etapas sendo, a Educação Infantil, Ensino Fundamental e Ensino Médio, fundamentadas na construção do conhecimento dos estudantes em relação ao desenvolvimento de habilidades que representam as aprendizagens consideradas essenciais a todos os estudantes do Ensino Médio e ainda, na formação de atitudes e valores.

O Ensino Médio está organizado em quatro áreas do conhecimento conforme determina a LDB. A Matemática está inserida na área “Matemática e suas Tecnologias”, de modo que cada área estabelece competências específicas, indicando como as competências gerais da Educação Básica se expressam em cada área.

Na BNCC, há cinco competências específicas para a Matemática e suas Tecnologias, de forma que, uma mesma habilidade possa estar a serviço de mais de uma competência, porém, sendo classificada na competência em que possui maior afinidade. Dessa forma:

No Ensino Médio, na área de Matemática e suas Tecnologias, os estudantes devem utilizar conceitos, procedimentos e estratégias não apenas para resolver problemas, mas também para formulá-los, descrever dados, selecionar modelos matemáticos e desenvolver o pensamento computacional, por meio da utilização de diferentes recursos da área. (BRASIL, Ministério da Educação, 2018, p. 470).

Nesse sentido, a Modelagem Matemática apresenta-se como uma ótima alternativa educacional por valorizar as vivências cotidianas dos estudantes associando-os aos

conteúdos matemáticos presentes no currículo do Ensino Médio, além de atender as competências e habilidades estabelecidas na BNCC.

Consideramos que a criação de modelos matemáticos baseados no tema COVID-19 pode contribuir de forma significativa, tanto no ensino da Matemática quanto na importância das medidas sanitárias e de segurança propostas pelas organizações e secretarias de saúde. Dentre os conteúdos matemáticos presentes no currículo de Matemática do Ensino Médio, podemos citar como exemplos, os estudos de funções, progressão aritmética e progressão geométrica, que podem ser relacionados ao avanço da doença ao decorrer dos dias.

Estes e outros conteúdos podem ser aliados ao uso de ferramentas computacionais, que cumprem salientar a importância dos algoritmos e de seus fluxogramas, podendo ser objetos de estudo nas aulas de Matemática. Das diferentes dimensões este se caracteriza como pensamento computacional.

[...] pensamento computacional: envolve as capacidades de compreender, analisar, definir, modelar, resolver, comparar e automatizar problemas e suas soluções, de forma metódica e sistemática, por meio do desenvolvimento de algoritmos; (BRASIL, Ministério da Educação, 2018, p. 474).

Em vista disso, fortalece ainda mais a utilização de recursos digitais para a compreensão de fenômenos descritos por um Modelo matemático.

As análises de regressão, taxas de mortalidade, taxas de transmissão da doença, a interação dos seres humanos com o meio ambiente, a importância do uso de máscaras e a imunização pela quantidade de carga viral são fatores relevantes para a nossa abordagem. A seguir apresentamos o Modelo *SIR* que procura combinar a importância do tema COVID-19 e as propostas da BNCC.

Capítulo 3

O Modelo SIR, Dados, Estimativas de Parâmetros e as Comparações dos Resultados Obtidos

Neste Capítulo apresentamos um Modelo matemático discreto epidemiológico do tipo SIR (suscetível, infectado, recuperado/removido), cujo objetivo é descrever a dinâmica da pandemia e compará-la com os dados reais sobre a COVID-19. Discutimos os significados dos parâmetros presentes no Modelo, em especial, dos parâmetros que determinam a incidência de infectados em uma população e as possíveis relações com a adoção de medidas não farmacológicas para a contenção da doença COVID-19.

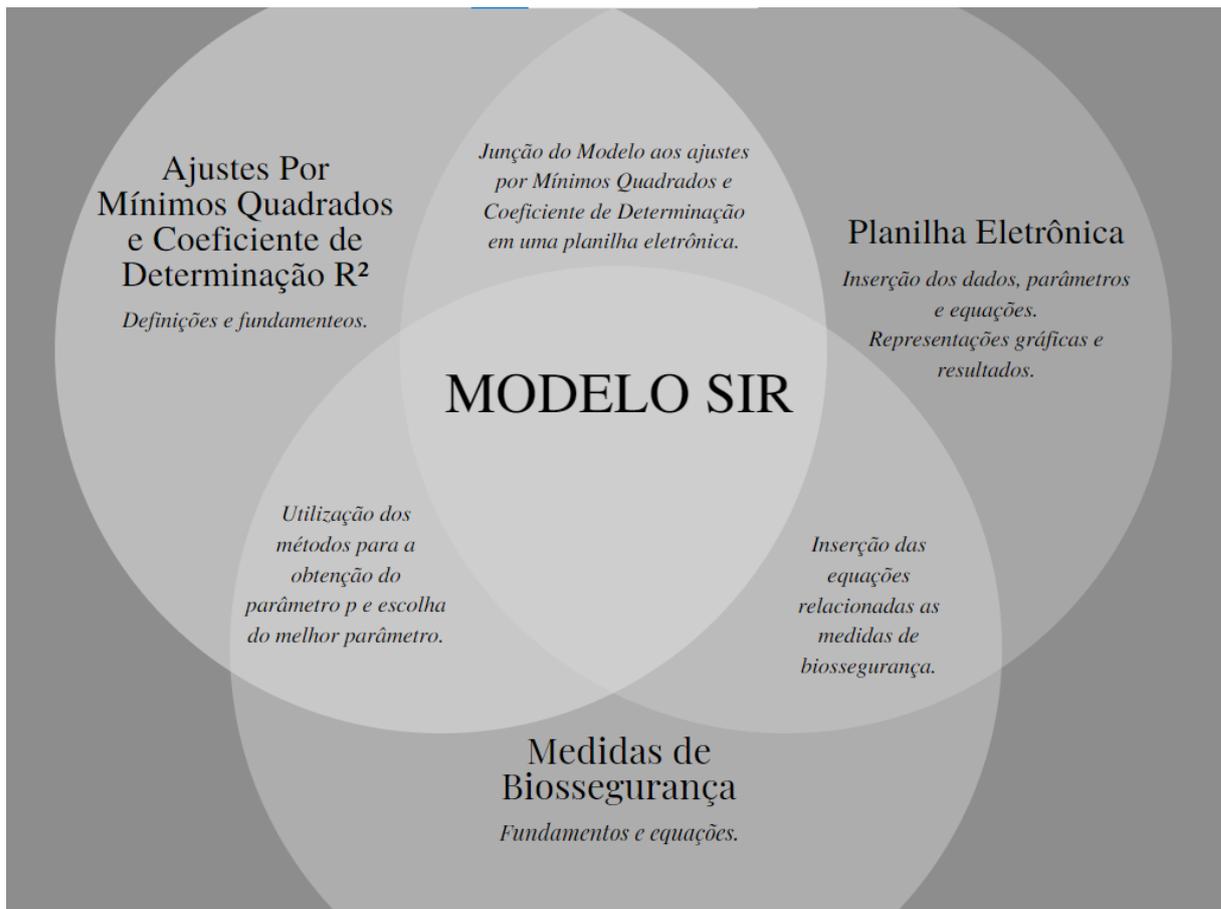
Para isso, são fundamentados alguns conceitos matemáticos que fornecem ferramentas para a funcionalidade do Modelo, em que são destacados alguns procedimentos a serem realizados em uma planilha eletrônica de forma que facilite a execução das estimativas de parâmetros e ajustes do Modelo. Fornecemos também representações gráficas que ilustram a comparação e os ajustes do Modelo com dados reais do histórico da atual pandemia. Por fim, apresentamos os gráficos e comparações das diferentes simulações feitas.

Queremos fornecer um trabalho que possa servir de referência para uma aplicação de modelagem em sala de aula, em que possam ser consultados, em parte ou em sua totalidade, detalhes importantes para a execução do Modelo. Isso implica em tornar acessível a forma com que a modelagem proposta seja utilizada. É com esse objetivo que são apresentados os métodos de utilização das equações do Modelo e a transcrição para

as fórmulas inseridas em uma planilha eletrônica com uma maior riqueza de detalhes.

Para uma melhor clareza do que está sendo apresentado exibimos a relação existente entre os fundamentos e procedimentos que estão ilustrados na Figura 3.1, para que o leitor possa estabelecer uma relação entre as seções que se consolidam com os resultados apresentados.

Figura 3.1: Esquema do capítulo, com as principais relações entre etapas descritas nas seções.



Fonte: O autor (2021).

Algumas observações sobre as Seções:

- 3.1 **Descrição do Modelo SIR** e 3.2 **Significado dos parâmetros**: Que apresentam os principais componentes do Modelo matemático na forma de equações discretas.
- 3.3 **Coleta de dados e simulações**: Se refere à forma com que os dados foram obtidos e apresenta os métodos para estimar os parâmetros, em que torna-se importante a utilização de ajustes por mínimos quadrados e o coeficiente de determinação R^2 , que auxiliam no ajuste do modelo.

- 3.4 Utilização dos métodos para estimar parâmetros:** A estimativa de um parâmetro p inicial surge da tentativa de se verificar um ajuste do Modelo com um único parâmetro constante. Do resultado, obtemos um coeficiente de contágio p_{MQ} para utilizar como base nas comparações dos diferentes cenários que se relacionam com as medidas de biossegurança.
- 3.5 Relação entre o parâmetro p e o número de infectados:** Ao relacionarmos a proporção de interação entre infectados e suscetíveis, partindo da hipótese de p ser variável, queremos verificar quais parâmetros p 's servem de base para as comparações de diferentes cenários, de acordo com as adoções de medidas de biossegurança.
- 3.6 Simulações e resultados:** Destacamos quais as medidas de biossegurança são utilizadas no Modelo, no intuito de se verificar qual o impacto da adesão de tais medidas sobre os principais indicadores da gravidade de uma pandemia.

3.1 Descrição do Modelo SIR

Os modelos matemáticos são uma importante ferramenta para compreender como se dá a propagação de uma doença infecciosa e ajudam a esclarecer os processos e parâmetros envolvidos nesta dinâmica. Nosso estudo está direcionado a modelos epidemiológicos, ou seja, modelos matemáticos que descrevem a dinâmica e evolução de alguma doença infecciosa.

As doenças infecciosas, recebem diferentes nomenclaturas dependendo de sua incidência ou agravo à saúde. Dessa forma, dizemos que uma doença infecciosa é dita uma endemia quando surge em um local com uma certa frequência sem causar espalhamento de contágio, sendo também classificada como sazonal. Torna-se uma doença epidêmica quando ocorre em maior abrangência decorrendo em diversas regiões de um mesmo país. E finalmente, é caracterizada como pandemia quando a propagação ocorre em nível mundial afetando um grande número de pessoas, como é o caso da COVID-19 (FORATTINI, 2005).

Para compreendermos um pouco da propagação e controle da COVID-19, faremos o uso de um Modelo matemático. Os modelos matemáticos podem ser classificados como estocásticos e determinísticos. Os modelos estocásticos são modelos em que os resultados das análises dependem dos parâmetros, suas condições iniciais e da aleatoriedade associada

a este sistema. Já no caso dos modelos determinísticos, as análises dependem unicamente dos valores atribuídos aos parâmetros e suas condições iniciais (MURRAY, 1989).

Os modelos determinísticos podem ser contínuos e discretos. Geralmente, são utilizadas equações diferenciais ordinárias (EDO) para descrever a dinâmica das interações entre diferentes elementos do sistema. Já no caso dos modelos determinísticos discretos, o estado do sistema altera-se somente no instante em que ocorre um evento, ou seja, em instantes isolados (EDELSTEIN, 2005). Para o presente trabalho, apresentamos as Equações Diferenciais Ordinárias (EDO) reformuladas como equações de diferenças em um Modelo discreto, favorecendo a apresentação dos conceitos com uma forma mais adequada para o Ensino Médio.

As variáveis que se aplicam ao Modelo têm por objetivo explicitar a inter-relação entre as classes (conjuntos) de indivíduos. De acordo com a condição estabelecida, são consideradas três classes em uma população, o que reforça a necessidade de se definir que tipo de função matemática pode ser utilizada na relação das equações a serem propostas.

Definição 1 *Dado um subconjunto $\mathbb{D} \subset \mathbb{R}^3$, uma função $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ é uma regra que associa a cada tripla ordenada $(x, y, z) \in \mathbb{D}$ um único vetor de \mathbb{R}^3 denotado por $f(x, y, z)$. O conjunto \mathbb{D} é chamado de domínio de f e sua imagem é o conjunto $\{f(x, y, z); (x, y, z) \in \mathbb{D}\} \subset \mathbb{R}^3$.*

O Modelo matemático que apresentaremos neste capítulo é do tipo determinístico discreto conforme definição a seguir.

Definição 2 *Dada uma função $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, um sistema dinâmico discreto autônomo (modelo discreto) é uma sequência de vetores em \mathbb{R}^3 denotados por v_t , para $t = 0, 1, 2, \dots$, onde cada vetor após o primeiro é relacionado ao anterior pela equação $v_{t+1} = f(v_t)$.*

O Modelo discreto que adotamos é do tipo compartimental SIR. Este Modelo apresenta três estágios de propagação de uma doença infecciosa, como é o caso da COVID-19. Assim,

- **S:** São os indivíduos suscetíveis à doença. Esses indivíduos podem ou não desenvolver a doença. Em geral, assume-se em modelos matemáticos que todo indivíduo suscetível é capaz de desenvolver a doença.
- **I:** São os indivíduos infectados pela doença, sendo estes os principais agentes de propagação da doença.

- **R:** São os indivíduos que passam do estágio de infectados para recuperados (Nesta classe os indivíduos permanecem imunes por um determinado período).

Com base nas Definições 1 e 2 apresentamos um Modelo do tipo SIR, cujo objetivo consiste em realizar uma estimativa para o número de indivíduos infectados pela COVID-19 e o número de indivíduos recuperados ou que vieram a óbito atribuindo-se um determinado período de tempo. Assim, considerando que todos os parâmetros do Modelo são não-negativos obtemos:

$$\begin{aligned}
 S(t+1) &= S(t) - pI(t)S(t) + aR(t), \\
 I(t+1) &= I(t) + pI(t)S(t) - rI(t) - \mu I(t), \\
 R(t+1) &= R(t) + rI(t) - aR(t).
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

O Modelo (3.1) apresenta três equações de recursão, isto é, a evolução do sistema acontece em instantes isolados visto que o tempo $t \in \mathbb{Z}_+$ é uma variável discreta e considerada como variável independente do Modelo. Dessa forma, para cada uma das equações do sistema (3.1), os valores das variáveis no instante $t+1$ são obtidos em função dos valores das variáveis no instante t . A variável independente t correspondente ao tempo é definida em semanas. O conjunto das variáveis dependentes identifica em cada intervalo de tempo os indivíduos presentes em cada estágio da doença. Assim,

- $S(t)$ e $S(t+1)$ correspondem ao número de indivíduos suscetíveis nos instantes t e $t+1$, respectivamente.
- $I(t)$ e $I(t+1)$ correspondem ao número de indivíduos infectados no instante t e $t+1$, respectivamente.
- $R(t)$ e $R(t+1)$ correspondem ao número de indivíduos recuperados e que não podem ser infectados no instante t e $t+1$, respectivamente.

Considera-se que a transição das variáveis dependentes do instante t para o instante seguinte $t+1$, ocorre semanalmente e está associada aos parâmetros p , a , r , μ do sistema.

A primeira equação do sistema representa a classe de indivíduos suscetíveis no instante $t+1$ dada por $S(t+1)$. O parâmetro de infecção p corresponde ao número

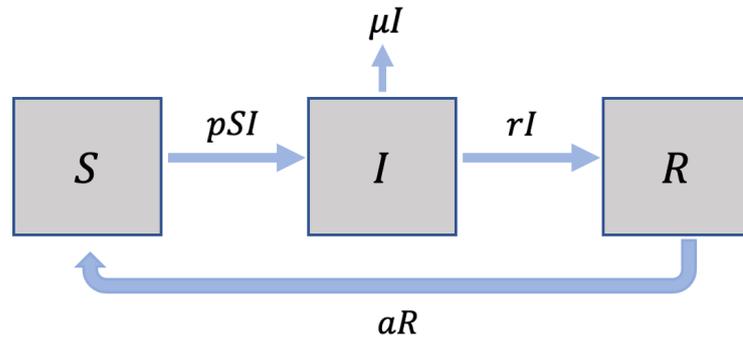
médio de contatos por indivíduo multiplicado pela probabilidade de contágio por contato entre indivíduos. Logo, o termo $pI(t)S(t)$ corresponde aos indivíduos que deixaram de ser suscetíveis e tornaram-se infectados pela doença. O parâmetro a corresponde à fração dos recuperados que perdem a imunidade por semana, ou seja, a está relacionado com o período de imunidade ao vírus. Assim, o termo $aR(t)$ representa os indivíduos recuperados que perderam a imunidade e tornaram-se suscetíveis no instante $t + 1$. Dessa forma, a primeira equação do sistema serve para representar as atualizações dos indivíduos suscetíveis em um determinado instante de tempo.

A segunda equação do sistema representa a classe de indivíduos infectados no instante $t + 1$ dada por $I(t + 1)$. O primeiro termo $I(t)$ corresponde aos infectados no instante anterior t , o segundo termo $pI(t)S(t)$ corresponde aos indivíduos que eram suscetíveis e se tornaram infectados. O terceiro termo $rI(t)$ representa os indivíduos infectados que tornaram-se recuperados, onde o parâmetro r corresponde à fração de recuperação semanal dos indivíduos infectados. O último termo dado por $\mu I(t)$ representa os indivíduos que deixaram a classe dos infectados devido à mortalidade, cujo parâmetro de mortalidade é dado μ . Dessa forma, a segunda equação do sistema fornece a dinâmica do número de infectados por semana.

A terceira e última equação do sistema representa os indivíduos recuperados no tempo $t + 1$. O primeiro termo corresponde aos recuperados no instante t , o segundo termo $rI(t)$ representa os indivíduos que eram infectados e tornaram-se recuperados, e finalmente, o terceiro termo dado por $aR(t)$ corresponde aos indivíduos recuperados que perderam a imunidade e tornaram-se suscetíveis.

A Figura 3.2, ilustra como é estruturado o nosso Modelo compartimental. Observe que os indivíduos suscetíveis podem tornar-se infectados (pIS) migrando do compartimento de suscetíveis para infectados. Neste novo compartimento, ocorrem duas situações distintas, isto é, os indivíduos podem vir a óbito (μI) ou podem se recuperar migrando para o compartimento dos indivíduos recuperados (rI). Nesta segunda situação, estes indivíduos recuperados perdem a imunidade após algum tempo migrando novamente para o compartimento dos indivíduos suscetíveis (aR).

Figura 3.2: Esquema compartimental para o Modelo SIR ilustrando como os indivíduos migram de um compartimento para outro.



Fonte: O autor (2021).

3.2 Significado dos Parâmetros Presentes no Modelo

Com o objetivo de compreender as transições entre os estados dos Modelo, esta seção detalha o significado de cada um dos parâmetros utilizados.

3.2.1 Parâmetro r : fração de recuperação semanal dos indivíduos infectados

O parâmetro r , que corresponde a fração de recuperação semanal dos indivíduos infectados, é definido com base no resumo apresentado por CDC e Prevention (2021), em que, após o início dos sintomas, a probabilidade de recuperação do vírus competente para replicação da COVID-19 é reduzida, e desse modo, o que nos interessa passa a ser o período de replicação do vírus ao qual o indivíduo infectado pode transmitir a doença. Ainda segundo o CDC e Prevention (2021) foi relatado em alguns adultos infectados pelo *coronavirus* em estado grave a recuperação do vírus competente para replicação entre 10 e 20 dias após o início dos sintomas, de modo que, para estes mesmos pacientes, foi verificado que 88% de suas amostras não produziam mais vírus competente para replicação após 10 dias do início dos sintomas e, em 95% das amostras, o vírus deixava de se replicar após 15 dias do início dos sintomas.

Com base na informação, supomos que o tempo de recuperação é de aproximadamente três semanas em média, estabelecemos que a cada semana $\frac{1}{3}$ dos indivíduos infectados se recuperarão e deixam de ser infecciosos caso não venham a óbito. Portanto o parâmetro que representa a fração de recuperação semanal é

$$r = \frac{1}{3}. \quad (3.2)$$

3.2.2 Parâmetro a : taxa de perda da imunização natural

A imunidade de rebanho surge quando um vírus não pode se espalhar imediatamente, porque ele se depara com uma população que tem um nível de imunidade que reduz o número de suscetíveis à infecção. Saber se existe imunidade pós-infecção, por quanto tempo dura e o grau em que pode prevenir a reinfecção sintomática ou reduzir sua gravidade tem implicações importantes para a pandemia de SARS-CoV-2 (LUMLEY et al., 2021). Informações atualizadas como as de CROMER et al. (2021), LUMLEY et al. (2021) e CDC e Prevention (2021) resumem estudos sobre as respostas imunológicas e o controle imunológico do *SARS-CoV-2* e as implicações para a prevenção de reinfecção.

De acordo com CDC e Prevention (2021), os indivíduos recuperados desenvolvem em 90% dos casos anticorpos anti-*SARS-CoV-2*, indicando assim um período de imunização contra o vírus, que de um modo geral pode durar três meses ou mais. Em nosso Modelo o parâmetro a corresponde à fração dos recuperados que perdem a imunidade por semana, e dessa forma, o indivíduo fica sujeito a uma reinfecção por SARS-COV-2.

Com base nessas informações, o que consideraremos válido para o nosso Modelo é uma das evidências apresentadas por LUMLEY et al. (2021) sugerindo que, a presença de anticorpos foi associada a um risco substancialmente reduzido de reinfecção de SARS-CoV-2 nos 6 meses seguintes.

Em alusão às informações apresentadas, adotaremos um período próximo de 180 dias de imunidade ao vírus, que equivale a 24 semanas. Considerando o parâmetro a , que deve ser adequado semanalmente (t) devemos utilizar frações correspondentes. Assim adotamos

$$a = \frac{1}{24}. \quad (3.3)$$

Portanto, o parâmetro a corresponde a fração de indivíduos que perderão a imunidade a cada semana. O que nos fornece os indivíduos recuperados imunizados que retornam à condição de suscetíveis no instante t , este valor é dado por $\frac{1}{24}R_t$.

3.2.3 Parâmetro μ : mortalidade dos indivíduos infectados

A mortalidade total dos indivíduos infectados denotada por $\bar{\mu}$ é obtida matematicamente por meio da razão entre o número total de óbitos e o número de infectados. Esse parâmetro dá uma ideia da gravidade da doença, pois indica o percentual de pessoas que morreram dentre os casos confirmados da doença, cujos dados são obtidos no painel interativo da (SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso, 2021). Assim o valor de $\bar{\mu}$ pode ser descrito pela equação

$$\bar{\mu} = \frac{\text{Número total de óbitos por infecção}}{\text{Número total de infectados}}.$$

Observe que $\bar{\mu}$ depende necessariamente do número de casos diagnosticados, que no caso do COVID-19, refere-se ao número de exames e diagnósticos realizados. Ao consultarmos os dados fornecidos por (SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso, 2021), obtemos 405940 casos confirmados, em Mato Grosso, por COVID-19 até a data de 30 de maio de 2021. O que pode não ser um valor apropriado pois, para cada caso confirmado estima-se que existem 12 casos reais na população.¹

Sendo assim, considera-se para o Modelo proposto um valor aproximado de 4871280 casos por COVID-19. O número de óbitos até a data citada era de 10903 e assim, obtemos $\bar{\mu} = \frac{10903}{4871280} \approx 0,0022382207551198$, em que será considerado o valor $\bar{\mu} = 0,0022382208$.

