

Modelagem das mudanças comportamentais durante a propagação do sars-cov-2: um estudo de caso considerando o atraso nos testes

Modelling behavior changes during the sars-cov-2 spreading: a case study considering the delay in the tests

Cambios en el comportamiento de modelado durante la propagación de sars-cov-2: un estudio de caso que considera el retraso en las pruebas

Recebido: 10/06/2020 | Revisado: 10/06/2020 | Aceito: 11/06/2020 | Publicado: 12/06/2020

Marcelo Amanajás Pires

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8333-7236>

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Brasil

E-mail: piresma@cbpf.br

Neylan Leal Dias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9659-8825>

Universidade Federal do Amapá, Brasil

E-mail: neylanmatematico@gmail.com

Edcarlos Vasconcelos da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8989-8843>

Universidade Federal do Amapá, Brasil

E-mail: edcarlos.vasconcellos@unifap.br

Simone de Almeida Delphim Leal

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7346-3159>

Universidade Federal do Amapá, Brasil

E-mail: sdelphim@gmail.com

Resumo

Este artigo apresenta uma modelagem epidêmico-comportamental da disseminação SARS-CoV-2 no Amapá em que foi empregada uma generalização do modelo SIR que captura a resposta comportamental da população no decorrer da evolução epidêmica através de um fator de redução δ na taxa de contágio. Os resultados da etapa de validação do modelo com os dados reais mostram que $\delta = [0.614,0.638]$ sinalizando que a resposta comportamental foi responsável por uma redução de $\sim[36,39]\%$ na taxa de transmissibilidade epidêmica. Posteriormente, desenvolve-se uma análise dos cenários que podem emergir para um relaxamento das medidas de isolamento com t_R dias após o primeiro pico considerando-se um novo fator de redução da transmissibilidade $\delta_R > \delta$. Os resultados indicam que a saída disciplinada ($\delta_R \leq 0.80$) do período de confinamento com 3 semanas ($t_R = 21$) após o primeiro pico ainda pode desencadear um segundo pico, mas com um alcance menor que o primeiro.

Palavras-chave: Covid-19; Modelo epidêmico; Modelo comportamental; Isolamento social.

Abstract

This article presents an epidemic-behavior model for the SARS-CoV-2 spreading in Amapá employing a generalization of the SIR model, which captures the behavioral response of the population during the epidemic evolution through a reduction factor δ in the contagion rate. The results of the model's validation step with empirical data show that $\delta = [0.614,0.638]$ indicating that the behavioral response was responsible for a reduction of $\sim[36,39]\%$ in the epidemic transmissibility. Subsequently, we provide an analysis of the scenarios that may emerge if the isolation measures are lifted t_R days after the first peak considering a new reduction factor $\delta_R > \delta$. The results indicate that the careful exit ($\delta_R \leq 0.80$) from the confinement measures with 3 weeks ($t_R = 21$) after the first peak can still trigger a second peak, but with a smaller size than the first one.

Keywords: Covid-19; Epidemic model; Behavioral model; Social isolation.

Resumen

Este artículo presenta un modelo de comportamiento epidémico de la propagación del SARS-CoV-2 en Amapá en el que se utilizó una generalización del modelo SIR, que captura la respuesta conductual de la población durante la evolución epidémica a través de un factor delta (δ) de reducción de la tasa contagio. Los resultados del paso de validación del modelo con los datos reales muestran que $\delta = [0.614,0.638]$ indicando que la respuesta conductual fue

responsable de una reducción de $\sim [36,39]\%$ en la tasa de transmisibilidad epidémica. Posteriormente, se realiza un análisis de los escenarios que pueden surgir para una relajación de las medidas de aislamiento con t_R días después del primer pico considerando un nuevo factor de reducción de transmisibilidad $\delta_R > \delta$. Los resultados indican que la salida disciplinada ($\delta_R \leq 0.80$) del período de confinamiento de 3 semanas ($t_R = 21$) después del primer pico todavía puede desencadenar un segundo pico, pero con un alcance más corto que el primero.

Palabras clave: Covid-19; Modelo epidémico; Modelo conductual; Aislamiento social.

1. Introdução

Em janeiro de 2020 o surto de COVID-19 foi declarado pela Organização Mundial de Saúde – OMS como uma Emergência de Saúde Pública sendo este o mais alto grau de alerta daquele organismo e, em 11 de março de 2020, a doença foi caracterizada como uma pandemia (PAHO, 2020a), e em fim de maio atinge todos os continentes do globo com 6 milhões de casos e quase 400 mil mortes (OMS, 2020a).

No Brasil, o primeiro caso confirmado de COVID-19 foi registrado pelo Ministério da Saúde (Brasil, 2020) em 26 de fevereiro de 2020, de um cidadão com histórico de viagem para a Itália, que era um dos países europeus considerado epicentro da doença nos meses de fevereiro e março de 2020. Hoje, o Brasil e os Estados Unidos, colocaram o continente Americano como o mais novo epicentro da doença no mundo com aproximadamente 465 mil e 1,7 milhões de casos confirmados COVID-19, respectivamente, colocando esses dois países no topo do ranking da doença no mundo (OMS, 2020a).

Considerando que até o presente momento não existem vacinas ou tratamentos eficazes para a COVID-19, a OMS recomendou a aplicação de medidas não farmacológicas como a quarentena, o isolamento social, distanciamento social, restrição de viagens, suspensão das aulas, fechamento do comércio e *lockdown*, com o objetivo de reduzir a velocidade de propagação do vírus Sars-CoV-2 (PAHO, 2020b). Tais medidas foram adotadas com diferentes níveis de rigor por todos os países atingidos pela pandemia, inclusive no Brasil, onde o Ministério da Saúde implementou o plano de ação de medidas não farmacológicas, que objetivam diminuir o contágio da doença na população suscetível (Brasil, 2020b).

Medidas de mitigação não farmacológicas estão intrinsecamente ligadas ao modo como a população se comporta no enfrentamento às doenças infecciosas, como foi o caso do surto da influenza A, de 2009, exemplificada por Verelst, Willem e Beutels (2016) e Funk, Salathé e Jansen (2010), naquela ocasião o efeito causado na sociedade foi significativamente visível, com ruas vazias e população usando máscaras de proteção facial, parte devido às orientações dos gestores públicos, parte devido às reações individuais, ou seja, o impacto de transmissão das doenças infecciosas estão diretamente associadas às intervenções políticas e ao comportamento dos indivíduos.

