
NOTA TÉCNICA 05

COMO O ESTADO ATUAL DA VACINAÇÃO NO BRASIL INFLUENCIA O CONTROLE DA PANDEMIA COVID-19?

**Rafael Sachetto Oliveira^{2,3}, Carolina Ribeiro Xavier^{2,3}, Vinícius da Fonseca Vieira^{2,3},
Ruy Freitas Reis¹, Rodrigo Weber dos Santos^{1,4}**

¹ Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Juiz de Fora

² Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de São João del-Rei

³ Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de São João del-Rei

⁴ Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora

sachetto@ufsj.edu.br, carolinaxavier@ufsj.edu.br, vinicius@ufsj.edu.br
ruy.reis@ufjf.br, rodrigo.weber@ufjf.edu.br

21 de junho de 2021

1 Introdução

O primeiro caso de COVID-19 foi registrado em Wuhan, China, em novembro de 2019. A rápida disseminação do vírus na cidade chinesa foi caracterizada como um surto, e em fevereiro de 2020, 8 países já apresentavam casos da doença. Preocupada com os níveis alarmantes de disseminação e gravidade da doença a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou a COVID-19 como uma pandemia global em março de 2020 [14].

Até 21 de junho de 2021, a COVID-19 já havia infectado mais de 178 milhões de pessoas globalmente e quase 18 milhões apenas no Brasil. O número global de mortes atingiu mais de 3,86 milhões, 501.825 somente no Brasil¹. Nesse contexto, a maior esperança da população mundial é a vacinação em massa, um grande desafio tanto para a indústria farmacêutica quanto para os sistemas nacionais de saúde.

Na Figura 1 pode-se comparar a situação da pandemia em relação aos países da América do Sul. O mapa coroplético no Painel 1A apresenta o número de casos confirmados em relação a população dos países, onde é possível observar que o Brasil apresenta um dos maiores números de casos per capita do subcontinente sul-americano, ficando atrás apenas do Uruguai e Argentina. O Painel 1B compara o número de mortes em relação a população dos países, podendo-se observar que o Brasil aparece em uma posição de evidência, neste caso ficando atrás apenas do Peru.

Segundo Li *et al.* [9], as vacinas, em um contexto geral e não apenas para COVID-19, evitarão 69 milhões (intervalo de confiança de 95 %) mortes entre 2000 e 2030, mostrando que a vacinação é fundamental para mitigar o efeito de doenças infecciosas. A conclusão dos testes das primeiras vacinas para o COVID-19 ocorreu em dezembro de 2020. Assim que foram aprovadas pelos órgãos reguladores nacionais, as vacinas passaram a ser aplicadas na população de acordo com o plano nacional de imunização de cada país. Em 20 de junho de 2021, mais de 2,66 bilhões de doses haviam sido administradas globalmente, 21,8% da população mundial. No Brasil, o número de vacinas administradas é de 86,96 milhões, sendo 62,64 milhões (29,5% da população) com a primeira dose e 24,22 milhões (11,93% da população) com as duas doses previstas. Em Israel, os efeitos da vacinação da maioria de sua população já são significativos. Podemos citar como exemplo a redução do número de mortes por dia, indo de 93 em 27/01/2021, para uma morte em 05/06/2021. Por conta do sucesso de sua campanha de vacinação, o governo de Israel já reduziu algumas restrições, como a utilização de máscaras em público. Sabe-se que a vacinação rápida é fundamental para mitigar a disseminação da doença. No entanto, as limitações impostas pela capacidade produtiva e de um plano logístico para a distribuição das vacinas, reduzem o potencial de aplicação das vacinas na população, especialmente em países de baixa renda.

¹Disponível em <https://data.humdata.org/dataset/novel-coronavirus-2019-ncov-cases>

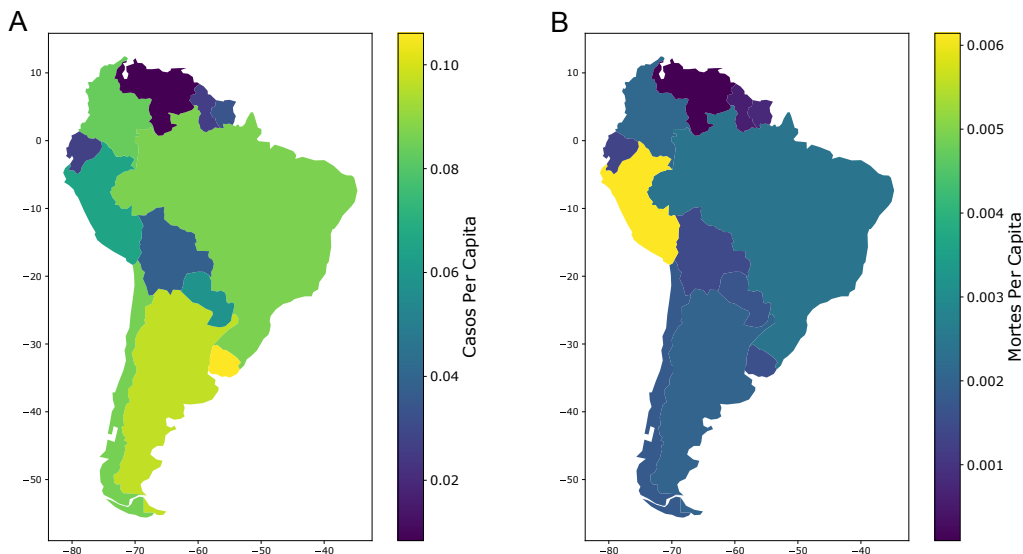


Figura 1: Mapas coropléticos de casos e mortes por covid dos países da América do Sul até o dia 21/06/2021: A) Número de casos confirmados de COVID-19 em relação a população dos países e B) Número de mortes em decorrência da COVID-19 em relação a população dos países. Fonte dos dados: Our World in Data [11]