A partir da mortalidade real estimada, $\bar{\mu}$ no período considerado leva em conta o primeiro caso confirmado desde o início da pandemia até 30 de maio de 2021 (período maior que doze meses), é que são contabilizados os casos diários. Como no caso do Modelo proposto são considerados os casos semanais, sendo necessário estimar o parâmetro de mortalidade semanal μ , pois, o avanço do tempo t adota a unidade por semana.

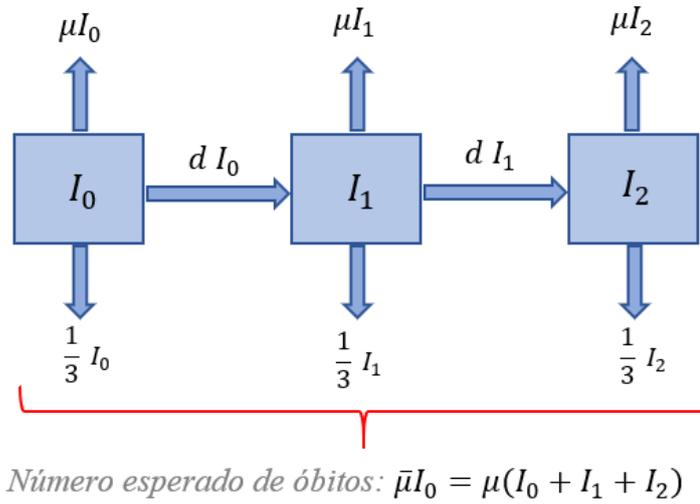
Como já mencionado, considera-se que, o período de infecção e transmissão da doença em um indivíduo infectado totaliza em média 21 dias. Para adequar o parâmetro a dinâmica da doença, dividimos esse período em três compartimentos I_i , onde $i = 0, 1, 2$. O compartimento I_0 corresponde a primeira semana em que o indivíduo está infectado, e I_1 e I_2 correspondem as semanas dois e três de infecção, respectivamente.

Para cada semana de infecção, levamos em conta uma mortalidade μI_i e também

¹Na Seção 3.3.1 justificamos a afirmação que diz respeito aos valores utilizados, bem como a maneira de como são considerados dados para os casos confirmados.

o número de indivíduos que se recuperam em cada semana dado por $\frac{1}{3}I_i$, onde $i = 0, 1, 2$. Na Figura 3.3 apresentamos um esquema de como a mortalidade total esperada μ é obtida. Dessa forma, o número total esperado de mortes será dado pelo número de mortes em cada compartimento semanal dividido pelo número total de infectados.

Figura 3.3: Esquema em compartimentos para representar a transição para obtenção da taxa de mortalidade, isto é, o número total de mortes durante o período de infecção distribuído em três semanas I_0 , I_1 e I_2 . Para cada semana de infecção, consideramos a mortalidade μI_i e o número de indivíduos que se recuperam $\frac{1}{3}I_i$, onde $i = 0, 1, 2$.



Fonte: O autor (2021).

De um modo geral, uma atualização semanal ocorre levando-se em conta a retirada dos recuperados rI_n com $n \in \mathbb{Z}_+$ o compartimento no qual a população de infectados se encontra no instante n e também a ocorrência de óbitos denotada por μI_n , fornecendo equação

$$I_{n+1} = I_n - \frac{1}{3}I_n - \mu I_n = I_n \left(1 - \frac{1}{3} - \mu\right) = I_n \left(\frac{2}{3} - \mu\right). \quad (3.4)$$

Da equação (3.4) obtemos $I_1 = I_0 \left(\frac{2}{3} - \mu\right) = I_0 d$, onde $d = \frac{2}{3} - \mu$, $d \in \mathbb{R}$, corresponde aos períodos semanais estabelecidos a partir de I_0 . Conseqüentemente, teremos $I_1 = I_0 d$ e $I_2 = I_0 d^2$.

Observe que, ao considerarmos o número de mortes denotada por M_1 no período de três semanas, podemos representá-lo por $M_1 = \bar{\mu}I_0$ e M_2 no mesmo período, seja dado por $M_2 = \mu(I_0 + I_1 + I_2)$, da igualdade $M_1 = M_2$ segue que

$$\begin{aligned}
\bar{\mu}I_0 &= \mu(I_0 + I_1 + I_2) \\
\bar{\mu}I_0 &= \mu(I_0 + I_0d + I_0d^2) \\
\bar{\mu}I_0 &= \mu I_0(1 + d + d^2) \\
\bar{\mu} &= \mu(1 + d + d^2),
\end{aligned}$$

onde substituindo d

$$\bar{\mu} = \mu\left(1 + \left(\frac{2}{3} - \mu\right) + \left(\frac{2}{3} - \mu\right)^2\right)$$

resulta

$$\bar{\mu} = \frac{19}{9}\mu - \frac{7}{3}\mu^2 + \mu^3. \quad (3.5)$$

Da equação (3.5) substituímos o valor de $\bar{\mu}$, resulta que

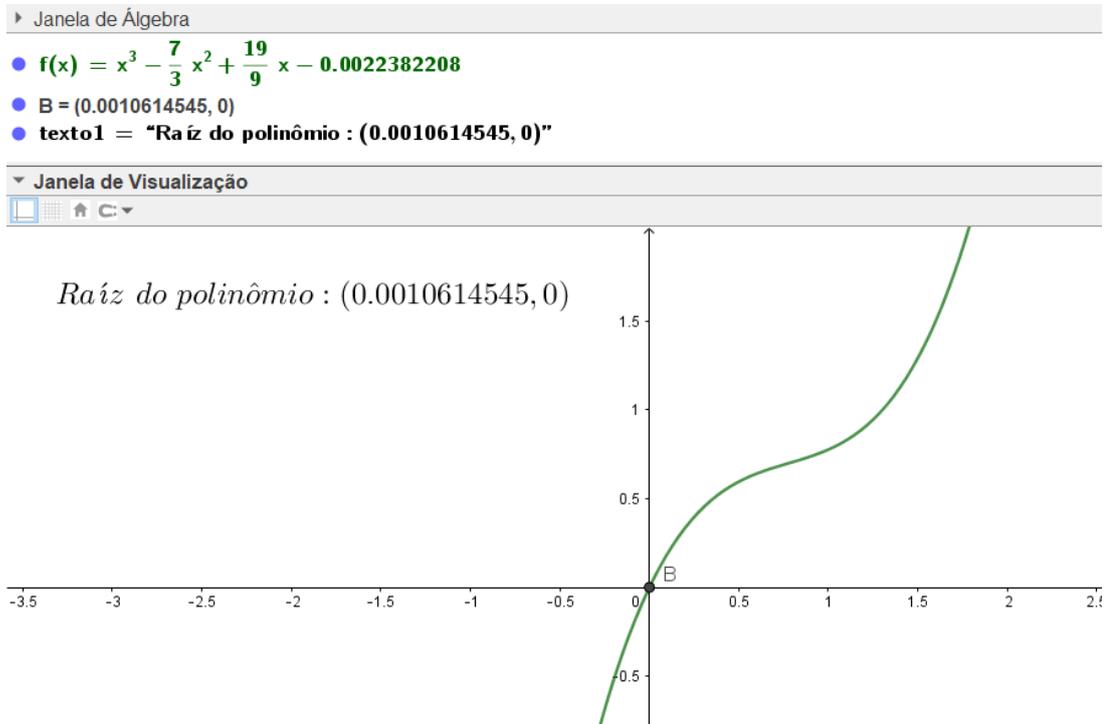
$$\mu^3 - \frac{7}{3}\mu^2 + \frac{19}{9}\mu = 0,0022382208. \quad (3.6)$$

Para obtermos o valor μ , que representa a taxa de mortalidade semanal no Modelo proposto, foi utilizado a janela algébrica do aplicativo Geogebra, onde inserimos a equação 3.6 utilizando a variável x que representa o parâmetro μ , o que nos fornece o gráfico do polinômio que é ilustrado pela Figura 3.4 em que, pelo comando “*Raiz(<Polinômio>)*” obtivemos o resultado para o parâmetro

$$\mu = 0,0010614545, \quad (3.7)$$

sendo este, utilizado nas simulações como taxa de mortalidade semanal.

Figura 3.4: Representação gráfica da Equação 3.6 para a solução, com a utilização do *software* Geogebra.



Fonte: O autor (2021).

3.2.4 Parâmetro p : coeficiente de contágio

Para estudarmos a dinâmica da COVID-19, devemos utilizar o parâmetro fundamental que representa a força da infecção da doença em uma população. No Modelo proposto, supomos que um indivíduo infectado pode apenas infectar os indivíduos suscetíveis. A taxa de contato entre um indivíduo infeccioso (I_t) e um suscetível (S_t), pode ser influenciada por diversos fatores, desse modo devemos considerar a ideia de se representar por p o valor do parâmetro que influencie no termo de capacidade de infecção pS_tI_t , que determina a incidência de novos casos em determinado instante t .

Para o Modelo proposto foi considerado, a partir da comparação dos valores obtidos pela simulação com os valores da amostra, a descrição que leva em consideração o valor proporcional de I_t em contato com indivíduos suscetíveis S_t , em determinado instante t . Como o Modelo proposto tem por objetivo o melhor ajuste para o parâmetro, o que desejamos é produzir uma característica específica, que é a melhor aproximação para os dados a serem comparados.

A seguir são descritos a forma como foram adequados dos dados consultados ao

modelo proposto, e os métodos matemáticos utilizados para a estimativa do parâmetro p .

3.3 Consulta dos Dados e Simulações Numéricas

Nesta seção procuramos apresentar a forma como foram consultados e tabulados os dados, também são descritas as equações do Modelo adequadas às formulas que possam ser inseridas em uma planilha eletrônica para a obtenção de resultados numéricos. São apresentados também alguns conceitos matemáticos que auxiliam no ajuste do Modelo, de uma forma simplificada, que fornecem ferramentas para as estimativas de parâmetros.

3.3.1 Obtenção dos dados da COVID-19

Em nossa pesquisa fizemos uma coleta de dados por consulta de banco de dados, considerando os mecanismos utilizados pela Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso. Consultamos o Painel COVID, que é um painel informativo onde são divulgadas todas as notas informativas referente à COVID-19. Os documentos são produzidos diariamente pelo Centro de Operações de Emergência em Saúde Pública de Mato Grosso (COE-MT)(SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso, 2021) ².

Um outro dado necessário para a simulação é o da quantidade de indivíduos suscetíveis (S) no instante $t = 0$ (inicial), para isso foi consultado em IBGE (2021) a população total de Mato Grosso, onde até o ano de 2015 a estimativa era de aproximadamente 3.240.000 pessoas, esse é o valor que utilizaremos para as simulações.

Do Painel COVID obtemos o histórico dos casos por data de notificação, onde são fornecidos os dados em valores diários, ou seja, a quantidade de casos notificados para cada dia, considerando os valores semanais a partir de 01 de janeiro de 2020 até 25 de maio de 2021. Com base nesses dados é que foram feitas as simulações, mas devemos destacar a forma como devem ser organizados de acordo com o Modelo proposto.

Para cada semana (a partir da primeira) foi obtida da soma dos casos contabilizados diariamente, a quantidade semanal de notificados respectivos a semana t . Para o Modelo proposto considera-se que o indivíduo infectado permanece na condição por um tempo médio, desse modo utilizamos os valores acumulados, por considerarmos que cada pessoa infectada permanece na condição I por três semanas.

²Os dados podem ser consultados em: <http://www.saude.mt.gov.br/painelcovidmt2/>, última consulta em 26 de outubro de 2021.

Para cada unidade de tempo t semanal vamos considerar n_t a quantidade de novos casos em uma semana, para os valores que consideramos casos confirmados utilizamos $\bar{I}_t = n_{t-2} + n_{t-1} + n_t$.

Outro fator importante a ser considerado é quando procuramos saber qual a quantidade de casos estimados em uma população, muitos são os casos assintomáticos e há ausência de testagem da população. Estima-se que no Brasil o número real de casos foi cerca de pelo menos 11 vezes maior do que os atualmente informados (PRADO et al., 2020). Considerando o estudo apresentado sobre a estimativa e subnotificação no estado de Santa Catarina NOGUEIRA et al. (2020) esse valor pode ser bem maior. Para o Modelo proposto consideramos uma quantidade 12 vezes maior que os casos notificados, de modo que possamos fazer uma comparação aproximada. Assim obtemos

$$y_t = 12\bar{I}_t,$$

que deve facilitar a utilização dos dados fornecidos no Painel Covid, pois os casos diários foram adequados às condições impostas pelo Modelo. Descrevemos a seguir a forma como os dados obtidos foram inseridos em uma planilha eletrônica, para que facilite a compreensão.

1. Inserimos em uma planilha eletrônica os valores diários com os casos confirmados fornecidos pelo Painel Covid conforme a Figura 3.5 onde na coluna A da planilha são apresentadas as datas e na coluna B os valores dos novos casos.

Figura 3.5: Inserção dos dados em uma planilha.

	A	B
1	Data dia	nº de caso
2	quarta-feira, 1 de janeiro de 2020	14,00
3	quinta-feira, 2 de janeiro de 2020	7,00
4	sexta-feira, 3 de janeiro de 2020	6,00
5	sábado, 4 de janeiro de 2020	8,00
6	domingo, 5 de janeiro de 2020	2,00
7	segunda-feira, 6 de janeiro de 2020	4,00
8	terça-feira, 7 de janeiro de 2020	0,00
9	quarta-feira, 8 de janeiro de 2020	4,00
10	quinta-feira, 9 de janeiro de 2020	3,00
11	sexta-feira, 10 de janeiro de 2020	3,00

Fonte: O autor (2021).

2. Agrupamos os dados por semana conforme ilustra a Figura 3.6 onde na coluna E estão as datas do fim de cada semana e na coluna F a soma dos novos casos para a respectiva semana, o que fornece os valores semanais dos novos casos.

Figura 3.6: Agrupamento dos dados semanais, onde foram consideradas as datas do fim da semana.

E		F	
data fim da semana		nº de casos semanais	
	07/01/2020		41,00
	14/01/2020		19,00
	21/01/2020		8,00
	28/01/2020		17,00
	04/02/2020		26,00
	11/02/2020		21,00
	18/02/2020		15,00
	25/02/2020		21,00
	03/03/2020		32,00

Fonte: O autor (2021).

3. Na coluna G da planilha, para determinarmos o número de casos semanais na condição I , de início, fizemos na planilha as células $G2 = F2$, $G3 = F2 + F3$ e $G4 = F2 + F3 + F4$. Utilizamos a partir da célula $B4$ conforme descrito por \bar{I}_t , em que t representa a respectiva linha da célula, que está ilustrado na Figura 3.7.
4. Na coluna H da planilha fazemos $Hn = Gn * 12$, sendo n a respectiva linha/semana da planilha para a célula (Figura 3.7).

Figura 3.7: Agrupamento dos dados semanais, onde foram consideradas as datas do fim da semana e os casos acumulados das últimas três semanas.

Exibição do comando

	G	H
1	número de casos acumulados confirmados por testag	Número de casos estimados
2	=F2	=G2*12
3	=F2+F3	=G3*12
4	=F2+F3+F4	=G4*12
5	=F3+F4+F5	=G5*12
6	=F4+F5+F6	=G6*12
7	=F5+F6+F7	=G7*12
8	=F6+F7+F8	=G8*12
9	=F7+F8+F9	=G9*12
10	=F8+F9+F10	=G10*12

Valores obtidos

	G	H
1	número de casos acumul	Número de casos estim
2	41,00	492
3	60,00	720
4	68,00	816
5	44,00	528
6	51,00	612
7	64,00	768
8	62,00	744
9	57,00	684
10	68,00	816

Fonte: O autor (2021).

Com essa procedência é que são apresentados os valores na Tabela 3.1. Com a utilização dos valores apresentados é que foram feitas as comparações dos valores obtidos da simulação. Apresentamos a seguir o modo como foram inseridas as informações em uma planilha eletrônica.

Tabela 3.1: Nesta Tabela são apresentados os valores consultados em SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso (2021), onde os dados foram contabilizados em períodos semanais, compreendidos entre 01 de janeiro de 2020 a 25 de maio de 2021, o que representa o período total explorado em nosso trabalho, sendo o histórico da amostra que descreve a pandemia por COVID-19 no Estado de Mato Grosso.

Data semana	Novos casos	Data semana	Novos casos
06/01/2020	492	21/09/2020	234192
13/01/2020	720	28/09/2020	216564
20/01/2020	816	05/10/2020	188316
27/01/2020	528	12/10/2020	158328
03/02/2020	612	19/10/2020	134124
10/02/2020	768	26/10/2020	106524
17/02/2020	744	02/11/2020	89712
24/02/2020	684	09/11/2020	83784
02/03/2020	816	16/11/2020	92184
09/03/2020	1152	23/11/2020	111120
16/03/2020	2292	30/11/2020	132552
23/03/2020	4080	07/12/2020	156936
30/03/2020	5940	14/12/2020	191652
06/04/2020	6900	21/12/2020	216312
13/04/2021	7044	28/12/2020	247068
20/04/2020	6936	04/01/2021	285840
27/04/2020	7056	11/01/2021	339060
04/05/2020	9936	18/01/2021	356844
11/05/2020	16980	25/01/2021	338328
18/05/2020	31536	01/02/2021	294216
25/05/2020	51504	08/02/2021	273156
01/06/2020	82032	15/02/2021	263532
08/06/2020	121548	22/02/2021	282924
15/06/2020	187032	01/03/2021	323700
22/06/2020	260460	08/03/2021	413016
29/06/2020	323916	15/03/2021	494604
06/07/2020	355248	22/03/2021	561408
13/07/2020	356964	29/03/2021	553056
20/07/2020	354672	05/04/2021	501240
27/07/2020	330648	12/04/2021	427464
03/08/2020	306804	19/04/2021	360660
10/08/2020	286848	26/04/2021	314832
17/08/2020	285084	03/05/2021	282132
24/08/2020	284220	10/05/2021	263208
31/08/2020	274152	17/05/2021	274020
07/09/2020	257028	24/05/2021	281856
14/09/2020	249240		

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos valores consultados em (SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso, 2021).

3.3.2 Inserção dos dados e equações do Modelo

Conforme ilustrado na Tabela 3.1, foram organizados os valores considerados como amostra dos casos confirmados por COVID-19 conforme descrito anteriormente, em que cada data representa o último dia de cada semana t .

Descrevemos até aqui parâmetros e dados essenciais para que possamos utilizar as equações 3.1. Destacamos os valores já apresentados para os parâmetros dos quais estão elencados a seguir:

1. $r = \frac{1}{3}$ taxa de recuperação.
2. $a = \frac{1}{24}$ taxa de perda de imunidade.
3. $\mu = 0,0010614545$.

Da Equação 3.1 obtemos

$$\begin{aligned}S(t+1) &= S(t) - pI(t)S(t) + \frac{1}{24}R(t), \\I(t+1) &= I(t) + pI(t)S(t) - \frac{1}{3}I(t) - 0,0010614545I(t), \\R(t+1) &= R(t) + \frac{1}{3}I(t) - \frac{1}{24}R(t).\end{aligned}\tag{3.8}$$

A Equação 3.8 já apresenta os valores dos parâmetros, mantendo as variáveis do Modelo.

Em resumo são considerados os valores iniciais para a simulação do Modelo proposto:

1. $S_0 = 3240000$ Quantidade de pessoas suscetíveis à infecção no instante inicial.
2. $I_0 = 492$ Quantidade inicial de infectados (Tabela 3.1).
3. $R_0 = 0$ Que representa inicialmente a quantidade de recuperados da doença.

Como já mencionado, o contágio pela doença COVID-19 depende da interação entre uma pessoa infectada e pessoas suscetíveis em uma determinada proporção. Assim, precisamos ajustar o valor do parâmetro p de modo que o resultado dos valores simulados possam ser comparados a uma situação real (Tabela 3.1).

Para o ajuste e simulação do Modelo proposto, os dados são inseridos em uma planilha eletrônica, em nosso caso as ilustrações e procedimentos descritos foram feitos no aplicativo de criação de planilhas *Excel*.

Conforme ilustrado na Figura 3.8, foram utilizados os valores apresentados na Tabela 3.1, inseridos na coluna *D* para a comparação dos resultados obtidos.

Figura 3.8: Representação dos Parâmetros e valores iniciais para a simulação em uma planilha eletrônica onde estão nas células *B2*, *B4* e *B5* respectivamente, correspondem aos parâmetros μ (Eq. 3.2), a (Eq. 3.3) e r (Eq. 3.7). A célula *B6* corresponde ao número aproximado de habitantes do Estado de Mato Grosso, nas células *B7* e *F2* os valores são iguais, as células *B8* e *G2* correspondem a quantidade de recuperados no instante inicial $t = 0$, e para a célula *B3* queremos atribuir o valor que melhor se ajusta aos dados.

	A	B	C	D	E	F	G
1	VALORES UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA PARA SIMULAÇÃO		Fin da semana ▾	Casos confirmados ▾	S(t) ▾	I(t) simulação ▾	R(t)
2	Taxa de mortalidade μ =	0,0010614545	07/01/20	492			
3	Coefficiente de interação p =		14/01/20	720			
4	Taxa de tempo imunizado a =	0,04	21/01/20	816			
5	Taxa de tempo de recuperação r =	0,33	28/01/20	528			
6	S(0)=	3240000,00	04/02/20	612			
7	I(0)=	492	11/02/20	768			
8	R(0)=	0,00	18/02/20	744			

Fonte: O autor (2021).

Ainda na Figura 3.8 ilustramos a inserção dos parâmetros em que nas células *B2*, *B4* e *B5*, estão os valores obtidos das Equações (3.2), (3.3) e (3.7), respectivamente. Já para *B6* utilizamos os valores consultados em IBGE (2021). Na célula *B7* atribuímos a quantidade inicial de infectados pelos dados da tabela 3.1 em que $F2 = B7$. O valor da célula *B3* é determinado de acordo com o melhor ajuste de p .

Vale ressaltar que, para as colunas *A* e *B* da planilha, os valores são inseridos apenas como base para a utilização na simulação, conforme apresentado na Figura 3.8. Desse modo os valores da coluna *B* quando alterados, automaticamente alteram-se também os resultados do Modelo, proporcionando reflexões acerca da variação de valores dos parâmetros.

Para a Figura 3.9 obtemos os valores quando associamos os parâmetros descritos na Figura 3.8 às equações (3.1). Desse modo estão representados a forma como podem ser inseridos os valores iniciais para a simulação, fazemos $E2 = B6$, $F2 = B7$ e $G2 = B8$.

Figura 3.9: Inserção dos dados para simulação.

	C	D	E	F	G
1	Fim da semana	Dados do painel covid	S(t)	I(t) simulação	R(t)
2	07/01/2020	492	3240000	492	0
3	14/01/2020	720			
4	21/01/2020	816			
5	28/01/2020	528			
6	04/02/2020	612			
7	11/02/2020	768			
8	18/02/2020	744			
9	25/02/2020	684			
10	03/03/2020	816			
11	10/03/2020	1152			
12	17/03/2020	2292			
13	24/03/2020	4080			
14	31/03/2020	5940			
15	07/04/2020	6900			
16	14/04/2020	7044			
17	21/04/2020	6936			
18	28/04/2020	7056			
19	05/05/2020	9936			
20	12/05/2020	16980			
21	19/05/2020	31536			
22	26/05/2020	51504			

Fonte: O autor (2021).

