

Necessidade e impacto de lockdown nacional na pandemia de COVID-19 no Brasil.

Álvaro Krüger Ramos*

29 de junho de 2021

Resumo

Neste trabalho, observamos que um *lockdown* nacional de três semanas poderia salvar uma quantidade entre 88.976 e 154.142 vidas até o dia 01 de outubro de 2021, além de impedir até 5,5 milhões de novos contágios, economizando, assim, até 18,9 bilhões de reais que seriam utilizados para o tratamento destes pacientes.

Dedicado à memória de cada um dos mais de 500 mil brasileiros e brasileiras que tiveram suas vidas ceifadas pela pandemia de COVID-19 no Brasil.

1 Introdução.

O Brasil passa por um momento muito delicado em relação à pandemia de COVID-19 que já ceifou a vida de mais de meio milhão de brasileiros nos últimos 15 meses. Especificamente, vemos observando um quarto período de aceleração no número de casos desta doença, com grande aumento nas taxas de transmissão do vírus SARS-COV-2. Com a campanha de vacinação contra a COVID-19 avançando lentamente no país, torna-se necessária a discussão de outras medidas de contenção do avanço viral. Na última quinta-feira, dia 24 de junho de 2021, o professor Pedro Hallal, em audiência pública no Senado Federal, defendeu a adoção de um *lockdown*¹ nacional por um período de três semanas como uma forma de reduzir os novos casos e óbitos decorrentes da COVID-19 a longo prazo. Neste artigo, discutimos a necessidade, o impacto e a exequibilidade desta drástica medida.

Primeiramente, para fins de contextualização, observamos a realidade atual da pandemia de COVID-19 no Brasil na Seção 2, onde observamos a necessidade da adoção de medidas drásticas de combate à transmissão do vírus causador da COVID-19. A seguir, na Seção 3 apresentamos os resultados principais da modelagem, comparando os dois distintos cenários onde mantemos

*Departamento de Matemática Pura e Aplicada, UFRGS, e-mail: alvaro.ramos@ufrgs.br

¹Ao longo do texto, um *período de lockdown* (ou apenas um *lockdown*) é um tempo no qual fica proibida a mobilidade urbana da população de uma dada região, a não ser para a realização de comprovada atividade essencial. Matematicamente, este período se resumirá ao fato de atingirmos índices de isolamento social médio de 65%.

as tendências atuais, em contraste com o cenário onde um período de três semanas de lockdown é adotado. Finalmente, a Seção 4 traz os detalhes matemáticos da modelagem que leva aos resultados apresentados na Seção 3, apresentando a sua calibragem e análise do erro. Em relação a casos e óbitos, os dados apresentados neste artigo são dados oficiais obtidos no painel COVID-19 mantido pelo Ministério da Saúde [11]. Os dados da vacinação foram obtidos semanalmente através dos painéis [12] (doses disponíveis) e [4] (doses aplicadas).

2 O contexto da pandemia no Brasil.

O Brasil enfrenta um novo desafio na pandemia. No dia 23 de junho de 2021, a média móvel de novos casos nos últimos 7 dias chegou ao patamar recorde de 77.328 novas confirmações por dia. Observamos, portanto, que incia-se o que pode ser considerado o quarto período de aceleração da pandemia no país, conforme observamos a seguir (veja a Figura 1).

O primeiro período de aceleração foi o período inicial da pandemia, que pode ser considerado entre 26 de fevereiro e 29 de julho de 2020, época onde o vírus se espalhou por todas as regiões brasileiras, sendo inicialmente uma pandemia mais forte nas regiões norte e nordeste, a seguir se espalhando para as regiões sudeste, sul e centro-oeste. Em 29 de julho de 2020, a média móvel de novos casos registrava seu até então auge de 46.393 confirmações por dia, com um total de 2.552.265 casos confirmados de COVID-19, pouco mais de 1% da população nacional. Durante os meses de agosto, setembro e outubro, houve uma retração da pandemia no país, possivelmente fruto de medidas sanitárias e maior conscientização popular, até que no dia 06 de novembro de 2020 se registrou a média móvel mais baixa desde então, com 16.727 casos por dia. Porém, com as campanhas eleitorais municipais gerando aglomerações em diversas cidades do país, houve um recrudescimento da pandemia, atingindo um patamar (até então) recorde de 55.034 casos por dia em 12 de janeiro de 2021. Neste período, houve um forte represamento de casos que baixou momentaneamente a média móvel no período de natal e de transição das gestões municipais; entre 28 de dezembro e 06 de janeiro as médias móveis caíram para cerca de 35.000 casos por dia, sendo retomado o crescimento na semana subsequente.

O período entre 12 de janeiro e 14 de fevereiro de 2021 trouxe uma leve queda no número de casos confirmados, passando de 55 mil em janeiro para pouco mais de 44 mil em fevereiro (e no dia 18 de janeiro de 2021, temos que destacar o início da campanha de vacinação brasileira contra a COVID-19). Esta queda não foi mais acentuada pois na região Norte do Brasil, especialmente no estado do Amazonas, houve um forte avanço da pandemia, que hoje sabemos ter sido causado pela nova variante Gama do vírus causador da COVID-19. E a partir de 14 de fevereiro de 2021, inciou-se o terceiro - e até hoje mais grave, devido ao número de óbitos decorrentes - período de aceleração no país, chegando a assombrosa média de 77.129 novos casos por dia em 27 de março de 2021, levando o sistema de saúde de todos os estados da federação ao colapso. Nesta data, o país já registrava mais de 12 milhões de casos de COVID-19 e 310 mil óbitos decorrentes da doença (o auge dos óbitos na pandemia se deu no período entre 05 e 12 de abril de 2021, com uma média de 3.124 óbitos diários nessa época). Observamos (veja a Figura 2) que precisamente no período entre final de março de 2021 e início de abril de 2021 houve um aumento nas taxas de isolamento social, que foi capaz de reduzir para cerca de 56.000 casos por dia a média móvel de

novas confirmações (valor superior ao auge anterior do dia 12 de janeiro).

Seguiu-se, durante o mês de maio, um período de aparente *estabilidade crítica* dos casos de COVID-19 no Brasil, registrando médias diárias na faixa de 60 mil casos por dia (e com diminuição da taxa de isolamento social para abaixo dos 40%). Porém, a partir do dia 09 de junho, saindo de uma média de 57.542 casos por dia, até o dia 23 de junho, chegando em uma média recorde de 77.328 casos por dia (aumento de 34% em duas semanas), iniciamos o que pode ser considerado o quarto período de aceleração da pandemia no país. Coincidentemente, em 13 de maio de 2021 foram identificados os primeiros casos de COVID-19 causados pela cepa Delta (B.1.671.2) do vírus SARS-COV-2 [7], potencialmente mais transmissível que a atual cepa predominante Gamma (P.1), e em junho já havia o registro da transmissão comunitária desta cepa [8] em pelo menos um estado do Brasil. Dado que até 09 de junho de 2021 o Brasil apresentava uma tendência de estabilidade no número de novos casos confirmados, existe a possibilidade de que esta cepa esteja se tornando predominante em algumas regiões do país, causando a aceleração observada, diminuindo a imunidade natural adquirida por contaminações anteriores (principalmente daqueles casos leves e assintomáticos) por outras cepas.