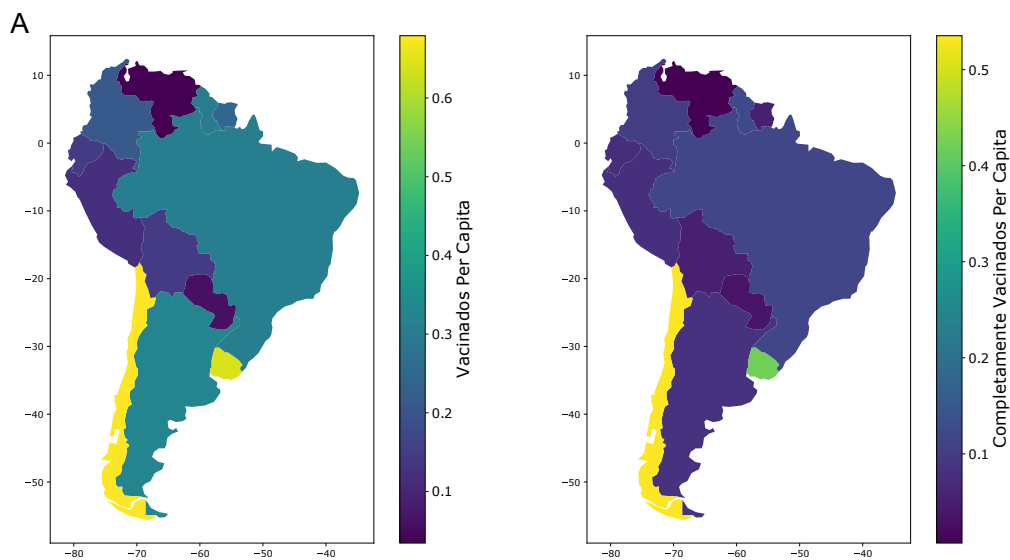


Figura 2: Mapas coropléticos de vacinação dos países da América do Sul até o dia 21/06/2021: A) Número de pessoas que receberam ao menos 1 dose de vacina em relação a população dos países e B) Número de pessoas que receberam ambas as doses de vacina em relação a população dos países. Fonte dos dados: Our World in Data [11].

Na Figura 2 apresenta o estágio onde se encontram os programas nacionais de imunização nos países da América do Sul. O mapa coroplético no Painel 2A expressa a fração da população que tomou ao menos 1 dose da vacina contra COVID-19, podendo observar que o Brasil ocupa a quarta posição no subcontinente sul-americano, no qual fica atrás do Chile, Uruguai e Argentina. Neste mapa vale destacar que o Brasil apresenta metade do número de vacinados per capita quando comparado com o primeiro colocado, o Chile. O Painel 2B compara a fração da população que está completamente vacinada, ou seja, tomou ambas as doses da vacina. Neste mapa pode-se observar que o Brasil também aparece na quarta posição, ficando atrás do Chile, Uruguai e Guiana. Apesar de manter a quarta posição, o Brasil possui uma fração da população completamente vacinada 5 vezes menor quando comparado com o primeiro colocado, também o Chile.

Esta nota técnica é uma atualização da nota técnica anterior². Os resultados obtidos mostram que, embora a discussão gire muito em torno da eficácia das vacinas, a **taxa diária de vacinação** continua sendo a variável mais importante para mitigar a pandemia. Portanto, nossos resultados sugerem que a vacinação do Brasil ainda não está com a celeridade ideal, e deve ser acelerada para que seja possível superar a pandemia. Além disso, os números estimados de mortes ao longo do ano são muito altos em qualquer cenário estudado, os quais simulam o uso apenas das vacinas para o enfrentamento da pandemia. Assim, nosso estudo sugere que mesmo com a vacinação, as medidas não farmacológicas, como distanciamento social e uso de máscaras, ainda são de fundamental importância para prevenir a propagação da doença e diminuir o número de mortes ao longo do ano.

2 Material e Métodos

2.1 Modelo Matemático

O modelo usado nesta nota é uma extensão do modelo apresentado em [12] que é baseado no modelo SIRD compartimental clássico [3, 5, 6, 7, 8] e foi mantido o mais simples possível para reduzir o número de parâmetros desconhecidos a serem estimados. O modelo foi modificado para incluir o esquema de vacinação, tanto na etapa de ajuste dos parâmetros com base em dados observados no passado, quanto na etapa de previsão do comportamento da epidemia no futuro, e é descrito pelo seguinte conjunto de equações:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha(t)}{N}(S - v(t)S)I, \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\alpha(t)}{N}(S - v(t)S)I - \beta I - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I, \\ \frac{dD}{dt} = \beta I, \\ I_r = \theta I, \\ R_r = \theta R, \\ C = I_r + R_r + D, \end{cases} \quad (1)$$

onde S , I , R , D , I_r , R_r e C são as variáveis que representam o número de indivíduos em uma população de tamanho N que são suscetíveis, infectados, recuperados, mortos, relatados como infectado, relatados como recuperados e total de casos confirmados, respectivamente. O termo $\alpha(t) = a(t)b$ representa a taxa na qual um indivíduo suscetível é infectado, onde $a(t)$ é a probabilidade de contato e b a taxa de infecção. Mais detalhes sobre o modelo podem ser obtidos em [12].

O novo termo $v(t)$ denota a taxa de imunização e é descrito pela seguinte equação:

$$v(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } t < t_{vs} + t_{im}, \\ 0.5(v_e D_r(t - t_{im})), & \text{se } t > t_{vs} + t_{im} \text{ e } t < t_p + t_{im}, \\ 0.5(v_e D_r(t_p)) + 0.5(v_e v_r t), & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2)$$

onde t_{vs} é o início da campanha de vacinação; t_{im} é o atraso da imunização, ou seja, o tempo entre a vacinação e a imunidade adquirida; $D_r(t)$ é taxa de vacinação real (Dados da primeira dose) observada no Brasil no tempo t ; t_p é o número de dias disponíveis nos dados públicos sobre a vacinação; v_e é a eficácia da vacina (em %) e v_r é a taxa de vacinação (a porcentagem da população vacinada com a primeira dose por dia).