Por se tratarem de equações de recorrências, as sucessões de valores respectivos a S , I e R , são inseridas nas colunas E , F e G da planilha, dados pelas fórmulas.

$$S_t : E_n = E(n-1) - B3 * E(n-1) * F(n-1) + B4 * G(n-1),$$

$$I_t : F_n = F(n-1) + B3 * E(n-1) * F(n-1) - B5 * F(n-1) - B2 * F(n-1),$$

$$R_t : G_n = G(n-1) - B4 * G(n-1) + B5 * F(n-1)$$

tal que $n \in \mathbb{Z}_+^*$ representa as respectivas linhas da planilha correspondentes as semanas t e as letras maiúsculas representam as colunas. Note que, por meio dos símbolo \$ fixamos a célula desejada de modo que a automação não altere os valores de $B2$, $B3$, $B4$ e $B5$, em uma replicação automática para as células subsequentes.³ A Figura 3.10 ilustra a forma

³É possível replicar o comando de uma célula para as células subsequentes em uma coluna da planilha, basta clicar mantendo pressionado o botão esquerdo do mouse sobre o canto inferior direito da célula que se deseje replicar, em seguida arrastar verticalmente quantas linhas desejar.

com que os dados são inseridos por representação das fórmulas.

Figura 3.10: Exibição das fórmulas inseridas na planilha.

E	F	G
S(t)	I(t) simulação	R(t)
=B6	=D2	=B8
=E2-\$B\$3*E2*F2+\$B\$4*G2	=F2+\$B\$3*F2*E2-\$B\$5*F2-\$B\$2	=G2+\$B\$5*F2-\$B\$4*G2

Fonte: O autor (2021).

O preenchimento das linhas subsequentes deve ser feito de acordo com a quantidade de semanas da coluna D (y_t), para que se possa fazer o ajuste para o período desejado. Para a estimativa do parâmetro p necessitamos de uma ferramenta que auxilie na aproximação dos resultados. Apresentamos a seguir o método que facilita essa tarefa.

3.3.3 Ajuste por mínimos quadrados

Ao propormos a simulação, queremos fazer uma representação dos valores em um sistema referencial, observamos os pontos dispersos de forma que seja verificada a correlação entre os dados. Uma forma de medirmos o grau de associação entre duas variáveis é por meio de um coeficiente de correlação, que é o valor numérico, uma medida, para o grau de associação entre duas variáveis.

Com o objetivo inicial de compararmos I_t à quantidade de infectados dos dados reais y_t de nossa amostra, fazemos as comparações em cada instante t , para isso adotamos um dos procedimentos mais utilizados para obter estimadores, é aquele que se baseia no princípio dos mínimos quadrados, em que faremos uma estimativa para a nossa amostra por meio de uma forma simplificada (MORETTIN e BUSSAB, 2004).

O método de ajustes por mínimos quadrados, que consiste em adotar estimadores que minimizam os desvios entre os valores estimados e os valores observados nos dados reais, nos fornece uma melhor aproximação para o Modelo proposto.

Considerando que essa situação pode ser vista como uma função (Definição 2), ao utilizarmos os dados reais da amostra, conhecemos os valores: $(1, y_1), (2, y_2), \dots, (t, y_t)$ tais que t representa a semana no instante t e y_t representa o número de infectados na referida semana, queremos aproximar os pontos (t, y_t) de I_t de modo que a diferença entre os valores obtidos seja mínima.

Considerando $\mathcal{E}_t = I_t - y_t$, é fato que existe a possibilidade de que possamos calcular $\bar{\mathcal{E}} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^n (I_i - y_i)$ mas podemos obter valores negativos. O “erro quadrático total” da amostra favorece, pois ao elevarmos ao quadrado \mathcal{E}_t podemos evitar o problema do sinal. O método dos mínimos quadrados minimiza a soma dos quadrados dos resíduos, ou seja, minimiza $E_I = \sum_{i=1}^n (I_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}^2$.

Queremos minimizar E_I de modo que consigamos aproximar os valores estimados dos valores reais, pois quanto menor for o erro quadrático total, melhor será a estimativa. Isso nos sugere procurar a estimativa de p que torne mínima essa soma de quadrados (MORETTIN e BUSSAB, 2004).

Uma forma imediata é por meio de uma ferramenta da planilha de cálculos, em que podemos automatizar a aproximação. Submetemos as equações descritas por (3.1) de modo que possamos inspecionar os resultados, inicialmente com um parâmetro p que pareça ser razoável. Para verificar a qualidade dessa estimativa consideramos os valores das colunas F e D da Figura 3.11 em que pela diferença $F_n - D_n$ medimos qual é a inadequação do Modelo para cada valor da amostra. Em seguida elevamos ao quadrado essa diferença, para que assim possamos obter a soma quadrática dos resíduos.

Figura 3.11: Resultados para a simulação, em que o ajuste para a célula $B3$ (ver Figura 3.8) que corresponde ao valor do parâmetro, sendo obtido $p \approx 0,000000179027300$, fornece a melhor aproximação da curva I_t dos valores da amostra.

	C	D	E	F	G	H	I
1	Fim da semana	Dados do painel covi	S(t)	I(t) simulaçã	R(t)	Erro	Erro quadrado
2	07/01/2020	492	3240000	492	0	0	0
3	14/01/2020	720	3239715	612	164	-108	11603
4	21/01/2020	816	3239366	762	361	-54	2922
5	28/01/2020	528	3238940	948	600	420	176510
6	04/02/2020	612	3238415	1180	891	568	322336
7	11/02/2020	768	3237768	1468	1247	700	489766
8	18/02/2020	744	3236969	1826	1685	1082	1170935
9	25/02/2020	684	3235981	2272	2223	1588	2520299
10	03/03/2020	816	3234758	2825	2888	2009	4037089
11	10/03/2020	1152	3233242	3513	3709	2361	5575775
12	17/03/2020	2292	3231363	4368	4726	2076	4309692
13	24/03/2020	4080	3229033	5429	5985	1349	1820059
14	31/03/2020	5940	3226144	6746	7545	806	649192
15	07/04/2020	6900	3222562	8378	9479	1478	2184970
16	14/04/2020	7044	3218123	10400	11877	3356	11264591
17	21/04/2020	6936	3212626	12902	14849	5966	35595194
18	28/04/2020	7056	3205824	15993	18531	8937	79873981
19	05/05/2020	9936	3197417	19805	23090	9869	97403984
20	12/05/2020	16980	3187042	24496	28730	7516	56494919
21	19/05/2020	31536	3174263	30253	35698	-1283	1646483
22	26/05/2020	51504	3158558	37293	44295	-14211	201954527
23							507504828

Fonte: O autor (2021).

O procedimento para obtenção do resultado em uma planilha eletrônica é descrito como apresentado a seguir:

1. Fazemos a diferença entre as células que representam os valores infectados a serem comparados no instante t , $F_n - D_n$, que consideramos como um erro \mathcal{E}_t . Essa diferença está inserida para cada célula H_n contida na coluna H , com $n \in \mathbb{Z}_+^*$ (Fig. 3.12).

Figura 3.12: Inserção do comando para *Erro* e *Erro Quadrado*.

H	I
Erro	Erro Quadrado
=F2-D2	=H2^2
=F3-D3	=H3^2
=F4-D4	=H4^2
=F5-D5	=H5^2
=F6-D6	=H6^2
=F7-D7	=H7^2
=F8-D8	=H8^2
=F9-D9	=H9^2
=F10-D10	=H10^2

Fonte: O autor (2021).

2. Como queremos uma curva que melhor se aproxime dos pontos, consideramos na coluna I os valores \mathcal{E}^2 , de modo que $\sum_{i=1}^t \mathcal{E}_t^2$ seja mínimo. Assim construímos na coluna I os valores \mathcal{E}^2 , bem como o seu somatório na célula $I23$ conforme apresentados nas figuras 3.11 e 3.13.

Figura 3.13: Inserção do comando para a obtenção da soma dos “*Erros Quadrados*”.

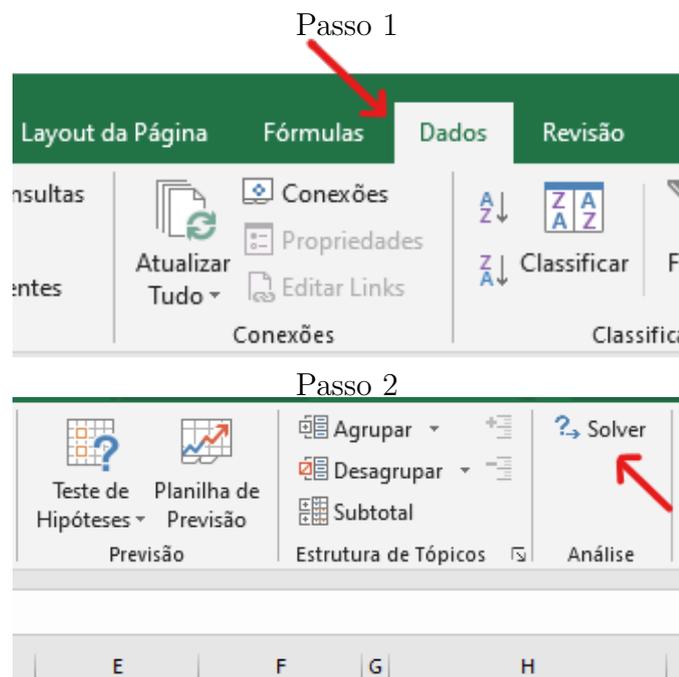
Erro	Erro quadrado
3494,49533807856000	12211497,67
6149,68329459080000	37818604,62
9179,48216789022000	84262892,87
10187,39895860660000	103783097,5
7931,60411129456000	62910343,78
-743,89742305542700	553383,376
-13514,93363367570000	182653431,1
	=SOMA(I2:I22)

Fonte: O autor (2021).

3. Utilizando a opção *Solver*, que é uma ferramenta de teste de hipóteses que encontra o valor ideal de uma célula de destino, alternando os valores nas células usadas para calcular a célula de destino, queremos definir como objetivo minimizar o valor da célula *I23* considerando a alteração a ser realizada na célula que contém o parâmetro *p*.

- Selecione a ferramenta *solver* conforme ilustra a Figura 3.14 .

Figura 3.14: Seleção da ferramenta *Solver*



Fonte: O autor (2021).

- Selecione a célula objetivo em “*Definir objetivo*”, que nesse caso é a célula *I23* que contém a soma dos quadrados dos resíduos (ver Fig. 3.11 e 3.16).
- Selecione a opção “*Mín.*”, que possui a função de minimizar o objetivo (ver Fig. 3.16).
- Selecione a célula que deve ajustar o parâmetro “*Alternando células variáveis*”, que em nosso caso foi considerado o valor da célula *B10* que é utilizada como numerador da razão que fornece *p* (ver Fig. 3.16 e 3.15)⁴.

⁴Utilizamos uma célula auxiliar devido a “sensibilidade” dos valores variáveis para ordem de grandeza de *p* quando relacionado com a quantidade de casos confirmados.

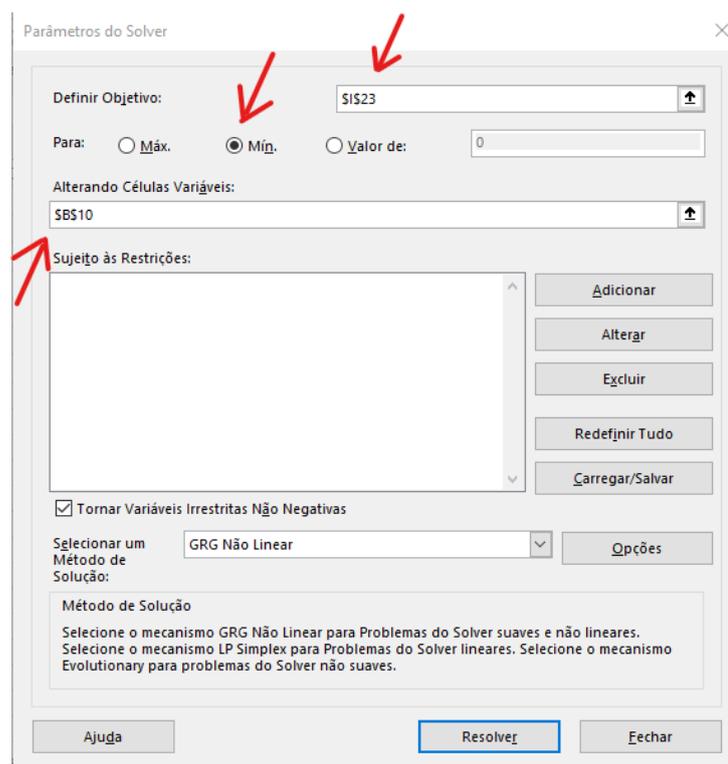
Figura 3.15: Valores adicionais que melhoram o ajuste da ferramenta *Solver*

VALORES UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA PARA SIMULAÇÃO	
Taxa de mortalidade μ =	0,0010614545
Coefficiente de interação p =	0,0000001786615
Taxa de tempo imunizado a =	0,04
Taxa de tempo de recuperação r =	0,33
$S(0)$ =	3240000,00
$I(0)$ =	492
$R(0)$ =	0,00
	1786,614975
	10000000000

Fonte: O autor (2021).

- O valor da célula $B3$ (parâmetro p) é obtido pela razão das células $B10$ por $B12$ (inserir na célula $B3$ o comando “ = $B10/B12$ ”).

Figura 3.16: Seleção dos comandos da ferramenta *Solver*



Fonte: O autor (2021).

Este procedimento fornece imediatamente a estimativa do parâmetro p que melhor aproxima os resultados do Modelo quando comparados com os casos confirmados. Surge a necessidade de representar uma medida percentual do erro, que favoreça comparações entre ajustes. Apresentamos a seguir um coeficiente que auxilia na medida do ajuste.

3.3.4 Coeficiente de determinação R^2

Considerando que o método por mínimos quadrados fornece a melhor aproximação entre y_t e I_t , tal que, o erro para esses valores seja mínimo, desejamos quantificar a viabilidade da estimativa feita.

Como o objetivo é medir a dispersão de uma distribuição, deve-se fazer o uso da diferença entre cada valor e a média aritmética da distribuição e comparar duas distribuições quanto à variabilidade, utilizando medidas de variabilidade relativa. Desse modo, o Coeficiente de Variação de Pearson, é dado por $R = \frac{S}{\bar{X}}$ e independe da natureza e magnitude de X .

O coeficiente de determinação, que pode ser denotado por R^2 , é frequentemente utilizado para julgar a adequação de um modelo, em nosso caso R^2 será o quadrado do coeficiente de correlação entre I_t e y_t , com intuito de quantificarmos a variabilidades nos dados ajustados pelo Modelo.

Segundo (MONTGOMERY et al., 2000, p. 344), um método chamado análise de variância pode ser usado para testar a significância da regressão. O procedimento divide a variância total na variável de resposta em componentes significativas, como base para o teste. A identidade de análise de variância é dada quando denotado por I_t o valor ajustado para t -ésima observação da amostra (y_t), segundo o Modelo (Eq. 3.1) ajustado pelo método de mínimos quadrados, pode-se realizar a decomposição:

$$\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 = \sum_{t=1}^n (I_t - \bar{y})^2 + \sum_{t=1}^n (y_t - I_t)^2 \quad (3.9)$$

Os dois componentes do lado direito da Equação 3.9 medem, respectivamente, a quantidade da variabilidade em y_t , por causa da linha de regressão, e a variação residual deixada sem explicação pela regressão (MONTGOMERY et al., 2000, p.344). Onde

- $\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2$ denotamos por *SQT* que é a *soma de quadrados total*, que é a variação total entre as observações y_t ;
- $\sum_{t=1}^n (y_t - I_t)^2$ denotamos por *SQE* que é *soma de quadrados de resíduos*, definida pela variação das observações y_t em relação aos valores I_t ajustados pelo Modelo;
- $\sum_{t=1}^n (I_t - \bar{y})^2$ denotamos por *SQR* que é a *soma dos quadrados da regressão*, que

denota a diferença entre os valores I_t ajustados pelo Modelo e a média amostral de resposta.

Quanto maior a *variação explicada* representada pelo valor obtido de SQR , maior a capacidade que o Modelo tem de explicar a resposta de interesse. Para o caso particular em que o ajuste é perfeito, ou seja, $I_t = y_t \forall t$, obtemos

$$SQE = 0 \text{ e } SQR = SQT$$

na equação (3.9), e desse modo, o coeficiente de determinação R^2 é definido por:

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} = 1 - \frac{SQE}{SQT}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1. \quad (3.10)$$

Da Equação (3.10) o objetivo é quantificar a proporção da variabilidade total de y que é satisfatoriamente explicada pelo parâmetro p explicativo do Modelo. A denominação de R^2 deve-se ao fato de que a quantidade obtida seja coincidente com o quadrado do coeficiente de correlação linear de Pearson, no caso da regressão linear simples, entre os valores y_i da variável resposta e os valores x_i da variável explicativa, para $1 \leq i \leq n$ (CHIODE, 2020).

O R^2 é útil, pois fornece uma medida de ajuste do Modelo. Uma vez que R^2 se aproxima de 1 o resultado torna-se cada vez mais satisfatório, o que consiste em um erro total, cometido pelo Modelo, cada vez menor. Desse objeto constituímos uma maneira de avaliarmos os ajustes, fazendo distinções e qualificando as simulações que serão apresentadas na Seção 3.6.

Na planilha de cálculos podemos utilizar a função $RQUAD$, que retorna o quadrado do coeficiente de correlação do momento do produto de Pearson, através dos pontos de dados em $val_conhecidos_y$ e $val_conhecidos_x$. A sintaxe da função

$$RQUAD(val_conhecido_y; val_conhecido_x)$$

tem os seguintes argumentos:

- $Val_conhecidos_y$ Obrigatório. Uma matriz ou intervalo de pontos de dados.
- $Val_conhecidos_x$ Obrigatório. Uma matriz ou intervalo de pontos de dados.

Para melhor compreensão de como utilizar a ferramenta, basta considerar o ajuste por mínimos quadrados já realizado e, com a mesma organização apresentada na Figura 3.8 inserimos o comando “ $RQUAD(D2 : D21; F2 : F21)$ ” na célula B9.

Figura 3.17: Seleção dos comandos da ferramenta *RQUAD*

	A	B
1	VALORES UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA PARA SIMULAÇÃO	
2	Taxa de mortalidade μ =	0,0010614545
3	Coefficiente de contágio p =	0,000000178661498
4	Taxa de tempo imunizado a =	0,04
5	Taxa de tempo de recuperação r =	0,33
6	S(0)=	3240000,00
7	I(0)=	492
8	R(0)=	0,00
9	Valor R ² = =RQUAD(D2:D21;F2:F21)	

Fonte: O autor (2021).

A sigla “ $D2 : D21$ ” representa o intervalo da coluna *D* dos casos confirmados do Painel COVID , e os valores “ $F2 : F21$ ” é o intervalo na coluna *F* e representa o resultados para *I*, ambos intervalos compreendidos da linha 2 até a linha 21 conforme ilustrado na Figura 3.18.

Figura 3.18: Seleção dos intervalos para uso da ferramenta *RQUAD*

	A	B	C	D	E	F
1	VALORES UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA PARA SIMULAÇÃO		Fim da semana	Dados do painel cov	S(t)	I(t) simulação
2	Taxa de mortalidade μ =	0,0010614545	07/01/20	492	3240000	492
3	Coefficiente de contágio p =	0,000000178661498	14/01/20	720	3239715	612
4	Taxa de tempo imunizado a =	0,04	21/01/20	816	3239368	762
5	Taxa de tempo de recuperação r =	0,33	28/01/20	528	3238942	948
6	S(0)=	3240000,00	04/02/20	612	3238418	1180
7	I(0)=	492	11/02/20	768	3237773	1468
8	R(0)=	0,00	18/02/20	744	3236976	1826
9	Valor R ² = =RQUAD(D2:D21;F2:F21)		25/02/20	684	3235990	2271
10		1786,614976	03/03/20	816	3234769	2825
11			10/03/20	1152	3233257	3513
12		10000000000	17/03/20	2292	3231382	4368
13			24/03/20	4080	3229057	5429
15			07/04/20	6900	3222601	8378
16			14/04/20	7044	3218172	10400
17			21/04/20	6936	3212688	12902
18			28/04/20	7056	3205901	15993
19			05/05/20	9936	3197513	19805
20			12/05/20	16980	3187161	24496
21			19/05/20	31536	3174409	30254

Fonte: O autor (2021).

Com todos os procedimentos adotados nesta seção bem como nas seções anteriores deste capítulo é que foram feitas as simulações, para a obtenção do parâmetro *p*.

Além do que fundamentamos acerca do ajuste do Modelo, apresentamos ferramentas que fornecem argumentos para discussões sobre o impacto das medidas de biosse-

gurança, estes são descritos a seguir.

3.3.5 Número de óbitos

Da estruturação e dos métodos apresentados para a simulação, podemos obter valores que são de interesse para a contextualização da situação apresentada.

O número de óbitos é um valor muito discutido e utilizado nas comparações, pois a quantidade de óbitos é a principal quantificação que evidencia a gravidade da doença. Para obtenção desse valor extraímos dos resultados da simulação, considerando o termo

$$pS_t I_t$$

da Equação 3.1, tendo em vista que representa o valor dos novos casos em cada semana t em que ao utilizarmos a taxa μ obtida, podemos calcular o número de óbitos

$$\mu pS_t I_t \tag{3.11}$$

em cada semana t .

Para inserir os comandos na planilha eletrônica, referente ao termo da Equação 3.11, basta escolher uma coluna para representar o número de óbitos, em que para cada célula, respectiva a semana t , será fornecido o número de óbitos. Em seguida, basta calcular a soma de todas as células da coluna do número de óbitos. Um exemplo que pode ser utilizado é a forma como foi inserida a fórmula na célula $O2$ que está representada na Figura 3.19. Para as células subsequentes basta replicar a inserção, utilizando os valores atualizados para cada respectiva semana t . Do somatório desses valores podemos fazer as comparações entre os diferentes cenários, quanto a adesão das medidas de biossegurança para a contenção do contágio.

3.4 Utilização dos Métodos Para Estimar Parâmetros e Analisar os Resultados

A medida da gravidade de uma doença geralmente é definida pelo avanço da infecção em uma população. Com base em comparações entre os casos confirmados e as

Figura 3.19: Representação das inserção da fórmula para a obtenção do número de óbitos em que $\mu = B2$, $p = B3$, $S_1 = M_2$ e $I_1 = N_2$ em que o número de óbitos para semana $t = 1$ dado por $=B\$2 * \$B\$3 * N2 * M2$ inserido na célula $P2$. A soma dos valores da coluna P fornece o número de óbitos da primeira semana para a simulação.

M	N	O	P
S(t)	I(t) p com ajustes por mínir R(t)		Número de óbitos
3240000,00	816	0,00	=B\$2*\$B\$3*N2*M2
3239384,24	1157,931073	272	2
3238521,96	1642,97655	646,643691	3
3237309,67	2330,872658	1167,359054	4
3235600,89	3306,125146	1895,676646	6
3233188,44	4688,113931	2918,731834	8
3229779,82	6645,151844	4359,822651	11
3224962,83	9413,873434	6393,213989	16
3218158,43	13325,6295	9264,787884	22
3208556,67	18841,72344	13320,63156	32
3195031,63	26599,04829	19046,17972	44
3176032,03	37466,35339	27118,93833	62
3149447,88	52607,81305	38477,76703	86

Fonte: O autor (2021).

simulações, fazemos a tentativa de ajustar o Modelo e observar as variações que podem existir. Como já mencionado, o parâmetro p é o coeficiente que expressa a proporção de interação entre indivíduos infectados e suscetíveis. Com base nas amostras realizamos as primeiras simulações no intuito de verificar qual o melhor valor para o parâmetro p , para o ajuste do Modelo, que possa representar a relação entre infectados e suscetíveis.