As posturas comportamentais da população em sua interação com as doenças são, com frequência, relatadas em pesquisas científicas de diversos países (Verelst, Willem & Beutels 2016; Funk, Salathé & Jansen, 2010), no entanto Funk et al. (2010) observam que, tais estudos apresentam poucas análises objetivas sobre a natureza ou o real efeito que o comportamento humano possa ter em relação a propagação de determinada doença, sendo muitas vezes mencionadas de forma subjetiva aos dados para explicar quedas nas taxas de incidência da infecção. Isso ocorre pela dificuldade de quantificar essas variáveis, bem como pela complexidade de coletar tais dados de forma sistemática a fim de inserir em um modelo que possa agregar tais informações com resultados seguros e precisos (Funk et al., 2010).

Nesta direção, a evolução dos modelos matemáticos, têm possibilitado a elucidação dos processos de transmissão de doenças infecciosas em populações humanas (Wang, Andrews, Wu, Wang, & Bauch, 2015), especialmente os modelos diferenciais que incorporam elementos mais básicos onde exista uma população homogênea compartimentada em indivíduos Suscetíveis (S), Infectados (I) e Recuperados (R), podendo a partir dessas características evoluir para modelos mais complexos. Estudos dessa natureza estão sendo amplamente empregados para descrever a evolução de COVID-19 em diversos países (Bagal, Rath, Barua, & Patnaik, 2020; Boudrioua & Boudrioua, 2020; Sinkala et al., 2020; Freitas, Silva, & Sandes, 2020).

Wang et al. (2015) asseveram que, os modelos diferenciais compartimentados clássicos usados para descrever epidemias que consideram a taxa de transmissão fixa, tornam suas suposições demasiadamente simplificadas, pois, podem não levar em consideração o fato da população mudar o seu comportamento, no decorrer de uma epidemia, com o intuito de mitigar a transmissão da doença. Observa-se que, o comportamento dos indivíduos pode alterar drasticamente o curso de uma epidemia e esta interação exige que se possa

compreender esses fenômenos para conhecer com aprofundamento como uma doença se espalha na população (Funk et al., 2010).

Assim, são denominados Behavioural Change Models - BCM, os modelos de mudança comportamental que são definidos como “um modelo no qual os indivíduos respondem a informações externas sobre a doença e, como resultado, tomam uma ou mais medidas preventivas para reduzir a chance de contrair a doença” (Verelst et al., 2016, p. 02). No Brasil, desde que a epidemia começou a se alastrar, os governadores iniciaram, nos estados, a aplicação de medidas não farmacológicas como a quarentena, distanciamento social, isolamento e *lockdown*, essas medidas fazem parte do conjunto de elementos associados ao comportamento da população, estudos já concluíram que tais medidas são benéficas e seus efeitos positivos podem ser percebidos em até 14 dias após sua aplicação (Agência Brasil, 2020a).

O Estado do Amapá, que teve seu primeiro caso registrado em 20 de março de 2020, já contava em 05 de junho de 2020, com 12.327 casos confirmados de COVID-19, além de 260 óbitos pela doença (Amapá, 2020a). Tal situação levaram os gestores do Estado e Municípios à aplicação das medidas não farmacológicas (comportamentais) inclusive o *lockdown*, buscando mitigar a proliferação da epidemia, haja vista que, o Amapá se tornou o Estado com maior taxa de incidência por 100 mil habitantes em todo o Brasil (Agência Brasil, 2020b).

Sob esta ótica dos modelos epidemiológicos compartimentais, este estudo tem dois objetivos. O primeiro é retrospectivo e visa fornecer subsídios para melhor compreensão das fases epidêmicas já enfrentadas pela população. Nessa etapa será analisado comparativamente a eficiência dos modelos tradicionais SIR, vSIR ante o modelo SIR-comportamental para casos de COVID-19 no Estado do Amapá. O segundo objetivo é prospectivo e visa analisar o risco de um possível segundo pico epidêmico de acordo com a aplicação de relaxamento das medidas de isolamento.

2. Metodologia

Este estudo parte do método matemático-estatístico que, segundo Pereira, et al., (2018) significa a “redução de fenômenos sociológicos, políticos, econômicos, entre outros, em termos quantitativos. A manipulação estatística permite comprovar as relações dos fenômenos

entre si, e obter generalizações sobre sua natureza, ocorrência ou significado” (p. 29), consequentemente a abordagem empregada foi a quantitativa, definida por Silva e Menezes (2005) como aquele em que “considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las” (p. 20).

Do ponto de vista dos procedimentos, foi feito uso da pesquisa documental, definida por Pereira et al., (2018) e por Silva e Menezes (2005) como o uso de documentos oficiais (arquivos, registros estatísticos, diários, biografias, jornais, revistas, entre outros) para construção de banco de dados, para fins de análises. Pesquisas envolvendo modelagem matemática-estatística que serviram de base para esta metodologia são encontradas em Dias et al., (2020), Verelst et al., (2016) e Funk et al., (2010).

A primeira das duas classes de abordagens que têm se destacado na modelagem da propagação do Sars-Cov-2 refere-se a modelos sofisticados que visam capturar todos os detalhes possíveis da referida epidemia. Tal abordagem foi empregada em Peng, Yang, Zhang, Zhuge e Hong (2020) com um sistema de 7 EDOs e em Zhang et al. (2020) com um sistema de 15 EDOs. A outra classe de modelos visa capturar os ingredientes essenciais do processo de propagação em si. Essa abordagem também tem sido implementada de modo satisfatório à epidemia atual (Timoteo, Fanelli, & Piazza, 2020; Nesteruk, 2020; Dias et al., 2020) com versões primárias ou simples variantes de modelos clássicos. O presente trabalho segue essa segunda linha de abordagem ao fazer uso dos modelos SIR e vSIR onde adicionalmente é incorporada a resposta humana (Verelst et al., 2016; Funk et al., 2010) no decorrer do processo epidêmico no modelo denominado SIR-comportamental. Serão considerados dois cenários com relação aos dados, um primeiro utilizando os dados oficiais de infectados, e outro considerando um acréscimo de 70% do número de exames ainda em análise. O percentual usado refere-se a taxa média de resultados positivo dos casos considerados suspeitos, que estão com exame em análise (Amapá, 2020b).

Modelo SIR

O modelo epidemiológico SIR (Suscetível-Infetado-Recuperado) foi introduzido por Kermack - McKendrick, 1991 considera a evolução temporal de uma população dividida de forma compartimental em indivíduos suscetíveis, infectados e recuperados Suscetível-

Infectado-Recuperado (Dias et al., 2020), é representado pelo sistema de equações diferenciais:

$$\begin{aligned}\frac{dS_t}{dt} &= -\frac{\beta I_t S_t}{N} \\ \frac{dI_t}{dt} &= \frac{\beta I_t S_t}{N} - \gamma I_t \\ \frac{dR_t}{dt} &= \gamma I_t\end{aligned}$$

onde β é a taxa de infecção, γ a taxa de recuperação dos indivíduos e N é o total da população N é a soma dos indivíduos em cada compartimento ($N = S_t + I_t + R_t$) (Dias et al., 2020). O parâmetro β reflete a transmissibilidade do vírus. Neste modelo, os Suscetíveis são os indivíduos que ainda não foram infectados, e que possuem chances de contrair o vírus, enquanto os Recuperados por sua vez contraíram o vírus ao menos uma vez e não irão ser infectados novamente, em virtude de possuir anticorpos da primeira exposição. Logo um indivíduo sempre estará em uma das variáveis SIR. Assim, um indivíduo Suscetível poderá ser infectado por uma taxa β , e um indivíduo Infectado poderá se recuperar através da taxa γ .