As variáveis v_e e v_r são utilizadas para a fase de projeções de diferentes cenários. Para a fase de ajuste de parâmetros, utilizamos os dados reais de vacinação $D_r(t)$. Como simplificação do modelo assumimos que o tempo entre a vacinação e a imunidade adquirida, $t_{im} = 35$. Além disso, usamos apenas os dados de primeira dose no Brasil e deslocamos esse a frente usando $t_{im} : D_r(t - t_{im})$. Ou seja, assumimos que as pessoas estão totalmente vacinadas com uma eficácia v_e após t_{im} dias da primeira dose.

Um estudo recente [4], mostrou que as vacinas da AstraZeneca e Pfizer conseguem reduzir a transmissão do vírus entre 40% e 50%. Dessa forma, assumimos nesse trabalho que a transmissão do vírus é reduzida em cerca de $0.5v_e$, visto que as eficácias das vacinas da AstraZeneca e Pfizer relatadas até hoje estão em torno de 90%.

Nesta nota, também modificamos a taxa de mortalidade (onde β é proporcional à mortalidade m) de acordo com a taxa de vacinação. Esta mudança tenta modelar a redução da mortalidade entre os vacinados e representa uma média ponderada entre a taxa de mortalidade dos não vacinados e dos vacinados. A seguinte equação descreve esta mudança:

$$m_n(t) = \begin{cases} m, & \text{if } t < (t_{vs} + t_{im}), \\ (m(1 - v(t))) + (m(1 - ef_{im})v(t)), & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3)$$

²Disponível em <https://bit.ly/3gKiBP5>

onde m é a taxa de mortalidade do modelo original, m_n é nova taxa de mortalidade e efi_m é a taxa de redução de mortalidade entre os vacinados. Nesta nota utilizamos $efi_m = 0.85$, o que reflete resultados recentes sobre a redução da mortalidade tanto para a vacina Coronavac [1] como para a AstraZeneca e Pfizer [2].

Para simplificar o modelo, as seguintes hipóteses são consideradas: 1) Na falta de números para eficiência da vacina, usamos a faixa de eficácia divulgada pelos fabricantes (entre 50% e 90%); 2) Consideramos que, uma vez imunizado o indivíduo ainda tem 50% de chance de transmitir a doença e infectar outro indivíduo; 3) não consideramos diretamente as diferenças de eficácia da vacina após uma dose de reforço, ou seja, a necessidade de uma segunda dose é capturada implicitamente pelo parâmetro t_{im} , o atraso de imunização; 4) neste modelo não consideramos diferentes níveis de risco para as diferentes faixas etárias.

2.2 Simulações Numéricas

Iniciamos nossa investigação ajustando as variáveis do modelo com os dados públicos disponíveis para o Brasil, usando os 156 dias desde o início da vacinação no Brasil e o modelo original, descrito em 2.1. Os ajustes das variáveis foram feitos usando um algoritmo de Evolução Diferencial (ED) e a mesma abordagem apresentada em [12]. Para a taxa de vacinação diária, utilizamos os dados disponíveis no repositório *Our World in Data*³. Em seguida, aplicamos o modelo modificado (incluindo o esquema de vacinação), simulando um ano (365 dias) usando os parâmetros ajustados e três diferentes cenários, cada um considerando uma taxa fixa diferente de vacinação e variando três valores de eficácia para as vacinas. As configurações dos cenários são descritas a seguir, deve-se considerar que em todos os cenários a taxa de vacinação se refere ao número de primeiras doses aplicadas.

- **Cenário 1:** Taxa de vacinação fixa de 360.000 p/d e eficácias de 0,5, 0,75 e 0,9. Essa taxa foi escolhida por ser uma taxa de vacinação média diária próxima da que ocorreu no Brasil até o mês de junho de 2021.
- **Cenário 2:** Taxa de vacinação fixa de 720.000 p/d e eficácias de 0,5, 0,75 e 0,9. Sendo essa taxa o dobro da taxa anterior.
- **Cenário 3:** Taxa de vacinação fixa de 1.44M p/d e eficácias de 0,5, 0,75 e 0,9. Sendo essa taxa o dobro da taxa anterior.

Em todas as simulações realizadas, consideramos que toda vacina leva 35 dias para desencadear a resposta imune e é considerada na taxa de vacinação diária somente a quantidade de aplicações de primeira dose. A população máxima a ser vacinada é limitada em 160 milhões, o que corresponde ao número de pessoas aptas a imunização, de acordo com o Programa Brasileiro de Imunização [10].

Assim como na nota anterior, realizamos a análise de sensibilidade global do modelo matemático usando índices de Sobol [13]. Apenas os parâmetros de vacinação como a eficácia da vacina e a taxa de vacinação foram analisados, os demais parâmetros foram investigados anteriormente [12].

3 Resultados

Após a aplicação da metodologia descrita na Seção 2, simulamos os cenários propostos considerando diferentes taxas de vacinação e eficácia. Os resultados das simulações numéricas são apresentados nas seções seguintes e ilustram a evolução dos casos ativos e óbitos no Brasil considerando diferentes esquemas de vacinação. Em todas as figuras nas seções seguintes, são apresentados os gráficos com os números de casos ativos e os números de mortes de acordo com valores disponíveis no repositório *Our World in Data* para os 156 primeiros dias, assim como as curvas ajustadas. Os parâmetros obtidos pelo ajuste são considerados para a simulação a partir do dia 157.

3.1 Cenário 1

A Figura 3 mostra a evolução dos casos ativos e óbitos no Brasil, considerando a simulação do modelo apresentado na Seção 2 utilizando 365 dias de simulação, com uma taxa de vacinação fixa de 360 mil pessoas por dia e variando a taxa de eficácia da vacina. No Cenário 1, observamos que os números de casos ativos após os 365 dias foram 304.272 com uma eficácia de 50%, 228.037 com uma eficácia de 75% e 199.383 com uma eficácia de 90%. O número total de mortes estimadas foi de 710.864 para uma eficácia de 50%, 694.819 para uma eficácia de 75% e 688.189 para uma eficácia de 90%.