Para obtenção de um parâmetro consideram-se algumas hipóteses:

- O parâmetro, caso não seja adotada a medida de biossegurança, possivelmente será maior.
- As medidas de enfrentamento da Pandemia, impactam diretamente em como ocorre o aumento dos casos de infecção.
- O parâmetro p pode ser fixo ou variável.

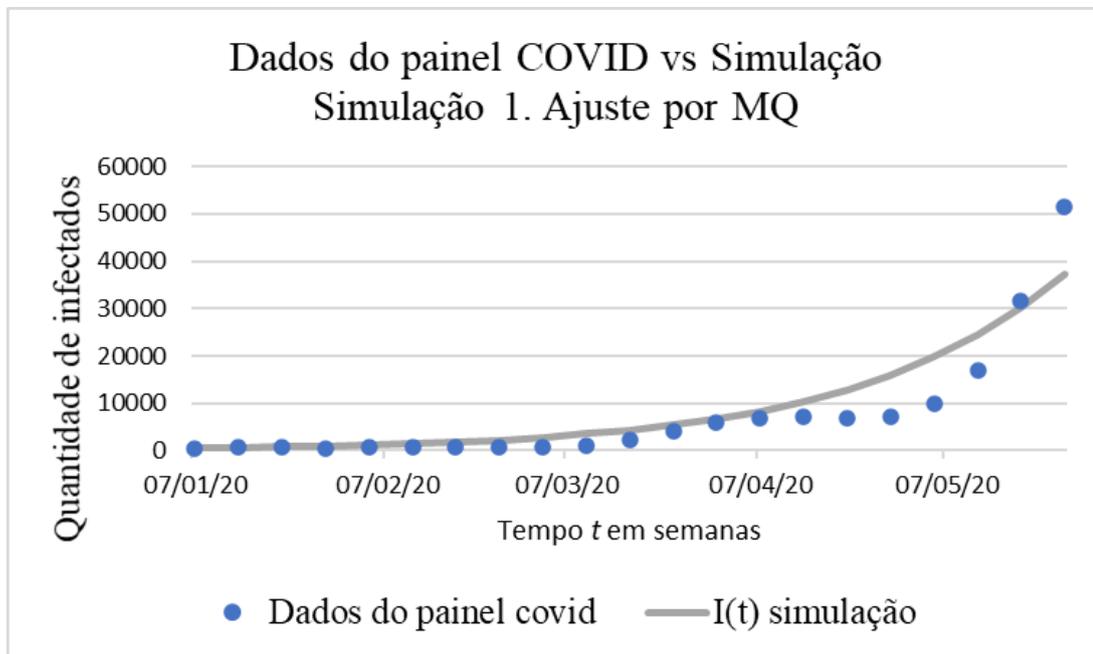
Com base nas hipóteses é que foram feitas as simulações, no intuito de estabelecer a melhor estimativa para o parâmetro p , de modo que se possa expressar a relação existente entre as variáveis, tendo como ferramenta a utilização dos métodos apresentados anteriormente. A primeira estimativa consiste na utilização de um único parâmetro. Para o ajuste inicial consideramos um período que possa mostrar o que ocorreria se não houvessem sido adotadas medidas de biossegurança.

Do ponto de vista social, o início da Pandemia foi o período de livre circulação, em que os indivíduos infectados interagiram com as demais classes sem nenhuma restrição do contágio, podemos supor que o parâmetro p , nesse período, seja o mais apropriado para as comparações, por não ter sofrido interferências.

A Figura 3.11 representa a primeira simulação feita, adotando o período inicial de 07/01/2020 a 26/05/2020. De acordo com os procedimentos já descritos anteriormente foram feitas as tabulações bem como a inserção das fórmulas para a obtenção dos resultados.

Das comparações feitas, foram mantidos nas representações gráficas apenas os dados a serem comparados. Como exemplo, na Figura 3.20 foram mantidas apenas as séries de valores que representam os casos confirmados do Painel COVID (y_t) e os resultados para simulação (I_t), por interesse de se verificar o melhor ajuste, que reflita o cenário de infecção da pandemia na população mato-grossense.

Figura 3.20: Representação gráfica da tabela 3.11 em que os y_t (dados do Painel COVID) são os valores da coluna D e I_t os valores obtidos da coluna F . Ajustados com a melhor aproximação pela ferramenta *Solver*.



Fonte: O autor (2021).

Na Figura 3.20, temos a representação gráfica que compara os dados reais de infectados com os valores obtidos na simulação para o novo ajuste. Da Equação (3.10) fazemos a medida da qualidade do Modelo, por meio da função $RQUAD$ da planilha de cálculos que oferece como resultado $R^2 \approx 0,8750$. Conforme apresentado, foi possível uma

aproximação dos resultados, no entanto, existem outros fatores que podem influenciar no ajuste proposto.

Há que considerar alguns fatores sociais relacionados. Por exemplo, os meios pelo qual, os órgãos responsáveis pelo estudo e medidas de controle da pandemia, na testagem e as notificações dos casos de infecção, podem ter encontrado certa dificuldade em manter uma regularidade na testagem e diagnóstico de novos casos, tendo em vista que a COVID-19 é uma doença desconhecida.

Segundo SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso (2021), em seu resumo da nota metodológica para obtenção dos dados, mostra que existem limitações quanto a testagem e confirmações dos casos confirmados, pois isso depende das condições técnico-operacionais do sistema de vigilância epidemiológica, em cada área geográfica, para detectar, notificar, investigar e realizar testes laboratoriais específicos para a confirmação diagnóstica de casos de COVID-19. Dessa afirmação podemos supor que, no período inicial esses dados podem ser ainda mais inconsistentes.

Além disso, a quantidade de casos confirmados no período inicial é pequena quando comparada a outros períodos, o que pode não sustentar a hipótese de que o parâmetro $p \approx 1,7866 \cdot 10^{-7}$ seja o ideal para o período subsequente, ou todo o intervalo de semanas considerado para a comparação com a amostra (y_t).

O que implica na adoção de um novo período inicial, em que a amostra apresente dados mais consistentes, onde a atenção dada às testagens e notificações pode ter ocorrido com um maior rigor. Com isso adotamos um novo período, que será considerado a partir de 03 de março de 2020, descartando os casos anteriores a esta data.

Nessa nova perspectiva foi repetida a simulação para o período de 03/03/2020 à 02/06/2020, alterando apenas os dados (y_t) de acordo com o período, no qual é representado pela Figura 3.21 a tabulação dos dados e também os resultados da simulação.

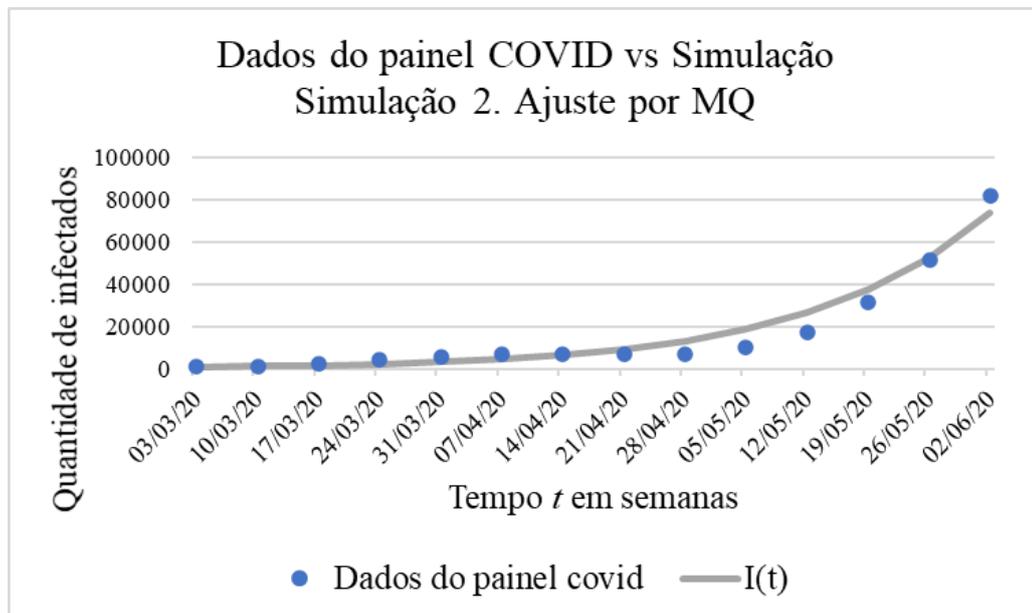
Figura 3.21: Simulação com alterações para o período inicial considerando a exclusão dos valores iniciais onde na coluna D estão os dados do Painel COVID (y_t) e na coluna F os valores simulados I_t para o período de 03/03/2020 à 02/06/2020 . Ajustados por mínimos quadrados com a melhor aproximação, o processo utilizou a ferramenta *Solver* como célula objetivo $I16$.

	C	D	E	F	G	H	I
1	Fim da semana	Dados do painel covid	S(t)	I(t)	R(t)	Erro	Erro Quadrado
2	03/03/20	816	3240000	816	0	0	0
3	10/03/20	1152	3239385	1158	272	6	35
4	17/03/20	2292	3238524	1643	647	-649	421.271
5	24/03/20	4080	3237314	2331	1167	-1749	3.059.669
6	31/03/20	5940	3235608	3306	1896	-2634	6.937.911
7	07/04/20	6900	3233200	4688	2919	-2212	4.893.319
8	14/04/20	7044	3229797	6645	4360	-399	159.336
9	21/04/20	6936	3224988	9413	6393	2477	6.137.418
10	28/04/20	7056	3218195	13325	9264	6269	39.299.279
11	05/05/20	9936	3208609	18841	13320	8905	79.294.626
12	12/05/20	16980	3195107	26598	19045	9618	92.503.516
13	19/05/20	31536	3176139	37465	27118	5929	35.156.015
14	26/05/20	51504	3149599	52608	38476	1104	1.217.884
15	02/06/20	82032	3112672	73545	54409	-8487	72.023.986
16						Somatório erro quadrado	341104265,24

Fonte: O autor (2021).

Da simulação apresentada, obtemos a representação gráfica da Figura 3.22. Isto representa a melhor aproximação para os valores, em que consideramos um parâmetro p fixo para todo o período, ajustado pelo método dos mínimos quadrados. Dessa nova simulação, obtemos $p \approx 2,325 \cdot 10^{-7}$ como melhor parâmetro estimado do período inicial.

Figura 3.22: Representação gráfica para a simulação do novo período, considerando a Fig. 3.21, em que (y_t) são os valores da coluna D . Consideramos I_t no período de 03/03/2020 à 02/06/2020, cujos valores obtidos estão presentes na coluna F . Ajustados com a melhor aproximação pela ferramenta *Solver*



Fonte: O autor (2021).

Utilizando o parâmetro $p_{MQ} \approx 2,325 \cdot 10^{-7}$, foram inseridas em uma nova planilha as equações do Modelo, e para os dados do Painel COVID (y_t) consideramos todos os valores referentes ao período de 03 de março de 2020 até 25 de maio de 2021.

Vale ressaltar, nesse caso, que **não** é necessário o ajuste por mínimos quadrados. Por ser considerado o parâmetro ideal, basta digitar em uma nova planilha de simulação, o valor na célula correspondente ao parâmetro, que nesse caso é dado por $p_{MQ} \approx 2,325 \cdot 10^{-7}$ que, conforme ilustrado na planilha eletrônica, corresponde a célula B3.

Tabela 3.2: Resultados da simulação para todo o período (03/03/2020 a 25/05/2021), apresentando as comparações de valores de y_t e I_t com erros e erros quadrados.

Fim da semana	Novos casos COVID	I_t	Erro	Erro quadrático
03/03/2020	816	816	0	0
10/03/2020	1152	1158	6	35
17/03/2020	2292	1643	-649	421271
24/03/2020	4080	2331	-1749	3059668
31/03/2020	5940	3306	-2634	6937910
07/04/2020	6900	4688	-2212	4893317
14/04/2020	7044	6645	-399	159335
21/04/2020	6936	9413	2477	6137424
28/04/2020	7056	13325	6269	39299298
05/05/2020	9936	18841	8905	79294664
12/05/2020	16980	26598	9618	92503565
19/05/2020	31536	37465	5929	35156044
26/05/2020	51504	52608	1104	1217885
02/06/2020	82032	73545	-8487	72024073
09/06/2020	121548	102185	-19363	374937802
16/06/2020	187032	140766	-46266	2140582801
23/06/2020	260460	191636	-68824	4736708776
30/06/2020	323916	256726	-67190	4514494690
07/07/2020	355248	336585	-18663	348291847
14/07/2020	356964	428994	72030	5188323606

21/07/2020	354672	527510	172838	29872839909
28/07/2020	330648	620935	290287	84266339886
04/08/2020	306804	695026	388222	150716110085
11/08/2020	286848	736912	450064	202557826154
18/08/2020	285084	740357	455273	207273322097
25/08/2020	284220	708276	424056	179823132624
01/09/2020	274152	650632	376480	141737056181
08/09/2020	257028	579640	322612	104078381267
15/09/2020	249240	505709	256469	65776371514
22/09/2020	234192	435756	201564	40628007435
29/09/2020	216564	373389	156825	24593969967
06/10/2020	188316	319854	131538	17302376731
13/10/2020	158328	275005	116677	13613590439
20/10/2020	134124	238008	103884	10791787411
27/10/2020	106524	207782	101258	10253096028
03/11/2020	89712	183240	93528	8747457086
10/11/2020	83784	163398	79614	6338442380
17/11/2020	92184	147417	55233	3050634594
24/11/2020	111120	134601	23481	551341595
01/12/2020	132552	124390	-8162	66615419
08/12/2020	156936	116339	-40597	1648135409
15/12/2020	191652	110095	-81557	6651580624
22/12/2020	216312	105384	-110928	12305125237
29/12/2020	247068	101992	-145076	21046942734
05/01/2021	285840	99758	-186082	34626410088
12/01/2021	339060	98558	-240502	57841184483
19/01/2021	356844	98300	-258544	66844854649
26/01/2021	338328	98919	-239409	57316737691
02/02/2021	294216	100368	-193848	37577136355
09/02/2021	273156	102617	-170539	29083685177
16/02/2021	263532	105647	-157885	24927796888
23/02/2021	282924	109447	-173477	30094264557

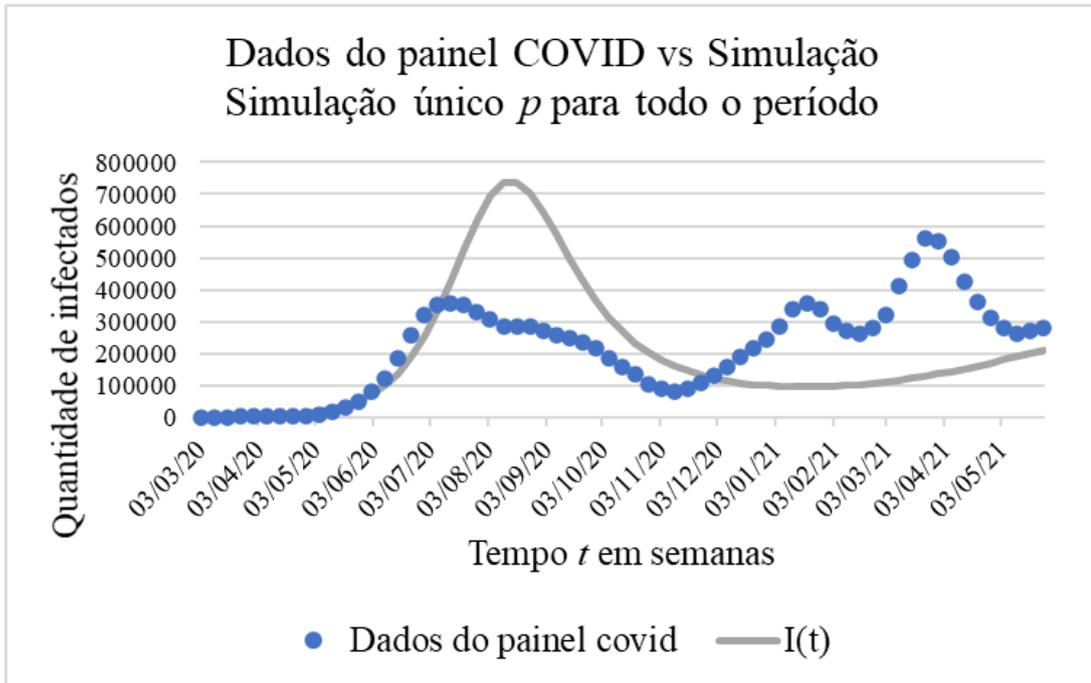
02/03/2021	323700	114011	-209689	43969289613
09/03/2021	413016	119334	-293682	86248991509
16/03/2021	494604	125406	-369198	136306870344
23/03/2021	561408	132212	-429196	184209504998
30/03/2021	553056	139722	-413334	170845180451
06/04/2021	501240	147892	-353348	124854712767
13/04/2021	427464	156657	-270807	73336310957
20/04/2021	360660	165927	-194733	37921060506
27/04/2021	314832	175582	-139250	19390442432
04/05/2021	282132	185477	-96655	9342153734
11/05/2021	263208	195435	-67773	4593119786
18/05/2021	274020	205257	-68763	4728339564
25/05/2021	281856	214724	-67132	4506699020

Fonte: O autor (2021).

Com o parâmetro p_{MQ} pré-determinado obtém-se a simulação, são observados os resultados do Modelo, que são apresentados pelo conjunto dos valores da Tabela 3.2. O que se observa, em alguns casos, é que existem algumas discrepâncias entre os valores dos novos casos y_t e os valores I_t ajustados pelo Modelo. Nesta situação, temos possíveis inadequações, que podem ser visualizadas no gráfico da Figura 3.23.

Ainda da Tabela 3.2, utilizando os valores das variáveis obtemos $R^2 = 0,1399$ que evidencia que o erro total é grande para o ajuste com a hipótese de o parâmetro p ser constante para todo o período.

Figura 3.23: Representação gráfica para todo o período (03/03/2020 à 25/05/2021), que representa a simulação do parâmetro $p \approx 2,325 \cdot 10^{-7}$ em que os dados do Painel COVID (y_t) são os pontos azuis e I_t a curva cinza.



Fonte: O autor (2021).

Com a discrepância do ajuste surge a ideia de particionar todo período comparado, tendo em vista que na primeira simulação, para uma quantidade menor de semanas, foi obtida uma melhor aproximação dos valores. Ao observarmos a representação gráfica podemos verificar oscilações para y_t em que, por hipótese, se justifica devido as medidas de biossegurança adotadas durante o agravo da Pandemia no Estado de Mato Grosso. Isso pode ter afetado diretamente a relação entre infectados e suscetíveis durante o período simulado.

Em uma nova simulação, o novo ajuste divide o período total em três subintervalos com diferentes valores para o parâmetro p . Buscando os pontos de inflexão do avanço da pandemia, esses descrevem a diminuição e aumento dos casos. Inserindo novas células, foram considerados três períodos com parâmetros distintos para cada um. Acrescentando outros dois parâmetros p' s para uma nova simulação, com a inserção de novas células para os parâmetros adicionais.

Utilizando o ajuste por mínimos quadrados com a utilização da ferramenta *Solver*, foram consideradas as células $B12$, $B13$ e $B14$ como variáveis a serem alteradas ⁵, em

⁵A ferramenta *Solver* admite a inserção com mais de uma célula variável basta utilizar o símbolo “;” entre as células selecionadas.

que os parâmetros $p_1 = B12/B15$, $p_2 = B13/B15$ e $p_3 = B14/B15$ são respectivamente inseridos nas células $B3$, $B4$ e $B5$, conforme ilustrado na Figura 3.24.

Figura 3.24: Representação da planilha para inserção dos novos parâmetros.

	A	B
1	VALORES UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA PARA SIMULAÇÃO	
2	Taxa de mortalidade μ =	0,0010614545
3	Coefficiente de contágio $p(1)$ =	2,53E-07
4	Coefficiente de contágio $p(2)$ =	1,24E-07
5	Coefficiente de contágio $p(3)$ =	2,29E-07
6	Taxa de tempo imunizado a =	0,04
7	Taxa de tempo de recuperação r =	0,33
8	$S(0)$ =	3240000,00
9	$I(0)$ =	816
10	$R(0)$ =	0,00
11	Ajuste R quadrado= 0,78952725	
12	Célula variável a ser alterada $p(1)$ =	2534,428651
13	Célula variável a ser alterada $p(2)$ =	1235,855355
14	Célula variável a ser alterada $p(3)$ =	2291,792047
15	Denominador para o coeficiente p = 10000000000	

Fonte: O autor (2021).

Para os três períodos são alterados apenas o valor do parâmetro, que passam a ser repetidos em intervalos menores e mantidos os demais valores que compõem as fórmulas. As alterações do parâmetro p , para cada intervalo, são ilustradas pela Figura 3.25, o que destaca as linhas que contém tais mudanças de parâmetro.

Figura 3.25: Representação das equações nas células em que mudam os parâmetros.

Primeira mudança

S(t)	I(t)
=E15-\$B\$3*E15+F15+\$B\$6*G15	=F15+\$B\$3*E15-F15-\$B\$2*F15-\$B\$7*
=E16-\$B\$3*E16+F16+\$B\$6*G16	=F16+\$B\$3*E16-F16-\$B\$2*F16-\$B\$7*
=E17-\$B\$3*E17+F17+\$B\$6*G17	=F17-\$B\$3*E17-F17-\$B\$2*F17-\$B\$7*
=E18-\$B\$4*E18+F18+\$B\$6*G18	=F18-\$B\$4*E18-F18-\$B\$2*F18-\$B\$7*
=E19-\$B\$4*E19+F19+\$B\$6*G19	=F19+\$B\$4*E19-F19-\$B\$2*F19-\$B\$7*
=E20-\$B\$4*E20+F20+\$B\$6*G20	=F20+\$B\$4*E20-F20-\$B\$2*F20-\$B\$7*
=E21-\$B\$4*E21+F21+\$B\$6*G21	=F21+\$B\$4*E21-F21-\$B\$2*F21-\$B\$7*

Segunda mudança

S(t)	I(t)
=E33-\$B\$4*E33+F33+\$B\$6*G33	=F33+\$B\$4*E33-F33-\$B\$2*F33-\$B\$7*
=E34-\$B\$4*E34+F34+\$B\$6*G34	=F34+\$B\$4*E34-F34-\$B\$2*F34-\$B\$7*
=E35-\$B\$4*E35+F35+\$B\$6*G35	=F35+\$B\$4*E35-F35-\$B\$2*F35-\$B\$7*
=E36-\$B\$4*E36+F36+\$B\$6*G36	=F36+\$B\$4*E36-F36-\$B\$2*F36-\$B\$7*
=E37-\$B\$4*E37+F37+\$B\$6*G37	=F37-\$B\$4*E37-F37-\$B\$2*F37-\$B\$7*
=E38-\$B\$5*E38+F38+\$B\$6*G38	=F38-\$B\$5*E38-F38-\$B\$2*F38-\$B\$7*
=E39-\$B\$5*E39+F39+\$B\$6*G39	=F39+\$B\$5*E39-F39-\$B\$2*F39-\$B\$7*
=E40-\$B\$5*E40+F40+\$B\$6*G40	=F40+\$B\$5*E40-F40-\$B\$2*F40-\$B\$7*
=E41-\$B\$5*E41+F41+\$B\$6*G41	=F41+\$B\$5*E41-F41-\$B\$2*F41-\$B\$7*
=E42-\$B\$5*E42+F42+\$B\$6*G42	=F42+\$B\$5*E42-F42-\$B\$2*F42-\$B\$7*
=E43-\$B\$5*E43+F43+\$B\$6*G43	=F43+\$B\$5*E43-F43-\$B\$2*F43-\$B\$7*

Fonte: O autor (2021).