Modelo vSIR

Diferentemente do modelo SIR clássico -- que necessita de uma prescrição para o valor de N -- o modelo vSIR (acrônimo para variante do SIR) considera N determinado a posteriori considerando os dados epidemiológicos disponíveis. Ou seja, N é o tamanho efetivo populacional para a cadeia de contágios para o vSIR. Essa variação do modelo SIR estabelece questões que nos direcionam as potencialidades e limitações que foram analisadas em Dias et al. (2020), com os dados do Amapá.

Os parâmetros desconhecidos do modelo vSIR são obtidos através do toolbox de otimização do Matlab, usando a função `fminsearch`, que calcula os valores ótimos de cada parâmetro desconhecido do modelo (Batista, 2020).

Modelo SIR-comportamental

Dado que o modo como a população responde a disseminação epidêmica não é estático (Verelst et al., 2016; Funk et al., 2010), adota-se neste trabalho a seguinte generalização do modelo SIR

$$\begin{aligned}\frac{dS_t}{dt} &= -f_t \beta S_t \frac{I_t}{N} \\ \frac{dI_t}{dt} &= f_t \beta S_t \frac{I_t}{N} - \alpha I_t \\ \frac{dR_t}{dt} &= \alpha I_t\end{aligned}$$

Onde f_t é uma função dependente do tempo que introduz o fator comportamental no decorrer da cadeia de contágios interpessoais. Baseado em Bastos e Cajueiro (2020) adota-se uma dependência funcional tal que após uma determinada data a reação comportamental promove uma redução na taxa de contágio através de uma função de dois valores:

$$f_t = \begin{cases} 1 & t < \tau \\ \delta & t \geq \tau \end{cases}$$

δ é a taxa de redução da transmissibilidade decorrente na adesão populacional às medidas de isolamento e τ é o tempo de efetiva mudança na tendência da evolução epidêmica de I_t . Enquanto as taxas $\{\beta, \gamma\}$ correspondem a propagação epidêmica as taxas $\{\delta, \tau\}$ capturam a reação comportamental da população à propagação do vírus.

Os parâmetros $\{\beta, \gamma, \delta, \tau\}$ são estimados usando as séries temporais com os número de casos confirmados com o uso de ferramentas de estatística e otimização da linguagem de programação R. Especificamente, para resolver as EDOs empregou-se o solucionador lsoda do pacote odepack que escolhe automaticamente a rotina de acordo com a especificidade das EDOS (Soetaert et al., 2010). No processo de estimativa do conjunto $\{\beta, \gamma, \delta, \tau\}$ minimizou-se a soma dos quadrados das diferenças entre os dados reais e os valores estimados com as soluções das EDOs que descrevem a evolução epidêmica.

Para otimizar a busca dos parâmetros que fornecem o melhor ajuste utilizou-se a função *optim* com o método *L-BFGS-B* (General-purpose Optimization) (Rdocumentation, 2020) que permite indicar o intervalo de busca, que foi adotado como $[0.1, 1]$ para $\{\beta, \gamma, \delta\}$ e $[15, 30]$ para τ com entradas aleatórias uniformemente distribuídas. Para cada entrada inicial é

obtido um conjunto $\{\beta, \gamma, \delta, \tau\}$ que fornece a menor discrepância em relação aos dados empíricos. Dado um conjunto estatístico no espaço de inputs é possível fazer um ranqueamento dos fits para prosseguir com os 3 melhores. Com tal metodologia é possível obter a margem de incerteza das séries temporais simuladas como será visto mais adiante.

Dados empíricos

Utilizou-se as séries temporais do número total de casos confirmados em todo o estado do Amapá. Esses dados estão disponíveis abertamente no repositório público <https://covid.saude.gov.br/>. Seja t o número de dias desde o primeiro caso. Como entre as datas 20/março ($t=1$) e 25/março ($t=6$) os dados ficaram estagnados em apenas 1 caso confirmado, adotou-se o dia 25/março como entrada inicial para os ajustes numéricos. Todos os parâmetros foram estimados com os dados disponíveis até data 05/junho.

Relaxamento das medidas de isolamento

Com t_R dias após primeiro pico é plausível cogitar-se remover as medidas de confinamento. Nesse sentido, considere o seguinte protocolo:

- A cada unidade de tempo (dia) monitora-se $\delta I_t = I_t - I_{t-1}$;
- No primeiro dia t com $\delta I_t < 0$ guarda-se $t_{pico} = t$;
- Se $t \geq t_{pico} + t_R$ aumenta-se o fator comportamental para $f_t = \delta_R > \delta$.

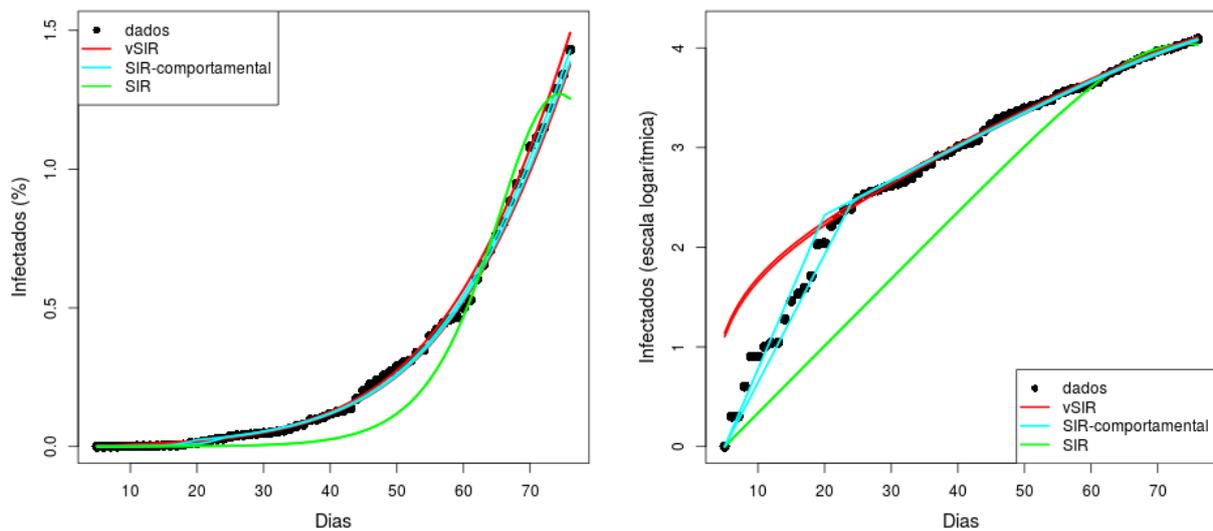
Note que há dados suficientes para estimar δ , diferentemente de δ_R . Desse modo, os parâmetros $\{t_R, \delta_R\}$ estão livres. Isso possibilita testar distintos cenários futuros.