³Disponível em <https://ourworldindata.org/covid-vaccinations>

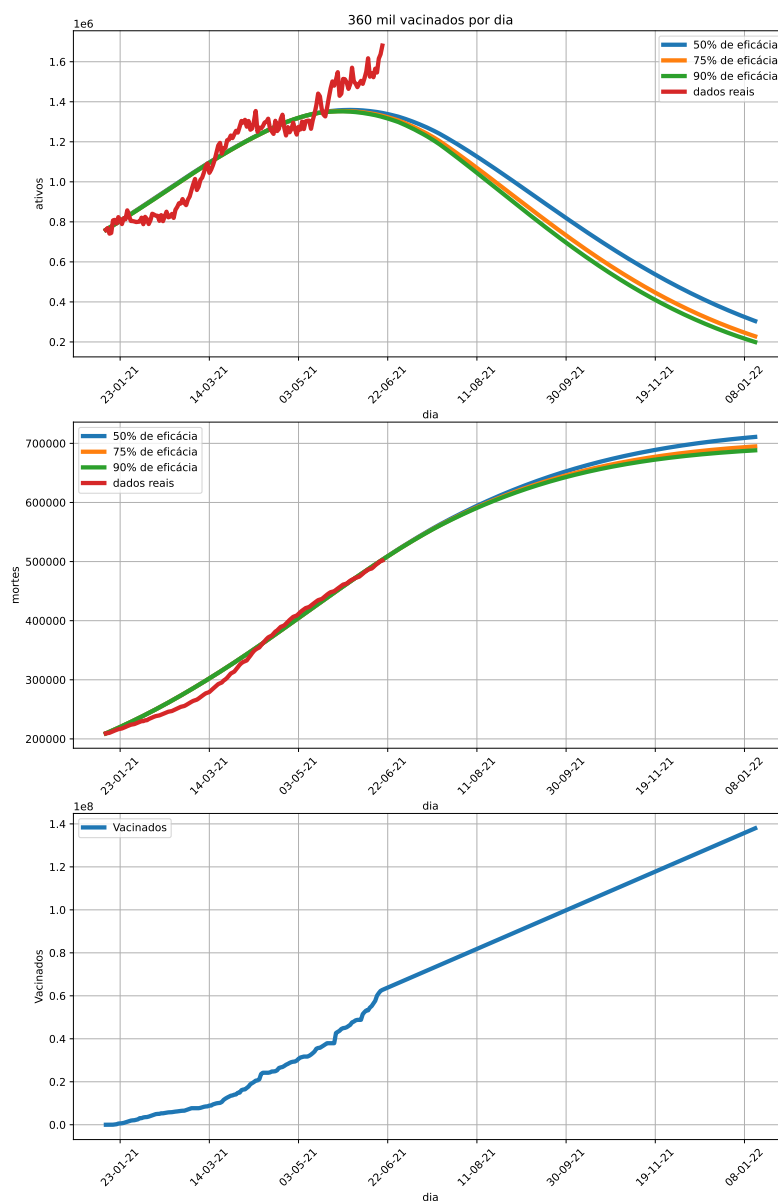


Figura 3: Cenário 1 - Fixando a taxa de vacinação em 360.000 p/d e variando a eficácia da vacina de 50%, 75% e 90%

3.2 Cenário 2

Os resultados da simulação numérica do Cenário 2, que considera uma taxa de vacinação fixa de 720 mil pessoas por dia e taxas de eficácia 50%, 75% e 90%, são apresentados na Figura 4. As simulações mostram que o número de casos ativos estimados seria em torno de 238.076 com uma eficácia de 50%, 152.459 com uma eficácia de 75% e 124.102 para uma vacina com eficácia de 90%. Já o total de mortes estimadas seria em torno 685.637, 670.705 ou 664.738

considerando vacinas com eficácia de 50%, 75% e 90% respectivamente. Em comparação com o número de mortes observadas na simulação utilizando a taxa de vacinação de 360.000 p/d (Cenário 1), no Cenário 2 temos mais de 23.000 óbitos a menos quando comparamos as mesmas eficácias de vacina.