Os resultados dessa alteração podem ser visualizados no gráfico ilustrado pela Figura 3.26. Obtemos a representação das curvas aproximadas por meio dos intervalos ajustados em três parâmetros, dessa nova simulação obtemos $R^2 \approx 0,7895$, o que nos garante um melhor ajuste com uma redução do erro total cometido pelo Modelo.

Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados para a nova simulação. Observe que a coluna *Erro* representa a diferença I_t em relação aos valores y_t (Novos casos), dessas comparações alguns dos valores apresentam diferenças significativas. Isso evidencia a importância de novas subdivisões do período total, o que pode ser trabalhoso quando queremos utilizar intervalos cada vez menores.

Assim, surge a necessidade de verificar a existência da variação de p , que possa ajustar o Modelo proposto aos valores da amostra, que favoreça uma melhor aproximação com relação ao o histórico de infecção no Estado de Mato Grosso.

Tabela 3.3: Resultado para a simulação dividida em três períodos/parâmetros e ajustados por mínimos quadrados, sendo $p_1 = 2,534 \cdot 10^{-7}$ para o período de 03/03/2020 à 23/06/2020, $p_2 = 1,235 \cdot 10^{-7}$ para 30/06/2020 à 10/11/2020 e $p_3 = 2,291 \cdot 10^{-7}$ para 17/11/2020 à 25/05/2020 em que os valores destacados em negrito representam as mudanças de parâmetro.

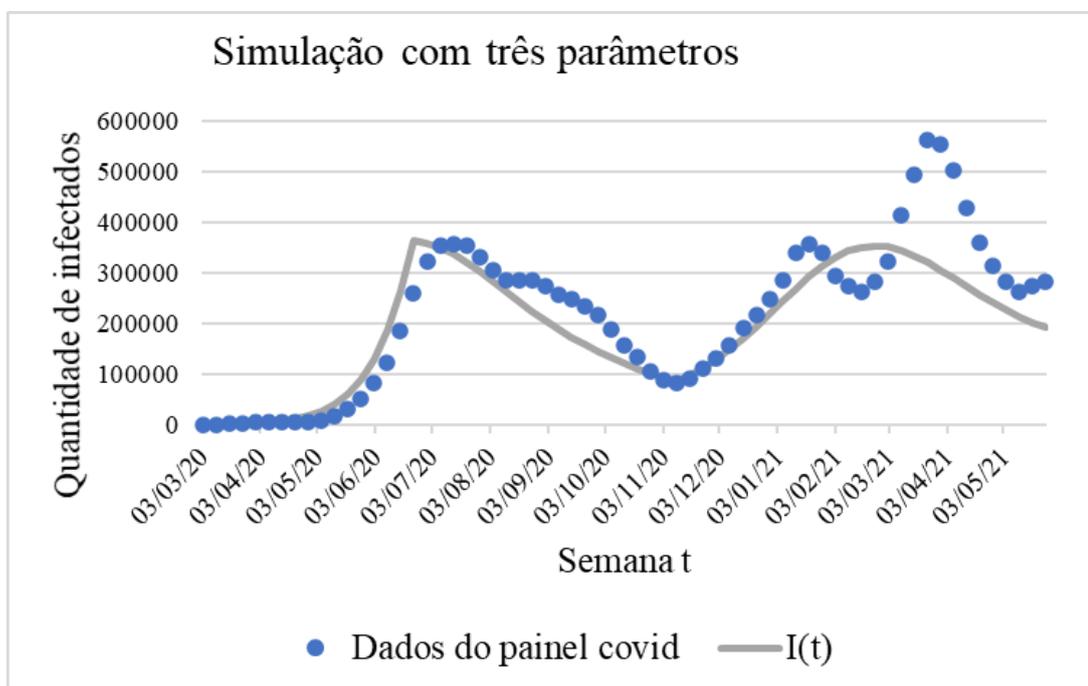
Fim da semana	Novos casos	I(t)	Erro	Erro Quadrático
10/03/2020	1152	1213	61	3745
17/03/2020	2292	1804	-488	238607
24/03/2020	4080	2681	-1399	1958170
31/03/2020	5940	3983	-1957	3828370
07/04/2020	6900	5917	-983	966245
14/04/2020	7044	8785	1741	3029498
21/04/2020	6936	13031	6095	37152113
28/04/2020	7056	19308	12252	150109731
05/05/2020	9936	28557	18621	346756936
12/05/2020	16980	42128	25148	632410733
19/05/2020	31536	61908	30372	922446810
26/05/2020	51504	90461	38957	1517652795
02/06/2020	82032	131092	49060	2406905807
09/06/2020	121548	187699	66151	4375978587
16/06/2020	187032	264142	77110	5946002740
23/06/2020	260460	362751	102291	10463473698
30/06/2020	323916	358597	34681	1202749652
07/07/2020	355248	349786	-5462	29836586
14/07/2020	356964	337062	-19902	396088098
21/07/2020	354672	321288	-33384	1114468502
28/07/2020	330648	303354	-27294	744942523
04/08/2020	306804	284102	-22702	515398041
11/08/2020	286848	264271	-22577	509706972
18/08/2020	285084	244476	-40608	1649015494
25/08/2020	284220	225191	-59029	3484416183
01/09/2020	274152	206762	-67390	4541438469
08/09/2020	257028	189418	-67610	4571076148
15/09/2020	249240	173295	-75945	5767614638
22/09/2020	234192	158452	-75740	5736491216
29/09/2020	216564	144894	-71670	5136641271

06/10/2020	188316	132583	-55733	3106151813
13/10/2020	158328	121459	-36869	1359342366
20/10/2020	134124	111442	-22682	514455773
27/10/2020	106524	102448	-4076	16614667
03/11/2020	89712	94387	4675	21851554
10/11/2020	83784	87171	3387	11472009
17/11/2020	92184	100110	7926	62819621
24/11/2020	111120	114999	3879	15046397
01/12/2020	132552	131955	-597	355880
08/12/2020	156936	151018	-5918	35017118
15/12/2020	191652	172110	-19542	381892995
22/12/2020	216312	194992	-21320	454559642
29/12/2020	247068	219226	-27842	775171181
05/01/2021	285840	244152	-41688	1737901378
12/01/2021	339060	268886	-70174	4924444758
19/01/2021	356844	292365	-64479	4157554083
26/01/2021	338328	313436	-24892	619590649
02/02/2021	294216	330984	36768	1351908136
09/02/2021	273156	344077	70921	5029798232
16/02/2021	263532	352100	88568	7844376606
23/02/2021	282924	354842	71918	5172234567
02/03/2021	323700	352507	28807	829818819
09/03/2021	413016	345658	-67358	4537135307
16/03/2021	494604	335112	-159492	25437602972
23/03/2021	561408	321811	-239597	57406741267
30/03/2021	553056	306700	-246356	60691341566
06/04/2021	501240	290641	-210599	44351939760
13/04/2021	427464	274359	-153105	23441281623
20/04/2021	360660	258418	-102242	10453371724
27/04/2021	314832	243231	-71601	5126670474
04/05/2021	282132	229072	-53060	2815336686
11/05/2021	263208	216105	-47103	2218684311

18/05/2021	274020	204408	-69612	4845768975
25/05/2021	281856	194000	-87856	7718742255

Fonte: O autor (2021).

Figura 3.26: Representação gráfica dos parâmetros para três períodos ajustados por mínimos quadrados sendo $p_1 = 2,534 \cdot 10^{-7}$ para o período de 03/03/2020 à 23/06/2020, $p_2 = 1,235 \cdot 10^{-7}$ para 30/06/2020 à 10/11/2020 e $p_3 = 2,291 \cdot 10^{-7}$ para 17/11/2020 à 25/05/2021 em que os dados do Painel COVID (y_t) são os pontos azuis D e I_t a curva cinza para o período total de 03/03/2020 à 25/05/2021.



Fonte: O autor (2021).

Observamos que, a simulação apresenta o quantitativo da aproximação da amostra com o valor $R^2 \approx 0,7895$. Entretanto ao avaliarmos as discrepâncias em alguns períodos, faz-se necessária uma adequação do parâmetro p para um período cada vez menor. O que pode ser trabalhoso do modo como procedemos até aqui.

Do que apresentamos até aqui, podemos notar que a variação do parâmetro p é uma das possibilidades para o melhor ajuste de I aos valores y . Descrevemos a seguir, uma equação que fornece ajustes de valores apropriados para o parâmetro em cada instante t .

3.5 Relação entre o Parâmetro p e o Número de Infectados

Nesta seção apresentamos a forma como pode ser descrita a relação entre o parâmetro p e o avanço da Pandemia por COVID-19, destacando quais as adequações necessárias para o ajuste do Modelo em relação aos dados da amostra.

3.5.1 Parâmetro p variável

Ao utilizarmos valores que sirvam de base para uma melhor aproximação e comparação nas simulações feitas, o objetivo é tornar, o mais próximo possível, os resultados (I_t) dos dados (y_t). Sabemos que, no Modelo proposto, o aumento dos novos casos é ajustado pelo parâmetro p no termo pS_tI_t das equações. Isto fornecerá o número de novos infectados a cada semana.

Tomando a segunda equação do Modelo (3.1) dada por

$$I(t+1) = I(t) + pI(t)S(t) - rI(t) - \mu I(t),$$

ao “isolar” p , podemos determinar seus valores, quando dadas as variáveis

$$p = \frac{I_{t+1} - I_t(1 - \mu - r)}{I_t S_t}. \quad (3.12)$$

Com o objetivo de determinar, em todo o período analisado, os p 's respectivos para cada instante t , a equação (3.12) serve para fornecer a melhor aproximação do valor de p apropriado para o instante t , que denotaremos por p_t . Essa equação é inserida na planilha de cálculo como uma fórmula para a obtenção dos valores correspondentes a p_t .

Um detalhe importante é que o valor I_t é substituído pela quantidade de novos casos y_t (dados do Painel COVID) apresentados na respectiva semana t , favorecendo assim uma relação direta entre os dados consultados e a incidência de p_t .

Com base na equação (3.12) fazemos a utilização dos valores iniciais das células $E2$, $E3$ e $F2$ bem como os parâmetros μ : $B2$ e r : $B5$ já descritos anteriormente. Na célula $H3$ correspondente a p_2 foi inserido

$$= (D3 - D2 * (1 - B5 - B2)) / (E3 * D2),$$

que é equivalente à

$$p_2 = \frac{1152 - 816(1 - \frac{1}{3} - 0,0010589698)}{816 \cdot 324000} \approx 0,0000002302954.$$

Repetindo o processo, de forma análoga, para as linhas subsequentes obtemos um parâmetro para cada instante t . A coluna “Parâmetro p para cada instante t ” é dada pela fórmula

$$p = \frac{I_{t+1} - I_t(1 - \mu - r)}{I_t S_t}$$

que na planilha corresponde a

$$Hn = (Dn - D(n - 1) * (1 - \$B\$5 - \$B\$2))/ (En * D(n - 1)),$$

tal que, $n \in \mathbb{Z}_+^*$ representa a semana da respectiva linha da planilha. Simultaneamente, inserimos Dn e En , de modo que, considera-se o p_t respectivo a linha n , isso fica claro quando observamos a Figura 3.27, Hn são as células da coluna H .

Figura 3.27: Ilustração da obtenção dos valores do parâmetro p em uma planilha eletrônica, em parte do período.

	C	D	E	F	G	H	I
1	Fim da semana	Dados do painel covid	S(t)	I(t)	R(t)	Parâmetro para cada instante t	p média móvel três semanas
2	03/03/20	816	3240000	816	0	-	-
3	10/03/20	1152	3239184	1152	272	2,30E-07	2,30E-07
4	17/03/20	2292	3237670	2292	645	4,09E-07	3,20E-07
5	24/03/20	4080	3235143	4080	1382	3,44E-07	3,28E-07
6	31/03/20	5940	3231976	5940	2684	2,44E-07	3,32E-07
7	07/04/20	6900	3229141	6900	4552	1,53E-07	2,47E-07
8	14/04/20	7044	3226880	7044	6663	1,10E-07	1,69E-07
9	21/04/20	6936	3224910	6936	8733	9,89E-08	1,21E-07
10	28/04/20	7056	3222834	7056	10681	1,09E-07	1,06E-07
11	05/05/20	9936	3218040	9936	12588	2,30E-07	1,46E-07
12	12/05/20	16980	3208198	16980	15376	3,24E-07	2,21E-07
13	19/05/20	31536	3188605	31536	20395	3,71E-07	3,09E-07
14	26/05/20	51504	3158941	51504	30057	3,03E-07	3,33E-07

Fonte: O autor (2021).

A Figura 3.27 ilustra a forma como foram obtidos os valores para os parâmetros p_t em uma planilha eletrônica. A Figura 3.28 apresenta a maneira como foram inseridas as fórmulas na planilha eletrônica.

Figura 3.28: Ilustração das fórmulas para obtenção dos valores do parâmetro p em uma planilha eletrônica, em parte do período.

	D	E	F	G	H
	Dados do painel covid	S(t)	I(t)	R(t)	Parâmetro para cada instante t
1					
2	816	=B6	816	=B8	-
3	1152	=E2-F2+G2*\$B\$4	=D3	=G2+\$B\$5*F2-\$B\$4*G2	=(D3-D2*(1-\$B\$5-\$B\$2))/(E2*D2)
4	2292	=E3-H4*F3*E3+\$B\$4*G3=F3+H4*F3*E3-\$B\$2*F3-\$B\$5*F3		=G3+\$B\$5*F3-\$B\$4*G3	=(D4-D3*(1-\$B\$5-\$B\$2))/(E3*D3)
5	4080	=E4-H5*F4*E4+\$B\$4*G4=F4+H5*F4*E4-\$B\$2*F4-\$B\$5*F4		=G4+\$B\$5*F4-\$B\$4*G4	=(D5-D4*(1-\$B\$5-\$B\$2))/(E4*D4)
6	5940	=E5-H6*F5*E5+\$B\$4*G5=F5+H6*F5*E5-\$B\$2*F5-\$B\$5*F5		=G5+\$B\$5*F5-\$B\$4*G5	=(D6-D5*(1-\$B\$5-\$B\$2))/(E5*D5)
7	6900	=E6-H7*F6*E6+\$B\$4*G6=F6+H7*F6*E6-\$B\$2*F6-\$B\$5*F6		=G6+\$B\$5*F6-\$B\$4*G6	=(D7-D6*(1-\$B\$5-\$B\$2))/(E6*D6)
8	7044	=E7-H8*F7*E7+\$B\$4*G7=F7+H8*F7*E7-\$B\$2*F7-\$B\$5*F7		=G7+\$B\$5*F7-\$B\$4*G7	=(D8-D7*(1-\$B\$5-\$B\$2))/(E7*D7)
9	6936	=E8-H9*F8*E8+\$B\$4*G8=F8+H9*F8*E8-\$B\$2*F8-\$B\$5*F8		=G8+\$B\$5*F8-\$B\$4*G8	=(D9-D8*(1-\$B\$5-\$B\$2))/(E8*D8)
10	7056	=E9-H10*F9*E9+\$B\$4*G9=F9+H10*F9*E9-\$B\$2*F9-\$B\$5*F9		=G9+\$B\$5*F9-\$B\$4*G9	=(D10-D9*(1-\$B\$5-\$B\$2))/(E9*D9)

Fonte: O autor (2021).

É importante observar nas colunas E , F e G , que nas fórmulas foram alterados os parâmetros que utilizam as células que representam os valores de p_t instantâneos obtidos. Note que já são inseridos os valores referentes às células da coluna H em suas respectivas linhas/semanas n . Isso fornece a obtenção simultânea dos valores que representam a proporção p dos contatos entre Infectados e Suscetíveis, de uma forma mais aproximada da situação apresentada pelo histórico da pandemia.

Desse procedimento obtemos duas possibilidades, a utilização do parâmetro instantâneo ou uma média aritmética das últimas três semanas, levando em consideração o caso de que um indivíduo infectado permanece na condição I por três semanas.

Para todo o período de 10/03/2020 a 23/05/2020, obtemos dois tipos de parâmetro p , um instantâneo p_t obtido nas células da coluna H e outro \bar{p}_t médio obtido da coluna I , este último é a média aritmética de p_t das últimas três semanas para cada instante t (Fig. 3.30).

Utilizando os dados da coluna H presentes na Figura 3.27, ou da Tabela 3.5, foram obtidos os \bar{p}_t 's médios das últimas três semanas, ou seja, $\bar{p}_t = \frac{p_t + p_{t-1} + p_{t-2}}{3}$. Assim, \bar{p}_t fornece uma alternativa a mais para testarmos uma aproximação para o ajuste.

Os valores obtidos para o parâmetro p em ambas situações descritas, podem ser consultados nas Tabelas 3.4 e 3.5. Resta apenas verificar qual das sequências de parâmetros melhor ajusta o Modelo. Dos dados presentes nessas tabelas, são feitas as simulações para todo o período, em que cada valor p_t ou \bar{p}_t é utilizado nas equações do Modelo (Eq. 3.1) e verificado o grau de determinação R^2 para cada simulação.

Utilização de \bar{p} : Para a simulação que utiliza \bar{p} foram inseridas nas colunas M , N e O as respectivas equações S , I e R conforme apresentado na Figura 3.29 e 3.30.

Figura 3.29: Inserção dos dados para simulação com a média móvel dos parâmetros

H	I	J	K	L	M	N	O
Parâmetro para cada instante t	p média móvel três semanas	Coluna1	Número de óbv		S(t)	I(t)	R(t)
-	-		-		3240000	816	0
2.30E-07	2.30E-07		1		3239184	1152	272
4.09E-07	3.20E-07		3		3238336	1959	645
3.44E-07	3.28E-07		5		3236336	3383	1271
2.44E-07	3.32E-07		5		3232800	5892	2346
1.53E-07	2.47E-07		4		3226566	8632	4212
1.10E-07	1.69E-07		3		3219853	10460	6914
9.89E-08	1.21E-07		2		3214441	11030	10112
1.09E-07	1.06E-07		3		3210580	11100	13368
2.30E-07	1.46E-07		8		3207360	12595	16511
3.24E-07	2.21E-07		19		3202145	17320	20021

Fonte: O autor (2021).

A coluna I da planilha oferece os valores \bar{p}_t utilizados para a inserção das fórmulas nas colunas M e N da mesma planilha (Fig.3.30).

Figura 3.30: Representação das fórmulas inseridas nas coluna M e N para simulação com a média móvel dos parâmetros

	M	N
1	S(t)	I(t)
2	=E2	=F2
3	=E3	=N2+I3*M2*N2-\$B\$2*N2-\$B\$5*N2
4	=M3-I3*M3*N3+\$B\$4*O3	=N3+I4*M3*N3-\$B\$2*N3-\$B\$5*N3
5	=M4-I4*M4*N4+\$B\$4*O4	=N4+I5*M4*N4-\$B\$2*N4-\$B\$5*N4
6	=M5-I5*M5*N5+\$B\$4*O5	=N5+I6*M5*N5-\$B\$2*N5-\$B\$5*N5
7	=M6-I6*M6*N6+\$B\$4*O6	=N6+I7*M6*N6-\$B\$2*N6-\$B\$5*N6
8	=M7-I7*M7*N7+\$B\$4*O7	=N7+I8*M7*N7-\$B\$2*N7-\$B\$5*N7
9	=M8-I8*M8*N8+\$B\$4*O8	=N8+I9*M8*N8-\$B\$2*N8-\$B\$5*N8

Fonte: O autor (2021).

Tabela 3.4: Valores para o parâmetro p para cada semana t .

Data semanal	Parâmetro p	Data semanal	Parâmetro p	Data semanal	Parâmetro p

03/03/20	-	04/08/20	$1,16 \cdot 10^{-7}$	05/01/21	$2,67 \cdot 10^{-7}$
10/03/20	$2,30 \cdot 10^{-7}$	11/08/20	$1,22 \cdot 10^{-7}$	12/01/21	$2,95 \cdot 10^{-7}$
17/03/20	$4,09 \cdot 10^{-7}$	18/08/20	$1,53 \cdot 10^{-7}$	19/01/21	$2,32 \cdot 10^{-7}$
24/03/20	$3,44 \cdot 10^{-7}$	25/08/20	$1,59 \cdot 10^{-7}$	26/01/21	$1,78 \cdot 10^{-7}$
31/03/20	$2,44 \cdot 10^{-7}$	01/09/20	$1,47 \cdot 10^{-7}$	02/02/21	$1,33 \cdot 10^{-7}$
07/04/20	$1,53 \cdot 10^{-7}$	08/09/20	$1,37 \cdot 10^{-7}$	09/02/21	$1,72 \cdot 10^{-7}$
14/04/20	$1,10 \cdot 10^{-7}$	15/09/20	$1,56 \cdot 10^{-7}$	16/02/21	$1,99 \cdot 10^{-7}$
21/04/20	$9,89 \cdot 10^{-8}$	22/09/20	$1,43 \cdot 10^{-7}$	23/02/21	$2,75 \cdot 10^{-7}$
28/04/20	$1,09 \cdot 10^{-7}$	29/09/20	$1,37 \cdot 10^{-7}$	02/03/21	$3,32 \cdot 10^{-7}$
05/05/20	$2,30 \cdot 10^{-7}$	06/10/20	$1,09 \cdot 10^{-7}$	09/03/21	$4,46 \cdot 10^{-7}$
12/05/20	$3,24 \cdot 10^{-7}$	13/10/20	$9,31 \cdot 10^{-8}$	16/03/21	$4,31 \cdot 10^{-7}$
19/05/20	$3,71 \cdot 10^{-7}$	20/10/20	$9,57 \cdot 10^{-8}$	23/03/21	$4,35 \cdot 10^{-7}$
26/05/20	$3,03 \cdot 10^{-7}$	27/10/20	$6,71 \cdot 10^{-8}$	30/03/21	$3,49 \cdot 10^{-7}$
02/06/20	$2,93 \cdot 10^{-7}$	03/11/20	$9,06 \cdot 10^{-8}$	06/04/21	$2,97 \cdot 10^{-7}$
09/06/20	$2,62 \cdot 10^{-7}$	10/11/20	$1,36 \cdot 10^{-7}$	13/04/21	$2,48 \cdot 10^{-7}$
16/06/20	$2,87 \cdot 10^{-7}$	17/11/20	$2,17 \cdot 10^{-7}$	20/04/21	$2,40 \cdot 10^{-7}$
23/06/20	$2,47 \cdot 10^{-7}$	24/11/20	$2,68 \cdot 10^{-7}$	27/04/21	$2,75 \cdot 10^{-7}$
30/06/20	$2,05 \cdot 10^{-7}$	01/12/20	$2,62 \cdot 10^{-7}$	04/05/21	$3,01 \cdot 10^{-7}$
07/07/20	$1,62 \cdot 10^{-7}$	08/12/20	$2,59 \cdot 10^{-7}$	11/05/21	$3,41 \cdot 10^{-7}$
14/07/20	$1,34 \cdot 10^{-7}$	15/12/20	$2,81 \cdot 10^{-7}$	18/05/21	$4,71 \cdot 10^{-7}$
21/07/20	$1,35 \cdot 10^{-7}$	22/12/20	$2,39 \cdot 10^{-7}$	25/05/21	$4,60 \cdot 10^{-7}$
28/07/20	$1,14 \cdot 10^{-7}$	29/12/20	$2,52 \cdot 10^{-7}$	-	-

Fonte: O autor (2021).

Tabela 3.5: Valores obtidos para o parâmetro \bar{p} médio da respectiva semana considerando a média aritmética dos três últimos valores de p .