3. Resultados e Discussão

Uma comparação entre os dados empíricos e os modelos SIR, vSIR e SIR-comportamental é apresentada nas Figuras 1 e 2 considerando-se $N=861773$ para o estado do Amapá. Primeiramente (Figura 1) considera-se exclusivamente o número reportado de casos confirmados. Em seguida (Figura 2) considera-se que são acrescentados ao número de infectados 70% dos casos suspeitos visando uma aproximação do número real dos casos infectados. Isso

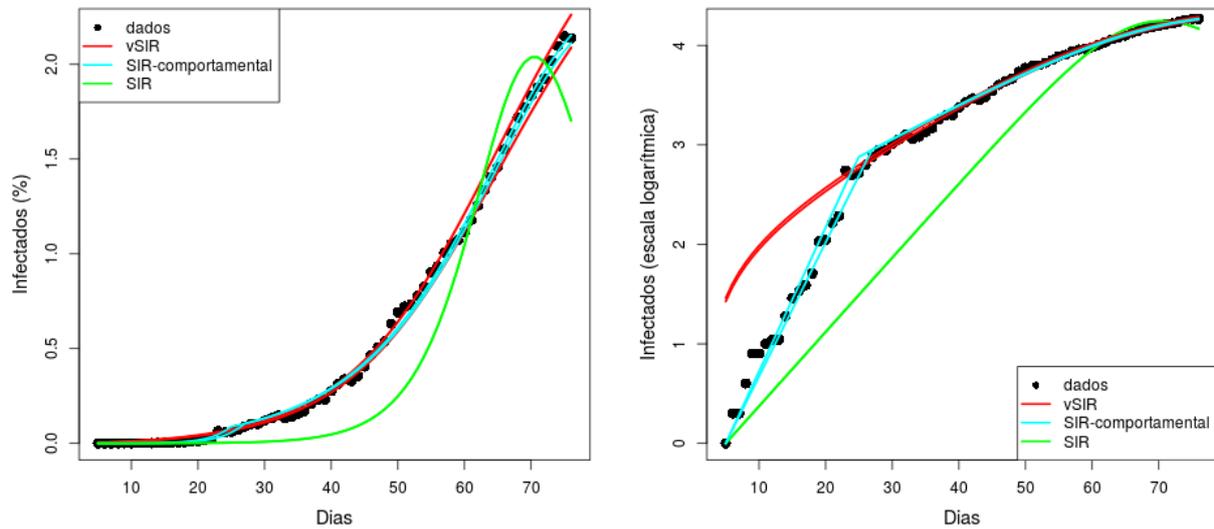
permite analisar o grau de influência do efeito do retardo do resultado dos exames na análise e modelagem dos dados. O percentual usado foi obtido de fontes oficiais do governo estadual (Amapá, 2020b).

Figura 1: Comparação modelos SIR, vSIR e SIR-comportamental. Os dados correspondem apenas ao número de casos confirmados.



Fonte: Os autores.

Figura 2: Comparação modelos SIR, vSIR e SIR-comportamental. Os dados correspondem a soma do número de casos confirmados com 70% de positivos dentre os casos suspeitos.



Fonte: Os autores.

No modelo vSIR, as curvas superior/inferior (faixa de valores) representam a margem de incerteza obtidas de forma que se tenha 95% de chance de que o valor esperado pertença ao intervalo simulado, além disso utilizou-se os parâmetros $\beta = 0.421$, $\gamma = 0.342$ e $N = 103085$ para os casos confirmados e $\beta = 0.373$, $\gamma = 0.282$ e $N = 60680$ para a soma de confirmados e 70% dos casos suspeitos. Já no modelo SIR $\beta = 1e$ e $\gamma = 0.844869$ para casos confirmados e $\beta = 0.881354e$ e $\gamma = 0.70942$ para a soma de confirmados e 70% dos casos suspeitos.

No modelo SIR-comportamental e SIR as curvas superior/inferior provém dos 3 melhores *fits* obtidos do conjunto estatístico no espaço de otimização descrito anteriormente. Os resultados apresentados nos painéis das Figuras 01 e 02 mostram que o modelo SIR padrão não é adequado para os presentes dados. O modelo vSIR apresenta um *fit* satisfatório apenas para as semanas intermediárias e mais recentes, mas falha nas semanas iniciais como evidenciado na escala logarítmica. O modelo SIR-comportamental mostrou-se satisfatório ao capturar as mudanças de tendências dos dados empíricos. Note que a tabela 01 mostra que o efeito do retardo do resultado dos exames provoca uma leve mudança nos parâmetros $\{\beta, \gamma, \delta, \tau\}$, mas isso não muda o padrão geral observado nas figuras 01 e 02.

Considerando todas as análises até o presente momento, este trabalho prossegue apenas com o modelo SIR-comportamental e com os dados que consideram os 70% dos casos suspeitos em análises laboratoriais.

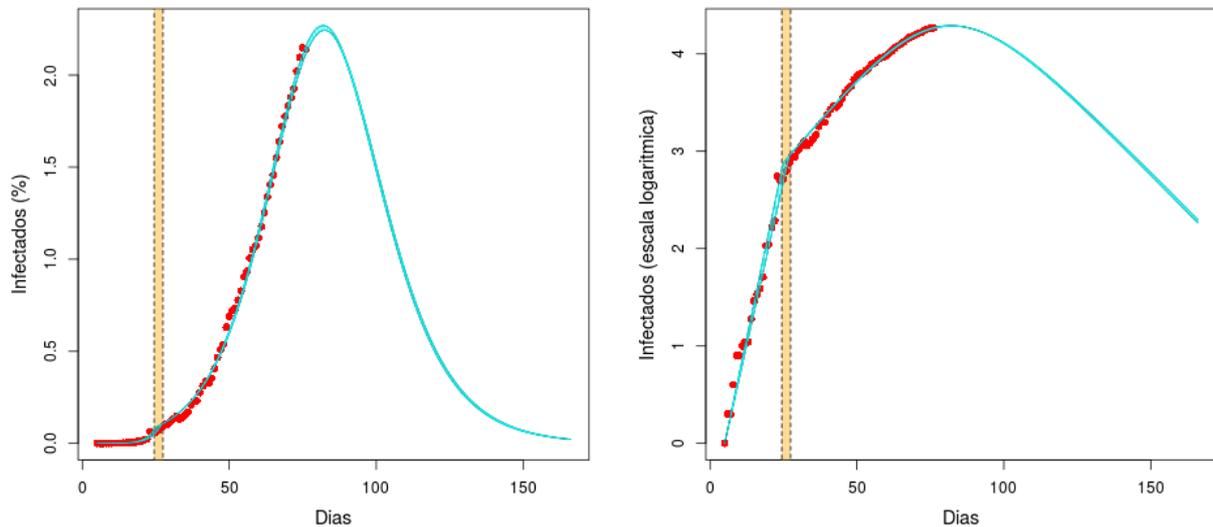
Uma perspectiva mais abrangente da projeção temporal para a propagação do vírus sars-cov-2 e as correspondentes curvas do modelo SIR-comportamental, é exibida na Figura 03. A faixa de valores em ciano correspondente aos três melhores fits cujos valores do conjunto $\{\beta, \gamma, \delta, \tau\}$ são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Melhores *fits* para o modelo SIR-comportamental considerando os dados que correspondem ao número de casos confirmados e confirmados com 70% de positivos dentre os casos suspeitos.