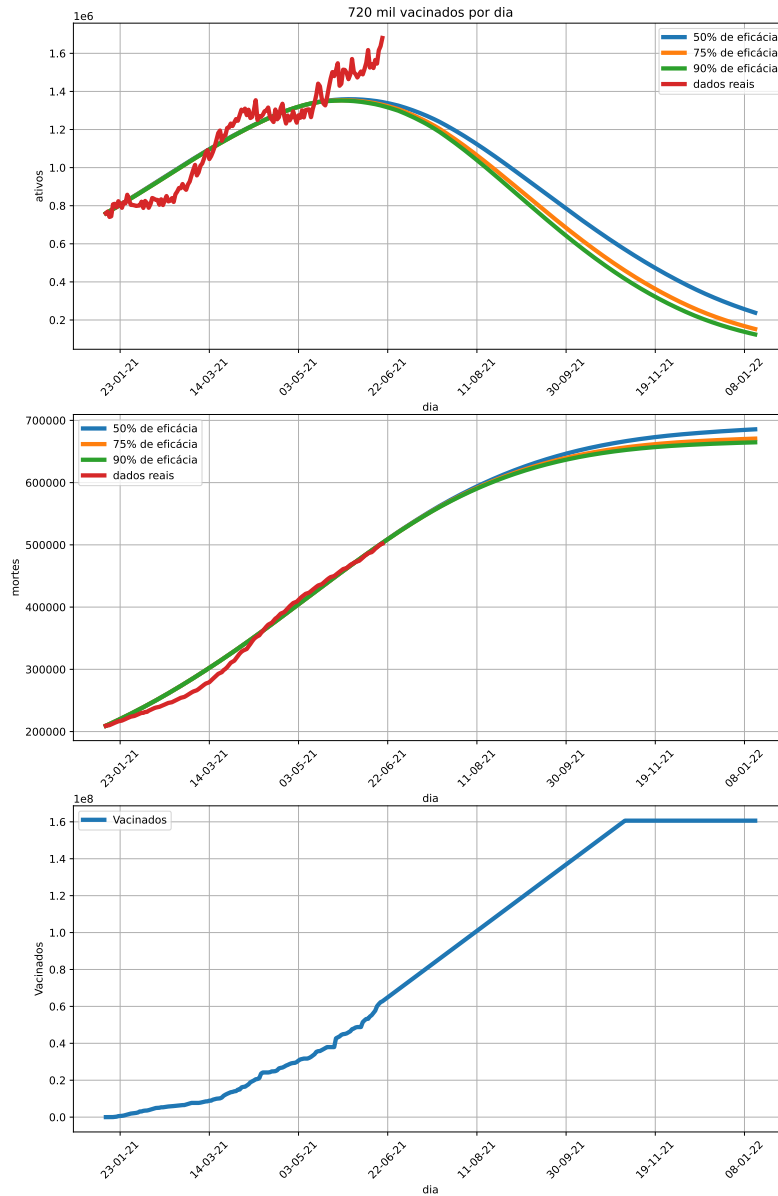


Figura 4: Cenário 2 - Fixando a taxa de vacinação em 720.000 p/d e variando a eficácia da vacina de 50%, 75% e 90%

3.3 Cenário 3

Os resultados deste cenário, que considera uma taxa de vacinação fixa de 1.44 milhões pessoas por dia e taxas de eficácia 50%, 75% e 90%, são apresentados na Figura 5. Segundo as simulações, o número de casos ativos estimados seria em torno de 204.045 com uma eficácia de 50%, 117.641 com uma eficácia de 75% e 91.231 para uma vacina com eficácia de 90%. Já o total de mortes ficaria em 662.560, 648.272 ou 642.816 considerando vacinas com eficácia de 50%, 75% e 90% respectivamente. Em comparação com o número de mortes observadas na simulação utilizando a taxa do Cenário 1, no Cenário 3 teríamos aproximadamente 45.000 óbitos a menos quando comparamos as mesmas eficácias de vacina..

3.4 Análise de Sensibilidade

Como na nota anterior, para entendermos melhor como os diferentes parâmetros impactam no número de casos ativos e de mortes para o modelo apresentado na Seção 2, apresentamos nesta seção uma Análise de Sensibilidade (AS) realizada para os parâmetros do modelo que representam a eficácia da vacina e taxa de vacinação. Os valores para a eficácia da vacina respeitam o limite do intervalo de $[0, 5; 0, 9]$, que abrange os valores usados nos experimentos, conforme relatado na Seção 2.2. O intervalo para a taxa de vacinação também explora os limites usados na simulação $[0, 0012; 0, 0070]$.

Os resultados da Análise de Sensibilidade com base nos principais índices de Sobol são apresentados em relação ao número de casos ativos e o número de mortes, respectivamente pelas Figuras 6 e 7. Essas figuras representam a forma como a importância da Eficácia e da Taxa de Vacinação variam ao longo do tempo observado.

Quando avalia-se o impacto da Eficácia e da Taxa de vacinação para o número de casos ativos (Figura 6), pode-se observar que no começo do período observado a Eficácia tem uma importância muito mais significativa do que a Taxa de vacinação, mas com o avanço da campanha de imunização, as curvas se aproximam.

No início do período observado, a Análise de Sensibilidade em relação ao número de mortes também revela uma importância muito mais significativa da Eficácia quando comparada à Taxa de Vacinação. Porém, como pode ser visto na Figura 7, quando a campanha de imunização avança, os índices de Sobol para a Taxa de Vacinação aumentam em comparação aos índices para a Eficácia da Vacina, indicando que a Taxa de Vacinação impacta o número de mortes de maneira mais significativa do que a Eficácia.

4 Discussão

Analisando os resultados apresentados nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3, podemos observar que, de acordo com as simulações realizadas neste trabalho, se mantivermos a taxa de vacinação atual (aproximadamente 360.000 pessoas vacinadas com a primeira dose por dia), a doença não seria totalmente controlada após o intervalo de tempo de 365 dias, independentemente da eficácia da vacina, pois o número de casos ativos ainda seria significativo (199.383 casos ativos, no melhor cenário). Além disso, com essa taxa não seria atingido o objetivo de 160 milhões de pessoas imunizadas até Dezembro, como anunciado pelo atual Ministro da Saúde, em 11/06/2021 ⁴.

A Figura 8 mostra a curva de ativos e de óbitos fixando a eficácia da vacina em 75%, e variando as taxas de vacinação de 360.000, 720.000 e 1.44M p/d. É interessante observar que, as diferentes taxas de vacinação só começam a apresentar diferentes comportamentos após aproximadamente 50 dias. Esse resultado sugere que devemos aumentar a taxa de vacinação o mais rápido possível, para que os resultados positivos sejam observados mais rapidamente.

A Figura 9 mostra o número de vidas salvas após 151, 176 e 201 dias das mudanças simuladas nas taxas de vacinação. Podemos ver que, os efeitos das mudanças nas taxas vacinação só começam a ser percebidos, após aproximadamente 50 dias. Se dobrássemos a taxa de vacinação, ou seja, fossem imunizadas com a primeira dose, 720.000 pessoas por dia, o modelo prevê 23.467 mortes a menos, quando comparado com a taxa de vacinação do Cenário 1. Agora, se essa taxa fosse quatro vezes maior, a nossa simulação prevê que poderíamos reduzir o número de óbitos em mais de 45.765 pessoas. Se considerarmos somente um aumento na eficácia da vacina (de 75% para 90%), e mantivermos a taxa em 360.000 p/d, teríamos 6.476 óbitos a menos no final dos 365 dias.