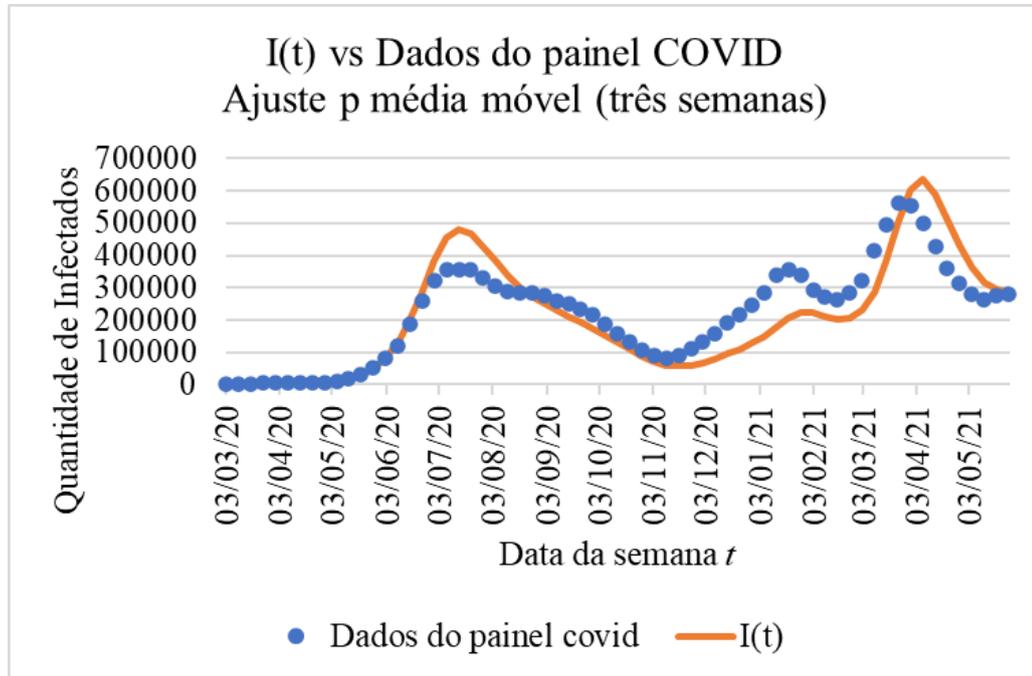
Data do fim da semana	Parâmetro para cada instante t	Data do fim da semana	Parâmetro para cada instante t	Data do fim da semana	Parâmetro para cada instante t
03/03/20	-	04/08/20	$1,22 \cdot 10^{-7}$	05/01/21	$2,53 \cdot 10^{-7}$
10/03/20	$2,30 \cdot 10^{-7}$	11/08/20	$1,17 \cdot 10^{-7}$	12/01/21	$2,71 \cdot 10^{-7}$

17/03/20	$3,20 \cdot 10^{-7}$	18/08/20	$1,30 \cdot 10^{-7}$	19/01/21	$2,65 \cdot 10^{-7}$
24/03/20	$3,28 \cdot 10^{-7}$	25/08/20	$1,44 \cdot 10^{-7}$	26/01/21	$2,35 \cdot 10^{-7}$
31/03/20	$3,32 \cdot 10^{-7}$	01/09/20	$1,53 \cdot 10^{-7}$	02/02/21	$1,81 \cdot 10^{-7}$
07/04/20	$2,47 \cdot 10^{-7}$	08/09/20	$1,48 \cdot 10^{-7}$	09/02/21	$1,61 \cdot 10^{-7}$
14/04/20	$1,69 \cdot 10^{-7}$	15/09/20	$1,47 \cdot 10^{-7}$	16/02/21	$1,68 \cdot 10^{-7}$
21/04/20	$1,21 \cdot 10^{-7}$	22/09/20	$1,45 \cdot 10^{-7}$	23/02/21	$2,15 \cdot 10^{-7}$
28/04/20	$1,06 \cdot 10^{-7}$	29/09/20	$1,45 \cdot 10^{-7}$	02/03/21	$2,69 \cdot 10^{-7}$
05/05/20	$1,46 \cdot 10^{-7}$	06/10/20	$1,30 \cdot 10^{-7}$	09/03/21	$3,51 \cdot 10^{-7}$
12/05/20	$2,21 \cdot 10^{-7}$	13/10/20	$1,13 \cdot 10^{-7}$	16/03/21	$4,03 \cdot 10^{-7}$
19/05/20	$3,09 \cdot 10^{-7}$	20/10/20	$9,91 \cdot 10^{-8}$	23/03/21	$4,37 \cdot 10^{-7}$
26/05/20	$3,33 \cdot 10^{-7}$	27/10/20	$8,53 \cdot 10^{-8}$	30/03/21	$4,05 \cdot 10^{-7}$
02/06/20	$3,23 \cdot 10^{-7}$	03/11/20	$8,44 \cdot 10^{-8}$	06/04/21	$3,60 \cdot 10^{-7}$
09/06/20	$2,86 \cdot 10^{-7}$	10/11/20	$9,77 \cdot 10^{-8}$	13/04/21	$2,98 \cdot 10^{-7}$
16/06/20	$2,81 \cdot 10^{-7}$	17/11/20	$1,48 \cdot 10^{-7}$	20/04/21	$2,62 \cdot 10^{-7}$
23/06/20	$2,65 \cdot 10^{-7}$	24/11/20	$2,07 \cdot 10^{-7}$	27/04/21	$2,54 \cdot 10^{-7}$
30/06/20	$2,46 \cdot 10^{-7}$	01/12/20	$2,49 \cdot 10^{-7}$	04/05/21	$2,72 \cdot 10^{-7}$
07/07/20	$2,05 \cdot 10^{-7}$	08/12/20	$2,63 \cdot 10^{-7}$	11/05/21	$3,06 \cdot 10^{-7}$
14/07/20	$1,67 \cdot 10^{-7}$	15/12/20	$2,67 \cdot 10^{-7}$	18/05/21	$3,71 \cdot 10^{-7}$
21/07/20	$1,43 \cdot 10^{-7}$	22/12/20	$2,60 \cdot 10^{-7}$	25/05/21	$4,24 \cdot 10^{-7}$
28/07/20	$1,28 \cdot 10^{-7}$	29/12/20	$2,57 \cdot 10^{-7}$		

Fonte: O autor (2021).

Note que os valores do parâmetro \bar{p} se alteram a cada semana (Fig. 3.30) de modo que se procure ajustar de forma simultânea a proporção sobre pSI .

Figura 3.31: Representação gráfica do ajuste de \bar{p} médio das últimas três semanas onde I_t representa os valores simulados e Dados do painel COVID (y_t) representa a amostra comparada



Fonte: O autor (2021).

Da simulação para \bar{p} , obtemos $R^2 = 0,8150$, o que representa o erro total do Modelo. Entretanto, ainda necessitamos de uma melhor aproximação. Assim, para as simulações em que consideramos p semanal, o resultado se ajusta aos valores da amostra com um “erro” menor, conforme apresentado na Figura 3.33.

Utilização de p_t : Para essa simulação foram considerados os números de infectados I para a primeira e segunda semana, iguais aos casos confirmados (Dados Painel COVID). Assim a inserção das equações começam a partir da terceira semana, conforme ilustrado pela Figura 3.32, os valores p_t são inseridos como representação Hn onde n representa linha/semana referida.

Na simulação com a utilização de p a cada instante t , por supormos que o parâmetro atual afeta a contaminação da semana seguinte, o primeiro parâmetro obtido é o da segunda semana p_2 (linha 3 da planilha) que é inserido na equação da terceira semana (linha 4 da planilha) e assim sucessivamente.

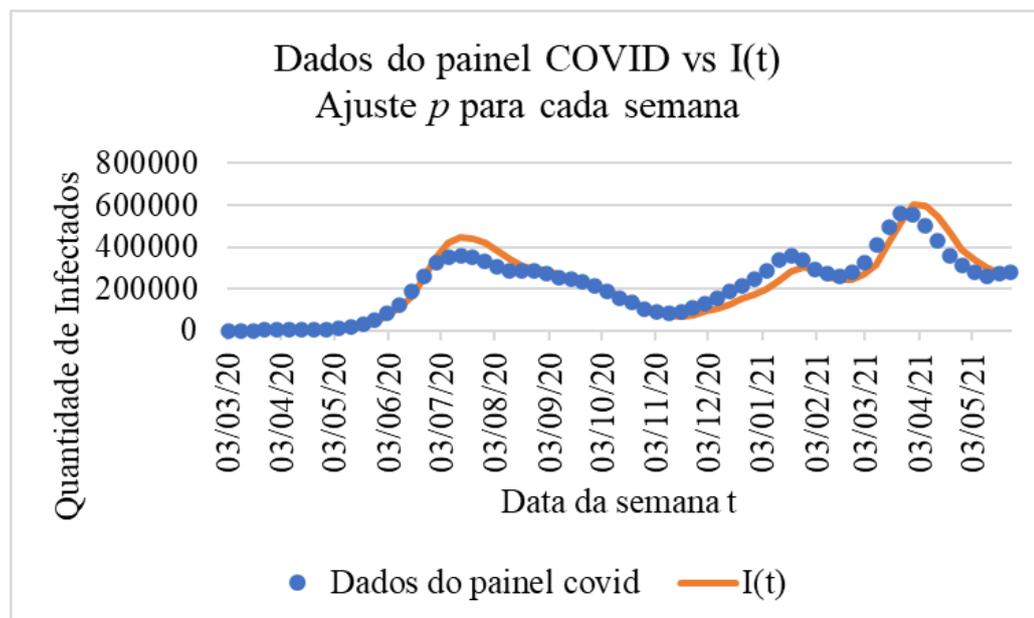
Figura 3.32: Representação da inserção das fórmulas para p variando semanalmente.

	M	N
1	$S(t)$	$I(t)$
2	=E2	=F2
3	=E3	=D3
4	=M3-H3*N3*M3+\$B\$4*O3	=N3+H3*M3*N3-\$B\$2*N3-\$B\$5*N3
5	=M4-H4*N4*M4+\$B\$4*O4	=N4+H4*M4*N4-\$B\$2*N4-\$B\$5*N4
6	=M5-H5*N5*M5+\$B\$4*O5	=N5+H5*M5*N5-\$B\$2*N5-\$B\$5*N5
7	=M6-H6*N6*M6+\$B\$4*O6	=N6+H6*M6*N6-\$B\$2*N6-\$B\$5*N6
8	=M7-H7*N7*M7+\$B\$4*O7	=N7+H7*M7*N7-\$B\$2*N7-\$B\$5*N7
9	=M8-H8*N8*M8+\$B\$4*O8	=N8+H8*M8*N8-\$B\$2*N8-\$B\$5*N8
10	=M9-H9*N9*M9+\$B\$4*O9	=N9+H9*M9*N9-\$B\$2*N9-\$B\$5*N9
11	=M10-H10*N10*M10+\$B\$4*O10	=N10+H10*M10*N10-\$B\$2*N10-\$B\$5*N10
12	=M11-H11*N11*M11+\$B\$4*O11	=N11+H11*M11*N11-\$B\$2*N11-\$B\$5*N11
13	=M12-H12*N12*M12+\$B\$4*O12	=N12+H12*M12*N12-\$B\$2*N12-\$B\$5*N12
14	=M13-H13*N13*M13+\$B\$4*O13	=N13+H13*M13*N13-\$B\$2*N13-\$B\$5*N13
15	=M14-H14*N14*M14+\$B\$4*O14	=N14+H14*M14*N14-\$B\$2*N14-\$B\$5*N14

Fonte: O autor (2021).

Desse modo é que obtivemos as devidas aproximações, conforme a representação gráfica da Figura 3.33.

Figura 3.33: Representação gráfica do ajuste de p semanal onde I_t representa os valores simulados e Dados do painel COVID (y_t) representa a amostra comparada.



Fonte: O autor (2021).

Observamos que foi possível obter um ajuste para a simulação de modo que o p_t variável é o que melhor aproxima o ajuste do Modelo dos casos confirmados, onde

obtemos $R^2 \approx 0,9118$, que mostra que o erro total do Modelo é reduzido significativamente ($< 10\%$).

Os procedimentos utilizados até aqui forneceram instrumentos que possibilitam um ajuste mais adequado do Modelo quando comparado aos dados “reais”. Isso favorece a seleção de parâmetros que melhor representam a interação entre infectados e suscetíveis e que sustentem a hipótese da variabilidade de p . Da seleção de parâmetros mais adequados para as simulações, são feitas as comparações nos diferentes cenários que se referem à adesão das medidas de biossegurança.

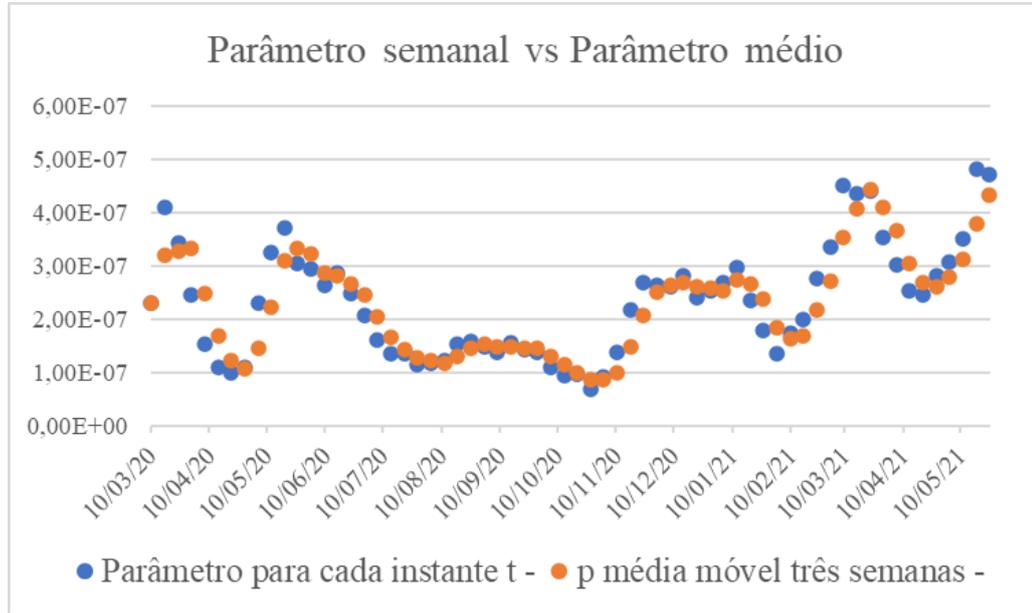
3.5.2 Escolha do parâmetro p adequado

Para simulações em que são comparadas situações envolvendo medidas de biossegurança para o enfrentamento da Pandemia, considera-se um único parâmetro p para todo o período, com o intuito de se verificar qual o impacto de uma medida de biossegurança pode causar sobre a interação $I \times S$.

Quando observamos o ajuste de p_t semanal (Fig. 3.33), nota-se que a variação de p_t implica na variação de I_t , e a maior quantidade de novos casos de infectados está relacionada a um maior valor de p . Com isso, dentre os p 's obtidos, escolhemos o maior parâmetro p_t , para que esse represente a maior proporção de contatos entre infectados e suscetíveis. Queremos supor que esse parâmetro seja o que represente um maior impacto na propagação do vírus na população.

Esse p é obtido dos valores apresentados nas Tabelas (3.4) e (3.5). Considerando que o maior p é o que representa a maior proporção de contatos entre infectados e suscetíveis e resulta em uma maior quantidade de infectados. A comparação gráfica ilustra os valores de p e \bar{p} de onde foi escolhido o de maior valor. Dessa escolha utilizamos a hipótese de que as medidas de biossegurança podem impactar na redução do contágio, e essa relação esta diretamente ligada a intensidade do maior p apresentado.

Figura 3.34: Representação gráfica dos parâmetros p e \bar{p} no qual podem ser comparados os valores em relação ao tempo.



Fonte: O autor (2021).

Na planilha eletrônica, escolhida uma célula de resposta, pode se obter um maior valor dentre uma lista, utilizando o comando “=Maior(matriz,k)”, para a “matriz” seleciona-se a lista dos valores apresentados para p , e para “ k ” o valor 1 que indica a ordem do maior valor. Da representação da Figura 3.34, o maior valor obtido é

$$p_{max} \approx 4,707 \cdot 10^{-7},$$

que corresponde a semana de 18/05/2021.

A hipótese é que esse valor seja o que representa uma maior proporção na interação entre indivíduos infectados e suscetíveis. O valor de $p_{max} \approx 4,707 \cdot 10^{-7}$ serve como parâmetro de referência para comparações em relação as medidas de biossegurança no controle da contaminação por COVID-19. A seguir são descritos os procedimentos que fornecem meios de obtermos variações dos impactos, que refletem a adesão às medidas de controle do avanço da Pandemia em uma população.

3.6 Simulações e Resultados

Nesta seção, são descritos os procedimentos utilizados no Modelo, que possibilitam comparar diferentes situações e cenários quando são adotadas medidas de prevenção

para o avanço da contaminação por COVID-19. São apresentadas equações que fornecem valores que impactam diretamente sobre o parâmetro p , com isso são feitas simulações de diferentes cenários que relacionam a adesão das medidas de biossegurança ao avanço da contaminação. Em seguida, são apresentados gráficos que destacam as comparações dos valores obtidos e por fim, fazemos uma comparação entre os dados de SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso (2021) e as simulações, levando-se em conta, o impacto sobre o parâmetro p ajustado de acordo com a adoção das medidas de biossegurança.

3.6.1 Medidas de prevenção para a redução de contágio, distanciamento social e uso de máscaras

Alguns aspectos evidenciam o avanço da pandemia. Isso se deve ao fato de que o vírus possui um alto nível de transmissibilidade. Também evidenciamos no Brasil, até o presente momento, a ausência de vacinas para população em sua totalidade.

Devido a inexistência de um tratamento que seja efetivo para a recuperação de um indivíduo infectado pela COVID-19, observamos as altas taxas de ocupação de leitos de unidades de terapia intensivas presentes no Painel COVID (SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso, 2021). Fatores como os que acabamos de citar, demandam métodos alternativos no enfrentamento do cenário pandêmico para que se possa evitar o colapso do sistema de saúde.

As medidas de distanciamento social, isolamento de casos, fechamento de escolas e comércio, restrição de tráfego e uso de máscaras faciais, estão entre as estratégias mais adotadas em diferentes países, pois a adesão às medidas de proteção individual é de extrema relevância para controlar a rápida disseminação do vírus. Estudos mostram ampla variação na adoção dessas medidas em diferentes populações durante a pandemia da COVID-19 (PEIXOTO et al., 2020).

Com isso, no Modelo proposto, apresentamos diferentes cenários, onde são levados em consideração a adoção às medidas de proteção individual. Vamos considerar as chances de infecção que existem ao adotar ou não duas das medidas de prevenção, que são o uso de máscaras e o distanciamento social.

Atualmente, existem muitos estudos relacionados à eficácia do uso de máscara como meio de combate a disseminação da doença COVID-19. Para os casos em que a população, ou parte dela, adote o uso de máscaras, utilizamos o estudo apresentado por

WENDLING et al. (2021) em que consideram-se as distintas maneiras que o contato pode ocorrer, ou seja, os possíveis encontros, onde as chances para cada tipo de contato entre infectado e suscetível sejam mensuradas para que possamos verificar o avanço do contágio.

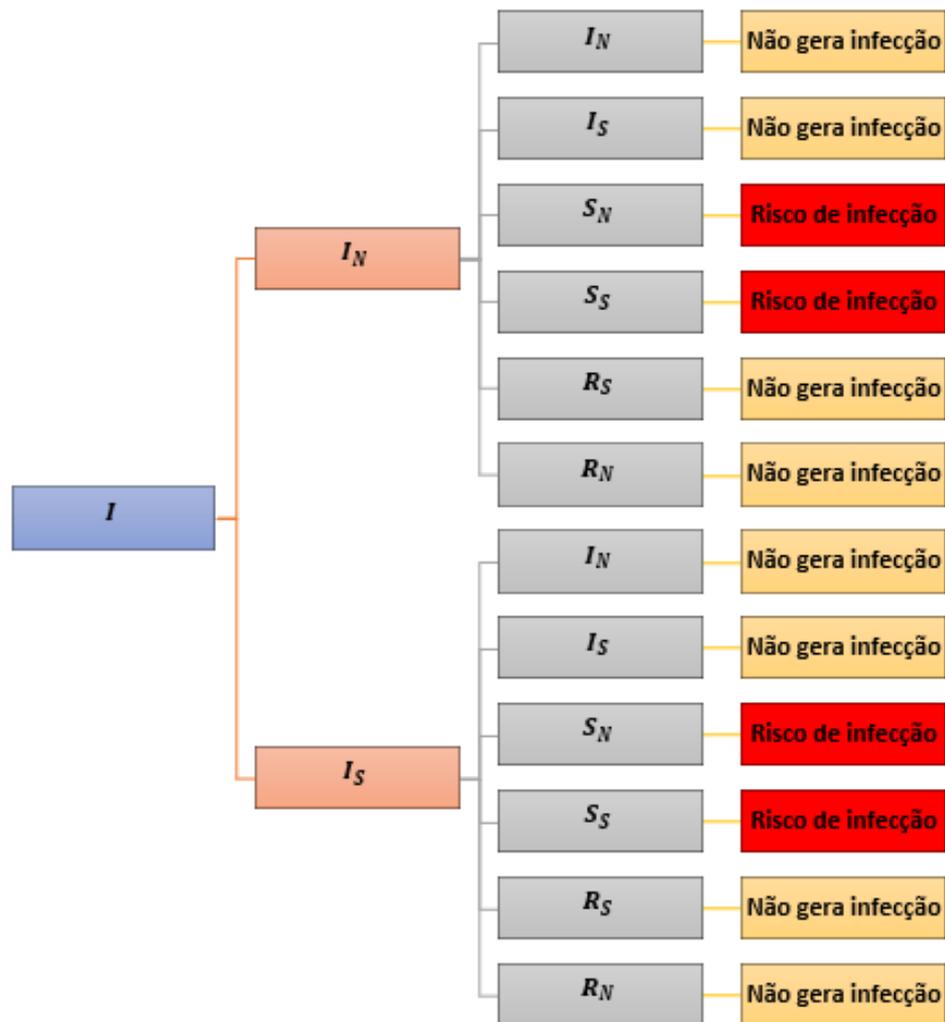
Os fatores de redução de contágio da doença são comparados quando avalia-se a quantidade de partículas que foram interrompidas pelos diferentes dispositivos de proteção e calcula-se os fatores de redução (RF) e as porcentagens do total de partículas inaladas em diversas configurações.

Dessas configurações, utilizando a proteção facial pelo uso de máscaras em que foram considerados todos os tamanhos de partículas ($\leq 0,3 \mu m$ a $10 \mu m$), os fatores de redução para utilização de máscara apenas pelo receptor foram de 13,8%, ou seja, o risco de infecção atingiu 86,2% do risco sem proteção. A proteção quando usada apenas pelo emissor, teve desempenho para todos os tamanhos de partículas, com fator de redução superior a 96%, ou seja, risco de infecção de 4% do risco sem proteção. Quando a proteção dupla foi usada (máscara para receptor e emissor), o fator de redução chegou a 97,1%, isto é, o risco de infecção é de 2,9% do risco sem proteção, para a máscara na faixa de $0,3 - 0,5 \mu m$ (WENDLING et al., 2021).

Para o distanciamento social, consideramos as informações de GONÇALVES et al. (2020) em um breve estudo que fornece resultados em que a adoção de medidas representa uma redução significativa nos contágios. Relatos de indivíduos que fizeram a adesão moderada a maior distanciamento social ($\geq 1m$ de outros indivíduos) tiveram entre 59% e 75% menor chance de se infectar. Outro fator importante é o de menor exposição fora do domicílio (isolamento) que reduziu as chances entre 52% e 75%, em comparação com sair todos os dias durante o dia todo (GONÇALVES et al., 2020).