O agravamento que vemos observando pode estar sendo potencializado por diversos outros fatores além da chegada da cepa Delta. Entre eles, citamos citações públicas por parte do presidente da república desestimulando a utilização de máscaras, especialmente entre aqueles vacinados ou que tiveram a COVID-19 mas já estão recuperados. Além de não ter respaldo científico, dado que uma pessoa recuperada não possui garantia de imunização contra novas cepas do vírus [14], o exemplo de Israel [15] nos mostra que mesmo com mais de 60% da população vacinada com duas doses, campanhas que permitem à população deixar de utilizar a máscara pode gerar agravamento da pandemia. Com o Brasil tendo pouco mais de 12% da sua população completamente vacinada, essa campanha pode ter efeito desastroso. Também o próprio avanço lento da vacinação pode ser um agravante da pandemia, dado que por um lado a própria campanha naturalmente traz otimismo à população, que reduz os seus cuidados pessoais, mas por outro lado há a imunização de uma parcela muito pequena da população, pouco mais de 12% da população completamente vacinada [4], de modo que 7 em cada 8 brasileiros não contam com a proteção máxima oferecida pelas vacinas disponíveis. Além disso, a vacinação completa está concentrada em grande parte no grupo das pessoas mais idosas, que possuem maior facilidade e disponibilidade para aderir ao isolamento social.

Por outro lado, em relação a medidas de contenção da transmissão viral, a testagem contra a COVID-19 em território nacional não atinge os critérios da Organização Mundial da Saúde para ser classificada como testagem em massa, dado que a taxa de positividade dos testes realizados em território nacional está estimada² em torno de 34% (veja [17, 4]), quando o aconselhado pela OMS [16, Página 96] é que essa taxa fique entre 3% e 5%. Com as taxas observadas no Brasil, demonstra-se que não há a prática generalizada do rastreamento de contatos, que poderia auxiliar na diminuição da transmissão viral, principalmente por assintomáticos, e que o critério predominante de testagem continua sendo, mesmo após mais de um ano de pandemia, o de testar majoritariamente pacientes que apresentam sintomas. Em relação ao isolamento social, observamos (segundo os dados disponibilizados em [9] e compilados na Figura 2) que a proporção média de

²Não há dados oficiais consolidados da testagem no país [13].

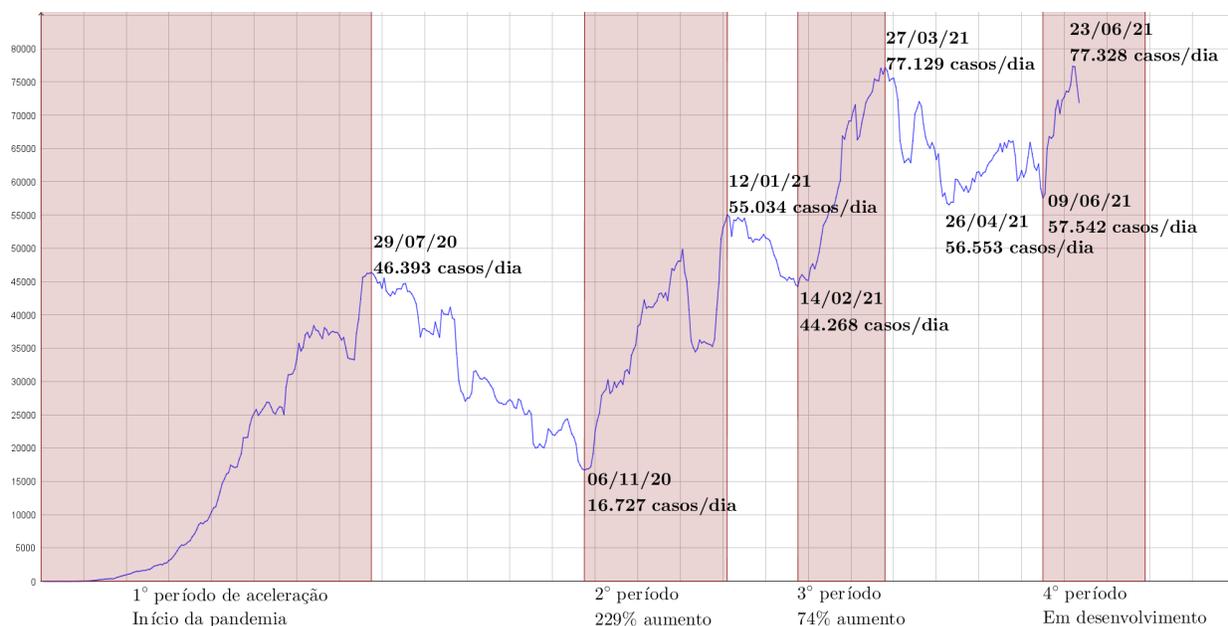


Figura 1: Média móvel (7 dias) no número de casos confirmados de COVID-19 no Brasil, com os quatro períodos de aceleração da pandemia destacados.

peças que adotam essa prática gira em torno de 37,8%, apenas 8% superior ao isolamento social médio medido em períodos anteriores à pandemia, quantidade insuficiente para barrar o avanço da doença no Brasil.

Dessa forma, torna-se de suprema necessidade ações imediatas de controle da transmissão viral, dado que por hora são poucos casos diagnosticados com a cepa Delta e em poucas localidades do Brasil, mas com a tendência sendo de espalhamento, se tornando predominante e agravando ainda mais a situação da pandemia no Brasil, que já é grave e pode vir a apresentar um ritmo até hoje nunca visto, com mais de 140 mil novas confirmações diárias (veja as Figuras 5 e 6 e o Cenário 3).

A primeira iniciativa para evitar a disseminação desta variante mais contagiosa do coronavírus seria a adoção de barreiras sanitárias interestaduais. Porém, dado que o período de incubação do vírus é em média de 5 dias [6], tais barreiras conseguiriam identificar casos sintomáticos mas não seriam o suficiente para interromper a transmissão interestadual desta cepa. Também o aumento imediato da testagem, a fim de atingir a completa rastreabilidade dos contatos de casos diagnosticados, poderia retardar o avanço da cepa Delta, mas esta medida esbarra na própria capacidade de testagem dos laboratórios com o teste PCR, considerado padrão ouro para a identificação de casos no período infeccioso. A longo prazo, a única medida capaz de diminuir os efeitos da pandemia no país é o aumento da vacinação, mas esta medida não pode ser considerada como ação de curto prazo, dado que não há doses disponíveis para utilização imediata e que existe um prazo entre a aplicação da primeira dose, a aplicação da segunda dose e a aquisição da máxima imunidade provocada pela vacinação.