5 Limitações

Algumas limitações de nosso modelo são relacionadas às incertezas quanto às características da doença, que só recentemente estão sendo investigadas. Atualmente, não há consenso sobre a frequência com que as reinfecções de

⁴Disponível em <https://bit.ly/3iN652Q>

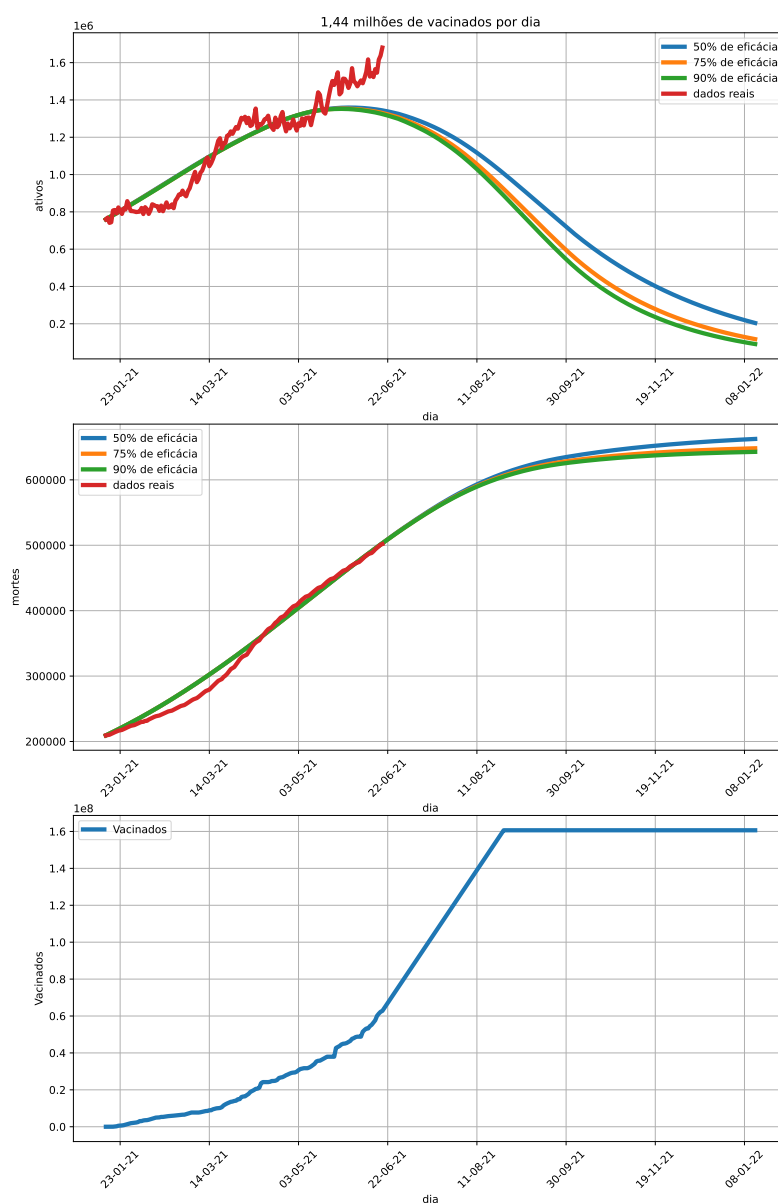


Figura 5: Cenário 3 - Fixando a taxa de vacinação em 1.440.000 p/d e variando a eficácia da vacina de 50%, 75% e 90%

COVID-19 podem ocorrer e como reinfecções pode afetar a dinâmica de sua transmissão. Ainda se sabe como as diferentes variantes do Corona Vírus podem impactar tanto a taxa de transmissão quanto a gravidade da COVID-19. Além disso, não existem estudos definitivos sobre o efeito das vacinas nas taxas de transmissão da doença.

Outras limitações são impostas pelo comportamento complexo de uma população, principalmente diante de uma pandemia, devido às políticas públicas e diretrizes explícitas ou à auto-organização das pessoas. À medida que a

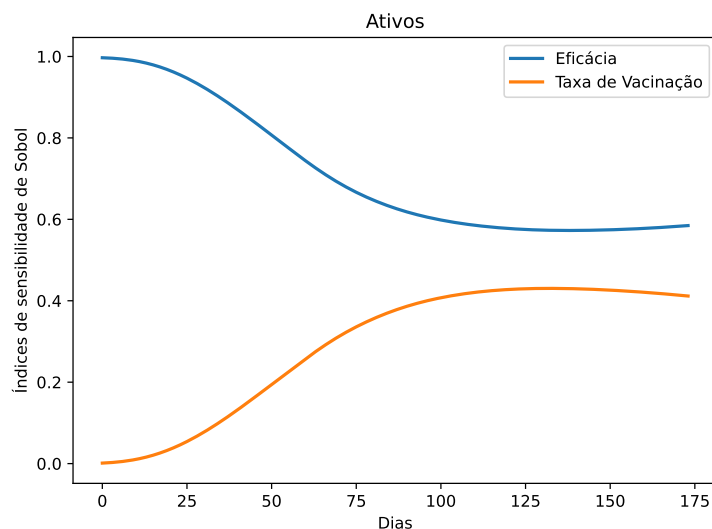


Figura 6: Análise de sensibilidade para o número de casos ativos em função do tempo.

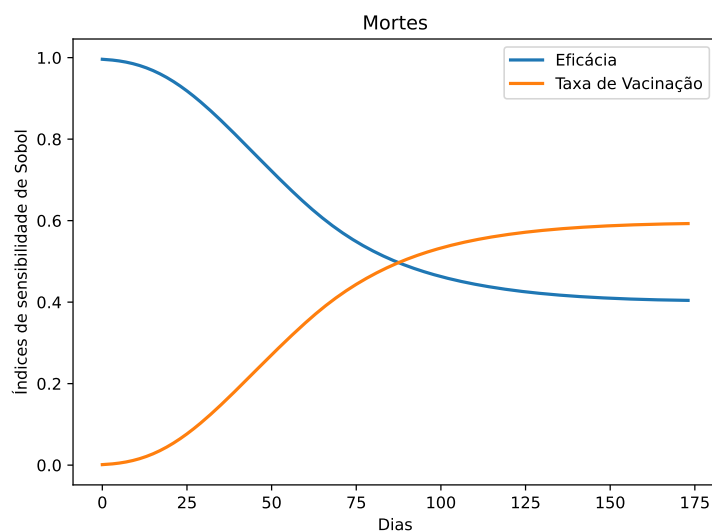


Figura 7: Análise de sensibilidade para o número óbitos em função do tempo.

pandemia avança, as pessoas endurecem ou amenizam o distanciamento social e a adoção de medidas como o uso de máscaras e higienização das mãos; restaurantes, escolas e outras atividades econômicas fecham e abrem à medida que a ocupação dos hospitais muda. As variações da dinâmica social não são consideradas pelo nosso modelo e representam uma limitação do nosso trabalho. Nosso modelo também considera a população distribuída de maneira homogênea no espaço e um contato homogêneo entre as pessoas.