A interação entre os indivíduos em suas respectivas classes S , I e R podem impactar ou não no Modelo, conforme apresentado na Figura 3.35

Figura 3.35: Representação em diagrama dos possíveis contatos para um indivíduo infectado.



Fonte: O autor (2021).

Das relações entre as variáveis são descritas as seguintes notações:

- Infectado com adesão às medidas (I_S);
- infectado sem adesão às medidas (I_N);
- suscetível com adesão às medidas (S_S);
- suscetível sem adesão às medidas (S_N).

Observamos que cada interação fornece uma probabilidade diferente de contágio, dependendo da condição de cada indivíduo. Desse modo, ilustramos por meio de uma tabela as possíveis formas de contato entre I e S .

Tabela 3.6: Representação das chances para cada interação entre indivíduos suscetíveis e infectados, em que x , y , z e w correspondem às chances de infecção para cada tipo de contato.

Infectado	Suscetível	Chance de infecção
I_N	S_S	x
I_S	S_S	y
I_N	S_N	z
I_S	S_N	w

Fonte: O autor (2021).

Na tabela 3.6 estão descritas diferentes maneiras em que podem ocorrer a infecção por COVID-19. Para cada encontro foram estabelecidos valores x , y , z e w como sendo as chances de transmissão. Assim, para modelarmos o estudo acerca da adesão ao uso de máscaras de proteção facial, propomos as seguintes condições:

- Para x : o emissor do vírus não utiliza máscara e o receptor utiliza. O fator de retenção de partículas é considerado apenas para o receptor que é de 13,8%, ou seja, a chance de se respirar uma partícula infectada podendo ocorrer a transmissão do vírus é de 86,2% do risco original ou $x = 0,862$.

- Para y : emissor e receptor utilizam máscara. O fator de retenção é de 97,1% logo o risco de infecção é de $y = 0,029$ do risco original.

- Para z : observamos que tanto a emissão quanto a recepção de partículas não sofrem nenhuma interferência, e nesse caso, a chance é de 100% ou $z = 1$.

- Para w : observamos que apenas o emissor utiliza a proteção, o que resulta em 96,0% na retenção de partículas, logo $w = 0,04$.

Substituindo na Tabela 3.6 obtemos a Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Representação das chances para cada interação entre indivíduos suscetíveis e infectados para uso de **máscara**, em que x , y , z e w correspondem às chances de infecção para cada tipo de contato.

Infectado	Suscetível	Fração do Risco Original
I_N	S_S	0,862
I_S	S_S	0,029
I_N	S_N	1
I_S	S_N	0,04

Fonte: O autor (2021).

Para a adesão às medidas de distanciamento e isolamento, em alusão às informações apresentadas, consideramos para nossas simulações a chance de infecção de 0,4 sobre o risco original para os suscetíveis, enquanto que para os infectados a chance

de transmissão seja de 0,2 sobre o risco original. Consideraremos esses riscos com a suposição que, quando haja adesão, essa seja simultânea ao distanciamento e isolamento. Descartando outras possibilidades obtemos os valores apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Representação das chances para cada interação entre indivíduos suscetíveis e infectados para o distanciamento/isolamento social, em que são apresentados os valores correspondente às chances de infecção para cada tipo de contato.

Infectado	Suscetível	Fração do Risco Original
I_N	S_S	0,2
I_S	S_S	0,08
I_N	S_N	1
I_S	S_N	0,4

Fonte: O autor (2021).

Além da tabela de distanciamento/isolamento os valores referentes a interação estão ilustrados pela Figura 3.37. Da descrição tanto para o uso de máscara quanto para o distanciamento social, considera-se que os valores apresentados são proporcionais ao percentual de cada população que adere ou não às medidas de prevenção.

Considerando que cada classe de indivíduos do Modelo seja dividida em os que aderem às medidas e os que não aderem, temos que $I = I_N + I_S$ e $S = S_N + S_S$.

Para cada grupo podemos denotar as seguintes representações percentuais:

- Seja $i_1 I = I_S$ implica que i_1 é o percentual da população de infectados que aderem às medidas de biossegurança.
- $i_2 I = I_N$ implica que i_2 é o percentual dos infectados que não aderem.
- s_1 o percentual dos suscetíveis (S_S) que aderem.
- s_2 o percentual dos suscetíveis (S_N) que não aderem ao uso de máscara

Ocorre é que, para o Modelo, a quantidade de novos infectados depende de

$$pSI$$

tal que

$$\begin{aligned} pSI &= p(I_N + I_S)(S_N + S_S) \\ &= p(i_1 I + i_2 I)(s_1 S + s_2 S) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= p(i_1 + i_2)I(s_1 + s_2)S \\
&= (i_1 + i_2)(s_1 + s_2)pSI \\
&= (i_1s_1 + i_1s_2 + i_2s_1 + i_2s_2)pSI
\end{aligned}$$

Do fator $(i_1s_1 + i_1s_2 + i_2s_1 + i_2s_2)$ podemos considerar a distribuição das chances de contágio para x , y , z e w . Dessa relação, podemos representar a distribuição dos valores como sendo a soma das probabilidades de cada evento ocorrer, sendo denotado por c o valor obtido dessa variação, dado por

$$c = i_2s_1x + i_1s_1y + i_2s_2z + i_1s_2w. \quad (3.13)$$

a alteração é dada por $cpSI$. Consideraremos, da Eq. 3.13, duas equações c_1 para a adesão ao uso de máscara e c_2 para adesão ao distanciamento social.

Da equação (3.13), vamos obter a proporção de infectados com base na adoção das medidas de prevenção do contágio da doença, variando as situações para i_1 , i_2 , s_1 , s_2 que representam o percentual de adesão de cada grupo.

Com base nas informações apresentadas e na equação (3.13), inserimos os dados em uma nova planilha. Para os valores utilizados como referência para simulação, são adicionados os valores dos p 's. Um representa o melhor ajuste para o período inicial (p_{MQ}), o outro, a maior proporção na incidência dos novos casos (p_{max}), ambos obtidos anteriormente, também são inseridos o número de óbitos para cada simulação, a fim de se comparar o impacto de cada parâmetro e medida, conforme ilustrados na Figura 3.36.

Figura 3.36: Ilustração para inserção dos dados, são inseridas as células $B9$ maior p estimado, $B10$ número de óbitos para o parâmetro p da célula $B9$, $B11$ p obtido por ajuste de mínimos quadrados e $B12$ número de óbitos correspondente ao parâmetro p da célula $B11$.

	A	B
1	VALORES UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA PARA SIMULAÇÃO	
2	Taxa de mortalidade $\mu= 1,061E-03$	
3	Coeficiente de interação p inicial= 4,708E-07	
4	Taxa de tempo imunizado $a= 0,04$	
5	Taxa de tempo de recuperação $r= 0,33$	
6	$S0= 3240000,00$	
7	$I0= 816$	
8	$R0= 0,00$	
9	p estimativa inicial (maior do período)= 4,71E-07	
10	Número de óbitos= 8026	
11	melhor p (MQ) ajustado por mínimos quadrados= 2,325E-07	
12	Número de óbitos= 4994	

Fonte: O autor (2021).

A Figura 3.37 ilustra a forma como são descritos os tipos de contato entre as classes S e I bem como a inserção dos valores proporcionais para o risco original de contágio em cada situação.

Figura 3.37: Valores inseridos na planilha eletrônica de acordo com cada interação Infectado-Suscetível, em que cada célula representa a chance de infecção sobre o risco real: $C47$ para ambos com máscara, $C48$ apenas suscetível com máscara, $C49$ ambos sem máscaras, $C50$ apenas infectado com máscara. Para a relação do distanciamento social, foram utilizados os valores referentes às células $C54$, $C55$, $C56$ e $C57$ de forma análoga à adesão ao uso de máscaras.

CÁLCULO RISCO DE INFECÇÃO RELACIONADO AO USO DE MÁSCARA			
	INFECTADO	SUSCETÍVEL	RISCO NA INTERAÇÃO
49	COM MÁSCARA	COM MÁSCARA	0,03
50	SEM MÁSCARA	COM MÁSCARA	0,86
51	SEM MÁSCARA	SEM MÁSCARA	1,00
52	COM MÁSCARA	SEM MÁSCARA	0,04
53			
54			
RISCO DE INFECÇÃO RELACIONADO AO ISOLAMENTO DISTANCIAMENTO FÍSICO ≥ 1 M			
	INFECTADO	SUSCETÍVEL	RISCO NA INTERAÇÃO
55	COM DISTANCIAMENTO	COM DISTANCIAMENTO	0,08
56	SEM DISTANCIAMENTO	COM DISTANCIAMENTO	0,20
57	SEM DISTANCIAMENTO	SEM DISTANCIAMENTO	1,00
58	COM DISTANCIAMENTO	SEM DISTANCIAMENTO	0,40
59			
60			

Fonte: O autor (2021).

A Figura 3.37 representa a forma como são inseridos na planilha os valores de acordo com cada interação Infectado/Suscetível onde cada célula representa a chance de infecção sobre o risco real. Essa representação auxilia na utilização da Equação 3.13 tal

que $C47$ e $C54$ contém o valor x , $C48$ e $C55$ correspondem a y , $C49$ e $C56$ os valores para z e $C50$ e $C57$ são valores de w . Onde os valores x , y , z e w são inseridos de acordo com o tipo de medida de biossegurança.

Com base nesses valores é que são obtidos os valores de c (Eq. 3.13). Na Figura 3.38 estão ilustradas as formas como foram inseridas as fórmulas na planilha eletrônica.

Figura 3.38: Valores inseridos na planilha de acordo com cada interação Infectado-Suscetível onde, na célula $A17$, é inserido o valor percentual.

Passo 1

	A	B
13		
14	Impacto da adesão ao uso de máscara sobre o parâmetro p	
15	Infectado	Suscetível
16	Percentual que utiliza máscara	percentual que utiliza máscara
17	=0,1	10,00%
18	Percentual que não utiliza máscara	Percentual que não utiliza máscara
19	90,00%	90,00%
20	Percentual de impacto uso de máscara em " p "= 0,8915248	

Fonte: O autor (2021).

Essa inserção pode ser feita para cada célula percentual. Mas da soma da população de infectados que não utiliza máscara com os infectados que utilizam máscaras ($A17 + A19$) resulta em 100% dos infectados, logo para $A19$ inserimos $= 1 - A17$. De forma análoga fazemos a inserção para os dados de adesão ao distanciamento social, isso pode ser observado na Figura 3.39.

Em resumo temos: $i'_1 : A17$, $i'_2 : A19$, $s'_1 : B17$ e $s'_2 : B19$ para os percentuais de adesão e $x' : C50$, $y' : C51$, $z' : C52$ e $w' : C53$ para as chances de infecção para o risco real, em que substituindo na Equação 3.13, obtemos:

$$c_1 = i'_2 s'_1 x + i'_1 s'_1 y + i'_2 s'_2 z + i'_1 s'_2 w$$

$$B20 = A19 * B17 * C50 + A17 * B17 * C51 + A19 * B19 * C52 + A17 * B19 * C53$$

que representa o percentual que incide sobre p_{max} com adesão ao uso de máscaras. Já para as comparações em relação ao distanciamento social $i''_1 : A25$, $i''_2 : A27$, $s''_1 : B25$ e $s''_2 : B27$, para os percentuais de adesão e $x'' : C57$, $y'' : C58$, $z'' : C59$ e $w'' : C60$ em que substituindo na Equação 3.13, obtemos:

$$c_2 = i''_2 s''_1 x'' + i''_1 s''_1 y'' + i''_2 s''_2 z'' + i''_1 s''_2 w''$$

$$B28 = A27 * B25 * C57 + A25 * B25 * C58 + A27 * B27 * C59 + A25 * B27 * C60$$

que representa a proporção sobre p_{max} para adesão ao distanciamento social.

Nas células $B20$ e $B28$ foram inseridas (cf. Eq. 3.13) respectivamente o impacto do uso de máscaras e o impacto do distanciamento social, conforme ilustrado na Figura 3.39, em que também é ilustrada na célula $B29$ o impacto causado pelas medidas de biossegurança, obtido a partir do produto sobre o maior parâmetro $p_{max} \approx 4,7073847 \cdot 10^{-7}$.

Figura 3.39: Inserção da fórmula para o impacto de c_1 : $B20$ e c_2 : $B28$ sobre o parâmetro p_{max} : $B3$, onde obtemos p : $B20 * B28 * B3$

	A	B
14	Impacto da adesão ao uso de máscara sobre o parâmetro p	
15	Infectado	Suscetível
16	Percentual que utiliza máscara	percentual que utiliza máscara
17	=0,1	=A17
18	Percentual que não utiliza máscara	Percentual que não utiliza máscara
19	=1-A17	=1-B17
20	Percentual de impacto uso de máscara em "p" = $=C50*A17*B17+C51*A19*B17+C52*A19*B19+A17*B19*C53$	
21	<	
22	Impacto da adesão ao distanciamento social sobre o parâmetro p	
23	Infectado	Suscetível
24	Percentual adere ao distanciamento social	Percentual que adere ao distanciamento social
25	=0,1	=A21/A54
26	Percentual não adere ao distanciamento social	Percentual não adere ao distanciamento social
27	=1-A25	=1-B25
28	Percentual de impacto distanciamento social em "p" = $=C57*A25*B25+C58*A27*B25+C59*A27*B27+A25*B27*C60$	
29	$p = B20*B3*B28$	

Fonte: O autor (2021).

Figura 3.40: Valores inseridos na planilha de acordo com cada interação Infectado-Suscetível, onde $A17$ e $A19$ representam Infectados que aderem ou não ao uso de máscaras e $B17$ e $B19$ representam Suscetíveis que aderem ou não ao uso de máscaras para ambos com máscara. De forma análoga, as células $A25$, $A27$, $B25$ e $B27$ representam a adesão ou não ao distanciamento social.

	A	B
13		
14	Impacto da adesão ao uso de máscara sobre o parâmetro p	
15	Infectado	Suscetível
16	Percentual que utiliza máscara	percentual que utiliza máscara
17	0,00%	0,00%
18	Percentual que não utiliza máscara	Percentual que não utiliza máscara
19	100,00%	100,00%
20	Percentual de impacto uso de máscara em "p" = 1	
21	< >	
22	Impacto da adesão ao distanciamento social sobre o parâmetro p	
23	Infectado	Suscetível
24	Percentual adere ao distanciamento social	Percentual que adere ao distanciamento social
25	0,00%	0,00%
26	Percentual não adere ao distanciamento social	Percentual não adere ao distanciamento social
27	100,00%	100,00%
28	Percentual de impacto distanciamento social em 1	
29	$p = 0,000000470738470$	
30	Número de óbitos = 8007	

Fonte: O autor (2021).

A Figura (3.40) apresenta a inserção dos valores em uma planilha eletrônica, em que a distribuição desses valores são inseridos conforme descrito na Equação (3.13). Para o percentual da população que adere às medidas, dispomos das células $B20$ (adesão da população ao uso de máscara) e $B28$ (adesão da população ao distanciamento social), que representam os valores que impactam sobre $p_{max} \approx 4,71 \cdot 10^{-7}$.

Quando variamos as células percentuais, obtemos diferentes valores para $B20$ e $B28$, dessa maneira são simuladas diversas situações que fomentem a discussão acerca da adesão a medidas de prevenção da COVID-19. Apresentamos a seguir alguns resultados e comparações.

Para as comparações, utilizamos a equação 3.13 onde são ajustados os valores para $c_1 = B20$ e $c_2 = B28$ em situações distintas. Para isso, fizemos a inserção dos valores descritos de forma que, por meio das variações percentuais (adesão ou não das medidas de biossegurança) são ajustados os valores percentuais, obtendo assim, $p = c_1 c_2 p_{max}$ que é utilizado para as simulações das equações do Modelo (3.1). Vejamos a seguir os resultados obtidos.

3.6.2 Comparação dos resultados para a adesão às medidas de biossegurança

Neste tópico, são apresentadas as comparações entre cenários em que parte da população adere às medidas de biossegurança. Em todas as simulações, consideramos $I_0 = 816$, e a quantidade semanas é a mesma dos dados obtidos do Painel COVID. Para as comparações, utilizamos como referência de maior proporção de interação entre infectados e suscetíveis o parâmetro $p_{max} \approx 4,71 \cdot 10^{-7}$ (maior p encontrado pelo uso da equação (3.12)), na hipótese de avanço do número de infectados, foi o que sofreu a menor interferência de medidas de biossegurança.

São contabilizadas as quantidades de infectados, bem com o número de óbitos, que serão contrastados com as simulações em que se adotam as medidas de biossegurança. Um fator importante para as comparações que apresentaremos são as discussões relacionadas ao “pico” da pandemia, em que o número de casos confirmados atinge o valor máximo em uma população. É um valor importante para se observar qual o período de maior intensidade da infecção, para as simulações em diferentes cenários.

Das comparações feitas a seguir, utilizaremos o máximo de infectados para o

período considerado. São valores utilizados para comparar os diversos cenários simulados, no qual surgem as reflexões acerca da gravidade de uma pandemia de acordo com a interação infectado suscetível.

Comparação 1: A primeira comparação tem o intuito de verificar qual a alteração sofrida em relação ao valor $p_{max} \approx 4,71 \cdot 10^{-7}$ com o outro parâmetro obtido da aproximação I dos novos casos do Painel COVID por ajuste de mínimos quadrados no período inicial da pandemia, que denotamos por p_{MQ} , em que $p_{MQ} \approx 2,33 \cdot 10^{-7}$ (ver Figura 3.22). Dessa comparação podemos supor que já no início da pandemia existia um percentual da população com alguma adesão às medidas de biossegurança no enfrentamento da Pandemia.

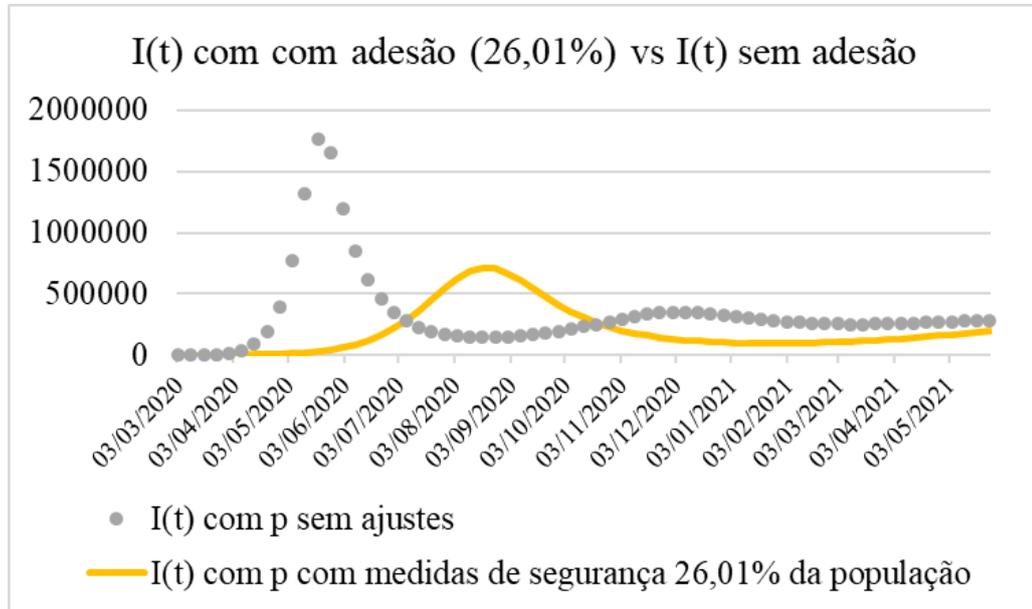
Figura 3.41: Calibração para p_{MQ} (período inicial): comparação entre o cenário em que não são adotadas medidas de biossegurança com 26,01% da população utilizando máscaras faciais e aderindo ao distanciamento/isolamento social.

	A	B
13		
14	Impacto da adesão ao uso de máscara sobre o parâmetro p	
15	Infectado	Suscetível
16	Percentual que utiliza máscara	percentual que utiliza máscara
17	26,01%	26,01%
18	Percentual que não utiliza máscara	Percentual que não utiliza máscara
19	73,99%	73,99%
20	Percentual de impacto uso de máscara em " p "= 0,723372738	
21	◀ ▶	
22	Impacto da adesão ao distanciamento social sobre o parâmetro p	
23	Infectado	Suscetível
24	Percentual adere ao distanciamento social	Percentual que adere ao distanciamento social
25	26,01%	26,01%
26	Percentual não adere ao distanciamento social	Percentual não adere ao distanciamento social
27	73,99%	73,99%
28	Percentual de impacto distanciamento social em " p "= 0,668332965	
29	$p = 0,000000232941901$	
30	Número de óbitos= 10476	

Fonte: O autor (2021).

Na Figura 3.41, observa-se que os valores percentuais de adesão às medidas de distanciamento social foram ajustados para 26,01% da população, de modo que, o impacto sobre p forneça o valor aproximado de p_{MQ} . Essa redução deve-se ao fato que no início da Pandemia a quantidade de infectados era pequena quando comparada ao instante de p_{max} . Com essa aproximação obtemos 5004 óbitos, cujo “pico” da pandemia, ocorre com um número máximo de infectados dado por 713452 na semana de 18/08/2021 equivalente a vigésima quinta semana do período comparado.

Figura 3.42: Comparação de p inicial entre o cenário em que não são adotadas medidas de biossegurança com 26,01% da população utilizando máscaras faciais e aderindo ao distanciamento social. Os pontos cinzas representam os valores sem a adesão ao uso de máscaras (p_1) e a linha amarela cinza os valores obtidos por $(c_1c_2p_1)$.



Fonte: O autor (2021).

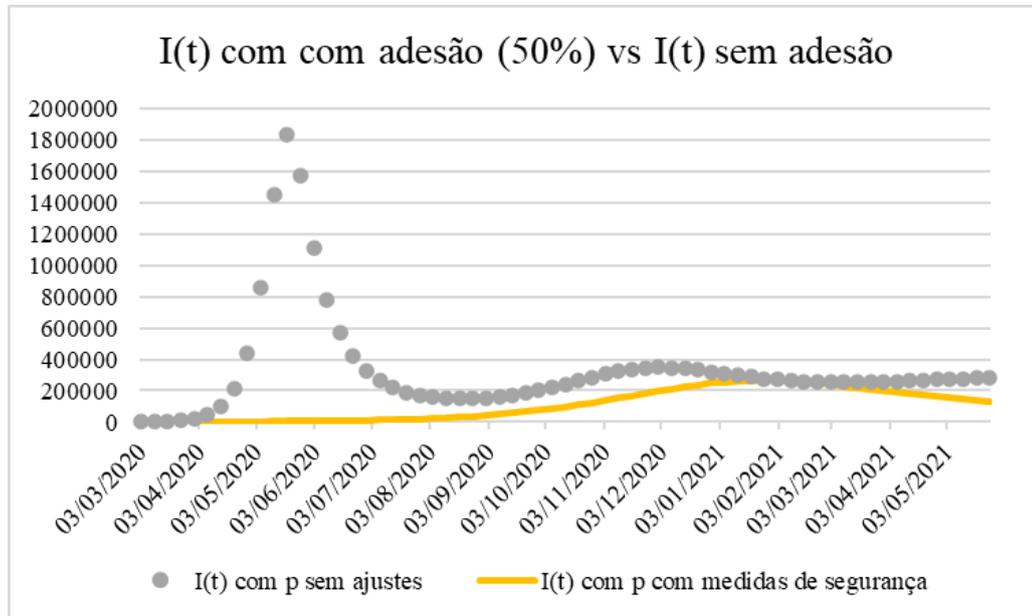
A Figura 3.42 apresenta o gráfico dessa simulação, onde os pontos cinzas nos fornecem a representação gráfica para I_t de uma simulação em que não são adotadas medidas de biossegurança. Observa-se ainda que, com a adesão de apenas 26,01% da população ao uso correto de máscara e ao distanciamento social, proporciona o “achatamento” da curva com diminuição do “pico” que passa a atingir o valor de 713448 casos na quadragésima semana, enquanto o número de casos em que não são adotadas as medidas de biossegurança é de 1767635 na data de 19/05/2020 equivalente a décima segunda semana, com a quantidade 8026 óbitos para todo o período simulado.