Uma proposta colocada em discussão no dia 24 de junho de 2021 pelo professor Pedro Halal [1] em sessão pública do Senado Federal foi a da adoção de um lockdown nacional de três se-

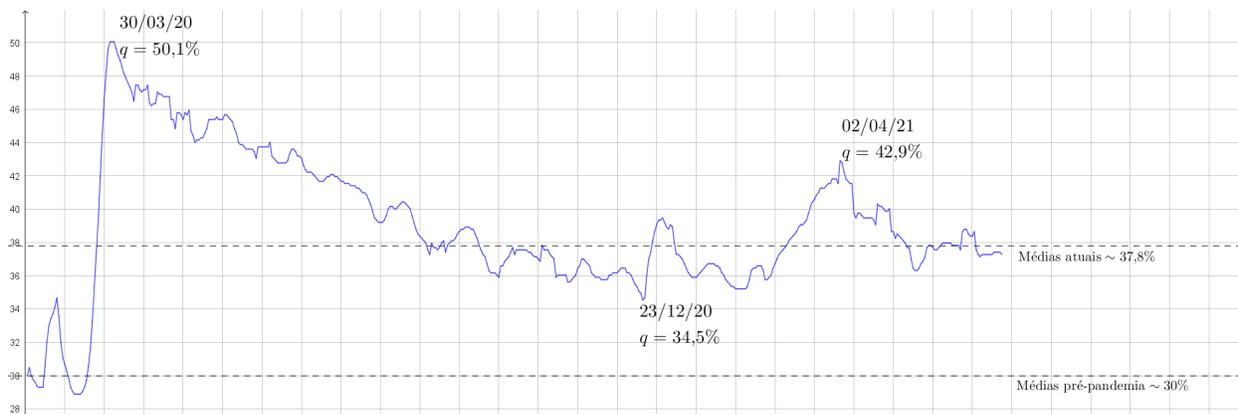


Figura 2: No período pré-pandêmico no Brasil (anterior ao dia 01 de março), o índice de isolamento social q tinha médias semanais em torno de 30%. A partir do dia 16 de março diversas medidas de controle da mobilidade urbana foram adotadas por governos e prefeituras, atingindo na semana entre 23 e 30 de março de 2020 média acima de 50% a nível nacional. Após esse primeiro período há forte recuo, culminando, na semana que antecede ao natal, 34,5% de média. Por um breve período entre meados de março e abril de 2021, o colapso simultâneo do sistema de saúde em diversos estados gera novas medidas de controle da mobilidade urbana, com o índice atingindo valores próximos de 43% em 02 de abril de 2021. Finalmente, ao longo de maio e até o mês de junho, o índice voltou a reduzir, e atualmente possui médias em torno de 37,8%.

manas como meio eficaz de redução imediata do número de novos contágios, com o consequente *achatamento da curva* nesse quarto período de aceleração, reduzindo o número total de óbitos que o Brasil enfrentará ainda nos próximos meses e atrasando a disseminação da cepa Delta em território nacional. Esta mesma proposta já havia sido discutida em junho de 2020 [3], em período de alta de casos e de óbitos no país, mas sem ter sido levada a cabo. A seguir, observaremos, através de um modelo matemático do tipo SEIR adaptado, com base nos dados atuais, qual o potencial impacto dessa medida no total de casos confirmados e no total de óbitos a se registrar até o dia 01 de outubro de 2021.

3 O impacto de um período de lockdown nacional.

Conforme descrito anteriormente (veja 1), um dado período será considerado como um *período de lockdown* se o isolamento social médio se mantiver no patamar de 65%. Esse nível de isolamento social não interrompe a cadeia produtiva no país, permitindo que atividades essenciais tais como hospitais e demais unidades de saúde, supermercados, setores do transporte, segurança pública entre outros continuem funcionando, mas possui um efeito, observável a curto prazo, de redução da transmissão viral, aliado a um efeito de alto impacto na preservação de vidas a médio prazo, fator que discutimos a seguir.

Para uma abordagem completa dos aspectos técnicos da modelagem cujos resultados aqui estão apresentados, veja a Seção 4. Por hora, apresentaremos apenas os dois parâmetros mais importan-

tes para a descrição dos resultados principais deste trabalho. Primeiramente, denotamos por α a taxa de transmissão viral, que é determinado semana a semana, com precisão de uma casa decimal, através dos dados oficiais do Ministério da Saúde [11]. Os valores dessa taxa no período da modelagem são apresentados na Figura 8, e observamos que nas últimas semanas, esse parâmetro vem crescendo significativamente, possivelmente como consequência de um espalhamento da predominância da cepa Delta, conforme já citado, ou da redução das medidas individuais para proteção da pandemia, como a menor utilização de máscaras ou aumento no número de aglomerações em ambientes abertos ou fechados. Em segundo lugar, o modelo leva em consideração o índice de isolamento social, denotado por q e medido e disponibilizado diariamente pela plataforma específica do Google [9], cujas médias estão apresentadas na Figura 2. Também citamos que o modelo observa a proporção das pessoas imunizadas (por hipótese, consideramos uma pessoa imunizada 14 dias após receber todas as doses de uma dada vacina contra a COVID-19), e que para a modelagem futura supõe uma extrapolação linear dos dados atuais de vacinação.

Os dois parâmetros α e q são os que de fato se alteram de acordo com o comportamento populacional e viral. Deste modo, são imprevisíveis, embora se possam apresentar estimativas baseadas nos seus valores médios passados. No que segue, vamos denotar por um cenário otimista aquele onde α se mantém no patamar dos níveis atuais. Já um cenário pessimista será um cenário onde observamos aumento deste parâmetro, condizente com a maior predominância da cepa Delta. Além disso, cada um dos dois cenários será modelado nas modalidades:

- **Sem lockdown:** adotamos isolamento social de 37,8% em todo o período de 97 dias da modelagem.
- **Com lockdown:** adotamos isolamento social de 65% durante os primeiros 21 dias, seguido de isolamento social de 37,8% nos demais 76 dias.

Enfatizamos que a única diferença entre um dado cenário com e sem lockdown é no parâmetro q do índice de isolamento social, em um período de 21 dias, se mantendo todas as demais variáveis iguais entre uma modalidade e outra.

Os resultados de cada uma das modelagens nos moldes descritos acima serão descritos a seguir, e salientamos que, conforme apresentado na Seção 4, o modelo utilizado possui capacidade de retratar a realidade, tendo apresentado no período de 56 semanas entre 31/05/20 e 26/06/21 (período de calibragem do modelo) um erro máximo de 2,08%, com erro absoluto médio de 0,31% (veja a Figura 8). A

Cenário 1 (Cenário otimista, sem lockdown). Mantendo a taxa de contágio média de $\alpha = 2.3$ pelo período entre 27 de junho e 01 de outubro de 2021, com isolamento social médio de 37,8%, observamos ao final do período um total de 24.553.721 casos confirmados de COVID-19. Comparativamente com os dados atuais, serão 6.166.827 novos casos registrados no período.