	β	γ	δ	τ
best fit 1	0.552	0.257	0.606	24.355
best fit 2	0.595	0.261	0.605	22.571
best fit 3	0.604	0.296	0.623	22.998
best fit 1 (+70% <i>s</i>)	0.631	0.321	0.638	26.942
best fit 2 (+70% <i>s</i>)	0.652	0.322	0.619	25.141
best fit 3 (+70% <i>s</i>)	0.653	0.32	0.614	24.91

Fonte: Os autores.

Figura 3: Projeção temporal dos 3 melhores *fit* cujos parâmetros estão mostrados na tabela T1.

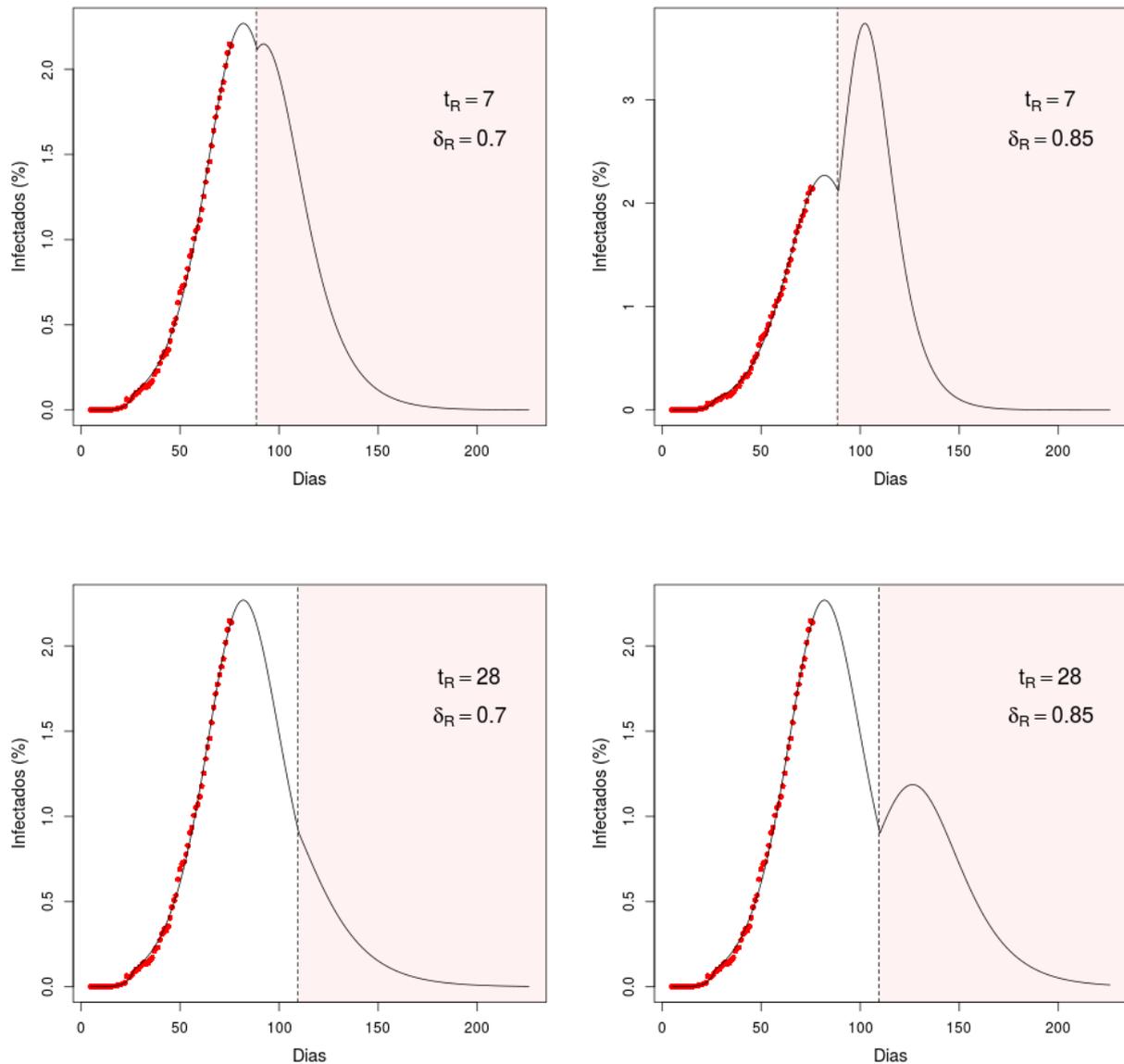


Fonte: Os autores.

É importante perceber que quanto maior a data posterior aos dados disponíveis, maior se torna a margem de incerteza. O fator de redução foi estimado em $\delta = [0.614, 0.638]$ indicando que a reação comportamental da população promoveu uma diminuição de $\sim [36, 39]\%$ na taxa de transmissibilidade. A faixa vertical laranja varre os valores de $\tau = [24.91, 26.942]$. Ou seja, a resposta comportamental da população levou cerca $\sim [25, 27]$ dias desde o primeiro caso confirmado para conseguir promover uma desaceleração notável na série temporal de Infectados detectados.

A Figura 4 mostra as projeções temporais para o período após o primeiro pico com distintos $t_R = \{7, 28\}$ e $\delta_R = \{0.7, 0.85\}$. Para melhor visualização considerou-se, por agora, apenas o melhor fit do ranqueamento descrito anteriormente. Seja P_n o pico de ordem n . A fenomenologia dos painéis evidencia 3 potenciais cenários: (i) $P_1 < P_2$ para $t_R = 7$ dias e $\delta_R = 0.85$; (ii) $P_1 > P_2 > 0$ para $t_R = 7$ dias com $\delta_R = 0.7$ e para $t_R = 28$ dias com $\delta_R = 0.85$; (iii) $P_2 = 0$ para $t_R = 28$ e $\delta_R = 0.7$.