Pela comparação que aproxima o p_{max} do ajuste por mínimos quadrados no período inicial p_{MQ} (representado pela Figura 3.22).

Comparação 2: Nessa simulação, levando-se em conta a intensificação da adesão ao uso de máscaras, consideramos um ajuste maior, em que 50% da população adere à medida. Para o distanciamento social optamos por manter no mesmo percentual 26,01%, pois é uma medida aplicada de acordo com o grau de risco de infecção para cada região/cidade com medidas restritivas ou não quanto à circulação de pessoas, bem como aglomerações. Portanto, para essa comparação e para as comparações seguintes, fixamos a adesão ao

distanciamento social em 26,01% e variamos apenas o percentual de adesão ao uso de máscaras.

Figura 3.43: Ilustração gráfica do impacto para $p \approx 1,52309011 \cdot 10^{-7}$ com 50% de adesão às medidas de biossegurança (utilizando máscaras faciais).



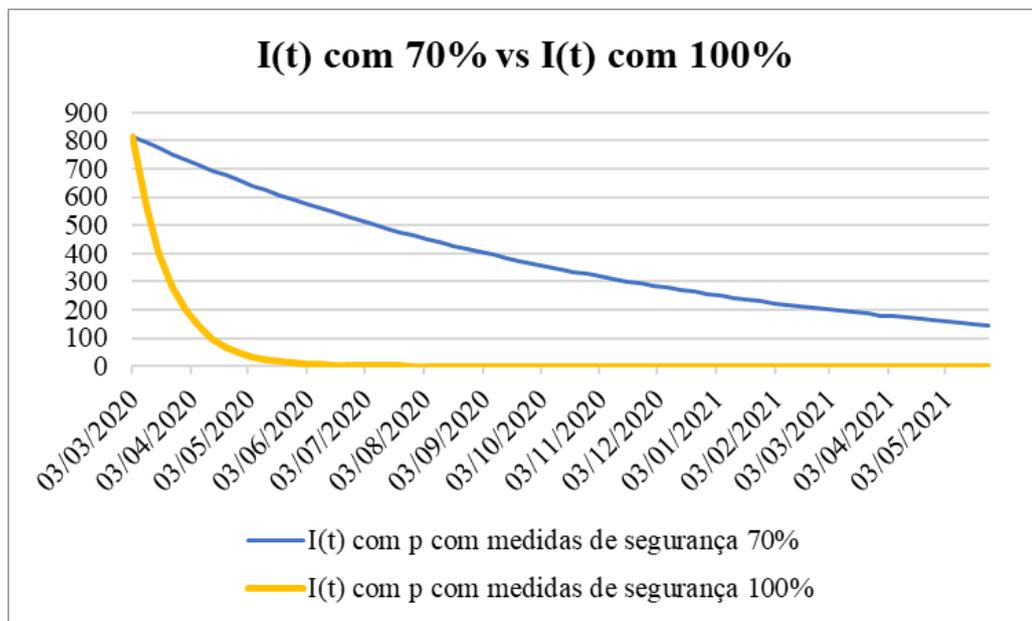
Fonte: O autor (2021).

Dessa segunda comparação obtemos o valor $p \approx 1,52309011 \cdot 10^{-7}$. Nota-se uma redução mais drástica tanto na concentração do número de casos quanto na quantidade de óbitos. A representação gráfica dessa comparação é expressa pela Figura 3.43, com a intensificação das medidas de proteção, a curva atinge um valor máximo de 246888 infectados no instante 09/02/2021 que equivale a quinquagésima semana do período considerado, com a curva em ascendência em parte do período analisado, sendo que o número de óbitos passa a ser de 2514 para todo o período.

Comparação 3: Para os casos 70% e 100% que aderem a efetiva utilização de máscara, obtém-se respectivamente $p \approx 9,3224 \cdot 10^{-8}$ e $p \approx 1,084775 \cdot 10^{-8}$ como parâmetros para as simulações. Na Figura 3.44 estão representados os dois últimos casos, em que para a simulação que considera a adesão de 75% da população ao uso de máscaras, o número de novos casos decresce semanalmente, sendo que o último valor registrado para $I(t)$ é de 98, enquanto que para 100% de adesão, zeram os novos casos na semana de 21/07/2020 e equivale a vigésima primeira semana do período. Com a quantidade de 7 óbitos para 70% de adesão, enquanto que, para a adesão maciça (100%) obtemos 0 óbitos. Esses

valores quando comparados com a Figura 3.42, demonstram uma grande diferença nos cenários, de forma que, evidenciam quão é afetado o avanço quando adotadas as medidas de segurança.

Figura 3.44: Comparação com 70% e 100% da população utilizando máscaras faciais.



Fonte: O autor (2021).

Apresentação dos Resultados: Das comparações feitas, destacamos na Tabela 3.9 os valores que evidenciam a relação entre a adoção de medidas de biossegurança e os resultados obtidos. São ilustrados os gráficos que fomentam discussões acerca das medidas de biossegurança.

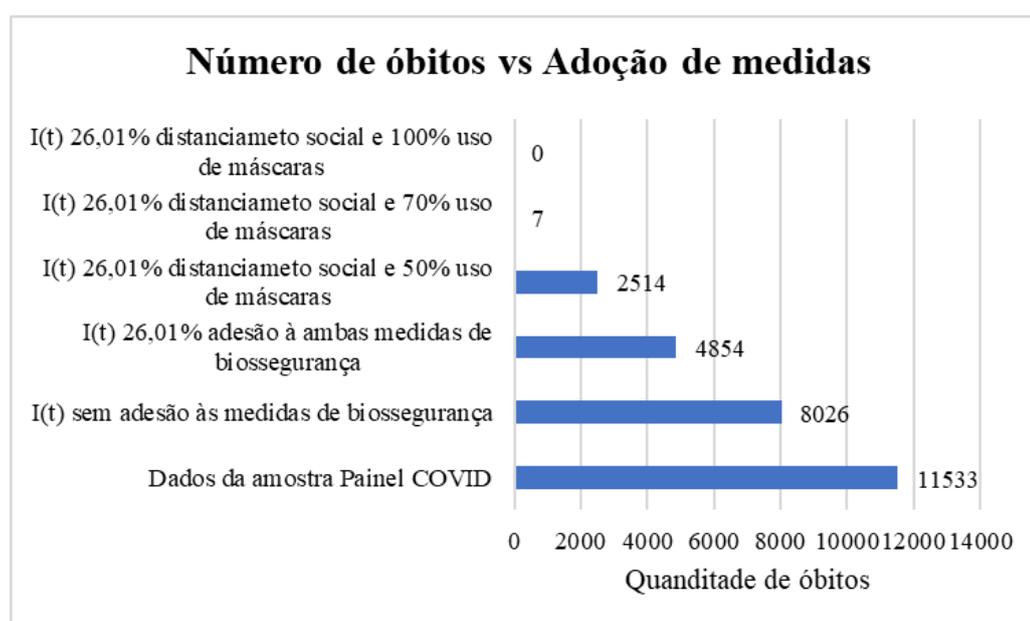
Para a comparação dos óbitos, utilizamos a Figura 3.45, em que são considerados os diferentes cenários simulados, isso evidencia a relação existente entre a intensificação da adesão das medidas de biossegurança e a redução no número de óbitos. A representação e a comparação do impacto percentual sobre o coeficiente p , apresentados na Figura 3.46, mostra que as medidas de prevenção incidem diretamente na proporção de interação entre suscetíveis e infectados, que nesse caso impacta diretamente sobre o parâmetro.

Tabela 3.9: Apresentação dos resultados obtidos das comparações em relação à adoção de medidas de biossegurança.

Tabela de comparação dos resultados				
Variável comparada	parâmetro p obtido para a simulação	Número de óbitos	Valor máximo de infectados para o período	Impacto sobre o coeficiente p
Dados da amostra Painel COVID	-	11533	561408	-
I(t) sem adesão às medidas de biossegurança	0,000000470738	8026	1767635	0%
I(t) 26,01% adesão à ambas medidas de biossegurança	0,000000227591	4854	713528	52%
I(t) 26,01% distanciamento social e 50% uso de máscaras	0,000000152316	2514	246937	68%
I(t) 26,01% distanciamento social e 70% uso de máscaras	0,000000093228	7	816	80%
I(t) 26,01% distanciamento social e 100% uso de máscaras	0,00000001084828	0	816	98%

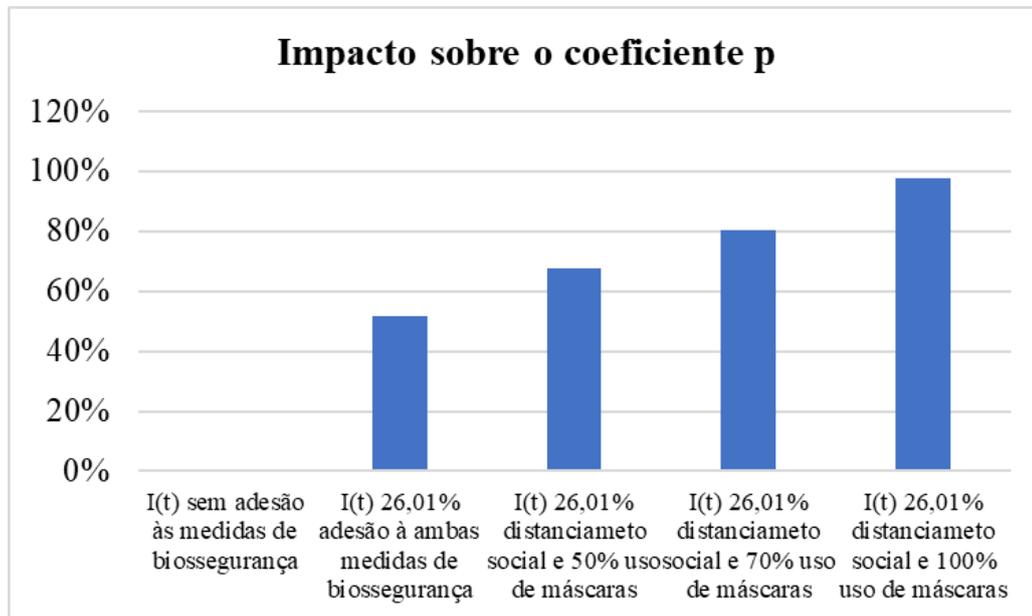
Fonte: O autor (2021).

Figura 3.45: Comparação entre os diferentes cenários simulados em que foram contabilizados os óbitos.



Fonte: O autor (2021).

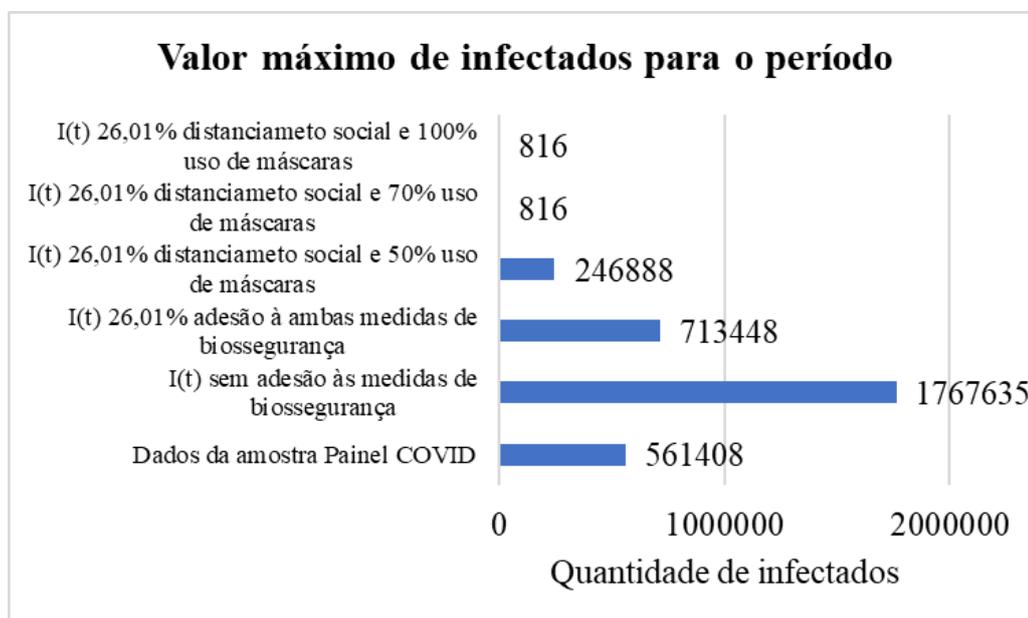
Figura 3.46: Gráfico que ilustra a redução percentual no parâmetro p de acordo com a adesão social às medidas de controle de biossegurança.



Fonte: O autor (2021).

Também são considerados os valores máximos de infectados I_t em determinado instante t , cujos resultados podem ser comparados para que se possa analisar as situações que fomentem discussões acerca da capacidade de atendimento hospitalar e o agravamento da doença na falta do mesmo. A representação dessa comparação é ilustrada pela Figura 3.47.

Figura 3.47: Comparação entre o cenários que leva em consideração o número máximo de infectados para o período em que em algum instante t é atingido o valor máximo.



Fonte: O autor (2021).

Discussões acerca das simulações e comparações apresentadas evidenciam ferramentas e hipóteses que podem ser utilizadas no contexto escolar para os estudos da Matemática, essas devem ser exploradas de acordo com a abordagem a ser adotada no Ensino, levando em conta os diferentes níveis de aprendizagem e experiência acerca da modelagem proposta. Deve-se levar em consideração o fato de que existe uma diversidade de conceitos e métodos que foram discutidos e utilizados, direta e indiretamente, durante a construção do Modelo e esses devem ser explorados com ponderação e de forma adequada às competências e habilidades propostas na BNCC. Com isso, a seguir, fazemos algumas considerações quanto a importância da modelagem apresentada e a possibilidade de trabalhos futuros.

Capítulo 4

Considerações Finais

Nas seções a seguir são expressas as conclusões referentes ao que foi executado no trabalho e as recomendações de futuras pesquisas que podem ser realizadas a partir do nível de compreensão alcançado.

4.1 Conclusões

Ao realizarmos este trabalho de pesquisa, concluímos que o Modelo *SIR* conforme apresentado, proporciona o acesso as informações e conceitos que auxiliam na compreensão da Modelagem Matemática aplicada ao tema COVID-19. Isso se justifica pelo fato de facilmente ser utilizado em uma planilha eletrônica, o que permite a inserção de valores e variáveis, conforme a necessidade ou situação.

Associada às possibilidades de ajuste dos parâmetros por parte de quem utilizar o Modelo, obtém-se grande diversidade de resultados que se expressam graficamente. Estes resultados contribuem para a compreensão da aplicação de conceitos matemáticos, bem como a aproximação da compreensão de como ocorre um fenômeno epidemiológico.

Do que foi exposto, considera-se que a modelagem possa estimular a compreensão dos alunos e a importância de se aderir às medidas de biossegurança. Quando observamos os resultados apresentados onde são comparados os diferentes cenários, podemos notar que o aumento no percentual de adesão às medidas de biossegurança, causam um impacto na quantidade de óbitos e número de infectados. Os resultados apresentados mostram que a adesão maciça às medidas de biossegurança implicará na extinção dos novos casos, isso reflete a importância das medidas de prevenção da doença.

Durante essa dissertação, foram discutidos os impactos das medidas de biossegurança e o que isso pode causar em uma determinada população. Além disso, buscou-se hipoteticamente mostrar quais os parâmetros influenciavam diretamente sobre o avanço do contágio de uma doença infectocontagiosa. Foi mostrado que o parâmetro p conforme descrito, é o que evidencia qual o grau de infecciosidade em uma população em determinado período, bem como qual o melhor ajuste que se pode obter, para que assim se compare o Modelo proposto aos dados reais do histórico da Pandemia causada pelo *coronavírus*. Também fica evidente que a diminuição percentual do parâmetro p pode “achatar” o pico de infecção em uma população.

Em síntese, entendemos que esse trabalho poderá contribuir de forma positiva tanto para os professores que fizerem a abordagem do tema para a Modelagem Matemática no Ensino Médio, quanto para os alunos e interessados que busquem o entendimento acerca do uso de modelos matemáticos no auxílio da compreensão do fenômeno pandêmico, levando em consideração os desafios que atualmente e talvez futuramente acometam a população mundial.

4.2 Recomendações

Como principais recomendações para trabalhos futuros, destacam-se necessários uma análise de estabilidade do ponto de equilíbrio ou o fator de reprodutibilidade basal conhecido como fator R_0 que é uma medida de epidemiologia. Isso ajudaria determinar qual é o p crítico dependendo do grau de isolamento social, em que possibilite descrever quais níveis ideais do parâmetro p levam à extinção da pandemia.

Outro estudo importante é a utilização de métodos que simulem a vacinação, levando em conta uma nova classe de indivíduos que adquiram imunidade por um maior período de acordo com a eficácia da vacina. Também faz-se necessário a utilização de métodos que evidenciem o grau de confiabilidade das simulações e relações dos parâmetros quando comparado a uma situação real. Explorar outros recursos e linguagens computacionais que favoreçam as simulações e ofereçam um aprimoramento da linguagem utilizada.

Como sugestão para uma proposta de aplicação, podem ser elaboradas atividades em sequências didáticas, em diferentes níveis de aprendizagem, destacando quais objetos podem ser consolidados para as habilidades da BNCC, de forma que concilie a proposta à

realidade escolar. Essas atividades devem oportunizar a utilização do Modelo no contexto do Ensino Médio, de modo que se faça uma discussão mais ampla quanto à relevância metodológica baseada na modelagem apresentada nesse trabalho, fortalecendo assim a prática docente.

Referências Bibliográficas

- BASSANEZI, R. C. (2002). *Ensino-aprendizagem com Modelagem Matemática: uma nova estratégia*. Editora Contexto, São Paulo.
- BIEMBENGUT, M. S. e HEIN, N. (2003). *Modelagem Matemática no ensino*. Editora Contexto, São Paulo.
- BRASIL, Ministério da Educação (2018). Base nacional comum curricular. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518-versaofinal_site.pdf Acesso em: 24/04/2021.
- BURAK, D. (2005). As diretrizes curriculares para o ensino de matemática e modelagem matemática. *Perspectiva*, 29(113):153–161.
- CDC, C. f. D. C. e Prevention (2021). Interim guidance on ending isolation and precautions for adults with covid-19. Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/duration-isolation.html#print> Acesso em: 24/04/2021.
- CHIODE, A. d. S. (2020). Avaliação de propostas de coeficientes de determinação do tipo R^2 em modelos de regressão logística com resposta nominal. Dissertação de Mestrado, Insittuto de Matemática Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.
- CROMER, D., Juno, J. A., Khoury, D., Reynaldi, A., Wheatley, A. K., Kent, S. J., e Davenport, M. P. (2021). Prospects for durable immune control of sars-cov-2 and prevention of reinfection. *Nature Reviews Immunology*. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41577-021-00550-x>, 21(6):395–404.
- EDELSTEIN, K. (2005). *Mathematical models in biology (classics in applied mathematics)*. New York: Society for Industrial and Applied Mathematics.

- FORATTINI, O. P. (2005). *Conceitos Básicos de Epidemiologia Molecular*. v.64, EdUSP, São Paulo.
- GONÇALVES, M. R., dos Reis, R. C. P., Tólio, R. P., Pellanda, L. C., Schmidt, M. I., Katz, N., Mengue, S. S., Hallal, P. C., Lessa Horta, B., Silveira, M. F., et al. (2020). Social distancing, mask use and the transmission of sars-cov-2: A population-based case-control study. *SSRN: DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3731445>*.
- GORBALENYA, Alexander E., S. C., Baker, R. S., Baric, Raoul J. and de Groot, C., Drosten, A. A., Gulyaeva, B. L., Haagmans, C., Lauber, A. M., Leontovich, B. W., Neuman, D., Penzar, S., Perlman, L. L. M., Poon, D. V., Samborskiy, I. A., Sidorov, S., Isabel, J., Ziebuhr, et al. (2020). The species severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: classifying 2019-ncov and naming it sars-cov-2. *Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of Viruses*. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41564-020-0695-z>.
- IBGE, I. B. d. G. e. E. (2021). Cidades panorama. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/panorama> Acesso em: 03/01/2021.
- LUMLEY, S. F., O'Donnell, D., Stoesser, N. E., Matthews, P. C., Howarth, A., Hatch, S. B., Marsden, B. D., Cox, S., James, T., Warren, F., et al. (2021). Antibody status and incidence of sars-cov-2 infection in health care workers. *New England Journal of Medicine*. Disponível em: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMoa2034545> Acesso em: 19/06/2021, 384(6):533–540.
- MONTGOMERY, D. C., Runger, G. C., Calado, V., et al. (2000). *Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros* ., volume 6. Grupo Gen-LTC.
- MORETTIN, P. A. e BUSSAB, W. O. (2004). *Estatística básica*. Saraiva Educação SA, São Paulo.
- MURRAY, J. D. (1989). *Mathematical Biology*. New York: Springer.
- NOGUEIRA, A. L., Nogueira, C. L., Zibetti, A. W., Roqueiro, N., Bruna-Romero, O., Carciofi, B. A., et al. (2020). Estimativa da subnotificação de casos da covid-19 no estado de santa catarina. *Notícias UFSC, Florianópolis*. Disponível em: <https://noticias.paginas.ufsc.br/files/2020/05/aqui.pdf> Acesso em: 19/06/2021.

- PEIXOTO, S. V., Nascimento-Souza, M. A., Mambrini, J. V. d. M., Andrade, F. B. d., Malta, D. C., Lima-Costa, M. F., et al. (2020). Comportamentos em saúde e adoção de medidas de proteção individual durante a pandemia do novo coronavírus: iniciativa ELSI-COVID-19. *Cadernos de Saúde Pública* [online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-311X00195420> Acesso em: 05/06/2021.
- PRADO, Marcelo, B., Antunes, L., Bastos, I., Peres, A., Silva, L., Dantas, F., Baião, P., Maçaira, S., Hamacher, F., Bozza, et al. (2020). Análise da subnotificação de covid-19 no brasil. *Revista Brasileira de Terapia Intensiva* [online]. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/0103-507X.20200030> Acesso em: 19/06/2021.
- RIPOLL, L. e Matos, J. C. M. (2017). Zumbificação da informação: a desinformação e o caos informacional. *Revista Brasileira de Biblioteconomia e Documentação*, 13:2334-2349.
- SES, Secretaria de Estado de Saúde de Mato Grosso (2021). Painel informativo COVID-19. Disponível em: <http://www.saude.mt.gov.br/painelcovidmt2/> Acesso em: 09/05/2021.
- WENDLING, Jean Michel Fabacher, T., Pébay, P. P., Cosperec, I., Rochoy, M., et al. (2021). Experimental efficacy of the face shield and the mask against emitted and potentially received particles. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18041942> Acesso em: 29/05/2021, 18(4):p. 1942.