Considerando uma taxa de letalidade média de 2,8% (a taxa observada atualmente), podemos atingir um total de 687.504 óbitos ao fim do período, ou 174.769 vidas perdidas nos próximos 97 dias.

Cenário 2 (Cenário otimista, com lockdown). Mantendo a taxa de contágio $\alpha = 2.3$ como no Cenário 1, com isolamento social médio de 37,8%, excetuando o período entre 27 de junho e 18 de

julho de 2021 onde supomos 65% de isolamento social, observamos ao final do período um total de 21.376.017 casos confirmados de COVID-19. Comparativamente com os dados atuais, serão 2.989.123 novos casos registrados no período.

Considerando uma taxa de letalidade média de 2,8%, podemos atingir um total de 598.528 óbitos ao fim do período, ou 85.793 vidas perdidas nos próximos 97 dias.

Conclusão 1. Comparando os Cenários 1 e 2 (veja as Figuras 3 e 4), um período de 21 dias de lockdown possui potencial de prevenir 3.177.704 casos de COVID-19 e 88.976 óbitos, que corresponde a mais de 50% dos óbitos previstos sem esta medida.

Em um cenário pessimista, onde a taxa de contágio aumente gradativamente até atingir $\alpha = 2.8$, algo semelhante ao aumento observado quando a cepa Gama (P.1) se tornou predominante no país, o efeito benéfico do lockdown fica ainda mais drástico.

Cenário 3 (Cenário pessimista, sem lockdown). Supondo que a taxa de contágio aumente progressivamente no período entre 27 de junho e 18 de julho de 2021, atingindo o valor de $\alpha = 2.8$ a partir de então e se mantendo nesse patamar até 01 de outubro de 2021, com isolamento social médio de 37,8%, observamos ao final do período um total de 29.857.419 casos confirmados de COVID-19. Comparativamente com os dados atuais, serão 11.470.525 novos casos registrados no período.

Considerando uma taxa de letalidade média de 2,8%, podemos atingir um total de 836.008 óbitos ao fim do período, ou 323.273 vidas perdidas nos próximos 97 dias.

Cenário 4 (Cenário pessimista, com lockdown). Supondo que a taxa de contágio seja como descrita no Cenário 3, com isolamento social médio de 37,8%, excetuando o período entre 27 de junho e 18 de julho de 2021, observamos no dia 01 de outubro de 2021 24.352.371 casos confirmados de COVID-19. Comparativamente com os dados atuais, serão 5.965.477 novos casos registrados no período.

Considerando uma taxa de letalidade média de 2,8%, podemos atingir um total de 681.866 óbitos ao fim do período, ou 169.131 vidas perdidas nos próximos 97 dias.

Conclusão 2. Comparando os Cenários 3 e 4, um período de 21 dias de lockdown possui potencial de prevenir 5.505.048 casos de COVID-19 e 154.142 óbitos, que corresponde a 47,7% dos óbitos previstos sem esta medida.

Considerando os cenários e as conclusões apresentadas acima, observamos que possivelmente o Brasil ainda passará por momentos de maior transmissão viral do que os já observados até agora, correndo o risco de aumentar drasticamente o número de óbitos decorrentes da COVID-19. Nesse contexto, um período de lockdown nacional de 21 dias salvaria, até o dia 01 de outubro de 2021, um total entre 88.976 e 154.142 vidas, além de possuir potencial de evitar até 5.505.048 novas contaminações. Porém, também observamos que um período de lockdown também diminui outros fatores de transmissão viral, como, por exemplo, aglomerações, encontros de pessoas de residências distintas, necessidade de permanência em ambiente de trabalho com baixa ventilação, além de atrasar a disseminação da cepa Delta pelas diversas regiões do país. Desse modo, um período de lockdown teria impacto não apenas na taxa de isolamento social, mas também traria

como consequência a diminuição da taxa de contágio α . Em particular, as conclusões apresentadas são sub-estimativas, no sentido que o impacto real de um período de lockdown provavelmente é ainda maior do que o apresentado neste estudo.

Em relação à exequibilidade desta medida, temos como certo que a adoção um período de lockdown com abrangência nacional é uma medida extrema, que exige mais do que a simples imposição por meio decretos. Um lockdown nacional deve ser planejado de maneira centralizada, pelo Governo Federal, mas exige a colaboração das gestões Estaduais e Municipais para fiscalização e cobrança. Porém, acima de tudo, um período de lockdown exige apoio e adesão por parte da população.

A seguir, argumentamos que um período de 3 semanas de lockdown é inclusive financeiramente benéfico à administração pública federal. Segundo relatório da CONITEC, comissão do próprio Ministério da Saúde, que tem por objetivo assessorar este Ministério, observamos (veja [2, Tabela 14]) os custos médios com um paciente diagnosticado com COVID-19 a seguir:

- Infecção leve (sem necessidade de internação): R\$158,00.
- Infecção moderada (necessidade de internação em enfermaria): R\$6.358,76.
- Infecção grave (necessidade de internação em CTI): R\$51.493,90.

Na análise que segue, utilizaremos as proporções apresentadas em [5], a saber que 81,4% dos casos diagnosticados são casos leves, 13,9% são casos moderados e 4,7% são casos graves. Assim sendo, a cada 1 milhão de casos evitados no Brasil, há uma latente economia que passa de R\$3,4 bilhões de reais. De fato, a cada 1 milhão de casos, 814.000 serão pacientes leves, 139.000 serão pacientes moderados e 47 mil desenvolverão casos graves. Deste modo, o custo imediato destes pacientes seria

$$814000 \times R\$158,00 + 139000 \times R\$6.358,76 + 47000 \times R\$51.493,90 = R\$3.432.692.940,00.$$

Em particular, quando comparamos os cenários pessimistas (3 e 4), evitando mais de 5,5 milhões de novas contaminações, teríamos uma economia imediata de mais de 18,9 bilhões de reais aos cofres públicos, o suficiente para pagarmos auxílio emergencial de R\$600,00 para 31,5 milhões de brasileiros ou para comprar 315 milhões de doses da vacina da Pfizer ou da Coronavac (com preço unitário de por volta de R\$60,00) ou até mesmo mais de 1 bilhão de doses da vacina da AstraZeneca (que possui custo médio de R\$16,00 por dose).

Chama a atenção que esta economia estimada de 18,9 bilhões de reais apresenta apenas a economia imediata, fruto do diagnóstico e de internações no curto período de pouco mais de 3 meses considerado pelo estudo. Ela não leva em consideração reduções de casos e óbitos a longo prazo nem que uma grande parte dos pacientes recuperados da COVID-19 ficam com sequelas duradouras, que exigem atenção contínua; tampouco leva em consideração os benefícios econômicos de um maior controle da pandemia, algo que foge do escopo deste trabalho.

Em suma, além do benefício inestimável em dezenas, quiçá centenas, de milhares de vidas salvas, um período de 21 dias de lockdown pode gerar uma economia significável aos cofres públicos, que permitiram inclusive a sua implementação com pagamento de auxílio emergencial para uma boa parte da população mais vulnerável.