Figura 4: Possíveis cenários se as medidas de isolamento relaxadas $t_R = \{7, 28\}$ dias após o primeiro pico com um novo fator comportamental $\delta_R = \{0.7, 0.85\}$. Demais parâmetros: $\beta = 0.631, \gamma = 0.321, \delta = 0.638$ e $\tau = 24.91$.

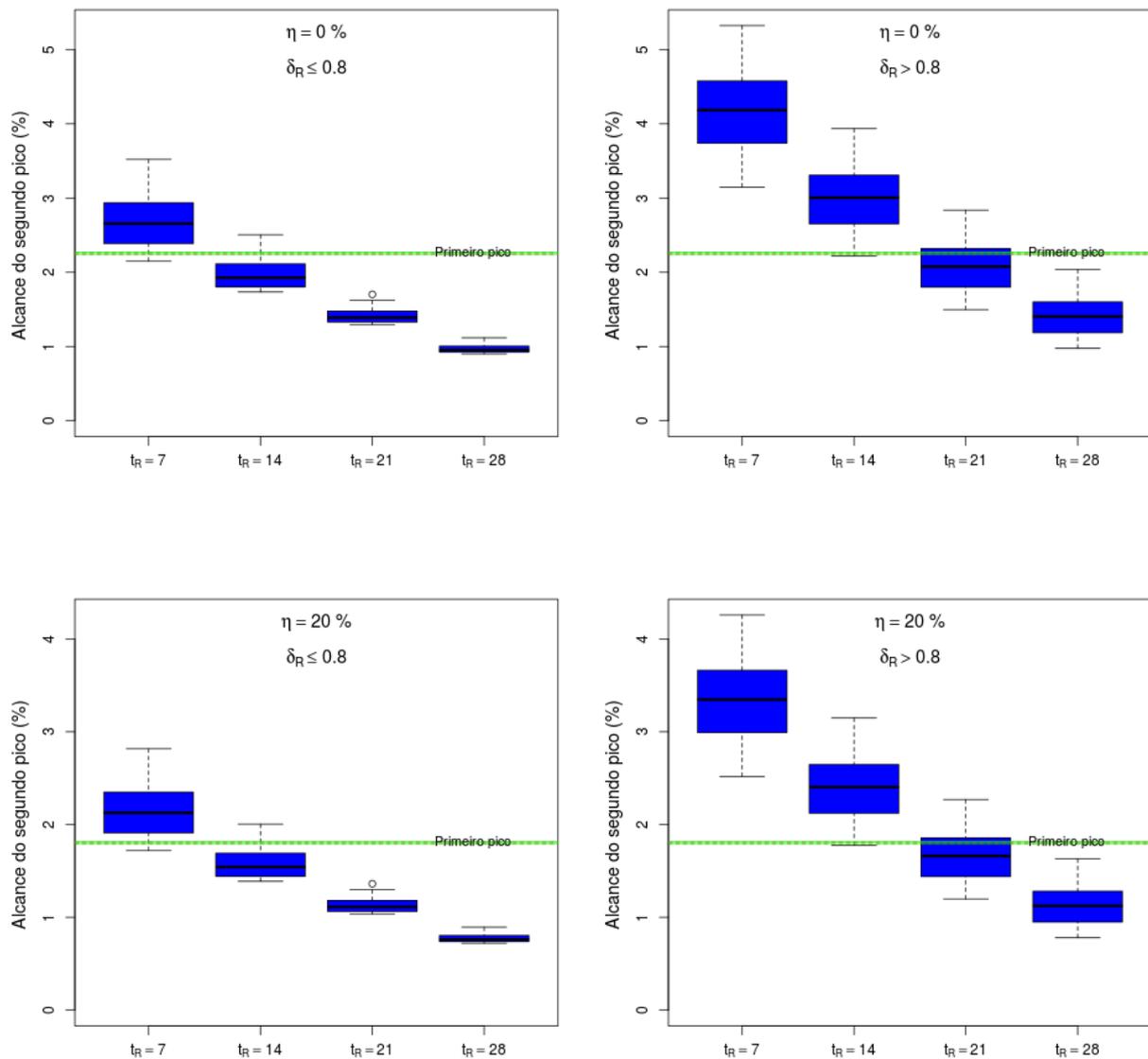


Fonte: Os autores.

A Figura 5 exibe o alcance do segundo pico para vários cenários com t_R de 1 a 4 semanas. Na ausência de estimativas atualizadas para a taxa de subnotificação do número de casos confirmados, implementa-se a análise dos cenários assumindo-se $\eta = \{0\%, 20\%\}$ de

subnotificação que está na faixa de valores apresentada para o Brasil segundo estimativas fornecidas na primeira quinzena de abril (Prado et al., 2020).

Figura 5: Medidas de isolamento relaxadas t_R dias após o primeiro pico, com taxa de subnotificação (η) de 0%, considerando uma saída cautelosa $\delta_R \leq 0.80$ e displicente $\delta_R > 0.80$.



Fonte: Os autores.

Cada boxplot é obtido considerando-se os 3 melhores *fits* e os cenários com $\delta_R = [0.7, 0.8]$ e $\delta_R = (0.8, 0.9]$ que representam uma saída cautelosa e displicente do isolamento,

respectivamente. Em ambos os intervalos implementa-se incrementos de 0.01. Nota-se nas referidas figuras com $\eta=\{0\%, 20\%\}$ uma diversidade de potenciais cenários, mas todos se enquadram em 2 categorias.

A categoria I caracteriza-se por ter um risco do segundo pico P2 com alcance maior o primeiro P1. Tal categoria é observada para o cenário com $\delta_R \leq 0.8$ com $t_R=\{7,14\}$ e com $\delta_R > 0.8$ com $t_R=\{7,14,21\}$. A categoria II é marcada por um segundo pico P2 que é menor que o primeiro P1. Essa categoria é observada para $\delta_R \leq 0.8$ com $t_R=\{21,28\}$ e $\delta_R > 0.8$ com $t_R=28$. Em decorrência desses resultados nota-se que a liberação cautelosa ($\delta_R \leq 0.8$) das restrições de mobilidade na terceira semana ($t_R=21$) após o primeiro pico é o mais indicado considerando os dados disponíveis até 05/junho.