Além disso, à medida que mais vacinas são desenvolvidas e aprovadas pelos órgãos reguladores, órgãos públicos e privados negociam sua aquisição e aprimoram as estratégias de logística e administração das vacinas, alterando a taxa de vacinação, que, neste trabalho, permanece fixa em função de tempo.

Conforme relatado na Seção 2, o modelo proposto neste trabalho foi o mais simples possível. As limitações aqui descritas não nos impedem de compreender melhor o efeito da adoção de diferentes esquemas de vacinação ao longo do tempo.

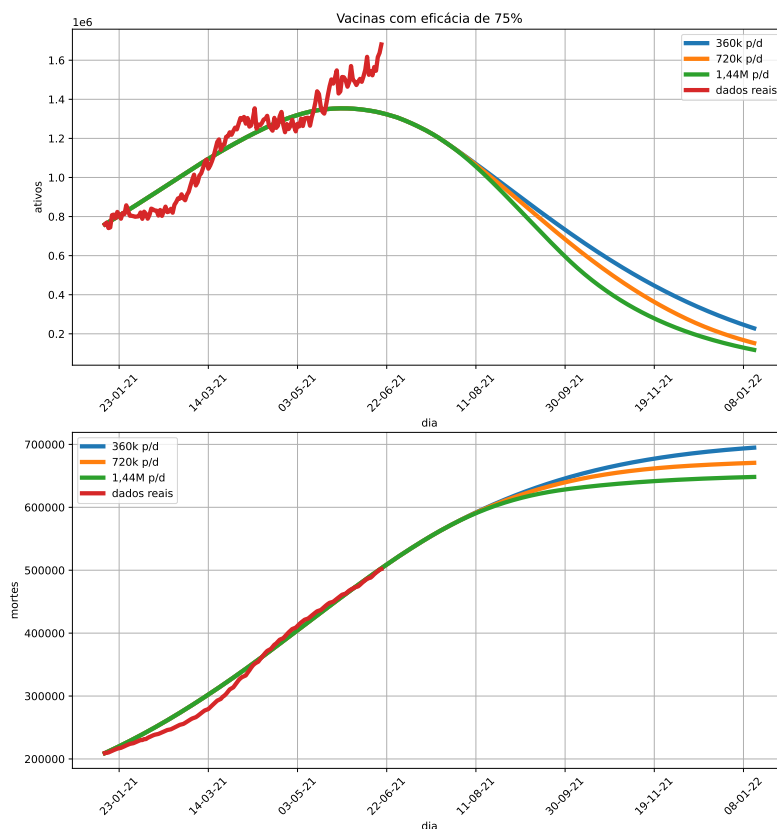


Figura 8: Eficácia da vacina em 75%, usando taxas de vacinação de 360.000, 720.000 e 1.44M p/d.

6 Conclusões

Nesta nota, apresentamos simulações da propagação de COVID-19 em uma população homogênea ao incorporar a imunização de uma parcela da população em função de tempo. Diferentes valores para a taxa de vacinação diária e eficácia da vacina foram testados para simular os efeitos da pandemia no Brasil em 365 dias. A partir dos resultados da simulação numérica, investigamos o como o aumento na taxa diária de vacinação poderia impactar no controle da pandemia.

Em primeiro lugar, observamos que caso seja mantida a atual taxa de vacinação (aproximadamente 360.000 pessoas vacinadas com a primeira dose por dia), a doença não seria totalmente controlada até o final do ano, independentemente da eficácia da vacina, pois o número de casos ativos ainda seria significativo (199.383 casos ativos, no melhor cenário). Além disso, com essa taxa não seria atingido o objetivo de 160 milhões de pessoas imunizadas até Dezembro, como anunciado pelo atual Ministro da Saúde, em 11/06/2021 ⁵.

Além disso, mantendo a taxa de vacinação atual, as projeções sugerem que o total de novas mortes entre o final de junho e o final do ano está entre 188 mil e 211 mil, para eficácias entre 90% e 50%, respectivamente. Dobrando a atual taxa de vacinação, as mortes projetadas são reduzidas em 13%, com mais de 23 mil mortes a menos (vidas salvas) do que o cenário com a taxa atual de vacinação. Quadruplicando a atual taxa de vacinação, as mortes projetadas são reduzidas em 28%, com cerca de 50 mil vidas salvas até o final do ano.

Nesse contexto, as projeções sugerem que a taxa de vacinação continua sendo mais importante do que a eficácia da vacina para mitigar a pandemia e, principalmente, reduzir o número de óbitos. Porém, os números projetados de mortes