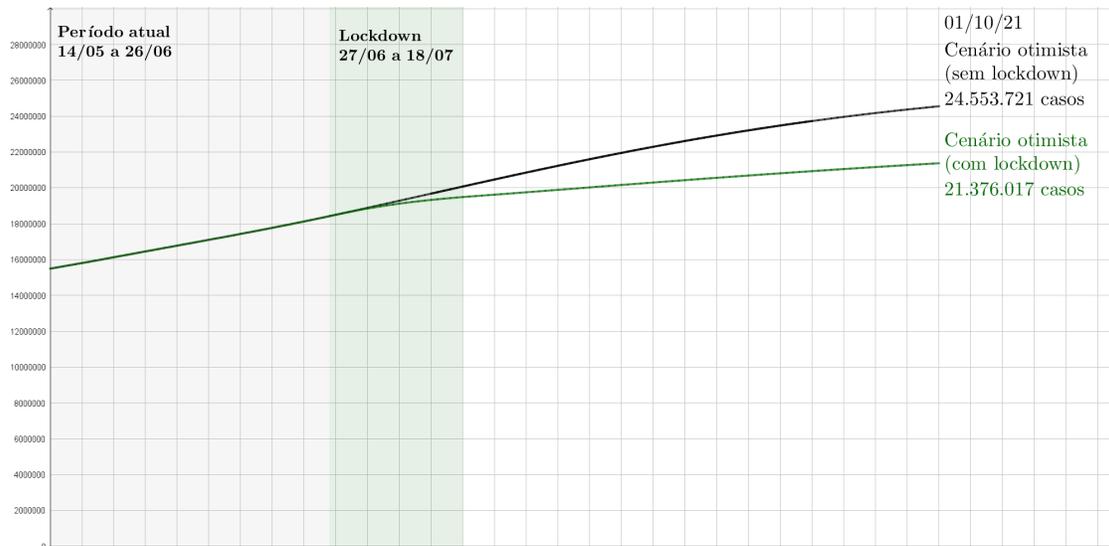


Figura 3: Comparação dos dois cenários otimistas, com e sem a presença de lockdown. Enquanto o cenário de controle (sem lockdown) apresenta no dia 01 de outubro de 2021 um total de 24.553.721 casos diagnosticados de COVID-19, um período de lockdown nacional de 21 dias reduz esse total para 21.376.017 casos, evitando 3.177.704 contaminações e salvando até 88.976 vidas nos próximos 97 dias.

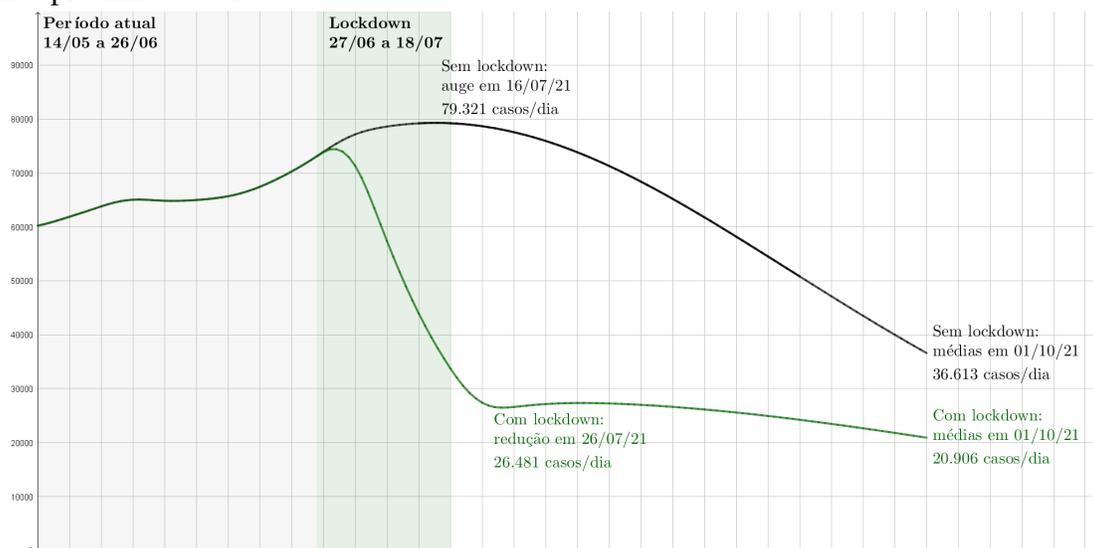


Figura 4: Comparação das médias diárias de casos confirmados nos dois cenários otimistas, com e sem a presença de lockdown. O cenário de controle (sem lockdown) apresenta auge no dia 16/07/21, com 79.321 casos por dia e, no dia 01/10/21 médias de 36.613 casos por dia, enquanto o cenário com lockdown mostra imediata redução no número de casos, chegando ao dia 26/07/21 a apenas 26.481 novas confirmações por dia. Observe que na situação mais otimista um período de lockdown reduz a circulação viral a ponto de não termos mais um período significativo de aceleração da pandemia.

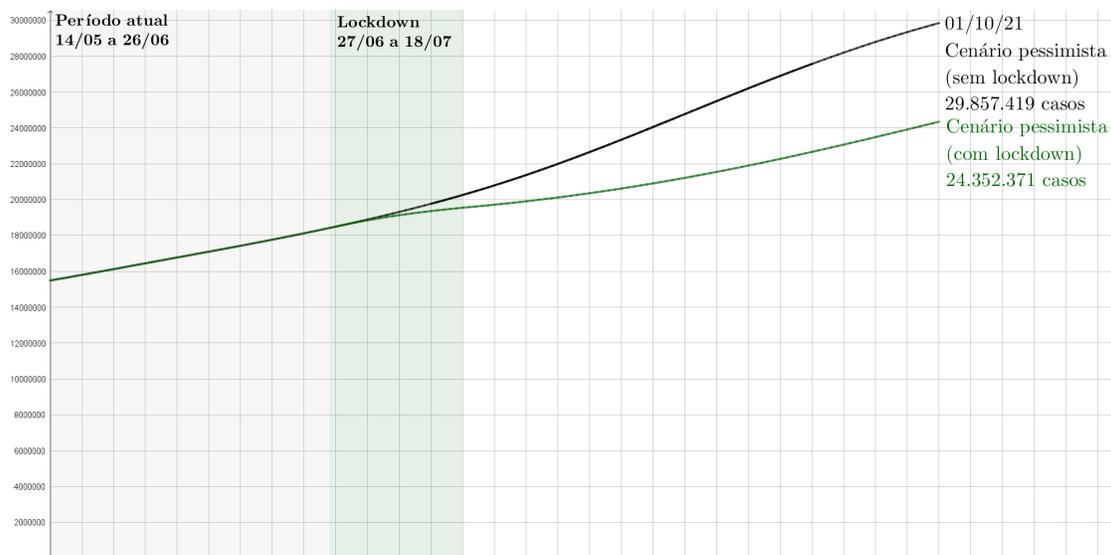


Figura 5: Comparação dos dois cenários pessimistas, com e sem a presença de lockdown. Enquanto o cenário de controle (sem lockdown) apresenta no dia 01 de outubro de 2021 um total de 29.857.419 casos diagnosticados de COVID-19, um período de lockdown nacional de 21 dias reduz esse total para 24.352.371 casos, evitando 5.505.048 contaminações e salvando até 154.142 vidas nos próximos 97 dias.