Tal como em todo o processo de modelagem, este trabalho apresenta limitações. Uma delas refere-se a f_t função que introduz o fator comportamental que modela apenas o comportamento médio da população do estado, isto é, f_t desconsidera a heterogeneidade socioeconômica a nível individual e municipal. Os resultados deste trabalho consideram os dados disponíveis até 05/junho, mas a resposta comportamental pode variar à medida que a epidemia fica cada vez mais próxima do pico. A subnotificação (Li et al., 2020) é um outro fator importante a ser levado em consideração e em particular no Brasil e seus estados a quantidade relativamente baixa de testes realizados no Brasil (Prado et al., 2020) acaba por dificultar a estimativa precisa do número de casos confirmados. Isso traz um grande desafio a qualquer modelagem matemática. Nesse sentido, as projeções deste trabalho devem ser interpretadas focando-se na escala de magnitude das grandezas apresentadas.

4. Considerações Finais

Seguindo a linha de modelos matemáticos que incorporam o modo como a população responde à cadeia de contágio na modelagem (Verelst et al., 2016; Funk et al., 2010), este trabalho apresenta a aplicação de um modelo epidêmico-comportamental que mostra-se apto a descrever as mudanças acentuadas de tendências na curva de incidência de casos confirmados do Sars-CoV-2 no Amapá.

Este estudo fornece uma modelagem retrospectiva e prospectiva. Por um lado, o modelo SIR-comportamental fornece indicativos que permitem compreender melhor os

estágios da propagação epidêmica já passados pela população, onde especificamente os resultados sinalizam que o modo como a população reagiu a propagação do Sars-CoV-2 levou a uma redução de $\sim[36,39]\%$ na taxa de contágio epidêmico. A efetivação da resposta comportamental populacional levou cerca $\sim[25,27]$ dias desde o primeiro caso confirmado. Por outro lado, a simulação computacional dos potenciais próximos cenários epidêmicos indica que a saída cautelosa ($\delta_R \leq 0.8$) do período de confinamento com 3 semanas ($t_R=21$) após o primeiro pico dias ainda pode promover a instauração de um segundo pico, mas com um tamanho inferior que o primeiro.

Colocando este trabalho em um contexto maior, nota-se que conforme a disseminação do Sars-CoV-2 começa a apresentar sinais de desaceleração em várias regiões do mundo, novas questões passam a ser tratadas (Kissler, 2020). O aparecimento de novos picos tem sido proposto como um potencial cenário para vários países tais como Inglaterra (Rogers, 2020), França (Hoertel et al., 2020) e Itália (Pedersen & Meneghini, 2020) se as restrições de mobilidade forem interrompidas de modo dispendioso. Para o Brasil recentemente foi projetado que há um risco iminente de um segundo pico com alcance comparável ao primeiro pico se as medidas de isolamento forem removidas sem a devida diligência em 1 semana após o primeiro pico (Pires, Crokidakis, Cajueiro, Menezes, & Queirós, 2020).

Dentre os possíveis caminhos para trabalhos futuros, há dois de grande relevância. O primeiro trata-se de acoplar o presente modelo epidêmico-comportamental com as dinâmicas de disseminação de rumores (Roohani & Priyanka, 2019) haja vista que a difusão de desinformação é uma fonte importante de mudanças comportamentais relacionadas ao grau de conformidade com as regras de quarentena e isolamento social (Tasnim, Hossain & Hoimonty, 2020). Adicionalmente, trabalhos futuros podem considerar a introdução de abordagens que empregam redes complexas para modelar as interações interpessoais (Wang et al., 2015) e assim fornecer uma compreensão mais precisa da relação entre a dinâmica de conexões entre os indivíduos e a dinâmica epidêmica.

Referências

Agência Brasil. (2020a). *Estudo indica eficácia do isolamento social contra o novo coronavírus*. [internet]. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2020->

05/estudo-indica-eficacia-do-isolamento-social-contra-o-novo-coronavirus> Acesso em: 01/06/20

Agência Brasil. (2020b). *Covid-19: Amapá restringe circulação e adota rodízio de veículos*. [internet]. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2020-05/covid-19-amapa-restringe-circulacao-e-adota-rodizio-de-veiculos-0>> Acesso em: 01/06/20

Amapá. (2020a). *Painel Coronavírus*. [internet]. Disponível em <<http://painel.corona.ap.gov.br/>> Acesso em: 05/06/20

Amapá. (2020b). *A cada 10 exames, 7 testam positivos para coronavírus no Amapá*. [internet]. Disponível em <<https://www.portal.ap.gov.br/noticia/0505/a-cada-10-exames-7-testam-positivos-para-coronavirus-no-amapa>> acesso em: 05/06/20

Bagal, D. K., Rath A., Barua A., & Patnaik D. (2020). *Estimating the parameters of SIR model of Covid-19 cases in India during lock down periods*. MedRxiv. Disponível em: <<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.06.03.20120899v1>> acesso em: 20/05/20
DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.06.03.20120899>

Batista, M. (2020). *fitVirus-Covid-19*. MATLAB Central File Exchange. [Internet]. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/74658-fitviruscovid19>> acesso em 15/05/2020.

Bastos, S. B., Cajueiro, D. O. (2020). *Modeling and forecasting the early evolution of the Covid-19 pandemic in Brazil*. Arxiv preprint. Disponível em <<https://arxiv.org/abs/2003.14288>> acesso em: 01/06/20

Boudrioua, M. S., & Boudrioua A. (2020). *Predicting the Covid-19 epidemic in Algeria using the SIR model*. MedRxiv. Disponível em: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.25.20079467v5> acesso em: 20/05/20 DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.04.25.20079467>

Brasil. Ministério da Saúde. (2020a). *Brasil confirma primeiro caso da doença*. [internet]. Disponível em: <<https://www.saude.gov.br/noticias/agencia-saude/46435-brasil-confirma-primeiro-caso-de-novo-coronavirus>> acesso em: 31/05/20

Brasil. Ministério da Saúde. (2020b). *Doença pelo Coronavírus 2019 Ampliação da Vigilância, Medidas não Farmacológicas e Descentralização do Diagnóstico Laboratorial*. Boletim Epidemiológico 05. Ministério da Saúde: Brasília. [internet]. Disponível em: <<https://portalarquivos.saude.gov.br/images/pdf/2020/marco/24/03--ERRATA---Boletim-Epidemiologico-05.pdf>> acesso em: 31/05/20

Dias, N. L., Silva, E. V., Pires, M. A., Chaves, D., Sanada, K. L., Fecury, A. A., Dias, C. A. G. M, Oliveira, E., Dendasck, C. V., & Leal, S. D. (2020). *Prediction of the propagation of SARS-CoV-2 in Amapá State, Amazon Region, Brazil, by mathematical modeling*. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. 6(5): 73-95. DOI: 10.32749

Freitas, A. S., Silva, L. S., & Sandes, S. S. L. (2020). *New SIR model used in the projection of Covid-19 cases in Brazil*. MedRxiv. Disponível em: <<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.26.20080218v2>> acesso em: 20/05/20
DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.04.26.20080218>

Funk, S., Salathé, M., & Jansen V. A. A. (2010). *Modelling the influence of human behaviour on the spread of infectious diseases: a review*, J. R. Soc. Interface, 7: 1247-1256).