⁵Disponível em <https://bit.ly/3iN652Q>

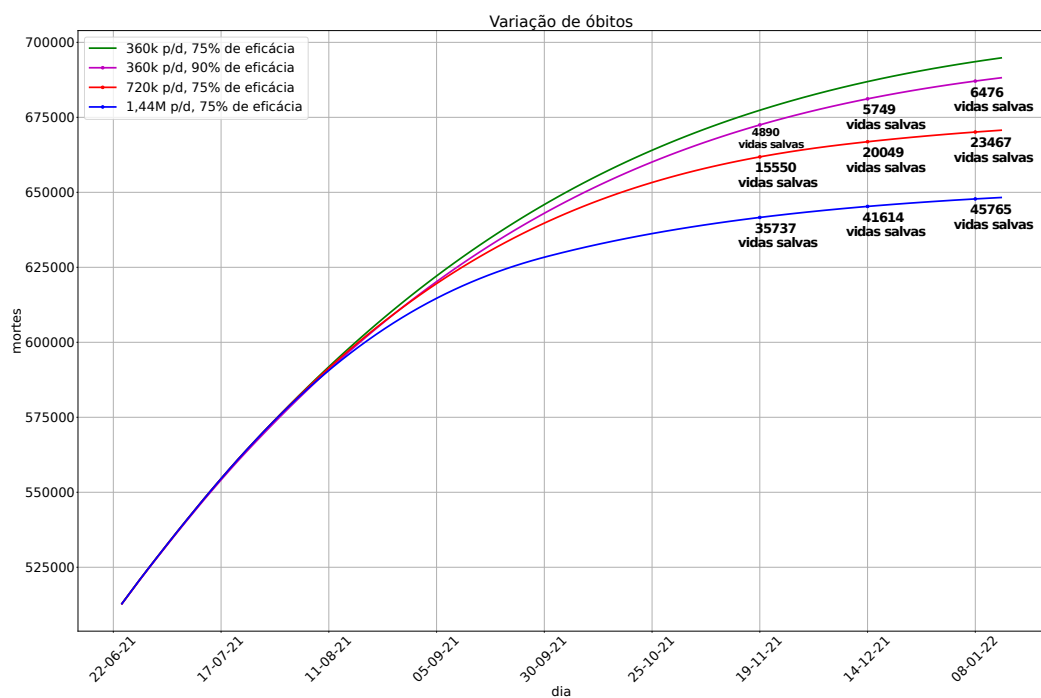


Figura 9: Número de óbitos e vidas salvas até o final do ano utilizando diferentes esquemas de vacinação. Mantendo a taxa de vacinação atual (360.000 p/d com referência a primeira dose), as projeções sugerem que o total de novas mortes entre o final de junho e o final do ano está entre 188 mil e 211 mil, para eficácias entre 90% e 50%, respectivamente. Dobrando a atual taxa de vacinação, as mortes projetadas são reduzidas em 13%, com mais de 23 mil vidas salvas. Quadruplicando a atual taxa de vacinação (1.44M p/d), as mortes projetadas são reduzidas em 28%, com cerca de 50 mil vidas salvas até o final do ano.

ao longo do ano são muito altos em qualquer cenário estudado, os quais simulam apenas o impacto da vacinação no enfrentamento da pandemia. Assim, nosso estudo sugere que mesmo com a vacinação, as medidas não farmacológicas, como distanciamento social e uso de máscaras, são de fundamental importância para prevenir a propagação da doença e diminuir o número de mortes ao longo do ano.

Referências

- [1] D. S. M. M. O. H. ARAOS R., *Efectividad de la vacuna coronavac con virus inactivo contra SARS-CoV-2 en Chile. preliminary report.*, 2021.
- [2] J. L. BERNAL, N. ANDREWS, C. GOWER, J. STOWE, C. ROBERTSON, E. TESSIER, R. SIMMONS, S. COTTRELL, R. ROBERTSON, M. O'DOHERTY, ET AL., *Early effectiveness of covid-19 vaccination with bnt162b2 mrna vaccine and chadox1 adenovirus vector vaccine on symptomatic disease, hospitalisations and mortality in older adults in england*, MedRxiv, (2021).
- [3] O. DIEKMANN AND J. HEESTERBEEK, *Mathematical Epidemiology of Infectious Diseases: Model Building, Analysis and Interpretation*, Wiley Series in Mathematical & Computational Biology, Wiley, 2000.
- [4] R. J. HARRIS, J. A. HALL, A. ZAIDI, N. J. ANDREWS, J. K. DUNBAR, AND G. DABRERA, *Impact of vaccination on household transmission of sars-cov-2 in england*, medRxiv, (2021).
- [5] H. W. HETHCOTE, *The mathematics of infectious diseases*, SIAM Review, 42 (2000), pp. 599–653.
- [6] M. J. KEELING AND P. ROHANI, *Modeling infectious diseases in humans and animals*, Princeton University Press, 2011.
- [7] W. O. KERMACK AND A. G. MCKENDRICK, *Contributions to the mathematical theory of epidemics—I*, Bulletin of Mathematical Biology, 53 (1991), pp. 33–55.
- [8] W. O. KERMACK, A. G. MCKENDRICK, AND G. T. WALKER, *A contribution to the mathematical theory of epidemics*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 115 (1927), pp. 700–721. Publisher: Royal Society.
- [9] X. LI, C. MUKANDAVIRE, Z. M. CUCUNUBÁ, S. E. LONDONO, K. ABBAS, H. E. CLAPHAM, M. JIT, H. L. JOHNSON, T. PAPADOPOULOS, E. VYNNYCKY, ET AL., *Estimating the health impact of vaccination against ten pathogens in 98 low-income and middle-income countries from 2000 to 2030: a modelling study*, The Lancet, 397 (2021), pp. 398–408.
- [10] MINISTÉRIO DA SAÚDE, *Preliminary vaccination plan against covid-19 foresees four phases*, 2021. Last accesses on Feb 3 of 2021 (in portuguese).
- [11] OUR WORLD IN DATA, *Coronavirus pandemic (COVID-19)*, 2021. Last accesses on June 9 of 2021, <https://covid.ourworldindata.org/data/owid-covid-data.csv>.
- [12] R. F. REIS, B. DE MELO QUINTELA, J. DE OLIVEIRA CAMPOS, J. M. GOMES, B. M. ROCHA, M. LOBOSCO, AND R. W. DOS SANTOS, *Characterization of the COVID-19 pandemic and the impact of uncertainties, mitigation strategies, and underreporting of cases in South Korea, Italy, and Brazil*, Chaos, Solitons & Fractals, 136 (2020), p. 109888.
- [13] I. M. SOBOL, *Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates*, Mathematics and computers in simulation, 55 (2001), pp. 271–280.
- [14] WORLD HEALTH ORGANIZATION, *WHO timeline - covid-19 - 27 april 2020*. <https://www.who.int/news/item/27-04-2020-who-timeline-covid-19>, 2020. Last accesses on February 03 of 2021.

As análises e previsões aqui divulgadas representam os resultados técnicos com base em estudo científico utilizando modelos matemáticos e simplificações propostas pelos autores envolvidos no estudo e não necessariamente representam a visão das instituições aos quais são associados.