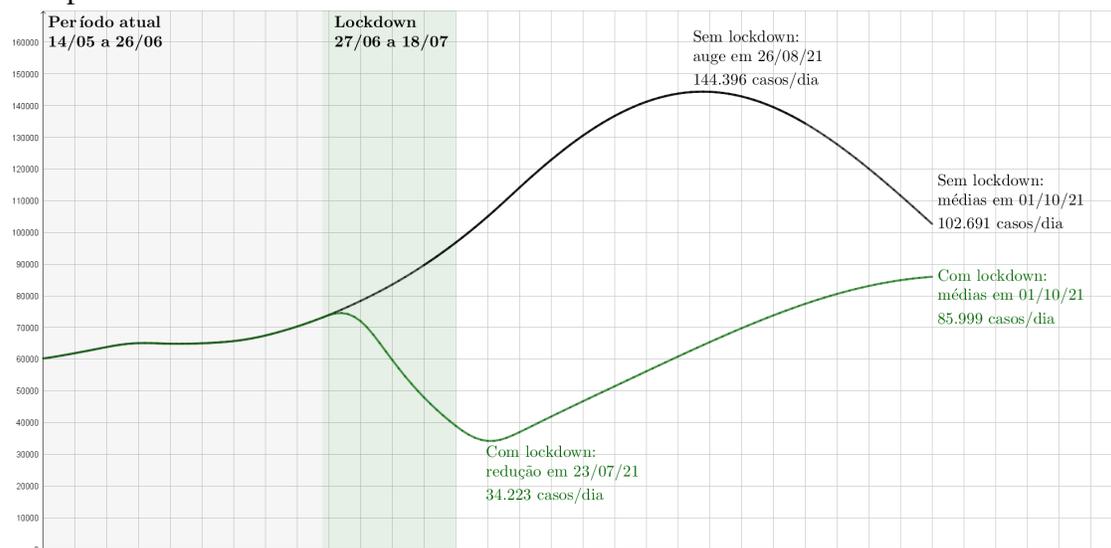


Figura 6: Comparação das médias diárias de casos confirmados nos dois cenários pessimistas, com e sem a presença de lockdown. Com o aumento da taxa de contágio, o cenário de controle (sem lockdown) apresenta auge no dia 26/08/21, com impressionantes 144.396 casos por dia e, no dia 01/10/21 ainda traz médias acima de 100 mil casos diários. Por outro lado, o cenário com um período de lockdown reduz a circulação viral imediatamente, chegando a 34.223 novos casos por dia em 23/07/21. Porém, o aumento da taxa de contágio faz com que haja um novo período de aceleração após a liberação da mobilidade urbana, e chegamos no dia 01/10/21 com médias na casa de 85.999 casos por dia, porém próximos do auge e com centenas de milhares de vidas salvas.

4 Considerações técnicas.

Modelos matemáticos são uma aproximação simplificada da realidade. Eles apresentam esboços da complexidade de certas situações, no caso abordado neste trabalho a pandemia de COVID-19 focalizada no Brasil, e possuem tanto qualidades quanto limitações. Por um lado, modelos muito sofisticados acabam possuindo parâmetros de difícil obtenção/estimativa, enquanto modelos super simplificados poderiam perder a noção da realidade que está sendo tratada (embora possam servir para fins didáticos). Neste trabalho, utilizamos um modelo intermediário que vem apresentando bastante assertividade na previsão do número de casos na pandemia de COVID-19, que é uma variação do modelo epidêmico determinístico clássico conhecido como *modelo SEIR*.

A seguir, detalharemos este modelo, iniciando esta discussão com as principais hipóteses utilizadas. Todas as projeções e simulações foram realizadas com o software R e utilizam métodos padrão de aproximação numérica de soluções de equações diferenciais ordinárias. O código utilizado está disponível em [18].

1. A população está dividida em 4 compartimentos principais: suscetíveis, expostas, infecciosas e removidas.
2. As pessoas **suscetíveis** não possuem nenhuma imunidade a priori ao vírus SARS-COV-2. Elas podem estar em isolamento ou não, e a proporção de pessoas em isolamento pode variar de dia a dia. Embora hajam exceções, consideramos um paciente suscetível imunizado após 14 dias do recebimento da última dose de uma dada vacina contra a COVID-19.
3. As pessoas **expostas** são aquelas que entraram em contato com o vírus mas estão ainda em seu período de incubação, e portanto não desenvolveram sintomas e tampouco estão transmitindo a doença.
4. As pessoas **infecciosas** são as que em um dado momento estão transmitindo a doença. Subdividimos os pacientes infecciosos em os que desenvolvem os principais sintomas da doença (pacientes *sintomáticos*) e os que não desenvolvem os sintomas ou os desenvolvem em baixo grau (pacientes *assintomáticos*).
5. As pessoas **removidas** são os pacientes de COVID-19 que por alguma razão não mais transmitem a doença. Especificamente, são considerados removidos: os pacientes sintomáticos que obtiveram um diagnóstico de COVID-19 (e portanto, praticam o isolamento social ou são internados em leito hospitalar ou de UTI), os pacientes que vieram a óbito e também aqueles pacientes recuperados que possuem imunidade contra reinfecção.
6. Um paciente que desenvolveu sintomas leves ou teve uma infecção assintomática de COVID-19 pode não possuir imunidade permanente para a doença. Especificamente, com 31% de chances (conforme [14]), o paciente pode perder a imunidade natural concedida pela infecção após 6 meses de sua recuperação. Observamos que a perda da imunidade não implica em contaminação imediata, mas apenas ao seu retorno à classe das pessoas suscetíveis.

7. A maior parte dos pacientes sintomáticos é diagnosticada, mas uma parcela muito pequena dos pacientes assintomáticos é diagnosticada. Isso reflete a realidade brasileira com seus protocolos de testagem.
8. O nosso modelo (que não considera mortes por outras causas nem nascimentos) assume homogeneidade da população e de suas interações. Em particular, através da lei dos grandes números, podemos utilizar um modelo determinístico para aproximar o efeito de um processo de caráter estocástico como a evolução da pandemia.

As funções que definem a quantidade de pessoas em cada uma das classes acima serão denotadas como segue. Estamos assumindo dependência na variável temporal, que será denotada por t .

- S as pessoas suscetíveis.
- E as pessoas expostas.
- I_a os infecciosos assintomáticos.
- I_s os infecciosos sintomáticos.
- R os retirados.