Hoertel N., Blachier, M., Blanco, C., Olfson, M., Massetti, M., Rico, M. S., Limosin, F., & Leleu, H. (2020). *Lockdown exit strategies and risk of a second epidemic peak: a stochastic agent-based model of SARS-CoV-2 epidemic in France*. MedRxiv preprint. Disponível em <<https://doi.org/10.1101/2020.04.30.20086264>> acesso em 31/05/20 DOI: 10.1101/2020.04.30.20086264.

Kissler, S. M., Tedijanto, C., Goldstein, E., Grad, Y. H., Lipsitch, M.. (2020). *Projecting the transmission dynamics of SARS-CoV-2 through the post-pandemic period*. MedRxiv preprint. Disponível em <<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.03.04.20031112v1>> acesso em: 31/05/20 DOI: 10.1101/2020.03.04.20031112.

Li, E., Pei, S., Chen, B., Song, Y., Zhang, T., Yang, W., Shaman, J.. (2020). *Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2)*, Science, published online March 16, 2020 DOI: 10.1126/science.abb3221

Nesteruk, I. (2020). *SIR-simulation of Corona pandemic dynamics in Europe*. ResearchGate preprint. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/340829180_SIR-simulation_of_Corona_pandemic_dynamics_in_Europe> acesso em 31/05/20. DOI: 10.13140/RG.2.2.13542.16969.

OMS. (2020a). *Coronavirus disease (COVID-19) Situation Report – 132*. [internet]. Disponível em: <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200531-covid-19-sitrep-132.pdf?sfvrsn=d9c2eaef_2> acesso em: 31/05/20

PAHO. (2020a). *Folha informativa – COVID-19 (doença causada pelo novo coronavírus)*. [internet]. Disponível em: <https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=6101:covid19&Itemid=875> acesso em: 31/05/20

PAHO. (2020b). *Considerações sobre ajustes das medidas de distanciamento social e medidas relativas a viagens no contexto da resposta à pandemia de Covid-19*. [internet]. Disponível em: <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/52045/OPASBRA-COVID1920039a_%20por.pdf?sequence=8 > acesso em: 31/05/20

Prado, M., Bastos, L., Batista, A., Antunes, B., Baião, F., Maçaira, P., Hamacher, S., & Bozza, F. (2020). *Análise de subnotificação do número de casos confirmados da Covid-19 no Brasil. Nota Técnica 7*. [internet]. Disponível em <<https://cdn.msnoticias.com.br/upload/ckeditor/images/nt7-subnotificacao-nota-dia-11-abr-2020.pdf>> acesso em: 01/06/20

Pedersen, M. G., & Meneghini, M. (2020). *Quantifying undetected COVID-19 cases and effects of containment measures in Italy*. ResearchGate Preprint. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/339915690_Quantifying_undetected_COVID-19_cases_and_effects_of_containment_measures_in_Italy_Predicting_phase_2_dynamics> acesso em: 31/05/20 DOI: 10.13140/RG.2.2.11753.85600

Peng, L., Yang, W., Zhang, D., Zhuge, C., & Hong, L. (2020). *Epidemic analysis of COVID-19 in China by dynamical modeling*. arXiv preprint Disponível em:

<<https://arxiv.org/abs/2002.06563>> acesso em: 31/-5/20

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., Shitsuka, R.. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Disponível em:

https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1. Acesso em: 09 fev. 2020.

Pires, M. A., Crokidakis, N., Cajueiro, D. O., Menezes, M. A., & Queirós, S. M. D. (2020). *What is the potential for a second peak in the evolution of SARS-CoV-2 in Brazil? Insights from a SIRASD model considering the informal economy*. Arxiv preprint. Disponível em

<arXiv:2005.09019> acesso em: 31/05/20

Rdocumentation. (2020). *General-purpose Optimization*. [internet]. Disponível em

<<https://www.rdocumentation.org/packages/stats/versions/3.6.2/topics/optim>> acesso em: 20/05/20

Rogers, L. C. G. (2020). *Ending the covid-19 epidemic in the united kingdom*. ArXiv preprint.

Disponível em: <arXiv:2004.12462> acesso em: 31/05/20

Roohani, R. T., & Priyanka, M. (2019). *Rumor Propagation: A State-of-the-art Survey of Current Challenges and Opportunities*. 2nd International Conference on Intelligent

Communication and Computational Techniques (ICCT), Jaipur, India, pp. 64-69, DOI:

10.1109/ICCT46177.2019.8969023.

Silva, E. L., Menezes E. M. (2005). *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. – 3. ed. rev. atual. – Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC.

Sinkala, M., Nkhoma, P., Zulu, M., Kafita, D., Tembo, R., & Daka, V. (2020). *The Covid-19 Pandemic in Africa: Predictions using the SIR Model Indicate the Cases are Falling*.

MedRxiv. Disponível em: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.06.01.20118893v2> acesso em: 20/05/20 DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.06.01.20118893>

Soetaert, K., Petzoldt, T., Setzer, R. W. (2020). *Solving Differential Equations in R: Package deSolve*. Journal of Statistical Software. DOI: 10.18637/jss.v033.i09

Tasnim, S., Hossain, M. M., & Hoimonty, M. (2020). *Impact of Rumors or Misinformation on Coronavirus Disease (Covid-19) in Social Media*. SocArchiv. Disponível em: <https://osf.io/preprints/socarxiv/uf3zn/> acesso em: 30/05/20 DOI: <https://doi.org/10.31235/osf.io/uf3zn>

Timoteo, C., Fanelli, D., & Piazza F. (2020). *Covid-19: The unreasonable effectiveness of simple models*. ResearchGate Preprint. disponível em https://www.researchgate.net/publication/341554295_The_unreasonable_effectiveness_of_simple_models/ acesso em: 31/05/20

Verelst, F., Willem, L., & Beutels, P. (2016). *Behavioural change models for infectious disease transmission: a systematic review (2010–2015)*. The Royal Society. 13(125). dec, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0820> acesso em: 20/05/20

Zhang, Y., You, C., Cai, Z., Sun, J., Hu, W., & Zhou, X. H. (2020). *Prediction of the COVID-19 outbreak based on a realistic stochastic model*. medRxiv preprint. Disponível em: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.03.10.20033803v1> acesso em: 31/05/20 DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.03.10.20033803>

Wang, Z., Andrews, M. A., Wu, Z. X., Wang, L., & Bauch, C.T. (2015). *Coupled disease–behavior dynamics on complex networks: A review*. Physics of Life Reviews. 15:.1-29, December. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2015.07.006> acesso em: 20/05/20

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Marcelo Amanajás Pires – 25%

Neylan Leal Dias – 25%

Edcarlos Vasconcelos da Silva – 25%

Simone de Almeida Delphim Leal – 25%