A transição de pessoas entre classes distintas segue o esquema apresentado na Figura 7. Além dessas funções apresentadas, utilizaremos as funções auxiliares abaixo.

- L o número de pacientes recuperados da COVID-19 sujeitos a perda de imunidade (casos leves e assintomáticos).
- D o número de pacientes diagnosticados com COVID-19, que é a solução buscada no sistema.

A descrição acima gera o seguinte sistema de equações diferenciais ordinárias:

$$\begin{aligned}
S' &= -\alpha(1-q)(1-\nu)S(\theta_a I_a + I_s) + sL(t) \\
E' &= \alpha(1-q)S(\theta_a I_a + I_s) - \mu E \\
I_a' &= \mu\rho_a E - \lambda_a I_a \\
I_s' &= \mu\rho_s E - \lambda_s I_s \\
R' &= \lambda_a I_a + \lambda_s I_s \\
L' &= r\lambda_a I_a - sL \\
D' &= \lambda_s I_s.
\end{aligned} \tag{1}$$

Os coeficientes acima apresentados são os que seguem:

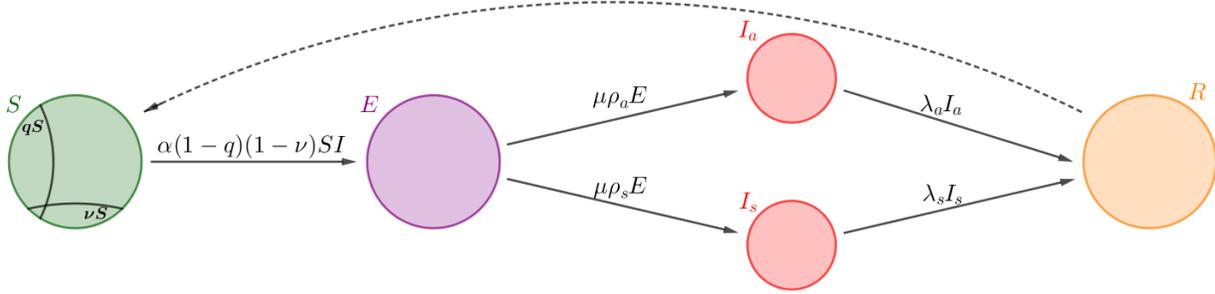


Figura 7: As pessoas suscetíveis (classe S) podem estar em isolamento (parcela $q.S$) ou não e estarem imunizadas (parcela νS) ou não. Ao serem infectados com o vírus SARS-COV-2, se tornam expostas (classe E). A seguir, na etapa infecciosa (que inclui o possível período pré-sintomático), ou desenvolvem sintomas (se tornando um paciente da classe I_s) ou não desenvolvem sintomas claros (classe I_a). Finalmente, após diagnóstico, cura ou óbito, a pessoa deixa de infectar outros e se torna um paciente removido (classe R). Caso o paciente tenha desenvolvido sintomas leves, após 6 meses da recuperação, há a chance de perda da imunidade, retornando assim à classe dos suscetíveis.

	Coefficiente	Valor	Observação
α	Taxa de infecção	Variável	Estimado a cada semana
q	Coefficiente de isolamento	Variável	Medido a cada dia (Figura 2)
ν	Taxa de imunização	Variável	Medido a cada semana [4]
θ_a	Espalhamento assintomático	1/10	Menor carga viral [10]
μ	Coefficiente de incubação	1/5.1	Tempo de incubação 5.1 dias [6]
ρ_a	Proporção assintomáticos	7/10	7 casos não registrados para 3 registrados
ρ_s	Proporção sintomáticos	3/10	7 casos não registrados para 3 registrados
λ_a	Coefficiente de recuperação	1/7	média de 7 dias infeccioso
λ_s	Coefficiente de diagnóstico	1/3	média de 3 dias até o diagnóstico
r	Chance de perda de imunidade	0.31	Para casos leves [14]
s	Coefficiente de perda de imunidade	1/180	180 dias de imunidade

Tendo descrito o modelo que será utilizado, passamos à sua *calibragem*, ou seja, observamos o quão capaz ele é de descrever a realidade em um período onde os dados são conhecidos. Neste trabalho, utilizando o período de 388 dias entre 31 de maio de 2020 (primeira data que registra mais de 500 mil casos de COVID-19 no Brasil) e 26 de junho de 2021. Em primeiro lugar, calculamos os valores semanais da taxa de contaminação α de modo que a função D dos casos diagnosticados melhor aproxime os dados oficiais divulgados pelo Ministério da Saúde. Com estes valores de α , obtemos a solução numérica do sistema de equações diferenciais dado por (1) e a comparamos com os dados oficiais. A modelagem obtida, apresentada na Figura 8 e, devido o seu tamanho, detalhada na tabela disponível em [18], é bastante satisfatória por dois motivos principais. O primeiro deles é o fato que o erro máximo encontrado após a primeira semana da modelagem foi de apenas 2,08%, e o erro médio foi de 0,31%, o que demonstra que o modelo tem capacidade de aproximar a realidade com boa precisão. Além disso, outra característica positiva que destaca

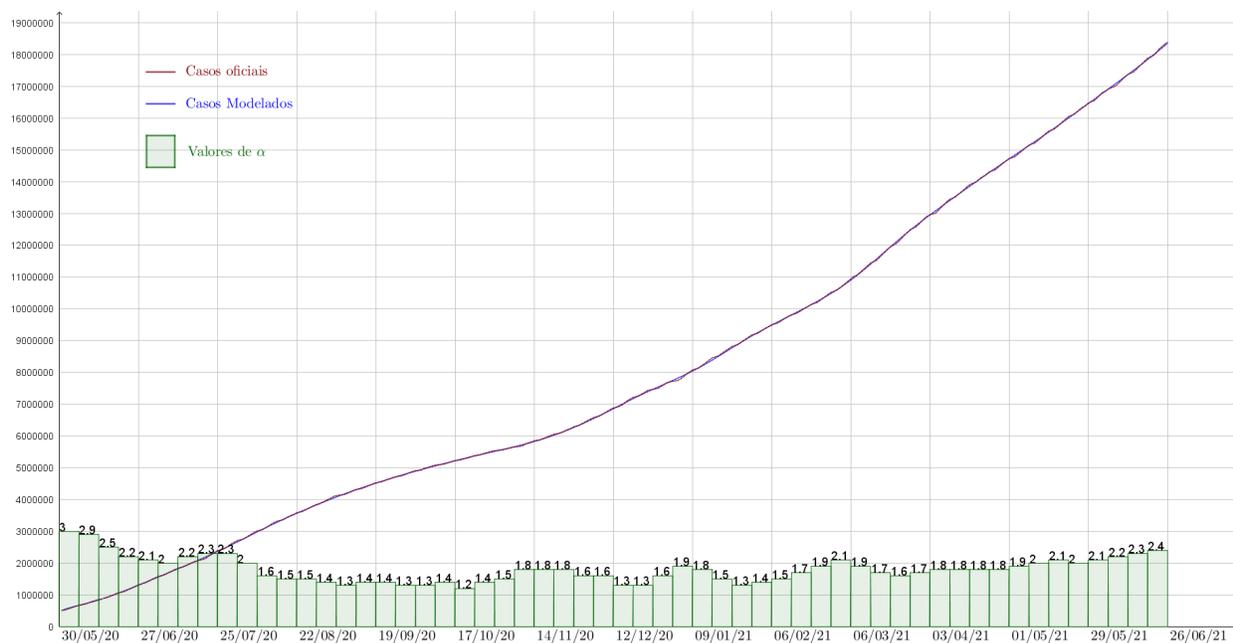


Figura 8: Calibragem do modelo: a comparação entre os dados modelados e os dados oficiais no período entre 31 de maio de 2020 e 26 de junho de 2021, juntamente com os valores semanais da taxa de transmissão viral α . O erro máximo observado no período foi de 2,08%, enquanto o erro absoluto médio é de 0,31%. Os dados brutos de comparação e o código que gerou esses dados podem ser encontrados em [18]. Observamos um aumento considerável na taxa de contaminação α no período após o dia 30 de janeiro de 2021, quando a cepa Gama (P.1) se tornou cada vez mais predominante em território nacional e também um segundo período de aumento de α a partir de maio de 2021, possivelmente indicando maior predominância de cepa Delta (B.1.671.2).

a qualidade do modelo apresentado é o fato que não há variações bruscas do dado α , algo que representaria um modelo artificial, não condizente com a realidade.

5 Conclusões finais.

Utilizando um modelo matemático determinístico dado por um sistema de equações diferenciais, baseado no clássico modelo SEIR, encontramos que a sua solução consegue retratar a realidade com precisão. Utilizando este modelo e diferentes cenários dependendo da taxa de transmissão viral e da adoção ou não de um período de 21 dias de lockdown nacional, chegamos à conclusão que esta medida possui potencial para salvar entre 88.976 e 154.142 vidas apenas até o dia 01 de outubro de 2021, além de reduzir consideravelmente o número de novos contágios por COVID-19 e assim economizar até 18,9 bilhões de reais que seriam utilizados para o tratamento destes pacientes.

Referências

- [1] R. Albuquerque e G. Toueg, *Hallal defende lockdown nacional de 3 semanas e vacinação diária de 1,5 mi.* Portal Uol notícias, publicado em 24 de junho de 2021. Disponível em <https://noticias.uol.com.br/politica/ultimas-noticias/2021/06/24/hallal-defende-lockdown-nacional-de-3-semanas-e-vacinacao-diaria-htm> acessado em 28/06/21.
- [2] Comissão Nacional de Incorporação de Tecnologias no SUS, *Relatório de recomendação*, nº 634, junho/2021. Disponível em http://conitec.gov.br/images/Consultas/Relatorios/2021/20210624_Relatorio_CP_vacinas_COVID-19_CP_34.pdf
- [3] P. Comunello, *'Lockdown rigoroso de 15 dias no Brasil inteiro', defende reitor da UFPel.* Jornal do Comércio, publicado em 27 de junho de 2020. Disponível em https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/geral/2020/06/745235-lockdown-rigoroso-de-15-dias-no-brasil-inteiro-s-defende.html, acessado em 28/06/21.
- [4] Coronavírus Brasil, *Painel COVID-19 no Brasil.* Disponível em <https://coronavirusbrasil.github.io/>, acessado em 27/06/21.
- [5] Epidemiology Working Group for NCIP Epidemic Response, Chinese Center for Disease Control and Prevention, *The epidemiological characteristics of an outbreak of 2019 novel coronavirus diseases (COVID-19) in China*, DOI 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2020.02.003

- [6] N. Ferguson, D. Laydon, G. Nedjati-Gilani, N. Imai N, K. Ainslie, M. Baguelin et al, *Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID19 mortality and healthcare demand*, Imperial College, London, (2020), DOI: <https://doi.org/10.25561/77482>
- [7] G1 Maranhão, *Maranhão registra primeiros casos da variante indiana da Covid-19*. Portal G1, publicado em 20 de maio de 2021. Disponível em <https://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/2021/05/20/maranhao-registra-primeiro-caso-da-variante-indiana-da-covid-19-ghtml> acessado em 28/06/21.
- [8] M. Gomes, *Variante delta do coronavírus é identificada e tem transmissão comunitária em Goiânia*. Portal G1, publicado em 18 de junho de 2021. Disponível em <https://g1.globo.com/go/goias/noticia/2021/06/18/variante-delta-do-coronavirus-e-identificada-e-tem-transmissao-comunitaria-em-goiania-ghtml> acessado em 28/06/21.
- [9] Google, *Relatórios de mobilidade da comunidade*. Disponível em <https://www.google.com/covid19/mobility/>, acessado em 27/06/21.
- [10] D. Gudbjartsson, A. Helgason, H. Jonsson, O. Magnusson, P. Melsted, G. Norddahl et al, *Spread of SARS-CoV-2 in the Icelandic Population*, N Engl J Med, 382 (2020),DOI: 10.1056/NEJMoa2006100
- [11] Ministério da Saúde, *Painel coronavírus*. Disponível em <https://covid.saude.gov.br/>, acessado em 27/06/21.
- [12] Ministério da Saúde, *COVID-19 distribuição de vacinas*. Disponível em https://qsprod.saude.gov.br/extensions/DEMAS_C19VAC_Distr/DEMAS_C19VAC_Distr.html acessado em 27/06/21.
- [13] Our World in Data. *Coronavirus (COVID-19) Testing* Disponível em <https://ourworldindata.org/coronavirus-testing>, acessado em 27/06/21.
- [14] C. Prete Jr, L. Buss, C. Abraham, T. Salomon, M. Crispim, M. Oikawa, R. Buccheri et al, *Reinfection by the SARS-CoV-2 P.1 variant in blood donors in Manaus, Brazil*. Preprint. Disponível em <https://doi.org/10.1101/2021.05.10.21256644>
- [15] J. C. Sanz, *Israel retoma uso obrigatório de máscaras em lugares fechados após repique de contágios pela variante delta*. Portal El País Brasil, publicado em 25 de junho de 2021. Disponível em <https://brasil.elpais.com/sociedad/2021-06-25/israel-retoma-uso-obrigatorio-de-mascaras-em-lugares-fechados-sa> html acessado em 28/06/21.
- [16] World Health Organization, *Health system response to COVID-19*. Eurohealth, special issue, volume 26, 2 (2020). Available at <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1313868/retrieve>

- [17] Worldometers.info, *COVID-19 Coronavirus Pandemic*. Disponível em <https://www.worldometers.info/coronavirus/#countries>, acessado em 27/06/21.
- [18] Arquivos anexos. Disponível em <https://www.dropbox.com/s/5n0jb9s83kdur9n/ModelagemAlvaroRamos.rar?dl=0>